



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN ELECTRICAL CAPACITANCE VOLUME
TOMOGRAPHY (ECVT) UNTUK DETEKTOR SINYAL DAN
REKONSTRUKSI CITRA OTAK MANUSIA**

SRI ELSA FATMI

0606068726

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

PROGRAM STUDI S1 FISIKA

DEPOK

JUNI 2010



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN ELECTRICAL CAPACITANCE VOLUME
TOMOGRAPHY (ECVT) UNTUK DETEKTOR SINYAL DAN
REKONSTRUKSI CITRA OTAK MANUSIA**

SKRIPSI

Diajukan sebagai syarat untuk memperoleh gelar sarjana

Oleh

**SRI ELSA FATMI
0606068726**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI S1 FISIKA
PEMINATAN FISIKA MEDIS DAN BIOFISIKA
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Sri Elsa Fatmi

NPM : 0606068726

Tanda Tangan :

Bulan : Juni 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Sri Elsa Fatmi
NPM : 0606068726
Program Studi : S1 Fisika
Judul Skripsi : Pengembangan Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT) untuk Detektor Sinyal dan Rekonstruksi Citra Otak Manusia

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi S1 Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Warsito ()

Pembimbing : Dwi Seno Kuncoro, M.Si ()

Penguji : Prof. Dr. Djarwani S.S ()

Penguji : Dr. Sastra Kusumawijaya ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 24 Juni 2010

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan karunia, nikmat kesehatan dan kesempatan kepada kita semua sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi tugas akhir tepat waktu.

Shalawat dan salam tak henti-hentinya penulis kirimkan kepada Rasulullah SAW, yang telah mengajarkan kebaikan kepada umat manusia, membawa kealam yang penuh dengan cahaya ilmu.

Penelitian ini memberikan banyak pelajaran kepada penulis, memberikan pengalaman baik suka maupun duka. Dalam pelaksanaannya, penulis banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak baik dorongan moril maupun bantuan langsung, sehingga perkenankan rasa terimakasih penulis haturkan pada kepada:

1. Ayahanda tercinta **Darmis “Apa” Soyata**, Ibunda tersayang **Rosmineti “Etek”**, **Widya Lestari “Uni”**, **Refi Harisman “Uda”** atas kasih sayang, doa yang tak henti-hentinya, dukungan dan motivasi kepada penulis, mengajarkan kepada penulis bagaimana untuk tidak mudah menyerah, kesabaran dan keikhlasan. Penyemangat dikala penulis merasa pesimis.
2. Bapak **Dr. Warsito** selaku Pembimbing I dan Direktur **Centre for Tomography Research (CTECH Labs)** yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk bergabung dengan penelitian beliau dan dengan penuh kesabaran membimbing serta membina penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak **Dwi Seno K, M. Si** selaku Pembimbing II yang telah memberikan arahan kepada penulis.
4. **Prof. Dr. Djarwani S. S** dan **Dr. Sastra K. W** sebagai Dosen Penguji.
5. **Almushfi Saputra, S. Si**, **Mukhlisin, S. Si**, **Marlin Ramadhan Baidillah, S. Si** yang telah memberikan banyak bantuan, memberikan solusi ketika penulis menemukan kesulitan.
6. Sahabat seperjuangan **Edwar Junior 2006: Mursilatun, Puspita Hudanyanti, Habib Syeh A, Rhyan Edwin** yang telah menjadi tempat berbagi keluh kesah dan suka duka selama penelitian.

