

## SISTEM TOMOGRAFI IMPEDANSI LISTRIK SEBAGAI SARANA UJI TAK RUSAK SEDERHANA

Khusnul Ain (khusnulainunair@yahoo.com)

R. Arif Wibowo

Imam Sapuan

Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga, Surabaya

Deddy Kurniadi

Fisika Teknik, Fakultas Teknologi dan Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung

### ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian rancang bangun sistem tomografi impedansi listrik sederhana sebagai sarana uji tak rusak. Penelitian ini dilakukan dengan cara membangun peralatan dan sistem instrumentasi yang diperlukan, yaitu phantom dan instrumen sumber arus bolak-balik. Phantom terbuat dari silinder dari PVC yang memiliki diameter 25 cm dan tinggi 6 cm dengan 16 elektroda berbentuk persegi panjang dengan lebar 2,45 cm dan tinggi 6 cm yang terpasang pada permukaan dalam phantom. Sistem instrumen sumber arus listrik bolak-balik dibangun berbasis OpAm LM4562. Proses pemindaian dilakukan dengan cara menginjeksikan arus listrik pada sepasang elektroda dan mengukur potensial listrik antar elektroda dengan metode koleksi data berpasangan, sehingga diperoleh 256 data lengkap. Data hasil pemindaian kemudian direkonstruksi dengan metode Newton Raphson. Analisis hasil dilakukan secara visual dengan cara membandingkan antara citra rekonstruksi terhadap objek uji. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem tomografi dapat menghasilkan citra rekonstruksi yang cukup baik sehingga menjanjikan untuk digunakan sebagai media uji tak rusak dan digunakan sebagai media pembelajaran dalam rangka memahami prinsip dasar dan mekanisme sistem tomografi impedansi listrik.

Kata kunci: impedansi, tomografi, uji tak rusak.

### ABSTRACT

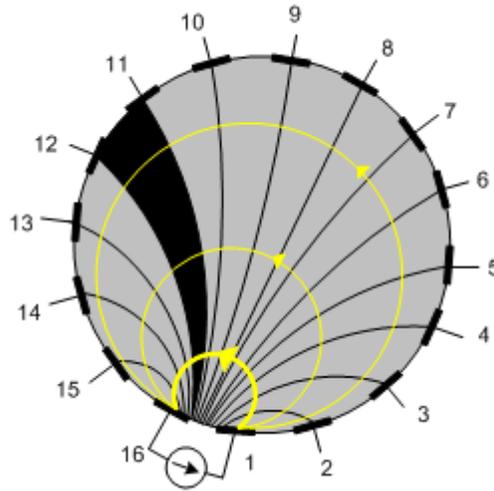
*The research was to build the simple electrical impedance tomography system as a nondestructive test equipment. It was carried out experimentally by developing two instrument as main systems. They were phantom and alternating current source. Phantom was built from PVC in 25 cm diameter and 16 electrodes in 6 cm x 2,45 cm rectangle, in which electrodes are placed on the interior boundary of the phantom. The alternating current source was built based on OpAm LM4562. Scanning was conducted by injecting an electrical current through a pair of electrodes and measure the electrical potential between the electrodes by adjacent method collecting data. The output were 256 complete data. The data were reconstructed by Newton Raphson method. Analysis of the results was done visually by comparing between reconstruction image and the reference object. The results showed that the system could generate sufficient reconstruction image, therefore it is promising to be used as a nondestructive test instrument and as instructional tool to*

*understand the basic principles and mechanisms of electrical impedance tomography system.*

