

## PERFORMA OPTIMASI POLA ELEKTRODA DALAM *ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY (EIT)*

Armelia Ramandha<sup>1</sup>, Basari<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Teknik Biomedik, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, <sup>2</sup>Research Center for Biomedical Engineering, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

Kampus UI Depok, Kota Depok, Jawa Barat 16424

<sup>1</sup>[armelia.ramandha@ui.ac.id](mailto:armelia.ramandha@ui.ac.id), <sup>2</sup>[basari.st@ui.ac.id](mailto:basari.st@ui.ac.id)

### Abstract

*Electrical Impedance Tomography (EIT) is a medical imaging technique that reconstructs images based on the conductivity distribution of biological tissues. EIT has advantages such as portability, good temporal resolution, low cost, non-invasiveness, non-ionization, and radiation-free, but it has lower spatial resolution compared to other imaging techniques. This study aims to optimize electrode patterns and reconstruction techniques to improve the quality of EIT images. The EIT system used consists of an AD5933 for impedance measurement, 16-pin multiplexers for electrode selection, an Arduino Nano for multiplexer control, and a Raspberry Pi for data processing and image reconstruction. Software based on Tkinter and pyEIT was developed to facilitate users in selecting electrode patterns (Adjacent, Cross, Opposite) and reconstruction algorithms (Back-Projection (BP), Jacobian (JAC), GREIT). Simulations were conducted to assess the similarity between the reconstructed images and the ground truth using the Structural Similarity Index Measure (SSIM). Simulation results showed that the JAC reconstruction with the adjacent electrode pattern produced the highest SSIM value of 0.9427, while experimental results showed that BP reconstruction with the adjacent electrode pattern produced the highest SSIM value of 0.9399. The cross electrode pattern generated excessive noise and lower SSIM values, whereas the opposite electrode pattern required further adjustments. The total data produced varied and affected the measurement time, with the adjacent electrode sequence having the most data and the longest acquisition time. The results of this study provide guidance on selecting the optimal electrode sequence and reconstruction technique to improve image quality in EIT systems.*

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

### Abstrak

*Electrical Impedance Tomography (EIT) adalah teknik pencitraan medis yang merekonstruksi gambar berdasarkan distribusi konduktivitas jaringan biologis. EIT memiliki keunggulan seperti portabilitas, resolusi temporal yang baik, biaya rendah, non-invasif, bebas ionisasi, dan bebas radiasi, namun memiliki resolusi spasial yang lebih rendah dibandingkan dengan teknik pencitraan lainnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan pola elektroda dan teknik rekonstruksi guna meningkatkan kualitas gambar EIT. Sistem EIT yang digunakan terdiri dari AD5933 untuk pengukuran impedansi, multiplexer 16-pin untuk pemilihan elektroda, Arduino Nano untuk kontrol multiplexer, dan Raspberry Pi untuk pemrosesan data dan rekonstruksi gambar. Perangkat lunak berbasis Tkinter dan pyEIT dikembangkan untuk memudahkan pengguna dalam memilih pola elektroda (*Adjacent, Cross, Opposite*) dan algoritma rekonstruksi (*Back-Projection (BP), Jacobian (JAC), GREIT*). Simulasi dilakukan untuk menilai kesamaan antara gambar yang direkonstruksi dengan *ground truth* menggunakan nilai *Structural Similarity Index Measure (SSIM)*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rekonstruksi JAC dengan pola elektroda *adjacent* menghasilkan nilai SSIM tertinggi sebesar 0,9427, sementara hasil eksperimen menunjukkan bahwa rekonstruksi BP dengan pola elektroda *adjacent* menghasilkan nilai SSIM tertinggi sebesar 0,9399. Pola elektroda *cross* menghasilkan noise berlebihan dan nilai SSIM rendah, sedangkan pola elektroda *opposite* memerlukan penyesuaian lebih lanjut. Total data yang dihasilkan berbeda dan mempengaruhi waktu pengukuran, dengan urutan elektroda *adjacent* memiliki data terbanyak dengan waktu akuisisi terpanjang.*

Hasil penelitian ini memberikan panduan dalam memilih urutan elektroda dan teknik rekonstruksi terbaik untuk meningkatkan kualitas gambar pada sistem EIT.