7. Semua jajaran pegawai **PT. Edwar, Dr. Edi Syukur, Mas Yanto, Mas Cepi, Mas Ari, Mas Rohmadi, Ka Tarto** yang sangat banyak membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi.
8. **Mba Habibah** dan keluarga tempat ngekost selama mengerjakan skripsi, atas kamar yang nyaman dan luas.
9. **Dosen-Dosen Fisika UI** yang telah mengajarkan ilmu yang bermanfaat kepada penulis.
10. Teman-teman **Fisika 2006, Lia, Mursi, Heni, Pus2, Ricky, Atul, Dedew, Faisal, Ketang, Dika** yang selalu saling menyemangati, mendoakan, *share each other* tentang skripsi, menemani malam-malam penulis ketika begadang.
11. Sahabat tercinta **Intan, Lia, Heni, Dini, Mursi, Puspita, Yaya dan Dedew, Nji** yang telah memberikan waktu-waktu yang indah dan tak tergantian.
12. Teman-teman Fisika Medis 2006, **Vivi, Tante, Emi, Fauzi, Agus, Lisday, dan Lisrin**, kuliah terasa lebih menyenangkan karena ada kalian.
13. **Fisika 2006** yang selalu berbagi cerita suka dan duka selama kuliah, berjuang bersama-sama.
14. **Fisika 2005 & 2004** atas informasinya, dukungannya.
15. Serta semua pihak yang ikut membantu dalam penyelesaian skripsi ini baik secara langsung maupun tidak langsung.

Menyadari keterbatasan pengalaman dan kemampuan yang penulis miliki, sudah tentu terdapat kekurangan dalam penulisan skripsi ini serta kemungkinan jauh dari sempurna, untuk itu penulis tidak menutup diri dari segala saran dan kritik yang sifatnya membangun dari semua pihak. Akhir kata semoga Allah SWT membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membantu perkembangan dunia fisika medis dalam bidang imaging non destruktif. Amin

Depok, Juni 2010

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai civitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Sri Elsa Fatmi
NPM : 0606068726
Program Studi : S1 Fisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

PENGEMBANGAN ELECTRICAL CAPACITANCE VOLUME TOMOGRAPHY (ECVT) UNTUK DETEKTOR SINYAL DAN REKONSTRUKSI CITRA OTAK MANUSIA

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Bulan : Juni 2010

Yang menyatakan

(Sri Elsa Fatmi)

Nama : Sri Elsa Fatmi
Program Studi : S1 Fisika
Judul Skripsi : Pengembangan Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT) untuk Detektor Sinyal dan Rekonstruksi Citra Otak Manusia

ABSTRAK

Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT) untuk detektor sinyal dan rekonstruksi citra otak manusia menggunakan nilai kapasitansi yang dipengaruhi oleh rapat muatan. Perbedaan aktifitas otak menghasilkan distribusi rapat muatan yang berbeda, sehingga membentuk sinyal listrik otak yang berbeda. Penelitian dilakukan secara simulasi dan eksperimen. Simulasi dengan COMSOL Multiphysics 3.4 menggunakan variasi rapat muatan untuk mensimulasikan aktivitas otak manusia. Eksperimen menggunakan otak manusia dengan memberikan perlakuan yang berbeda. Hasil simulasi mampu merekonstruksi citra. Sedangkan hasil eksperimen mampu mendeteksi sinyal dan merekonstruksi otak manusia, tetapi perubahan aktifitas otak hanya bisa dibedakan oleh beberapa sensor ECVT.

Kata kunci :
ECVT, Otak manusia, rapat muatan, detektor sinyal, rekonstruksi citra.

Name : Sri Elsa Fatmi
Study Program : Bachelor Degree of physics
Title : Development of Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT) for Signal Detector and Image Reconstruction of Human Brain

ABSTRACT

Electrical capacitance volume tomography (ECVT) is attempted to detect signal and reconstruct image of human brain using capacitance values which influenced by charge density. Differences in activity of human brain produces different distribution of charge density to form different electric signal of human brain. This research was conducted by simulation and experiment. Simulation with COMSOL Multiphysics 3.4 using variations of the charge density is used to simulate the activity of human brain. The experiment used real human head by providing different mental task. The simulation result were able to reconstruct image. Whereas, experiment result can detect signal of brain, but the change of activity only can be distinguished by some of ECVT sensor.