*Key words: tomography, non destructive test, impedance.*

Tomografi adalah sebuah metode untuk memperoleh penampang objek tanpa harus merusak objek tersebut. Istilah ini pertama kali diperkenalkan oleh Godfrey Hounsfield pada tahun 1971 di dunia kedokteran dengan nama CT-Scan sinar-X. Peralatan tersebut mampu mencitrakan penampang tubuh pasien dengan resolusi yang sangat bagus. Dengan menggunakan iluminator selain sinar-X maka berkembanglah berbagai sistem tomografi yang lain, diantaranya adalah *positron emission tomography* (PET), *single photon emission computed tomography* (SPECT), *magnetic resonance imaging* (MRI), ultrasonografi dan lain-lain. Tomografi yang tergolong baru dan sedang banyak dikembangkan saat ini adalah pencitraan berdasarkan karakteristik listrik objek yang dikenal dengan *Electrical Impedance Tomography* (EIT). Ada beberapa kelebihan tomografi listrik jika dibandingkan dengan yang lain, diantaranya adalah relatif lebih aman, sederhana, mudah dijinjing dan memungkinkan untuk digunakan secara *real time* yang sangat sesuai untuk kebutuhan monitoring (Noor, 2007). Oleh karena itu tomografi impedansi listrik telah banyak digunakan dalam beberapa aplikasi praktis, diantaranya adalah untuk kontrol kualitas, deteksi cacat pada berbagai bahan, analisis aliran fluida multi komponen, eksplorasi geologi dan diagnosa medis (Nejatali, 1997). Hingga saat ini tomografi impedansi listrik telah dikembangkan dan telah menghasilkan citra rekonstruksi tiga dimensi (3D) secara langsung (Graham & Adler, 2007, Vauhkonen *et.al.* 2004, Polydorides & Lionheart, 2002). Namun citra rekonstruksi 3D juga dapat diperoleh secara tidak langsung melalui interpolasi citra rekonstruksi dua dimensi (2D) dengan hasil yang cukup baik (Kurniadi, 2010). Kasus citra rekonstruksi pada sistem tomografi listrik masih cukup relevan untuk terus dikembangkan.

Tomografi impedansi listrik bekerja dengan cara menginjeksikan arus listrik bolak-balik pada objek melalui elektrode yang terpasang pada permukaan objek dan mengukur potensial listrik antar elektroda pada permukaan objek. Terdapat beberapa metoda injeksi arus listrik dan pengukuran tegangannya pada sistem tomografi impedansi listrik, diantaranya adalah metoda berpasangan (*adjacent method*), metoda bersilangan (*cross method*), metoda berlawanan (*opposite method*), metoda multireferensi (*multireference method*), dan metoda adaptif (*adaptive method*) (Noor, 2007). Metode berpasangan mempunyai kelebihan sederhana dalam pembuatan perangkat kerasnya, namun distribusi arusnya tidak merata, karena sebagian besar arus hanya mengalir di sekeliling elektroda. Oleh karena itu, rapat arus pada pusat objek akan cenderung rendah, sehingga rentan akan kesalahan pada saat pengukuran (Nejatali, 1997).



Gambar 1. Injeksi arus listrik dan pengukuran tegangan pada objek

Koleksi data metode berpasangan dilakukan dengan cara menginjeksikan arus listrik pada sepasang elektroda yang berdekatan kemudian beda potensial yang terjadi diukur pada pasangan elektroda yang lain. Pada Gambar 1, arus listrik diinjeksikan pada elektroda nomor 16 dan 1, kemudian beda potensial yang terjadi diukur pada pasangan elektroda nomor 16 dan 1, 1 dan 2, dan seterusnya hingga pasangan elektroda nomor 15 dan 16. Prosedur yang sama diulang dengan menginjeksikan arus listrik pada pasangan elektroda nomor 1 dan 2, 2 dan 3, dan seterusnya hingga pasangan elektroda nomor 15 dan 16. Dengan demikian, pada koleksi data metode berpasangan akan terkumpul sejumlah 16x16 atau 256 data.

Untuk merekonstruksi citra berdasarkan distribusi resistivitas, maka solusi dari model maju (*forward problem*) harus didapatkan terlebih dahulu. Solusi ini tidak dapat diperoleh secara analitik, sehingga diperlukan metode elemen hingga untuk mendapatkan data distribusi potensial akibat adanya distribusi resistivitas. Metoda elemen hingga bertujuan untuk memperoleh distribusi beda potensial objek dengan menyelesaikan persamaan medan listrik *Laplace*. Untuk suatu distribusi resistivitas  $\rho$ , distribusi potensial listrik dalam objeknya memenuhi persamaan:

$$\nabla \cdot \frac{1}{\rho} \nabla v = 0, \text{ di dalam } \Omega \tag{1}$$

dengan ketentuan syarat batas sebagai berikut :

$$v = v_0, \text{ di permukaan } \partial\Omega \tag{2}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial v}{\partial \eta} = J_0, \text{ di permukaan } \partial\Omega \tag{3}$$

Dengan  $v$  merupakan distribusi potensial di dalam objek,  $v_0$  dan  $J_0$  merupakan potensial dan rapat arus yang terukur, serta  $\eta$  adalah vektor satuan arah normal bidang batas.

