

1224 PERFORMA OPTIMASI POLA ELEKTRODA DALAM ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY (EIT)

By Armelia Ramandha

PERFORMA OPTIMASI POLA ELEKTRODA DALAM ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY (EIT)

Armelia Ramandha

Abstract

4

Electrical Impedance Tomography (EIT) is a medical imaging modality that reconstructs images of certain areas of the human body based on the conductivity distribution of biological tissue. EIT has several advantages as a medical imaging technique, such as being portable, having better temporal resolution, low cost, non-invasive, non-ionization, and radiation-free. However, the main limitation of EIT is that it has lower spatial resolution compared to other imaging modalities. Some ways to increase the resolution of EIT are by choosing the right electrode pattern and reconstruction technique needed so that EIT can produce optimal images. Therefore, it is necessary to create an automatic multiplexer control system for electrode selection, reconstruction of the measured EIT signal into a tomographic image based on various reconstruction techniques chosen, as well as analyzing measurement data and EIT images based on electrode patterns and different image reconstructions to find the right parameters of optimal results. The resulting images were analyzed using the Structural Similarity Index Measure (SSIM) and it was found that the Gauss-Newton reconstruction technique with the Adjacent electrode pattern gave the best SSIM value of 0.9427 in the simulation and 0.9367 in the experiment. The results of this research can provide convenience for further development of EIT so that it can be used freely based on needs.

Keywords : *Electrical Impedance Tomography, Electrode, Optimization, Imaging, Reconstruction.*

Abstrak

Electrical Impedance Tomography (EIT) adalah sebuah modalitas pencitraan medis yang merekonstruksi gambar dari area tertentu tubuh manusia berdasarkan distribusi konduktivitas jaringan biologis. EIT memiliki beberapa keunggulan sebagai teknik pencitraan medis, seperti portabilitas, resolusi temporal yang lebih baik, biaya rendah, non-invasif, tidak menggunakan ionisasi, dan bebas radiasi. Namun, keterbatasan utama EIT adalah resolusi spasialnya yang lebih rendah dibandingkan dengan modalitas pencitraan lainnya. Beberapa cara untuk meningkatkan resolusi EIT adalah dengan memilih pola elektroda dan teknik rekonstruksi yang tepat sehingga EIT dapat menghasilkan gambar yang optimal. Oleh karena itu, perlu dibuat sistem kontrol multiplexer otomatis untuk pemilihan elektroda, rekonstruksi sinyal EIT yang diukur menjadi gambar tomografi berdasarkan berbagai teknik rekonstruksi yang dipilih, serta menganalisis data pengukuran dan gambar EIT berdasarkan pola elektroda dan rekonstruksi gambar yang berbeda untuk menemukan parameter yang tepat dengan hasil yang optimal. Gambar yang dihasilkan dianalisis menggunakan *Structural Similarity Index Measure (SSIM)* dan ditemukan bahwa teknik rekonstruksi *Gauss-Newton* dengan pola elektroda *Adjacent* memberikan nilai SSIM terbaik sebesar 0,9427 dalam simulasi dan 0,9367 dalam eksperimen. Hasil penelitian ini dapat memberikan kemudahan untuk pengembangan EIT lebih lanjut sehingga dapat digunakan secara bebas sesuai kebutuhan.

Kata kunci : *Electrical Impedance Tomography, Elektroda, Optimasi, Pencitraan, Rekonstruksi.*

1. PENDAHULUAN

Electrical Impedance Tomography (EIT) adalah sebuah modalitas pencitraan medis yang merekonstruksi gambar dari area tertentu tubuh manusia berdasarkan distribusi konduktivitas

jaringan biologis [1]. Saat ini, terdapat banyak modalitas pencitraan yang digunakan selain EIT. Namun, setiap modalitas memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. *Computed Tomography (CT) Scan* mampu menciptakan gambar tulang dan tumor dengan sinar-X tetapi

melibatkan radiasi ionisasi dalam jumlah besar [2]. PET dapat digunakan untuk memeriksa metabolisme tubuh, tetapi memerlukan injeksi radiotracer ke dalam tubuh dan kadang-kadang harus didukung oleh teknik pencitraan lain [3]. Ultrasound bebas dari radiasi ionisasi sehingga mampu memvisualisasikan kehamilan, tetapi sangat bergantung pada keterampilan operator dan memiliki kontras yang sangat rendah [4]. MRI, yang menggunakan gelombang radio untuk pencitraan, memiliki risiko radiasi yang lebih rendah dan kontras yang baik, tetapi tidak portabel, bisung, sangat mahal, dan memerlukan sedasi [5]. Namun, pencitraan medis tetap dibutuhkan dan saat ini berkembang sangat pesat karena memiliki peran penting dalam kesehatan: untuk mendukung diagnosis dan pengobatan penyakit [6].

