

Rekonstruksi Citra Tomografi Kapasitansi Elektrik Menggunakan Metode Proyeksi Balik Linear Iteratif

M. Komarudin

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung
komar@unila.ac.id

Abstrak—Penelitian ini bertujuan untuk mengamati kualitas citra yang dihasilkan dari tomografi kapasitansi elektrik dengan menggunakan metode proyeksi balik linear iteratif. Pengujian dilakukan menggunakan sensor kapasitif yang memiliki 8 elektroda yang diisi dengan obyek yang berupa batang terbuat dari perspex dan pipet yang terbuat dari plastik untuk berbagai macam posisi. Metode proyeksi balik linear dapat mengidentifikasi posisi obyek namun dengan ukuran obyek yang jauh lebih besar dari aslinya. Agar rekonstruksi citra sesuai dengan ukuran obyek yang sebenarnya maka proses iterasi dilakukan. Pengujian menunjukkan iterasi sebanyak 50 kali dapat menghasilkan citra sesuai yang diharapkan.

Kata Kunci: tomografi kapasitansi elektrik, proyeksi balik linear iteratif, rekonstruksi citra

Abstrak—*The aim of this research is to observe the quality of images resulting from electrical capacitance tomography using iterative linear back projection. Tests have been conducted using a rod and straw(s) that put inside an 8 electrode capacitive sensor with various positions. Despite the size of the reconstructed images are bigger than that of original object(s), the linear back projection method can correctly identify the position of object(s). In order to overcome the inaccuracy of image sizes, the method is used iteratively. Resulting tests suggest 50 iterations can improve the reconstructed images as expected.*

Keywords: *electrical capacitance tomography, iterative linear back projection, image reconstruction*

A. Pendahuluan

Tomografi (*tomography*) dapat didefinisikan sebagai teknik untuk merekonstruksikan citra irisan melintang (*cross-sectional*), yang memvisualisasikan struktur internal objek secara *non-invasive*. Citra irisan melintang tersebut dinamakan

tomogram, sedangkan perlengkapan yang menghasilkan citra disebut *tomograph*. Istilah tomografi berasal dari bahasa Yunani, *tomos* berarti “iris tipis” dan *grapho* berarti “citra”. Istilah ini asalnya digunakan dalam aplikasi medis untuk membedakannya dengan kebanyakan teknik *radiograph* yang umum digunakan [1].

Tomografi proses industri (*industrial process tomography*) adalah sebuah teknik untuk mengekstrak informasi spasial dan/atau temporal berkenaan dengan parameter-parameter proses dengan cara memasang sensor-sensor di sekitar proses yang diukur. Sistem sensor yang dipilih bergantung pada nilai parameter atau karakteristik yang akan dicitrakan. Sebagai contoh, sensor kapasitansi sensitif terhadap konstanta dielektrik dari objek, sedangkan sinar γ (gamma) dan sinar x sensitif terhadap kepadatan. Sinyal dari sensor kemudian dikuatkan, dimultiplekskan, didigitalkan dan dikirim ke komputer, untuk direkonstruksi menjadi citra irisan melintang.

Tulisan ini membahas tentang rekonstruksi citra kapasitansi elektrik menggunakan proyeksi balik linear (PBL) [2] dan bentuk iteratifnya (PBLI) [3]. Citra yang dihasilkan oleh kedua metode tersebut kemudian dibandingkan untuk melihat kualitas dari citra yang dihasilkan.

B. Teori Dasar

Gambar 1 menunjukkan sistem tomografi kapasitansi elektrik, dimana medan elektrik dipengaruhi oleh distribusi dielektrik yang mengakibatkan perubahan nilai kapasitansi

Naskah ini diterima pada tanggal 5 Februari 2009, direvisi pada tanggal 13 Maret 2009 dan disetujui untuk diterbitkan pada tanggal 20 April 2009

pada sensor. Pengukuran kapasitansi elektrik pada sensor diukur dengan sudut-sudut yang bervariasi sehingga citra tomografik bisa direkonstruksi.

Model sistem untuk sistem tomografi kapasitansi berdasarkan pada persamaan Poisson [1], diberikan oleh:

$$\nabla \cdot [\varepsilon(\chi) \nabla \Phi] = -\rho(\chi) \quad (1)$$

dimana $\varepsilon(\chi)$ merupakan distribusi konstanta dielektrik, Φ adalah potensial dan ρ adalah distribusi muatan. Medan elektrik diberikan oleh,

$$E = -\nabla \Phi = -\text{div } \Phi = -\text{div } V(r) \quad (2)$$

Dengan memasukkan hukum Gauss, muatan terinduksi di elektroda j saat elektroda i sebagai elektroda sumber bisa dihitung dengan persamaan berikut:

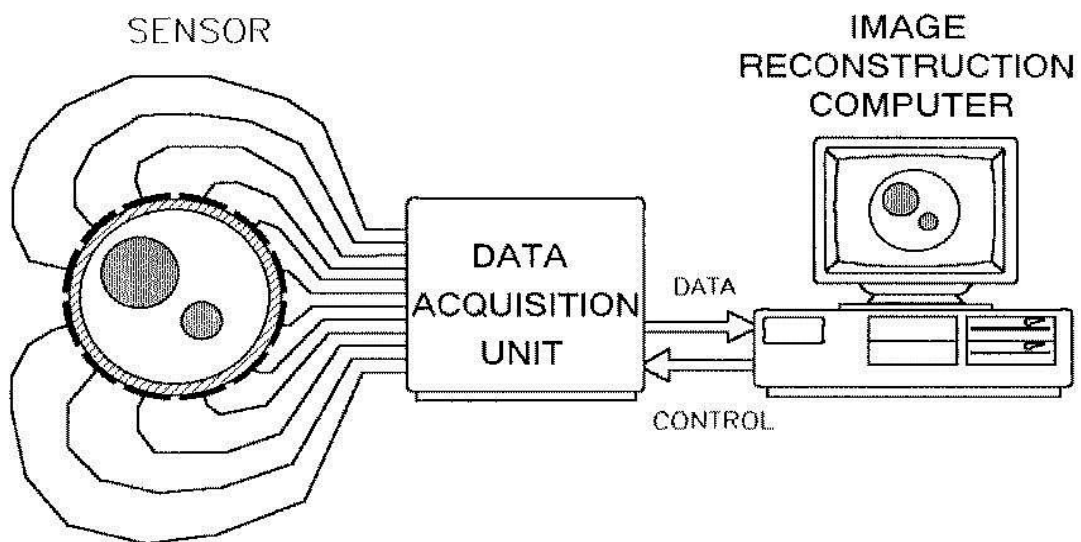
$$Q_{ij} = \oint_{\Gamma_j} \varepsilon(x) E \cdot \hat{n} dl \quad (3)$$

dimana Γ_j merupakan kurva tertutup yang menutupi elektroda sensor, $E = -\nabla \cdot V(r)$, dan $\hat{n}$ adalah vektor normal unit pada Γ_j .

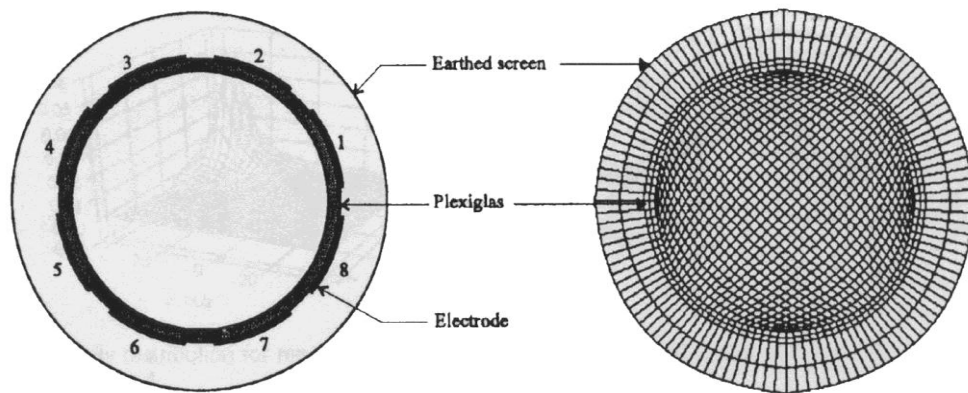
Dengan mengetahui muatan Q_{ij} dan tegangan antara elektroda i dan j, U_{ij} , nilai kapasitansi antara elektroda-elektroda ini dapat dikalkulasikan sebagai berikut:

$$C_{ij} = \frac{Q_{ij}}{U_{ij}} \quad (4)$$

dimana U_{ij} merupakan tegangan di antara elektroda sumber i dan elektroda detektor j. Persamaan 1 sampai 4 menghubungkan distribusi konstanta dielektrik $\varepsilon(\chi)$ dengan kapitanasi terukur, C_{ij} . Sehingga, untuk distribusi medium yang diberikan $\varepsilon(\chi)$, dan kondisi batas *Dirichlet*, kapasitansi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan di atas. Seperti dilihat pada persamaan, cukup sulit untuk mendapatkan hubungan yang eksplisit antara kapasitansi terukur dengan fraksi dan posisi komponen-komponen dielektrik (seperti minyak dan gas) di bagian dalam pipa. Namun, model bisa diselesaikan secara numerik menggunakan metode elemen hingga [4] dengan cara membagi *domain* solusi ke dalam elemen-elemen, seperti yang ditunjukkan di Gambar 2, dengan mencari solusi Persamaan (1) untuk kondisi nilai batas dan distribusi medium.



Gambar 1. Sistem Tomografi Kapasitansi Elektrik.



Gambar 2. *Domain* solusi dibagi ke dalam sejumlah elemen. Mata jala ini terdiri dari 1380 elemen yang mana 900 elemen berada di bagian dalam pipa [1].

Metode Proyeksi Balik Linear

Metode proyeksi balik linier (PBL) merupakan algoritma yang paling populer digunakan untuk merekonstruksi citra. Masalah *inverse* (inverse problem) dari algoritma ini adalah sebagai berikut [4]:

$$G(p) = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N S_{i,j}(p) \cdot C_{i,j}}{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N S_{i,j}(p)} \quad (5)$$

yang mana:

- $G(p)$ = derajat keabuan dari *pixel* p .
- N = Jumlah elektroda.
- $S_{i,j}(p)$ = Peta sensitivitas pada *pixel* p dengan elektroda sumber i dan elektroda *ground* j .
- $C_{i,j}$ = Kapasitansi terukur antara elektroda sumber i dan elektroda *ground* j .