Metode Newton Raphson adalah sebuah algoritma rekonstruksi citra berdasarkan iterasi yang dikembangkan untuk menyelesaikan persoalan non-linear. Proses iterasi dilakukan berdasarkan fungsi objektif yang menggambarkan adanya perbedaan antara tegangan hasil pengukuran terhadap tegangan hasil perhitungan pada model. Fungsi objektif tersebut didefinisikan sebagai.

$$\Pi(\rho^k) = \frac{1}{2} (v_e(\rho^k) - v_0)^T (v_e(\rho^k) - v_0) \quad (4)$$

Dengan  $v_e(\rho^k)$  merupakan vektor potensial batas dari hasil perhitungan model dan  $T$  merupakan simbol transpos vektor atau matriks. Distribusi resistivitas objek dapat diperoleh dengan cara meminimumkan fungsi objektif  $\Pi(\rho^k)$ . Sehingga diperoleh,

$$\rho^{k+1} = \rho^{k+1} + \Delta\rho^k \quad (5)$$

dengan

$$\Delta\rho^k = -[J^T J]^{-1} (J)^T q \quad (6)$$

$$J = \frac{\partial v_e(\rho^k)}{\partial \rho^k} \quad (7)$$

$$q = v_e(\rho^k) - v_0 \quad (8)$$

$J$  dikenal sebagai matriks Jacobian.

Rekonstruksi distribusi resistivitas merupakan persoalan inversi (*inverse problem*). Umumnya pada persoalan inversi muncul persoalan *ill-posed*. Hal ini disebabkan karena adanya kesalahan pada pengukuran dan kesalahan pada proses pemodelan. Untuk mengatasi persoalan *ill-posed* dapat digunakan metoda regularisasi Tikonov (Kurniadi, 2010).

Penerapan metoda Tikonov dilakukan dengan mensubstitusikan suatu fungsi penstabil pada fungsi objektif sebelumnya, sehingga diperoleh:

$$\Pi(\rho^k) = \frac{1}{2} (v_e(\rho^k) - v_0)^T (v_e(\rho^k) - v_0) + \alpha \Lambda(\rho^k) \quad (9)$$

dengan  $\alpha$  adalah parameter regulasi yang berupa bilangan positif yang mengontrol fungsi penstabil, dan  $\Lambda(\rho^k)$  merupakan fungsi penstabil yang memberikan informasi distribusi resistivitas ke fungsi objektif sebagai informasi pendahulu. Fungsi ini didefinisikan sebagai:

$$\alpha \Lambda(\rho^k) = (\Delta\rho^k)^T \Sigma (\Delta\rho^k) \quad (10)$$

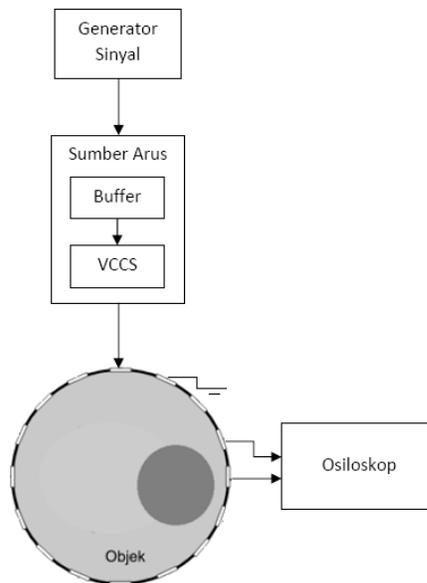
dengan  $\Sigma$  merupakan matrik positif definit yang umumnya digunakan sebagai matrik identitas. Dengan cara yang sama, yaitu dengan meminimumkan fungsi objektif baru pada Persamaan (9), akan diperoleh persamaan perubahan distribusi resistivitas baru sebagai berikut:

$$\Delta\rho^k = -[J^T J + 2\alpha\Sigma]^{-1} (J)^T \rho \quad (11)$$

Persamaan (9), (10) dan (11) diperoleh dari (Kurniadi, 2010). Persamaan (11) akan memiliki kondisi yang lebih baik dibandingkan dengan Persamaan (8), karena matriks yang akan diinversi pada Persamaan (11) tidak dalam kondisi *ill*. Pada Persamaan (11) yang telah teregularisasi tersebut, ternyata memunculkan persoalan penentuan parameter regularisasi. Parameter regularisasi dipilih secara *trial and error*, kemudian nilai tersebut akan dikecilkan pada iterasi berikutnya sehingga akan memperkecil nilai fungsi objektif. Sebaliknya harga parameter akan dibesarkan jika nilai fungsi objektif membesar pada proses iterasi selanjutnya. Dengan demikian pada suatu saat fungsi objektif akan menghasilkan suatu solusi yang konvergen, sehingga parameter regularisasi akan menuju nol, dengan demikian Persamaan (11) akan mempunyai bentuk seperti semula yaitu Persamaan (8). Algoritma tersebut sudah diwujudkan dalam bentuk perangkat *open source* "EIDORS 2-D" (Vauhkonen *et.al*, 2001).

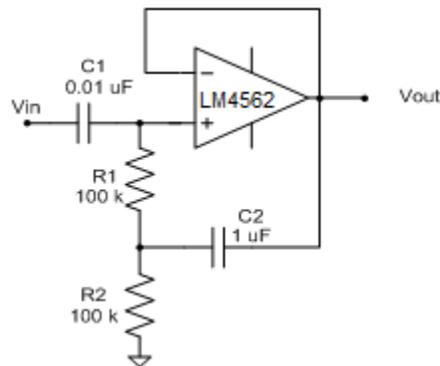
## METODE

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Generator sinyal (Agilent 33120A), Osiloskop (Leader 2100AR), Sumber arus AC (dibuat dalam penelitian ini), Phantom (dibuat dalam penelitian ini), dan Komputer. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah perangkat lunak EIDORS 2D v1.0 dan Matlab v7.8, sebagai objek uji adalah silinder logam aluminium, silinder karet, ginjal dan paru-paru serta jantung hewan. Seluruh peralatan disusun seperti Gambar 2.



Gambar 2. Susunan peralatan eksperimen tomografi impedansi listrik

Sumber arus listrik AC terdiri dari dua rangkaian utama, yaitu rangkaian penyangga dan rangkaian *Voltage Controlled Current Source* (VCCS). Rangkaian penyangga berfungsi sebagai rangkaian yang akan mempertahankan tegangan input dari generator sinyal akibat adanya beban. Skema rangkaian penyangga dapat dilihat pada Gambar 3.

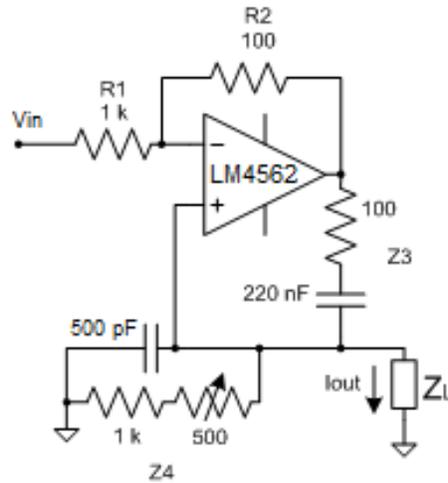


Gambar 3. Rangkaian penyangga

Kapasitor  $C_1$  pada rangkaian berfungsi sebagai filter lolos frekuensi tinggi. Ketika frekuensi sinyal meningkat,  $C_2$  berlaku sebagai rangkaian tertutup sehingga tegangan di antara kedua hambatan sama dengan keluaran pada kaki penguat operasional. Pada kondisi ini, beda potensial pada hambatan  $R_1$  mendekati nol. Dengan tidak adanya perbedaan tegangan pada  $R_1$ , tidak ada arus listrik yang mengalir sehingga impedansi masukan sistem akan sama dengan nilai hambatan yang dipasang pada kaki masukan positif komponen penguat. Hal ini menyebabkan tegangan masukan  $V_{in}$  akan sama dengan tegangan keluaran  $V_{out}$ .