Keywords:

ECVT, human brain, charge density, signal detector, reconstruct image

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK.....	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Pembatasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Metode Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Otak Manusia	6
2.2 Sel Saraf	8
2.3 Potensial Listrik Otak Manusia	10
2.4 Gelombang Otak Manusia.....	16
2.5 Perkembangan Detektor Sinyal dan Tomografi Otak Manusia.....	19
2.5.1 Elektroencepalografi (EEG)	19
2.5.2 Functional Magnetik Resonance Imaging (fMRI).....	19
2.5.3 CT-Scan.....	20
2.5.4 Positron Emission Tomography (PET)	20
2.5.5 Electrical Impedance Tomography (EIT).....	20
2.5.6 Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT).....	21
BAB III LANDASAN TEORI.....	22
3.1 Kelistrikan Otak Manusia	22
3.2 Prinsip Electrical Capacitance Volume Tomography.....	23
3.2.1 Teori Medan Elektromagnet	23
3.2.1.1 Teorema Gauss	23
3.2.1.2 Persamaan Poisson	26
3.2.1.3 Kapasitansi	27
3.3.2 Sensitivitas Matriks.....	29
3.3 Rekonstruksi Citra ECVT	29
3.3.1 Problema Maju.....	30
3.3.2 Problema Inversi	30
3.4 Metode Rekonstruksi Citra ECVT	30
3.4.1 Linear Back Projection (LBP)	30
3.4.2 Metode Iterasi (Landweber Equation).....	32
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN.....	34

4.1 Komputasi Sistem ECVT	35
4.1.1 Desain Sensor	35
4.1.2 Parameter Fisika.....	36
4.1.2.1 Parameter Subdomain.....	36
4.1.2.2 Parameter Boundary	36
4.1.2.3 Sensitivitas Matriks	37
4.2 Simulasi Sistem ECVT	39
4.3 Metode Eksperimen	42
4.3.1 Alat dan Bahan.....	42
4.3.2 Pengambilan Data Kapasitans	43
4.3.3 Mental Task	43
4.4 Rekonstruksi Citra	44
4.4.1 Metode Landweber Equation.....	44
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	47
5.1 Distribusi Sensitivitas Matriks	47
5.2 Hasil Rekonstruksi Simulasi	49
5.3 Hasil Eksperimen.....	53
BAB VI PENUTUP	77
6.1 Kesimpulan	77
6.2 Saran	77
DAFTAR REFERENSI.....	78
LAMPIRAN A.....	80
LAMPIRAN B	82