**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, bising, 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 yg sudah dilakukan 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 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.

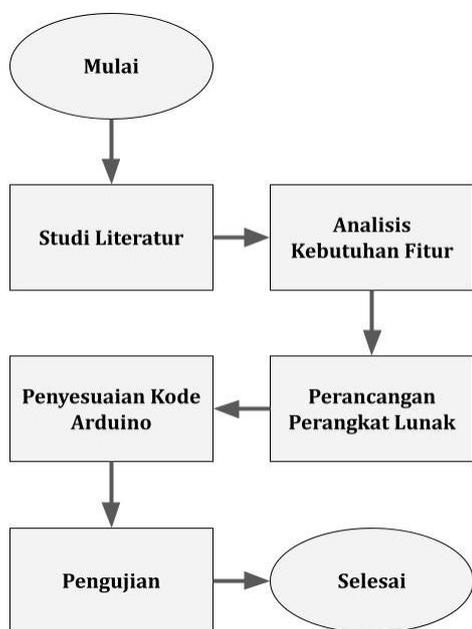
Penelitian yang ada umumnya hanya menggunakan satu metode pola elektroda dan satu teknik rekonstruksi [15-20], sehingga tidak ada kesulitan dalam menjalankan sistem kontrol atau membuat rekonstruksi gambar karena parameternya tidak berubah. Oleh karena itu, untuk memudahkan pengguna dalam mengubah

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

Penelitian ini dimulai dengan melakukan studi literatur untuk memahami berbagai teknik pencitraan menggunakan EIT serta keunggulan dan keterbatasannya. Setelah itu, dilakukan analisis kebutuhan fitur untuk menentukan fitur-fitur yang harus ada dalam perangkat lunak yang dikembangkan. Langkah berikutnya adalah perancangan software, yang meliputi pengembangan antarmuka pengguna berbasis Tkinter dan integrasi dengan pyEIT untuk pemilihan pola elektroda dan algoritma

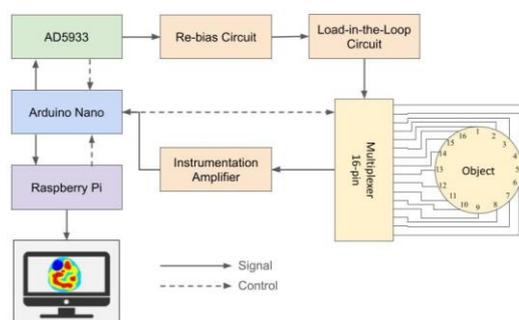


Gambar 1. Alur Penelitian

rekonstruksi. Setelah perangkat lunak dirancang, dilakukan penyesuaian kode Arduino untuk mengotomatisasi proses akuisisi data dan pengendalian multiplexer berdasarkan pilihan pola elektroda yang ditentukan pengguna. Tahap

berikutnya adalah melakukan pengujian, baik melalui simulasi menggunakan pyEIT maupun eksperimen nyata dengan sistem EIT yang terhubung ke wadah observasi. Hasil pengujian dianalisis untuk menilai kesesuaian antara gambar yang direkonstruksi dengan ground truth menggunakan nilai SSIM. Setelah semua tahapan ini diselesaikan, penelitian dinyatakan selesai dengan memberikan panduan dalam memilih urutan elektroda dan teknik rekonstruksi terbaik untuk meningkatkan kualitas gambar pada sistem EIT. Tahapan dari alur penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.

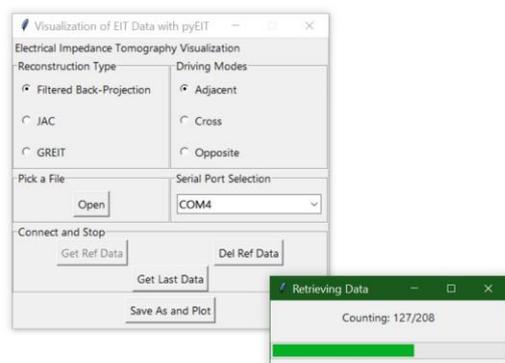
EIT memiliki sistem yang cukup kompleks dan harus terdiri dari rangkaian listrik yang mampu menghasilkan sinyal eksitasi dan mengukur impedansi. AD5933 digunakan untuk melakukan tugas ini dengan berbagai rangkaian pendukung. Empat multiplexer 16-pin digunakan untuk menghubungkan ke elektroda yang akan mengambil data dari objek. Pemilihan elektroda akan dikontrol dengan mikrokontroler yang sudah biasa digunakan seperti Arduino [24]. Pada penelitian ini digunakan Arduino Nano yang relatif berukuran lebih 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 2.