EIT memiliki beberapa keunggulan sebagai teknik pencitraan medis, seperti portabilitas, resolusi temporal yang lebih baik, biaya rendah, non-invasif, tidak menggunakan ionisasi, dan bebas radiasi [7]. Dengan keunggulan-keunggulan ini, EIT telah banyak dikembangkan untuk keperluan medis [8], [9], [10], [11], [12]. Namun demikian, sistem EIT terdiri dari berbagai subsistem dan komponen seperti elektroda, sumber arus, voltmeter, mekanisme pemilihan pola elektroda, sistem akuisisi data, dan algoritma rekonstruksi gambar [13]. Cara kerja EIT adalah dengan menginjeksikan arus dan mengukur tegangan pada elektroda yang dipilih. Pemilihan elektroda untuk menginjeksikan arus dan mengukur tegangan dapat dilakukan menggunakan berbagai pola. Nilai yang diukur akan digunakan untuk merekonstruksi gambar tomografi. Beberapa algoritma rekonstruksi juga telah dikembangkan dan digunakan dalam setiap alat EIT [14]. Oleh karena itu, pemilihan pola elektroda dan teknik rekonstruksi yang tepat sangat penting untuk dievaluasi.

EIT menggunakan teknik yang biasa disebut four-terminal sensing (4T) sehingga digunakan empat elektroda, dua untuk injeksi dan dua untuk pengukuran. Pemilihan elektroda biasanya dilakukan menggunakan multiplexer yang dikontrol oleh sistem untuk mengatur kanal guna memilih elektroda untuk injeksi atau pengukuran. Terdapat berbagai pola yang digunakan, tiga di antaranya adalah *adjacent*, *cross*, dan *opposite* [12]. Masing-masing pola ini memiliki lokasi elektroda injeksi yang berbeda, tetapi elektroda pengukur terletak bersebelahan. Pola *adjacent* banyak digunakan dalam berbagai penelitian [15], [16], [17], [18], [19], [20], tetapi terdapat beberapa temuan yang menunjukkan bahwa setiap pola dapat memberikan hasil yang berbeda [21], [22]. Namun, penelitian ini masih hanya melakukan eksperimen terbatas pada simulasi

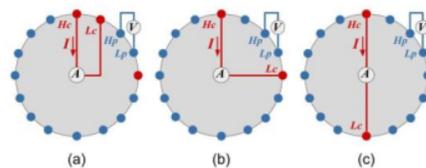
dalam aplikasi. Oleh karena itu, diperlukan eksperimen untuk memvalidasi dan mengoptimalkan gambar EIT berdasarkan pemilihan pola elektroda.

Selain itu, berbagai algoritma rekonstruksi gambar telah digunakan dalam berbagai penelitian. Awalnya, algoritma *Back-Projection* (BP) yang dikembangkan dari CT dapat digunakan untuk rekonstruksi EIT sejak tahun 1984 tetapi menghasilkan artefak garis-garis. Sementara itu, *Jacobian* (JAC) *matrix* dengan regularisasi *Gauss-Newton* (GN) *Solvers* telah digunakan sejak tahun 1987 tetapi menghasilkan artefak berbentuk cincin. GREIT dikembangkan pada tahun 2008 yang meningkatkan resolusi gambar dan mengurangi noise dalam gambar [23]. Salah satu teknik rekonstruksi ini biasa digunakan dalam perangkat EIT. Namun, belum ada yang membandingkan bagaimana hasil dari algoritma rekonstruksi ini digunakan pada objek yang sama.

Penelitian yang ada umumnya hanya menggunakan satu metode pola elektroda dan satu teknik rekonstruksi [15-20], sehingga tidak ada kesulitan dalam menjalankan sistem kontrol atau membuat rekonstruksi gambar karena parameternya tidak berubah. Oleh karena itu, untuk memudahkan pengguna dalam mengubah dan memilih pola elektroda serta teknik rekonstruksi, diperlukan pembuatan perangkat lunak GUI.