DAFTAR TABEL

	halaman
Tabel 5.1 Pemberian Mental Task dan Tujuan.....	54



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Pengelompokkan Sinyal Otak Manusia	1
Gambar 2.1 Pembagian Otak Manusia	7
Gambar 2.2 Pembagian Lapisan <i>Cortex</i>	7
Gambar 2.3 Jenis – Jenis Neuron	9
Gambar 2.4 Struktur Neuron	10
Gambar 2.5 <i>Resting Potential</i>	11
Gambar 2.6 (a) Neurotransmisi	12
Gambar 2.6 (b) Potensial Aksi	12
Gambar 2.7 (a) RepolarisasiHyperpolarisasi.....	13
Gambar 2.7 (b) Hyperpolarisasi	13
Gambar 2.8 <i>Electrical dan Chemical Neurotransmission</i>	14
Gambar 2.9 Sinaps Listrik.....	15
Gambar 2.10 Sinaps Kimia	16
Gambar 2.11 Gelombang Alpha.....	17
Gambar 2.12 Gelombang Beta	18
Gambar 2.13 Gelombang Theta.....	18
Gambar 2.14 Gelombang Delta	19
Gambar 3.1 Sistem ECVT.....	23
Gambar 3.2 Hukum Gauss pada Medium Dielektrik	25
Gambar 3.3 Kapasitans ECVT	28
Gambar 3.4 Metode LBP	31
Gambar 3.5 Iterasi Landweber	32
Gambar 4.1 Skema Penelitian	34
Gambar 4.2 Model Desain Sensor	35
Gambar 4.3 Menu <i>Subdomain Setting</i>	37
Gambar 4.4 Menu <i>Boundary Setting</i>	37
Gambar 4.5 Hasil Proses <i>Meshing</i>	38
Gambar 4.6 Distribusi Medan Listrik	38
Gambar 4.7 Model Sensor dan Bola.....	39
Gambar 4.8 Menu <i>Subdomain Setting</i> Objek Bola.....	40
Gambar 4.9 Hasil Mesh Bola	41
Gambar 4.10 Solve Bola.	41
Gambar 4.11 Menu <i>Post Prossesing</i> Objek Bola	42
Gambar 4.12 Eksperimen Sistem ECVT	42
Gambar 4.13 Langkah Rekonstruksi Metode Landweber.....	45
Gambar 5.1 (a) Grafik Distribusi Sensitivitas Ternormalisasi pada Sumbu Z.....	47
Gambar 5.1 (b) Model Sensor Posisi xz	47
Gambar 5.1 (c) Plot Sensitifitas 3D untuk Pasangan Sensor 1 dan 2.....	48
Gambar 5.2 Model Geometri Simulasi Rekonstruksi Citra Sinyal Otak.....	50
Gambar 5.3 Bola dengan jari-jari 7, permitivitas 30 dan ρ adalah 0	50
Gambar 5.3 (a) Sebelum Rekonstruksi	50
Gambar 5.3 (b) Setelah Rekonstruksi	50
Gambar 5.4 Bola dengan jari-jari 7, permitivitas 30 dan rapat muatan (ρ) adalah 5 C/m ³	51
Gambar 5.4 (a) Hasil Rekonstruksi Full	51

Gambar 5.4 (b) Hasil Rekonstruksi Sebagian	51
Gambar 5.5 Bola dengan jari-jari 7, rapat muatan (ρ) adalah 0.1 C/m^3 dan permitivitas 30	53
Gambar 5.5 (a) Hasil Rekonstruksi Full	53
Gambar 5.5 (b) Hasil Rekonstruksi Sebagian	53
Gambar 5.6 Metode Eksperimen	54
Gambar 5.7 Hasil Rekonstruksi Eksperimen Objek A	56
Gambar 5.8 (a) Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 6	57
Gambar 5.8 (b) Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 8	57
Gambar 5.9 Grafik Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 6 dari Objek A	58
Gambar 5.10 Grafik Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 8 dari Objek A	58
Gambar 5.11 Hasil Rekonstruksi Pasangan 61 dan 81 Objek A	60
Gambar 5.12 Hasil Rekonstruksi Objek B	62
Gambar 5.13 Grafik Nilai Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 6 Objek B	63
Gambar 5.14 Grafik Nilai Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 8 Objek B	63
Gambar 5.15 Hasil Rekonstruksi Pasangan 61 dan 81 Objek B	64
Gambar 5.16 Hasil Rekonstruksi Objek C	65
Gambar 5.17 Grafik Nilai Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 6 Objek C	65
Gambar 5.18 Grafik Nilai Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 8 Objek C	67
Gambar 5.19 Hasil Rekonstruksi Pasangan 61 dan 81 Objek C	68
Gambar 5.20 Hasil Rekonstruksi Objek D	69
Gambar 5.21 Grafik Nilai Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 6 Objek D	70
Gambar 5.22 Grafik Nilai Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 8 Objek D	70
Gambar 5.23 Hasil Rekonstruksi Pasangan 61 dan 81 Objek D	72
Gambar 5.24 Hasil Rekonstruksi Objek E	72
Gambar 5.25 Grafik Nilai Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 6 Objek E	74
Gambar 5.26 Grafik Nilai Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 8 Objek E	74
Gambar 5.27 Hasil Rekonstruksi Pasangan 61 dan 81 Objek E	75
Gambar 5.28 Sinyal Utama Setelah Dekomposisi Wavelet	76
Gambar 5.29 Sinyal Noise	76

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A	80
LAMPIRAN B.....	82



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Otak merupakan alat untuk memproses data tentang lingkungan internal dan eksternal tubuh yang diterima reseptor pada alat indera. Ukuran otak hanya sebesar 2% dari keseluruhan berat badan manusia, tapi seluruh kegiatan tubuh dikontrol oleh organ yang bernama otak ini. Komunikasi antara sel dan jaringan dikendalikan oleh otak. Oleh karena itu otak merupakan bagian terpenting pada tubuh manusia. Jaringan otak manusia hidup menghasilkan gelombang listrik yang berfluktuasi. Gelombang listrik ini disebut *brainwave* atau gelombang otak.