Arus listrik yang diinjeksikan pada objek uji tidak boleh berubah terhadap beban, oleh karena itu diperlukan rangkaian VCCS. Skema rancangan rangkaian VCCS dapat dilihat pada Gambar 4. Rangkaian pada Gambar 4 akan mengubah tegangan keluaran dari sinyal rangkaian penyangga  $V_{in}$  menjadi arus listrik  $I_{out}$  yang akan mengalir ke objek. Dengan asumsi penguat ideal, maka arus keluaran  $I_{out}$  dinyatakan dengan Persamaan (12) dan (13).

Bilamana penguat tidak ideal, kesalahan penguatan dan perbedaan fasa yang terjadi dapat diperkecil dengan mengatur besarnya  $Z_4$ . Rangkaian pada Gambar 4 akan menghilangkan arus listrik DC karena adanya penambahan kapasitor pada  $Z_3$ .

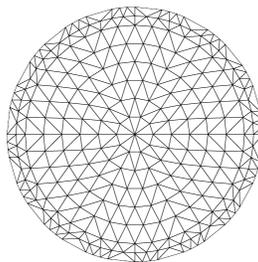


Gambar 4. Rangkaian VCCS

$$I_{out} = \frac{-V_{in} R_2 Z_4}{R_1 Z_3 Z_4 + Z_L (R_1 Z_3 - R_2 Z_4)} \quad (12)$$

$$\text{Jika } R_1 Z_3 = R_2 Z_4 \text{ maka } I_{out} = \frac{-V_{in}}{Z_4} \quad (13)$$

Koleksi data yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode berpasangan, karena metode ini sesuai dengan metode koleksi data pada perangkat lunak EIDORS 2D v1.0 yang akan menghasilkan citra rekonstruksi berbentuk lingkaran dengan 279 elemen seperti ditampilkan pada Gambar 5. Perangkat sumber arus yang dibuat, diuji kestabilannya dengan cara memberikan beban yang berbeda pada keluaran sumber arus. Jika tidak terjadi perubahan arus yang berarti maka sumber arus artinya dapat berfungsi dengan baik. Phantom sebagai wadah objek uji dibuat dari bahan silinder PVC dengan diameter 25 cm dan tinggi 6 cm. Bagian sisi dalam dipasang 16 elektroda terbuat dari plat tembaga dengan lebar 2,45 cm dan tinggi 6 cm. Analisis hasil dilakukan secara visual dengan cara membandingkan antara citra rekonstruksi terhadap objek uji.

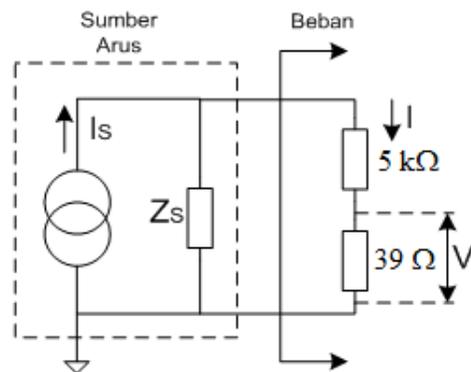


Gambar 5. Struktur 279 elemen dalam lingkaran model citra rekonstruksi yang akan dihasilkan (Vauhkonen, *et.al.* 2001)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