Gambar 2. Diagram Sistem EIT yang Dikembangkan

Tabel I. ANALISIS KEBUTUHAN FITUR

Fitur	[27]	[28]	[29]	[30]	[31]	Penulis
<b>Citra</b>	V	V	V	V	V	V
<b>Colorbar</b>	V	X	X	V	V	V
<b>Machine Learning Output</b>	X	V	V	X	X	X
<b>Connect</b>		V	V		V	V
<b>Disconnect</b>	Tidak Mengakuisisi Langsung dari Perangkat	V	V	Tidak Mengakuisisi Langsung dari Perangkat	V	Selesai saat akuisisi data selesai
<b>V difference</b>	X	X	X	V	V	X
<b>Frame Rate</b>	X	X	X	V	V	X
<b>Voltage Measured</b>	X	X	X	X	Tabel	Grafik
<b>Data Generated</b>	-	-	-	-	Tabel	Disimpan ke Excel
<b>Reconstruction Type Selection</b>	X	X	X	X	V	V
<b>Driving Mode Type Selection</b>	X	X	X	X	X	V



Gambar 3. Desain Software untuk Sistem EIT

Gambar 3 menunjukkan perangkat lunak yang dibuat khusus untuk memudahkan pengguna. Sebelum perangkat lunak ini dirancang, dilakukan analisis kebutuhan fitur terhadap beberapa literatur sebelumnya. Ada beberapa literatur yang menggunakan pyEIT sebagai alat untuk merekonstruksi gambar yang dihasilkan oleh perangkat dan membentuknya menjadi aplikasi. Setiap aplikasi ini memiliki fitur yang berbeda tergantung pada fungsi dan tujuan penelitian. Dari tinjauan literatur, dibuat Tabel 1 yang menunjukkan setiap fitur dari aplikasi yang ada beserta fitur yang diusulkan oleh penulis.

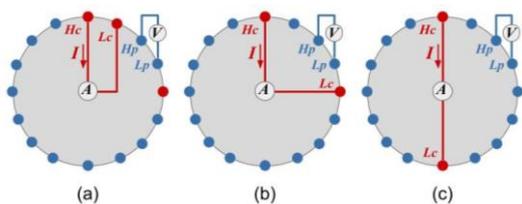
Dengan menggunakan fitur yang sudah ditentukan, perangkat lunak ini kemudian dibuat dengan menggunakan Tkinter sebagai kerangka

GUI dan pyEIT untuk melakukan rekonstruksi gambar, sementara metode akuisisi dibuat khusus untuk jenis pola elektroda yang digunakan. Terdapat pilihan jenis rekonstruksi seperti algoritma BP, JAC, dan GREIT. Selain itu, pengguna juga dapat memilih jenis pola elektroda seperti *Adjacent*, *Cross*, dan *Opposite*. Pola pemilihan elektroda dapat dilihat pada Gambar 4, dengan  $H_c$  sebagai *High Current*,  $L_c$  sebagai *Low Current* yang menunjukkan arah arus pada elektroda injeksi, dan  $H_p$  sebagai *High Potential* dan  $L_p$  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 pada Arduino IDE yang merupakan aplikasi pemrograman untuk melakukan pengembangan pada perangkat Arduino [25]. Kode yang dikembangkan digunakan untuk mengotomatiskan 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. Hubungan antara pin multiplexer dengan Arduino ditunjukkan pada Tabel 2. Setiap multiplexer akan menentukan setiap satu elektroda yang digunakan, sehingga dengan menggunakan 4 elektroda akan dibutuhkan 4 multiplexer. Pola dan jumlah data mengenai elektroda yang akan digunakan akan disesuaikan

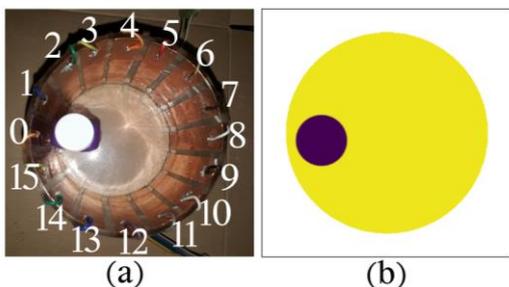


Gambar 4. Pilihan Pola Elektroda Untuk Akuisisi Data EIT (a) *Adjacent*, (b) *Cross*, (c) *Opposite*

dengan pola elektroda yang dipilih.