Berdasarkan riset selama bertahun-tahun di berbagai negara maju, frekuensi gelombang otak manusia berbeda-beda untuk setiap fase sadar, rileks, tidur ringan, tidur nyenyak, panik, dan sebagainya. Melalui penelitian yang panjang, akhirnya para ahli syaraf (otak) sependapat bawah gelombang otak berkaitan dengan kondisi pikiran. Dalam satu waktu, otak manusia menghasilkan berbagai gelombang otak secara bersamaan. Akan tetapi selalu ada jenis gelombang otak yang paling dominan, yang menandakan aktivitas otak saat itu. Gelombang otak menandakan aktifitas pikiran seseorang.



Gambar 1.1 Pengelompokan Sinyal Otak Manusia [1].

Alat yang biasa digunakan dalam pendeteksian sinyal otak manusia adalah *electroencephalogram* (EEG). *Electroencephalogram* merekam aktifitas listrik otak manusia dengan meletakkan elektroda pada kulit kepala manusia sehingga diperoleh sinyal lemah otak manusia yang telah diperkuat dengan suatu faktor penguatan tertentu. Dengan menggunakan EEG, bisa diperoleh sinyal otak manusia untuk berbagai aktifitas otak.

Karena kebutuhan di dunia medis semakin meningkat, berkembang teknologi pencitraan otak manusia yang dapat melihat anatomi otak manusia. Beberapa alat pencitraan tersebut adalah radiografi sinar-X konvensional, CT Scan, MRI, SPECT-CT, PET. Modalitas yang digunakan adalah sinar-X untuk sinar-X konvensional, CT Scan, SPECT-CT dan PET. Selain itu menggunakan medan magnet untuk pesawat MRI. Modalitas yang digunakan ini ada yang bersifat invasive (memasukkan) seperti SPECT-CT dan PET yang memasukkan sumber radioaktif kedalam pembuluh darah manusia yang akan mengalir ke otak, radiasi sumber radioaktif dari otak ini akan ditangkap oleh detektor, selanjutnya direkonstruksi pada computer untuk menghasilkan citra dari otak tersebut. Disamping itu beberapa alat pencitraan ini masih bersifat instrusive (merusak), seperti penggunaan sinar-X yang sedikit banyaknya akan mempengaruhi otak manusia, biasanya disebut dengan efek stokhastik.

Baik *electroencephalogram* maupun alat pencitraan diagnostik untuk otak manusia mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing. *Electroencephalogram* hanya bisa melihat sinyal listrik otak sebagai fenomena otak manusia pada kondisi tertentu tanpa mengetahui anatomi dari kondisi otak pada saat itu, sedangkan alat pencitraan otak, hanya dapat melihat anatomi otak manusia tanpa melihat adanya sinyal listrik dan mengetahui fenomena otak pada kondisi tertentu. Kebutuhan untuk memperoleh informasi otak secara detail semakin meningkat untuk mengetahui fenomena otak dan anatomi otak pada kondisi tertentu. Oleh karena itu dilakukan penelitian untuk melihat fenomena otak pada kondisi tertentu beserta anatominya dengan pengembangan teknik pencitraan menggunakan modalitas kapasitansi listrik atau disebut dengan Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT) yang memberikan harapan untuk memperoleh dua sekaligus yaitu sinyal dan citra otak pada kondisi tertentu.