Dalam bentuk matriks, persamaan di atas dapat ditulis kembali seperti:

$$\mathbf{G} = \mathbf{D}(\mathbf{S}\mathbf{c}) \quad (6)$$

di mana $\mathbf{D}$ adalah sebuah matriks diagonal $p \times p$ dengan

$$d_{ii} = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N S_{i,j}(p) \quad (7)$$

Matriks sensitivitas S_{ij} dapat dihitung dengan menggunakan metode elemen hingga dari persamaan 5, 6, dan 7. Komputasi matriks sensitivitas S_{ij} berdasarkan pada metode elemen hingga disebut dengan masalah maju (*forward problem*).

Metode Proyeksi Balik Linear Iteratif

Tujuan metode proyeksi balik linear iteratif (PBLI) adalah untuk memprediksi distribusi permitifitas dari sekumpulan pengukuran. Proses algoritma iteratif dimulai dengan memprediksi suatu distribusi permitifitas awal, lalu secara berulang memperbaharui prediksi distribusi permitifitas untuk meminimisasi *error* antara nilai yang dikalkulasi dengan nilai yang terukur hingga diperoleh *error* minimal yang didefinisikan sebelumnya (*pre-defined*). Hal yang menjadi pembahasan dalam algoritma-algoritma iteratif adalah menentukan seberapa cepat algoritma tersebut mencapai nilai *error* minimal yang telah didefinisikan sebelumnya melalui pembaharuan prediksi distribusi permitifitas. Pada algoritma proyeksi balik linear iteratif [4], citra inisial yang dihasilkan dari algoritma digunakan untuk menghitung nilai

kapasitansi. Nilai kapasitansi berdasarkan kalkulasi ini kemudian dibandingkan dengan nilai kapasitansi terukur, lalu *error* yang dihasilkan dari perbandingan keduanya digunakan sebagai informasi untuk meningkatkan kualitas citra inisial. Proses diulangi dengan merubah citra awal dengan citra yang diperbaharui. Proses iterasi ini akan berhenti bila *error* yang diijinkan telah dicapai atau sejumlah iterasi yang ditentukan sebelumnya telah tercapai. Rumus untuk menghitung nilai kapasitansi dari citra yang diperbaharui adalah:

$$C_{i,j} = \frac{\sum_{p=1}^M S_{i,j}(p).G(p)}{\sum_{p=1}^M S_{i,j}(p)} \quad (8)$$

di mana:

$G(p)$ = level abu-abu dari *pixel* p .

M = Jumlah *pixel*.

$S_{i,j}(p)$ = Peta sensitivitas pada *pixel* p dengan elektroda sumber i dan elektroda *ground* j .

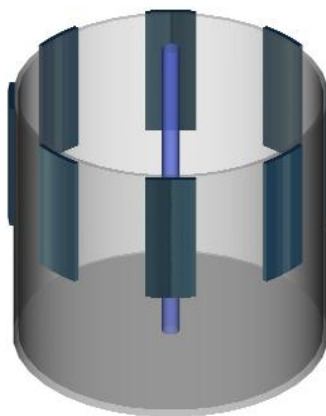
$C_{i,j}$ = Kapasitansi terukur antara elektroda sumber i dan elektroda *ground* j .

C. Metode Penelitian

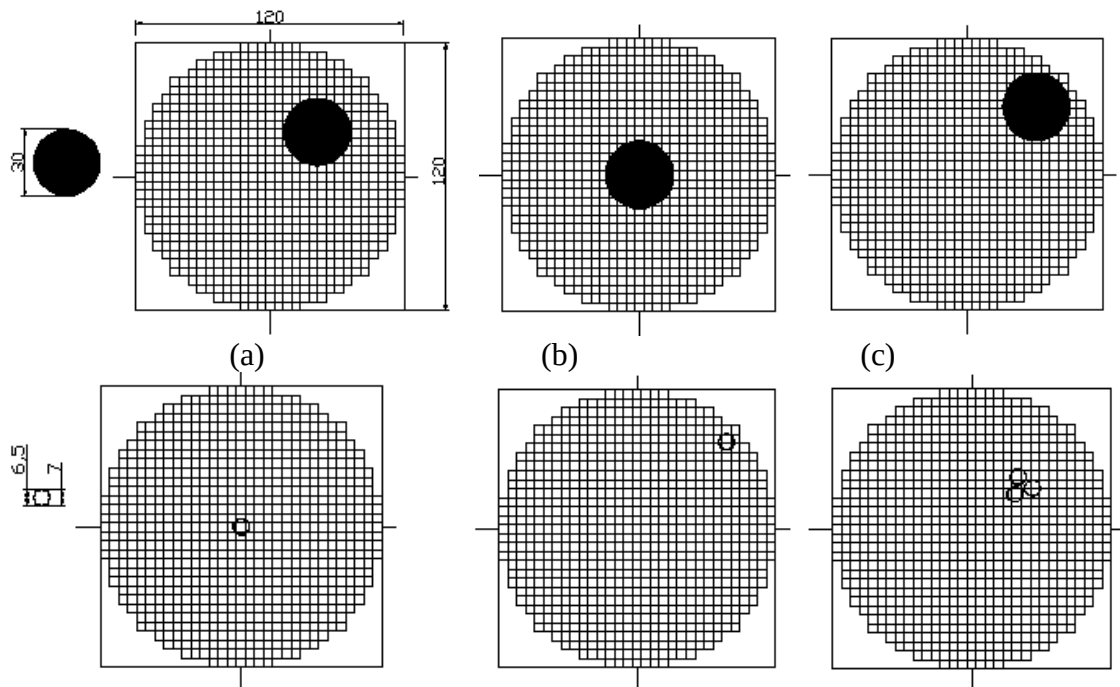
Percobaan dilakukan dengan membuat sensor kapasitif yang terdiri dari 8 elektroda seperti ditunjukkan pada Gambar 3 kemudian memasukkan 2 jenis benda