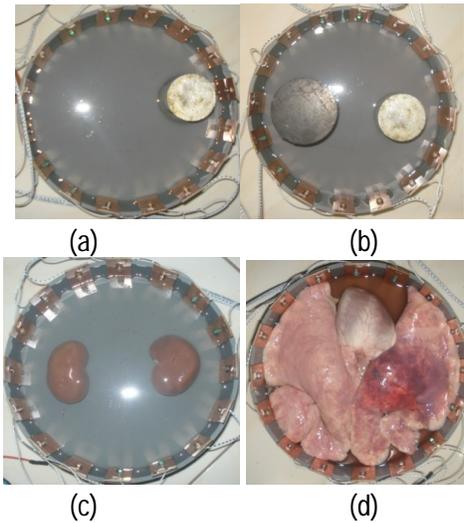
Hasil dan pembahasan meliputi hasil pengujian perangkat sumber arus, pembuatan phantom objek uji eksperimen dan pengujian secara visual citra rekonstruksi objek uji yang meliputi silinder aluminium, silinder aluminium dan karet, ginjal, paru-paru, dan jantung hewan percobaan. Rangkaian sumber arus pada Gambar 3 dan 4 dalam penelitian ini diuji dan menghasilkan respon arus stabil maksimum 2 mA pada frekuensi 50 kHz. Besar arus tersebut sudah mencukupi untuk digunakan sebagai sumber arus pada sistem tomografi impedansi listrik.

Percobaan pengukuran arus keluaran sumber arus dilakukan dengan memasang hambatan minimal dan hambatan maksimal seperti pada Gambar 6. Pengukuran pertama dilakukan dengan memasang hambatan sebesar  $39 \Omega$  sebagai hambatan minimal, sehingga bisa didapatkan tegangan  $V_1$ . Pada pengukuran kedua ditambahkan hambatan variabel  $5 \text{ k}\Omega$  yang dipasang seri dengan hambatan  $39 \Omega$ , sehingga didapatkan tegangan  $V_2$  pada hambatan  $39 \Omega$ . Semua pengukuran dilakukan pada frekuensi 50 kHz dengan tegangan masukan berupa sinyal bolak-balik dari generator sinyal dengan amplitudo sebesar 1,2 volt. Dari hasil pengukuran didapat amplitudo tegangan  $V_1$  sama dengan  $V_2$ , yaitu 55 mV, atau besarnya arus listrik yang dapat dihasilkan cukup stabil yaitu sebesar 0,997 mA. Dengan demikian rangkaian sumber arus tersebut sudah cukup stabil sehingga dapat digunakan sebagai instrumen sumber tegangan pada sistem tomografi impedansi listrik.



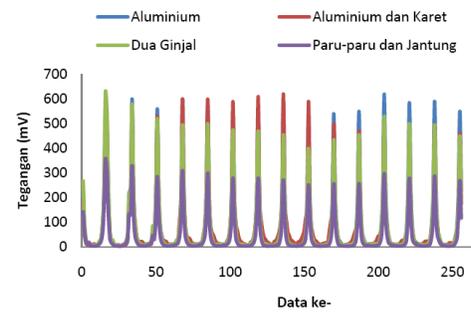
Gambar 6. Konfigurasi pengukuran arus keluaran dari sumber arus

Setelah dipastikan bahwa perangkat sumber arus cukup stabil, objek uji eksperimen dimasukkan ke dalam phantom yang sudah terisi air seperti pada Gambar 7.

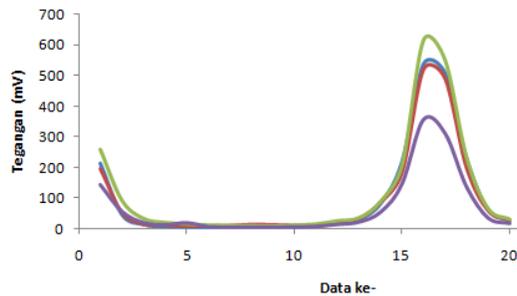


Gambar 7. Objek eksperimen tampak atas (a) silinder aluminium (b) silinder aluminium dan karet (c) ginjal hewan (d) paru-paru dan jantung hewan

Dengan menggunakan perangkat yang sudah disusun pada Gambar 2, dapat diperoleh data potensial lengkap antar elektrode dari keempat objek uji yang ditampilkan pada gambar 8.