Disamping itu *Electrical Capacitance Volume Tomography* lebih murah dibandingkan dengan alat pencitraan otak lainnya.

ECVT merupakan teknik pencitraan yang memanfaatkan nilai kapasitansi dari objek berbentuk volum yang dikelilingi oleh multi sensor [2]. Sensor-sensor yang mengelilingi objek tersebut mengukur nilai kapasitansi listrik yang dipengaruhi oleh distribusi permitivitas yang terdapat di dalam objek yang kemudian direkonstruksi dengan algoritma yang sesuai untuk mendapatkan citra dan untuk mendeteksi sinyal lemah otak manusia. Algoritma tertentu digunakan untuk memprediksi nilai distribusi permitivitas dari data kapasitansi (*invers problem*) dan untuk menghitung kapasitansi dari nilai prediksi distribusi permitivitas (*forward problem*) yang dihitung secara iterasi.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan diteliti dalam penelitian ini adalah pengembangan ECVT untuk detektor sinyal dan rekonstruksi otak manusia. Pengembangan yang dilakukan berkaitan dengan penggunaan ECVT untuk memperoleh rekonstruksi otak manusia pada berbagai macam kondisi aktifitas sinyal otak, diharapkan dapat mendeteksi sinyal lemah otak manusia dan memahami fenomena citra otak pada kondisi otak tertentu. Untuk memperoleh hal ini dilakukan dengan menggunakan data kapasitansi yang diperoleh dari sensor yang diletakkan disekitar kepala manusia, dari nilai kapasitansi itu dapat dilakukan rekonstruksi citra otak manusia.

1.3 Pembatasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada pembahasan mengenai nilai kapasitansi terhadap setiap nilai rapat muatan yang diberikan pada ECVT pada saat menggunakan objek otak manusia. Dari kapasitansi ini diperoleh rekonstruksi citra otak manusia. Hasil citra otak manusia yang diperoleh akan dibandingkan dengan citra otak yang diperoleh pada kondisi otak lainnya.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian bertujuan untuk:

- a. Mencari sensitifitas matriks untuk desain sensor yang digunakan.
- b. Mengaplikasikan ECVT sebagai detektor sinyal lemah otak manusia.

- c. Mengembangkan system ECVT untuk rekonstruksi citra sinyal otak manusia.

1.5 Metode Penelitian

Metode penelitian yang akan dilakukan dibagi dalam tahap-tahap berikut:

1. Studi literatur

Pada tahap ini akan dipelajari mengenai prinsip dasar dari ECVT dan konsep dasar dari sinyal otak manusia serta algoritma yang diperlukan untuk memperoleh citra dan sinyal otak manusia.

2. Simulasi dan Eksperimen

Simulasi dilakukan dengan menggunakan software COMSOL Multiphysics 3.4, dengan melakukan desain sensor untuk kepala manusia dilakukan untuk memperoleh data sensitifitas sensor dan data kapasitansi sebagai acuan untuk pencitraan otak manusia. Selanjutnya melakukan eksperimen dengan menggunakan sensor yang sudah dibuat, nilai kapasitansi yang diperoleh diolah dengan algoritma ILBP pada software Matlab R2007b untuk digunakan pada rekonstruksi citra dan memperoleh sinyal otak manusia. Setelah itu dilakukan perbandingan nilai kapasitansi antara kondisi otak tertentu dengan kondisi otak lainnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika pada penulisan ini dibagi menjadi 6 bab, yang masing-masing terdiri dari beberapa sub-bab untuk mempermudah penjelasan. Penulisan bab-bab dilakukan sebagai berikut :

BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini berisi tentang penjelasan secara umum latar belakang permasalahan, perumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan penelitian, dan sistematika.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini penulis menguraikan tentang anatomi dan potensial listrik otak manusia.

BAB III. LANDASAN TEORI

Pada bab ini penulis menguraikan teori-teori dasar yang digunakan pada penulisan, simulasi dan analisa dalam skripsi ini.