yang masing-masing terbuat dari prespex dengan diamter 30 mm dan plastik (sedotan plastik) dengan diameter 7 mm. Kedua benda tersebut ditempatkan pada posisi yang berbeda-beda seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Nilai kapasitansi pada Persamaan (4) untuk setiap posisi diukur dengan LCR meter. Terdapat 28 nilai kapasitansi hasil pengukuran untuk setiap keadaan sensor, baik kosong maupun terisi. Sebelum dilakukan pengukuran, sensor terlebih dahulu dikalibrasi dengan mengukur nilai kapasitansi pada saat sensor kosong (CL) dan pada saat sensor penuh dengan bahan dielektrik (CH).

Setelah sensor selesai diimplementasikan, selanjutnya dibuat program untuk kedua metode di atas. Distribusi dielektrik divisualisasikan dengan citra berukuran 32 x 32 *pixel*. Data hasil pengukuran untuk kalibrasi dan distribusi dielektrik untuk berbagai posisi disimpan ke dalam file seperti ditunjukkan pada Tabel 1. File-file tersebut akan digunakan dalam proses rekonstruksi citra untuk semua metode di atas. Kedua metode tersebut dibandingkan berdasarkan citra yang dihasilkan, baik dari ukuran obyek (dielektrik) maupun posisinya.



Gambar 3. Rancangan sensor tomografi kapasitansi elektrik dengan 8 elektroda



Gambar 4. Posisi benda dalam sensor (a) temp41000. (b) temp51000. (c)temp71000. (d) temp111000. (e) temp131000. (f) temp191000.

Tabel 1. Tabel file nilai kapasitansi untuk setiap posisi dielektrik

<i>File</i>	Informasi
Temp11000.dat	Sensor dengan pipa yang kosong (untuk kalibrasi CL)
Temp21000.dat	Sensor dengan penuh pipet (untuk kalibrasi CH)
Temp31000.dat	Sensor dengan penuh <i>bar</i> (untuk kalibrasi CH)
Temp41000.dat	Sensor dengan <i>rod</i> di antara bagian tengah dan pinggir
Temp51000.dat	Sensor dengan <i>rod</i> di bagian tengah
Temp71000.dat	Sensor dengan <i>rod</i> di bagian pinggir
Temp111000.dat	Sensor dengan 1 <i>straw</i> di bagian tengah
Temp131000.dat	Sensor dengan 1 <i>straw</i> di bagian pinggir
Temp191000.dat	Sensor dengan 3 <i>straw</i> di bagian pinggir agak ke tengah

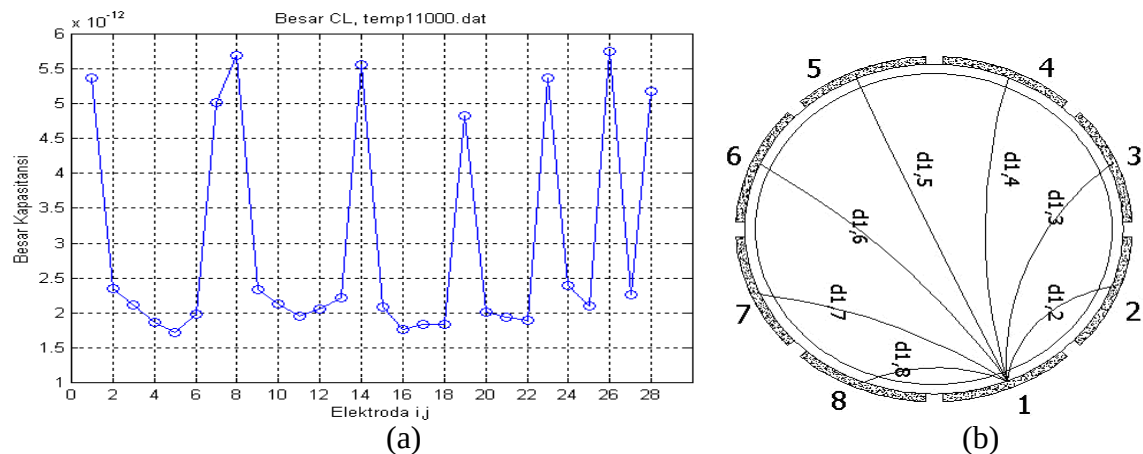
D. Hasil dan Pembahasan

Kalibrasi sensor kosong (CL) dan penuh (CH)

Hasil pengukuran untuk sensor kosong (CL) diperlihatkan pada Gambar 5. Sumbu x menunjukkan nilai kapasitansi untuk elektroda 1 dan 2, elektroda 1 dan 3, dan seterusnya hingga elektroda 7 dan 8, sehingga diperoleh 28 pengukuran. Dari Gambar 5 (a) tersebut terlihat bahwa bentuk grafik menyerupai huruf "U" atau

lebih dikenal dengan istilah "U curve" dimana elektroda yang berdekatan

memiliki nilai kapasitansi lebih tinggi dibandingkan elektroda yang letaknya berjauhan. Elektroda 1 dan 2 mempunyai nilai kapasitansi lebih dari dua kali nilai kapasitansi elektroda 1 dan 3 karena secara geometri jarak elektroda 1 ke 2 lebih dekat dibandingkan elektroda 1 ke 3 sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 5 (b).