Penelitian ini akan memberikan beberapa kebaruan, yaitu: 1) membuat sistem kontrol multiplexer otomatis dalam EIT untuk pemilihan elektroda, 2) merekonstruksi sinyal EIT yang diukur menjadi gambar tomografi berdasarkan teknik rekonstruksi yang dipilih, 3) menganalisis data pengukuran dan gambar EIT berdasarkan pola elektroda dan rekonstruksi gambar yang berbeda untuk memberikan hasil yang optimal.

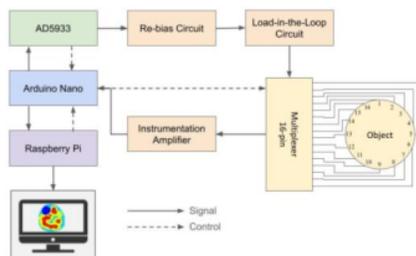
2. METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 3. Pilihan Pola Elektroda untuk Akuisisi Data EIT (a) *Adjacent*, (b) *Cross*, (c) *Opposite*

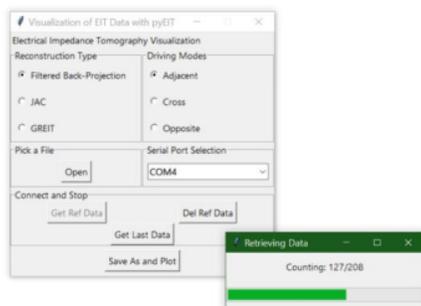
EIT memiliki sistem yang cukup kompleks dan harus terdiri dari rangkaian listrik yang mampu menghasilkan sinyal eksitasi dan mengukur impedansi. AD5933 digunakan untuk melakukan tugas ini dengan berbagai rangkaian pendukung. Empat multiplexer 16-pin digunakan

untuk menghubungkan ke elektroda yang akan mengambil data dari objek. Pemilihan elektroda akan dikontrol dengan mikrokontroler seperti Arduino Nano yang berukuran kecil sehingga sistem menjadi lebih ringkas dan portabel. Data yang diukur kemudian dikirim ke Raspberry Pi yang memproses dan merekonstruksi data menjadi gambar EIT. Untuk memudahkan pengguna menyimpan dan memproses data EIT, dibuat perangkat lunak sebagai GUI yang akan digunakan pada Raspberry Pi. Alur sistem yang digunakan untuk pengumpulan data dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Sistem EIT yang Dikembangkan

Gambar 2 menunjukkan perangkat lunak yang dibuat khusus untuk memudahkan pengguna. Perangkat lunak ini dibuat menggunakan Tkinter sebagai GUI dan pyEIT untuk melakukan rekonstruksi gambar, sementara metode akuisisi dibuat khusus untuk jenis pola elektroda yang digunakan. Terdapat pilihan jenis rekonstruksi seperti algoritma *Back-Projection* (BP), *Jacobian* (JAC), dan GREIT. Selain itu, pengguna juga dapat memilih jenis pola elektroda seperti *Adjacent*, *Cross*, dan *Opposite*. Pola pemilihan elektroda dapat dilihat pada Gambar 3, dengan *Hc* sebagai *High Current*, *Lc* sebagai *Low Current* yang menunjukkan arah arus pada elektroda injeksi,



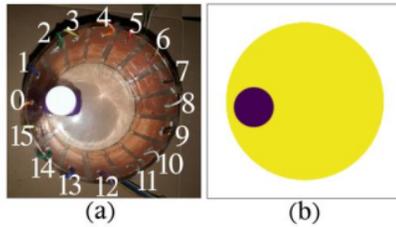
Gambar 2. Desain Software untuk Sistem EIT

dan *Hp* sebagai *High Potential* dan *Lp* sebagai *Low Potential* yang menunjukkan elektroda yang digunakan untuk pengukuran tegangan. Selain itu, perangkat lunak ini mampu memudahkan pengguna untuk mengambil dan menyimpan data yang ditangkap dengan menghubungkan alat EIT melalui *port* yang tersedia, serta memvisualisasikan hasil data dan gambar yang direkonstruksi.

Penyesuaian kode Arduino dilakukan untuk mengotomatisasi akuisisi data untuk mekanisme switching pada perangkat EIT yang ada. Sehingga ketika pengguna menekan tombol untuk mengakuisisi data seperti "**Get Ref Data**" dan "**Get Last Data**", komputer akan melakukan proses akuisisi data dari perangkat EIT yang kemudian dikirim kembali dan disimpan oleh komputer.