BAB IV. METODOLOGI PENELITIAN

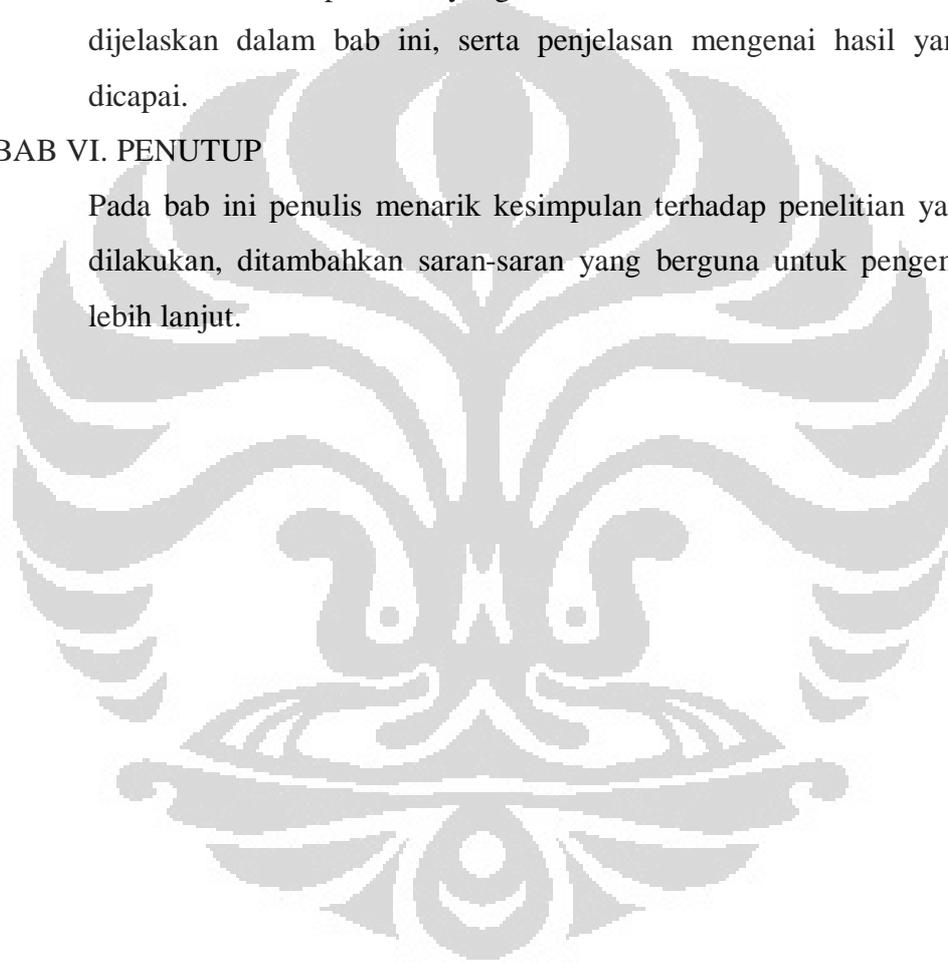
Bab ini berisi tahapan-tahapan simulasi dan eksperimen untuk memperoleh hasil yang diinginkan dengan menggunakan program MATLAB R2007b dan COMSOL Multiphysics 3.4.

BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi dan eksperimen yang telah dilakukan memberikan hasil dan dijelaskan dalam bab ini, serta penjelasan mengenai hasil yang telah dicapai.

BAB VI. PENUTUP

Pada bab ini penulis menarik kesimpulan terhadap penelitian yang telah dilakukan, ditambahkan saran-saran yang berguna untuk pengembangan lebih lanjut.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada Bab II akan dibahas tentang otak manusia, bagian-bagiannya beserta fungsi masing-masingnya. Selain juga dibahas tentang mekanisme timbulnya potensial listrik pada otak manusia.