Gambar 5. (a) Grafik nilai kapasitansi CL (b) jarak masing-masing elektroda.

Hasil kalibrasi untuk sensor terisi penuh baik dengan prespex maupun pipet diperlihatkan pada Tabel 2. Dari tabel terlihat bahwa nilai kapasitansi kalibrasi adalah $CL < Chi < CHx$. Hal ini disebabkan nilai dielektrik prespex lebih tinggi

dibandingkan campuran plastik dan udara mengingat pipet memiliki lubang berisi udara, dan nilai dielektrik pipet lebih tinggi dari udara.

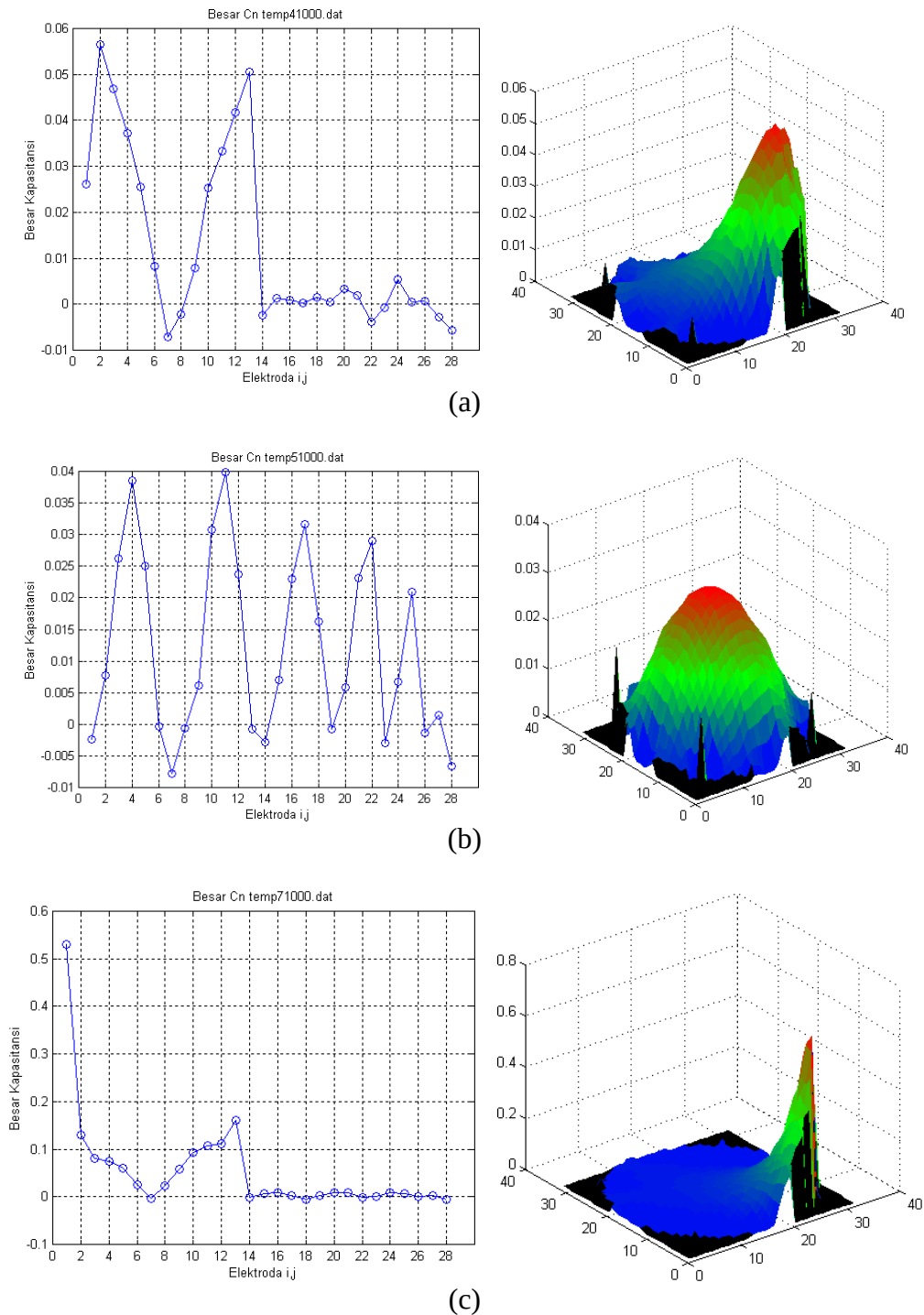
Tabel 2. Nilai kapasitansi untuk sensor kosong (CL), sensor penuh dengan prespex (CHx) dan sensor penuh dengan pipet (Chi)