Data yang dikirim dari komputer ke Arduino pada perangkat EIT berbentuk string "\$0|1|2|3#" menggunakan metode *parsing* di mana angka 0, 1, 2, 3 menunjukkan urutan elektroda yang digunakan dalam proses akuisisi data. Setiap data integer yang diterima kemudian dikonversi menjadi data 4-bit yang kemudian digabungkan menjadi 1 *string* yang berisi 16-bit. *String* 16-bit ini kemudian ditugaskan satu per satu ke setiap multiplexer oleh Arduino dari *Digital Pin* 2 hingga 17. Pola dan jumlah data mengenai elektroda yang akan digunakan akan disesuaikan dengan pola elektroda yang dipilih.

Penelitian ini akan mengukur perbedaan hasil dari berbagai jenis rekonstruksi dan jenis pola elektroda. Simulasi dilakukan terlebih dahulu menggunakan pyEIT dengan *Forward Model* berdasarkan pola elektroda dan jenis rekonstruksi yang berbeda. Eksperimen kemudian dilakukan menggunakan sistem perangkat EIT yang dihubungkan ke wadah pengamatan dengan 16 elektroda tembaga dan 2cm air di dalamnya. Wadah pengamatan terbuat dari kaca akrilik dengan diameter dan tinggi masing-masing 10cm. Elektroda tembaga yang



Gambar 4. (a) Wadah Pengamatan dengan *Phantom* dan (b) Gambar *Ground Truth*

digunakan lebar 15mm dan memiliki tinggi yang sama dengan kaca akrilik. Elektroda ditempatkan secara berurutan searah jarum jam. *Phantom* yang digunakan dibuat menggunakan botol plastik berdiameter 2,5cm yang diisi dengan larutan NaCl dengan salinitas 70g/L. Wadah pengamatan dengan *phantom* dan gambar *ground truth* ditunjukkan pada Gambar 4.

Perhitungan kuantitatif menggunakan *Structural Similarity Index Measure* (SSIM), yang merupakan metode untuk menghitung rata-rata akar nilai gambar yang direkonstruksi terhadap gambar *ground truth* dengan menggunakan Persamaan (1) di mana rentang nilai 0-1 dan 1 menunjukkan bahwa gambar yang direkonstruksi sama dengan gambar referensi [24].

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (1)$$

2

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Simulasi

Simulasi pertama kali dilakukan menggunakan pyEIT untuk melihat perbedaan yang dihasilkan dalam setiap kondisi. Semua hasil simulasi dengan nilai SSIM ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai SSIM terbaik dari simulasi diperoleh menggunakan rekonstruksi tipe *Gauss-Newton* dengan pola elektroda *adjacent* dengan nilai 0,9427, sedangkan tipe *Back-Projection* dengan pola elektroda *cross* memperoleh nilai terendah 0,9098 yang memiliki banyak *noise* pada gambar.

3.2. Hasil Eksperimen

Semua gambar yang dihasilkan dalam Tabel 2 diperoleh secara otomatis sesuai urutan elektroda dari sistem EIT dan direkonstruksi sesuai dengan jenis pilihan menggunakan perangkat lunak yang telah dibuat. Rekonstruksi tipe *Back-Projection* dengan urutan elektroda *adjacent* memiliki nilai SSIM terbaik, yaitu 0,9399, yang diikuti oleh rekonstruksi tipe *Gauss-Newton*

Tabel 1. Hasil Simulasi pyEIT dengan Berbagai Pola Elektroda dan Rekonstruksi

Rekonstruksi (Nilai SSIM)	Pola Elektroda		
	<i>Adjacent</i>	<i>Cross</i>	<i>Opposite</i>
BP	 (0.9357)	 (0.9098)	 (0.9208)
GN	 (0.9427)	 (0.9404)	 (0.9350)
GREIT	 (0.9354)	 (0.9330)	 (0.9354)

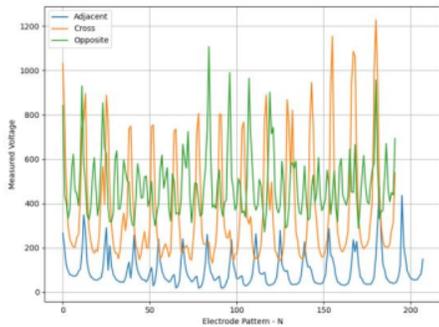
Tabel 2. Hasil Eksperimen dengan Berbagai Rekonstruksi dan Pola Elektroda