Tabel II. HUBUNGAN PIN MULTIPLEXER DAN ARDUINO.

Pengukur Tegangan	Arduino		Injeksi Arus	Arduino	
	S3	D2		S3	D10
Mux 1	S2	D3	Mux 3	S2	D11



Gambar 5. (a) Wadah Pengamatan dengan *Phantom* dan (b) Gambar *Ground Truth*

Penelitian ini akan mengukur perbedaan hasil dari berbagai jenis rekonstruksi dan jenis pola elektroda. Simulasi dilakukan terlebih dahulu

Tabel III. 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)
JAC	 (0.9427)	 (0.9404)	 (0.9350)
GREIT			

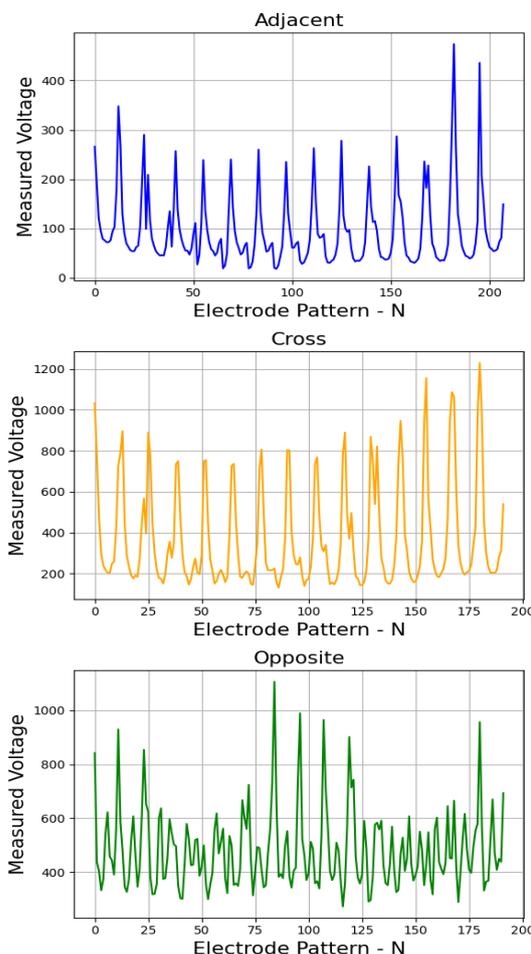
Tabel IV. HASIL EKSPERIMEN DENGAN BERBAGAI REKONSTRUKSI DAN POLA ELEKTRODA

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

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 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 5.

Perhitungan kuantitatif menggunakan *Structural Similarity Index Measure* (SSIM), yang

merupakan metode untuk menghitung rata-rata



Gambar 5. Grafik dari hasil akuisisi berbagai pola elektroda.

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 [26].

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

### 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 3. Nilai SSIM terbaik dari simulasi diperoleh menggunakan rekonstruksi tipe JAC dengan pola elektroda *adjacent* dengan nilai 0,9427,

sedangkan tipe BP 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 4 diperoleh secara otomatis sesuai urutan elektroda dari sistem EIT dan direkonstruksi sesuai dengan jenis pilihan menggunakan perangkat lunak yang telah dibuat. Rekonstruksi tipe BP dengan urutan elektroda *adjacent* memiliki nilai SSIM terbaik, yaitu 0,9399, yang diikuti oleh rekonstruksi tipe JAC 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 JAC 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 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 JAC dalam simulasi dan BP dalam eksperimen. Pola *Cross* tidak ideal untuk rekonstruksi BP 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:

- [1] S. Mansouri, Y. Alharbi, F. Haddad, S. Chabcoub, A. Alshrouf, and A. A. Abd-Elghany, "Electrical Impedance Tomography – Recent Applications and Developments," *J Electr Bioimpedance*, vol. 12, no. 1, p. 50, 2021, doi: 10.2478/JOEB-2021-0007.
- [2] "Drawbacks and Limitations of Computed Tomography Views from a Medical Educator," 2004.
- [3] J. J. Vaquero and P. Kinahan, "Positron Emission Tomography: Current Challenges and Opportunities for Technological Advances in Clinical and Preclinical Imaging Systems", doi: 10.1146/annurev-bioeng-071114-040723.
- [4] A. Koutras *et al.*, "Advantages and Limitations of Ultrasound as a Screening Test for Ovarian Cancer," *Diagnostics*, vol. 13, no. 12, p. 2078, Jun. 2023, doi: 10.3390/diagnostics13122078.
- [5] Shaikh, Torres, and Takeoka, "Neuroimaging in Pediatric Epilepsy," *Brain Sci*, vol. 9, no. 8, p. 190, Aug. 2019, doi: 10.3390/brainsci9080190.
- [6] WHO, "Strengthening Medical Imaging." Accessed: Dec. 26, 2022. [Online]. Available: <https://www.who.int/activities/strengthening-medical-imaging>
- [7] T. K. Bera, "Applications of Electrical Impedance Tomography (EIT): A Short Review," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 331, p. 012004, Mar. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/331/1/012004.
- [8] S. Heinrich, H. Schiffmann, A. Frerichs, A. Klockgether-Radke, and I. Frerichs, "Body and head position effects on regional lung ventilation in infants: an electrical impedance tomography study," *Intensive Care Med*, vol. 32, no. 9, p. 1392, Sep. 2006, doi: 10.1007/s00134-006-0252-0.
- [9] L. Tarassenko and P. Rolfe, "Imaging spatial distributions of resistivity—an alternative approach," *Electron Lett*, vol. 20, no. 14, p. 574, 1984, doi: 10.1049/el:19840397.
- [10] T. Meier *et al.*, "Assessment of regional lung recruitment and derecruitment during a PEEP trial based on electrical impedance tomography," *Intensive Care Med*, vol. 34, no. 3, pp. 543–550, Mar. 2008, doi: 10.1007/s00134-007-0786-9.
- [11] N. M. Zain and K. K. Chelliah, "Breast Imaging Using Electrical Impedance Tomography: Correlation of Quantitative Assessment with Visual Interpretation," *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, vol. 15, no. 3, pp. 1327–1331, Feb. 2014, doi: 10.7314/APJCP.2014.15.3.1327.
- [12] F. Pennati *et al.*, "Electrical Impedance Tomography: From the Traditional Design to the Novel Frontier of Wearables," *Sensors*, vol. 23, no. 3, p. 1182, Jan. 2023, doi: 10.3390/s23031182.
- [13] Y. Shi, Z. Yang, F. Xie, S. Ren, and S. Xu, "The Research Progress of Electrical Impedance Tomography for Lung Monitoring," *Front Bioeng Biotechnol*, vol. 9, Oct. 2021, doi: 10.3389/fbioe.2021.726652.
- [14] S. Mansouri, Y. Alharbi, F. Haddad, S. Chabcoub, A. Alshrouf, and A. A. Abd-Elghany, "Electrical Impedance tomography – recent applications and developments," *J Electr Bioimpedance*, vol. 12, no. 1, pp. 50–62, Jan. 2021, doi: 10.2478/joeb-2021-0007.
- [15] C. Montellano, E. C. L. Garay, S. Rodriguez, and P. Rogeli, "Development of an electrical impedance tomograph," in *2011 8th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control*, IEEE, Oct. 2011, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICEEE.2011.6106665.
- [16] J. D. Muñoz, V. H. Mosquera, and C. F. Rengifo, "A low-cost, portable, two-