Nomor C	Elektroda	CL	CHx	Chi
1	1 dan 2	5.37e-12	5.90e-12	5.42e-12
2	1 dan 3	2.36e-12	2.53e-12	2.37e-12
3	1 dan 4	2.11e-12	2.21e-12	2.12e-12
4	1 dan 5	1.87e-12	1.95e-12	1.88e-12
5	1 dan 6	1.72e-12	1.82e-12	1.73e-12
6	1 dan 7	1.99e-12	2.15e-12	2.00e-12
7	1 dan 8	5.01e-12	5.53e-12	5.07e-12
8	2 dan 3	5.69e-12	6.21e-12	5.75e-12
9	2 dan 4	2.34e-12	2.50e-12	2.36e-12
10	2 dan 5	2.12e-12	2.22e-12	2.13e-12
11	2 dan 6	1.96e-12	2.03e-12	1.96e-12
12	2 dan 7	2.06e-12	2.15e-12	2.07e-12
13	2 dan 8	2.22e-12	2.38e-12	2.23e-12
14	3 dan 4	5.57e-12	6.07e-12	5.63e-12
15	3 dan 5	2.09e-12	2.25e-12	2.11e-12
16	3 dan 6	1.77e-12	1.86e-12	1.78e-12
17	3 dan 7	1.84e-12	1.92e-12	1.84e-12
18	3 dan 8	1.83e-12	1.93e-12	1.84e-12
19	4 dan 5	4.82e-12	5.31e-12	4.88e-12
20	4 dan 6	2.01e-12	2.16e-12	2.02e-12
21	4 dan 7	1.93e-12	2.02e-12	1.94e-12
22	4 dan 8	1.89e-12	1.97e-12	1.90e-12
23	5 dan 6	5.37e-12	5.87e-12	5.43e-12
24	5 dan 7	2.39e-12	2.55e-12	2.41e-12
25	5 dan 8	2.11e-12	2.20e-12	2.12e-12
26	6 dan 7	5.75e-12	6.24e-12	5.81e-12
27	6 dan 8	2.27e-12	2.43e-12	2.28e-12
28	7 dan 8	5.18e-12	5.69e-12	5.24e-12

Pengukuran Obyek batang prespex

Pengukuran nilai kapasitansi untuk obyek batang prespex dilakukan dengan berbagai posisi obyek sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4 (a), 4 (b) dan 4 (c). Hasil

pengukuran dan citra yang dihasilkan dengan metode PBL ditunjukkan pada Gambar 6.

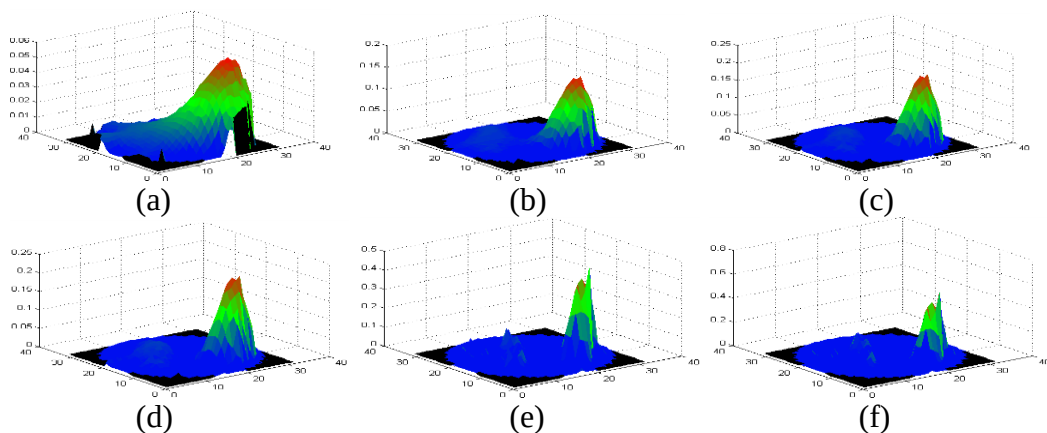


Gambar 6. Menunjukkan nilai kapasitansi dan citra untuk obyek (a) di antara tengah dan pinggir (b) di tengah dan (c) di pinggir,