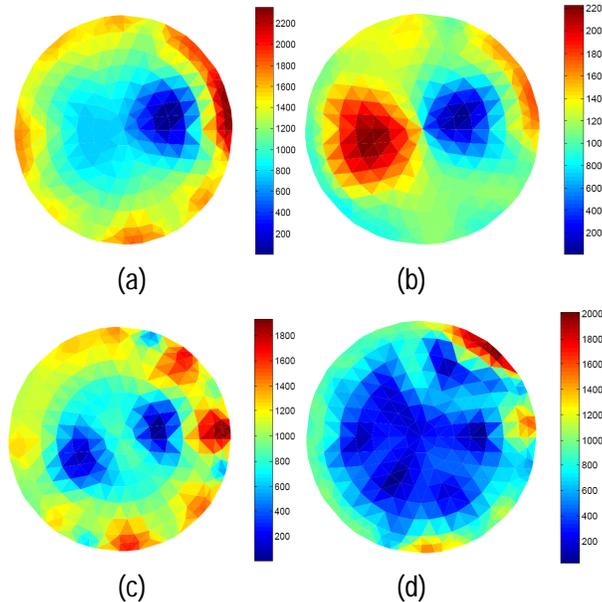
(a)



(b)

Gambar 8. Data potensial antar elektrode dari keempat objek uji (a) data lengkap (b) 20 data pertama

Dengan menggunakan perangkat lunak *Electrical Impedance Diffuse Optical Reconstruction Software* (EIDORS), keempat data objek uji pada Gambar 8 kemudian direkonstruksi sehingga diperoleh citra rekonstruksi yang ditampilkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Citra rekonstruksi penampang lintang objek uji (a) silinder aluminium (b) silinder aluminium dan karet (c) ginjal hewan (d) paru-paru dan jantung hewan

Dari keempat citra rekonstruksi pada Gambar 9 (a), (b), (c), dan (d) tersebut secara visual nampak bahwa citra rekonstruksi yang diperoleh telah merepresentasikan nilai konduktivitas objek yang diuji. Aluminium, memiliki konduktivitas yang lebih tinggi daripada air, sehingga nampak bahwa di dalam citra rekonstruksi berwarna lebih biru jika dibandingkan dengan air. Itu menunjukkan bahwa hambatan jenis aluminium lebih rendah daripada air. Karet, memiliki konduktivitas yang lebih rendah daripada air, sehingga nampak bahwa citra rekonstruksi berwarna lebih merah jika dibandingkan dengan air. Itu menunjukkan bahwa hambatan jenis karet lebih tinggi daripada air. Ginjal, paru-paru, dan jantung memiliki konduktivitas lebih tinggi daripada air, sehingga nampak bahwa citra rekonstruksi lebih biru jika dibandingkan dengan air. Itu menunjukkan bahwa hambatan jenis ginjal, paru-paru dan jantung hewan lebih tinggi dari pada air.

## KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem tomografi yang telah disusun dapat menghasilkan citra rekonstruksi yang cukup baik sehingga menjanjikan untuk digunakan sebagai media uji tak rusak dan digunakan sebagai media pembelajaran dalam rangka memahami prinsip dasar dan mekanisme sistem tomografi impedansi listrik.

## **REFERENSI**

- Graham, B. M., & Adler, A. (2007). Electrode placement configuration for 3D EIT. *Physiol. Meas.* 28, S29 – S44.
- Kurniadi, D. (2010). Reconstruction of multislice image in electrical impedance tomography. *International journal of tomography ands.* 15 (F10).
- Nejatali, A. (1997). *Electrical impedance tomography with neural network and fuzzys*. A thesis of philosophy doctor, University of Manitoba, Canada.
- Noor J.A.F. (2007). *Electrical impedance tomography at low frequencies*. Thesis of philosophy doctor, University New South Wales, Australia.
- Polydorides, N., & Lionheart, W.R. B., (2002). A matlab toolkit for three dimensional electrical impedance tomography: A contribution to the electrical impedance and diffuse optical reconstruction software project. *Meas. Sci. Technol.* 13, 1871-1883.
- Vauhkonen, P.J., Vauhkonen, M., A. Seppanen, A., & Kaipio, J.P. (2004). *Iterative image reconstruction in three-dimensional electrical impedance tomography*. Inverse problem, design and optimization symposium, Brazil.
- Vauhkonen, M., Lionheart, WRB., Heikkinen, LM., Vauhkonen, PJ, & Kaipio, JP. (2001). A matlab toolbox for the EIDORS project to reconstruct two-dimensional EIT images. *Phys. Meas.*, 22, pp. 107-111.