- dimensional bioimpedance distribution estimation system based on the AD5933 impedance converter," *HardwareX*, vol. 11, p. e00274, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.ohx.2022.e00274.
- [17] A. Widodo, A. Rubiyanto, and E. Endarko, "The Influence of Multi-frequency Current Injection in Image Reconstruction for Two-Dimensional High-Speed Electrical Impedance Tomography (EIT)," *IPTEK The Journal of Engineering*, vol. 5, no. 1, May 2019, doi: 10.12962/joe.v5i1.5019.
- [18] M. M. Mohamedali, M. E. Salih, and A. A. Mohamed Ahmed, "Design of a simple and low cost electrical impedance tomography system," *Proceedings of the International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering 2019, ICCCEEE 2019*, Sep. 2019, doi: 10.1109/ICCCEEE46830.2019.9071221.
- [19] H. Sohal, H. Wi, A. L. McEwan, E. J. Woo, and T. I. Oh, "Electrical impedance imaging system using FPGAs for flexibility and interoperability," *Biomed Eng Online*, vol. 13, no. 1, pp. 1–14, Aug. 2014, doi: 10.1186/1475-925X-13-126/FIGURES/8.
- [20] R. Kusche, A. Malhotra, M. Ryschka, G. Ardel, P. Klimach, and S. Kaufmann, "A FPGA-Based Broadband EIT System for Complex Bioimpedance Measurements—Design and Performance Estimation," *Electronics 2015, Vol. 4, Pages 507-525*, vol. 4, no. 3, pp. 507–525, Jul. 2015, doi: 10.3390/ELECTRONICS4030507.
- [21] O. Bader, N. E. Ben Amara, and O. Kanoun, "Realistic 2D Model of the Human Thorax for Electrical Impedance Tomography," in *2022 International Workshop on Impedance Spectroscopy (IWIS)*, IEEE, Sep. 2022, pp. 70–74. doi: 10.1109/IWIS57888.2022.9975137.
- [22] T. Zhang, G. Y. Jang, Y. E. Kim, T. I. Oh, H. Wi, and E. J. Woo, "Influence of current injection scheme on electrical impedance tomography for monitoring of the respiratory function of obese subjects," *J Appl Phys*, vol. 128, no. 17, Nov. 2020, doi: 10.1063/5.0022704.
- [23] A. Adler *et al.*, "GREIT: a unified approach to 2D linear EIT reconstruction of lung images," *Physiol Meas*, vol. 30, no. 6, p. S35, Jun. 2009, doi: 10.1088/0967-3334/30/6/S03.
- [24] A. Noor, Oky Rahmanto, and Muhammad Yahya, "PERANCANGAN WIRELESS STARTER KENDARAAN BERMOTOR BERBASIS ARDUINO," *Jurnal Informatika dan Rekayasa Elektronik*, vol. 6, no. 2, pp. 228–237, Nov. 2023, doi: 10.36595/jire.v6i2.959.
- [25] A. Noor, M. Maulana, and A. Supriyanto, "PURWARUPA SISTEM RUMAH PINTAR BERBASIS INTERNET OF THINGS," *Jurnal Informatika dan Rekayasa Elektronik*, vol. 5, no. 2, pp. 272–282, Nov. 2022, doi: 10.36595/jire.v5i2.684.
- [26] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: From error visibility to structural similarity," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, no. 4, pp. 600–612, Apr. 2004, doi: 10.1109/TIP.2003.819861.
- [27] A. D. Prasetyo, "RPI.EIT: Purwarupa Rekonstruksi Citra pada Electrical Impedance Tomography Berbasis Internet of Things," 2017, Accessed: Jun. 19, 2023. [Online]. Available: <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/89409>
- [28] D. H. Kim, S. H. Lee, and H. Hahm, "Wearable Pediatric Eczema Tracker," Dec. 2019.
- [29] J. Zhu *et al.*, "EIT-kit: An Electrical Impedance Tomography Toolkit for Health and Motion Sensing," *UIST 2021 - Proceedings of the 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 400–413, Oct. 2021, doi: 10.1145/3472749.3474758.
- [30] D. Metz, B. Matheis, and I. Constantinou, "Towards micro electrical impedance tomography on chip," *SPhERE Proceedings: 4th International Symposium on Pharmaceutical Engineering Research*, 2021, doi: 10.24355/DBBS.084-202110251619-0.
- [31] G. Rao, S. Aghajanian, Y. Zhang, L. Jackowska-Strumiłło, T. Koironen, and M. Fjeld, "Monitoring and Visualization of Crystallization Processes Using Electrical Resistance Tomography: CaCO<sub>3</sub> and Sucrose Crystallization Case Studies," *Sensors (Basel)*, vol. 22, no. 12, Jun. 2022, doi: 10.3390/S22124431.