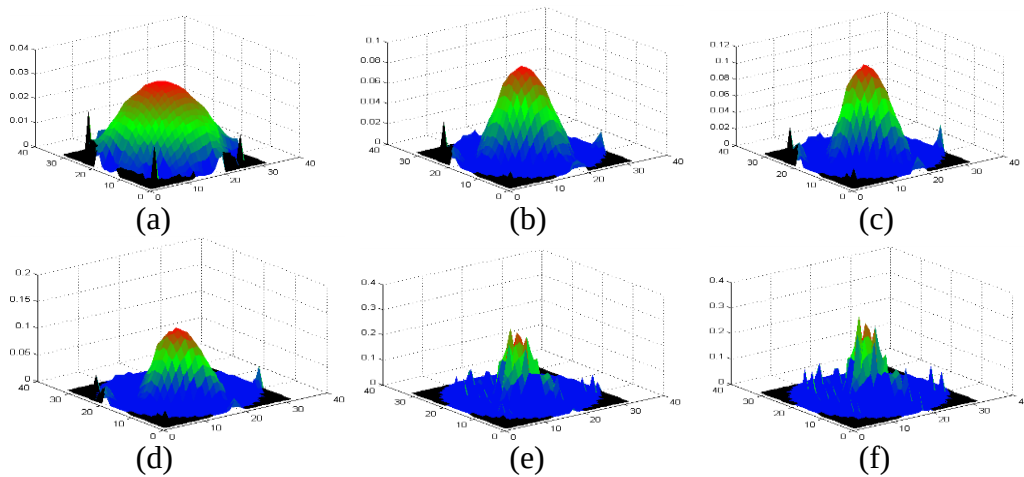
Dari Gambar 6 (a) terlihat bahwa untuk sensor dengan obyek di antara tengah dan pinggir (dekat elektroda 3), nilai kapasitansinya lebih tinggi dibandingkan nilai kapasitansi untuk elektroda yang berdekatan yaitu elektroda 1 dan 2, dan elektroda 1 dan 8. Sedangkan untuk posisi obyek di tengah, pada Gambar 6 (b), nilai kapasitansinya berlawanan dengan nilai kapasitansi sensor tanpa obyek. Nilai kapasitansi untuk elektroda yang berdekatan (misalnya elektroda 1 dan 2) lebih kecil dibandingkan dengan nilai kapasitansi untuk elektroda yang berjauhan (misalnya 1 dan 4). Hal ini dikarenakan medan listrik yang melintasi obyek dipengaruhi oleh dielektrik prespex yang nilai permitivitasnya jauh lebih tinggi dari udara. Sedangkan medan listrik untuk elektroda yang berdekatan pengaruh obyek tidak signifikan karena lintasan medan listrik hampir tidak dipengaruhi obyek. Untuk posisi obyek di pinggir, pada Gambar 6 (c), nilai kapasitansi tertinggi terletak diantara elektroda 1 dan 2 di mana obyek terletak di antara elektroda tersebut. Gambar 6 yang kanan menunjukkan posisi obyek. Dari gambar tersebut terlihat bahwa posisi obyek dapat direkonstruksi dengan tepat. Namun demikian besar obyek yang direkonstruksi jauh lebih besar dibandingkan obyek sebenarnya. Untuk

mengatasi hal ini diperlukan metode iteratif yang mana nilai kapasitansi hasil pengukuran dan hasil kalkulasi dibandingkan, dan hasil perbandingan tersebut digunakan untuk memperbaharui citra. Iterasi diulang hingga perbedaan (*error*) antara nilai kapasitansi terukur dengan hasil kalkulasi mencapai nilai yang telah ditentukan atau hingga jumlah iterasi yang ditentukan telah tercapai.

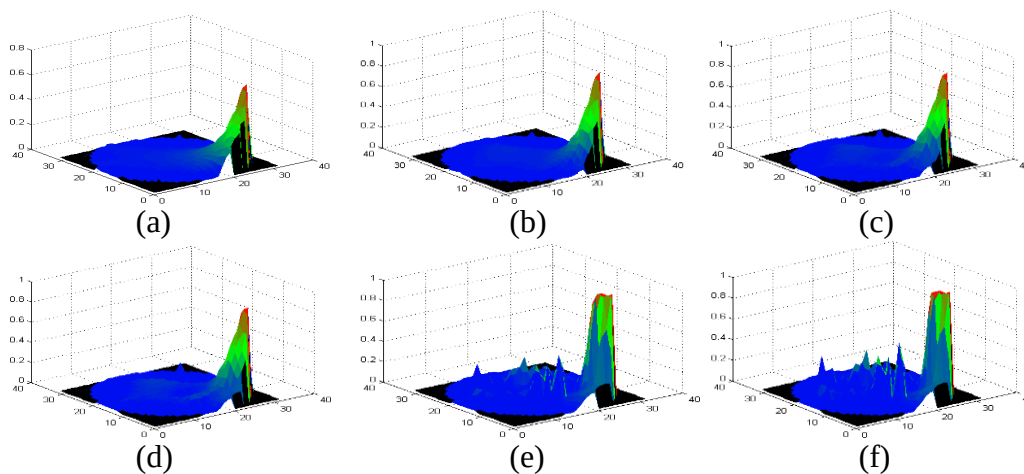
Gambar 7, 8 dan 9 menunjukkan hasil rekonstruksi dengan metoda proyeksi balik linear iteratif dengan jumlah iterasi masing-masing 10, 30, 50, 1000 dan 1500 untuk obyek dengan berbagai posisi. Untuk rekonstruksi citra tanpa iterasi, metoda yang digunakan sama dengan metoda proyeksi balik linear. Dari ketiga Gambar terlihat bahwa semakin banyak iterasinya, maka besar obyek yang direkonstruksi akan semakin mendekati besar obyek sesungguhnya. Namun demikian jika jumlah iterasi terlalu banyak, akan muncul *artifact* pada citra yang dihasilkan sebagaimana ditunjukkan pada iterasi 1000 dan 1500. Untuk keperluan praktis, jumlah iterasi biasanya dibatasi hingga 50 kali. Pembatasan jumlah iterasi ini disamping untuk mencegah munculnya *artifact*, juga untuk mempercepat komputasi.