Rekonstruksi (Nilai SSIM)	Pola Elektroda		
	<i>Adjacent</i>	<i>Cross</i>	<i>Opposite</i>
BP	 (0.9399)	 (0.9074)	 (0.9201)
GN	 (0.9367)	 (0.8841)	 (0.8102)
GREIT	 (0.9235)	 (0.8976)	 (0.7821)

dengan urutan elektroda yang sama. Seperti pada simulasi, nilai SSIM tinggi dapat diperoleh menggunakan dua parameter ini. Sementara itu, nilai SSIM terendah dihasilkan dari pola elektroda *opposite* dengan tipe rekonstruksi GREIT, hanya 0,7821 dan *Gauss-Newton* sebesar 0,8102. Hal ini bisa disebabkan karena perangkat dan kode yang digunakan untuk mengambil data tidak sesuai dengan teknik rekonstruksi yang disediakan oleh pyEIT, sehingga memerlukan penyesuaian lebih lanjut pada algoritma.

3.3. Grafik dan Total Data

Urutan elektroda yang berbeda mempengaruhi grafik hasil pengukuran dan jumlah data. Pola akuisisi data dari 4 elektroda menggunakan $[N, N+P, K, K+1]$ dengan $P=1$ untuk *Adjacent*, $P=4$ untuk *Cross*, dan $P=8$ untuk *Opposite*, sampai N dan K adalah 15 dan ketika $N+1$ atau $K+1$ adalah 16 menjadi 0. Ada 16 pasangan injeksi arus dan 16 pasangan pengukuran tegangan. Namun, $N, N+P, K,$ dan $K+1$ tidak bisa bersamaan. Jadi, jumlah data dari *Adjacent* adalah 208, sedangkan *Cross* dan *Opposite* adalah 192. Hal



Gambar 5. Grafik dari hasil akuisisi berbagai pola elektroda.

ini juga mempengaruhi total waktu pengukuran di mana pola *Adjacent* akan memakan waktu lebih lama.

Grafik tipe *Adjacent* hampir sama dengan tipe *Cross*, tetapi *Opposite* berbeda dan metode untuk memperkirakan lokasi *phantom* juga dalam injeksi arus yang melewatinya, seperti pada 0-8 atau 8-0. Perbedaan grafik pada setiap pola elektroda ditunjukkan pada Gambar 5.

4. Kesimpulan dan Saran

Sistem EIT yang digunakan dapat secara otomatis mengontrol multiplexer untuk

menyesuaikan pola elektroda berdasarkan pilihan pengguna dalam perangkat lunak yang dibuat. Menggunakan perangkat lunak ini, sinyal EIT yang telah diperoleh dapat dengan mudah direkonstruksi berdasarkan jenis yang disediakan. Dari data yang dihasilkan, nilai SSIM yang menunjukkan kesamaan terbesar dengan ground truth diperoleh menggunakan pola elektroda *Adjacent* dengan tipe rekonstruksi *Gauss-Newton* dalam simulasi dan *Back-Projection* dalam eksperimen. Pola *Cross* tidak ideal untuk rekonstruksi *Back-Projection* karena kecenderungannya menghasilkan noise yang berlebihan dan menghasilkan nilai SSIM yang rendah. Sementara itu, pola elektroda *Opposite* masih memerlukan penyesuaian lebih lanjut pada kode untuk menghasilkan gambar yang representatif. Total data yang dihasilkan berbeda dan mempengaruhi waktu pengukuran dengan urutan elektroda *Adjacent* memiliki data terbanyak dengan waktu akuisisi terpanjang. Dengan demikian, hasil ini akan membantu memilih urutan elektroda dan tipe rekonstruksi terbaik saat menggunakan EIT dan pyEIT sebagai kerangka yang merekonstruksi gambar.

Daftar Pustaka:

1224 PERFORMA OPTIMASI POLA ELEKTRODA DALAM ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY (EIT)

ORIGINALITY REPORT

2%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	www.researchgate.net Internet	11 words — < 1%
2	prosiding.bkstm.org Internet	10 words — < 1%
3	radars.ie.ac.cn Internet	10 words — < 1%
4	hdl.handle.net Internet	8 words — < 1%

EXCLUDE QUOTES OFF

EXCLUDE SOURCES OFF

EXCLUDE BIBLIOGRAPHY OFF

EXCLUDE MATCHES OFF