Gambar 7. Tampilan PBLI, temp41000.dat. (a) tanpa iterasi. (b) 10 iterasi. (c) 30 iterasi. (d) 50 iterasi. (e) 1000 iterasi. (f) 1500 iterasi.



Gambar 8. Tampilan PBLI, temp51000.dat. (a) tanpa iterasi. (b) 10 iterasi. (c) 30 iterasi. (d) 50 iterasi. (e) 1000 iterasi. (f) 1500 iterasi.

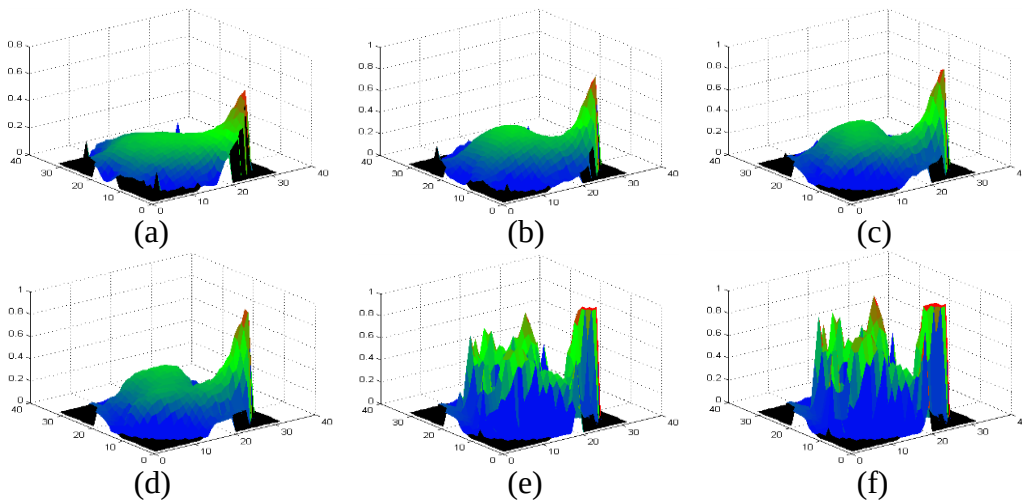


Gambar 9. Tampilan PBLI, temp71000.dat. (a) tanpa iterasi. (b) 10 iterasi. (c) 30 iterasi. (d) 50 iterasi. (e) 1000 iterasi. (f) 1500 iterasi.

Pengukuran Obyek Pipet Plastik

Hasil pengukuran kapasitansi untuk obyek pipet pada dasarnya mirip dengan hasil pengukuran obyek batang prespex hanya saja nilai kapasitansinya lebih kecil. Demikian juga dengan posisi obyek dapat direkonstruksi secara tepat. Gambar 10 menunjukkan hasil rekonstruksi citra pipet dengan menggunakan metode PBL dan PBLI untuk posisi obyek di pinggir. Seperti halnya pada rekonstruksi citra

batang prespex di atas, proses iterasi membuat citra yang dihasilkan mendekati ukuran obyek yang sesungguhnya. Akan tetapi jika iterasi dilakukan secara terus menerus maka munculah artifact pada citra yang direkonstruksi seperti pada Gambar 10 (e) dan 10 (f). Untuk menghindari hal ini maka jumlah iterasi juga dibatasi sebanyak 50 kali.



Gambar 10. Tampilan PBLI, temp131000.dat. (a) tanpa iterasi. (b) 10 iterasi. (c) 30 iterasi. (d) 50 iterasi. (e) 1000 iterasi. (f) 1500 iterasi.

E. Kesimpulan dan Saran

Rekonstruksi citra dengan menggunakan metoda proyeksi balik linear dapat menentukan posisi obyek yang direkonstruksi secara tepat namun ukuran obyek jauh lebih besar dari ukuran obyek sesungguhnya. Proses iteratif dapat digunakan untuk menghasilkan citra yang sesuai dengan ukuran obyek. Jumlah iterasi harus dibatasi agar tidak memunculkan *artifact* pada citra yang direkonstruksi. Jumlah iterasi sebanyak 50 kali sudah dapat menghasilkan citra yang sesuai dengan obyek sesungguhnya baik dari posisi maupun dari ukurannya.

Daftar Pustaka

- [1] Isaksen, O. 1996. "A review of reconstruction techniques for capacitance tomography". Meas. Sci. Technol, Vol.7. United Kingdom.
- [2] Garcia-Nocetti, D.F., Gamio J.C., Aguilar L.A. 2003. "Parallel Realisation of the Linear-Back Projection Algorithm for Capacitance Tomography Using TMS320C6701 Digital Signal Processors". Proceeding of 3rd World Congress on Industrial Process Tomography. Banff, Canada.
- [3] Spink, D. M., Noras, J. M. 1998, "Recent developments in the solution of the forward problem in capacitance tomography and implications for iterative reconstruction". Nondestr. Test. Eval., Vol. 14.
- [4] Komarudin, M., Lionheart, W. R. B., and York, T. A. 2003. "Prototype Hardware for Finite Element Modelling", Proceeding of Proceeding of 3rd World Congress on Industrial Process Tomography, Banff, Canada.
- [5] Yang, W. W., Spink, D. M., York, T. A., McCann, H. 1999. "An image-reconstruction algorithm based on Landweber's iteration method for electrical-capacitance tomography". Meas. Sci. Technol, 10.