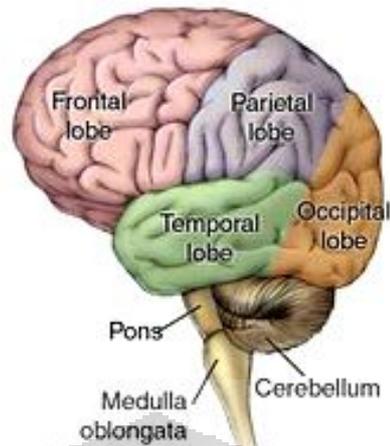
2.1 Otak Manusia

Otak adalah bagian terpenting dari tubuh manusia. Otak mengendalikan seluruh aktifitas tubuh manusia dengan suatu sistem yang disebut sistem saraf. Otak mengatur dan mengkoordinasikan sebagian besar fungsi tubuh manusia, keseimbangan cairan tubuh dan suhu tubuh.

Otak terbentuk dari dua jenis sel yaitu sel glia dan neuron. Neuron adalah sel yang menghantarkan dan mengolah informasi berupa rangsangan dalam bentuk sinyal listrik. Neuron menerima input informasi dari neuron lain, kemudian mengolah informasi tersebut dan mengeluarkan output untuk dihantarkan ke neuron lainnya. Neuron memproses semua informasi yang datang yaitu informasi motorik, sensory, dan kognitif [3]. Sel glia adalah sel penunjang, melindungi dan menutrisi fungsi kerja dari neuron [4]. Jumlah neuron pada otak manusia adalah sekitar 100 milyar, sedangkan sel glia adalah 50 kali lebih banyak dari sel neuron. Berdasarkan fungsinya otak manusia dapat dibagi kedalam 3 bagian utama yaitu otak besar, otak tengah dan otak belakang.

a. Otak besar

Bagian paling besar dari otak manusia adalah otak besar. Otak besar dibagi kepada dua belahan (*hemisphere*) yaitu kanan dan kiri. Belahan kiri mengatur fungsi tubuh bagian kanan, dan begitu sebaliknya. Masing-masing belahan otak ini terdiri dari 4 lobus yaitu frontal, parietal, temporal dan occipital. Setiap bagian ini mempunyai fungsi tertentu :

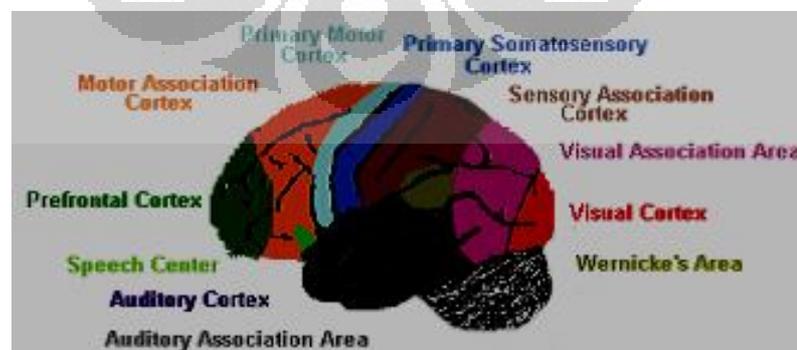


Gambar 2.1 Pembagian Otak Manusia

- a. Lobus Frontal : Tingkah laku, proses berfikir, perhatian, berfikir kreatif, emosi, intelektual, inisiatif, mengkoordinasi pergerakan, penciuman, pergerakan otot, keahlian motorik.
- b. Lobus Occipetal : Penglihatan, Membaca.
- c. Lobus Parietal : Sentuhan, respon terhadap rangsangan internal, kombinasi sensori dan pemahaman, fungsi bahasa dan membaca.
- d. Lobus Temporal : Memori pendengaran, musik, ketakutan, pengucapan, beberapa tindakan dan emosi.

Otak besar terdiri dari 2 lapisan utama yaitu :

- a. Lapisan luar (*Cortex*) adalah merupakan lapisan tipis berwarna abu-abu (*grey matter*) yang berlipat-lipat merupakan tempat dimana sel neuron berada. Pada lapisan ini juga terdapat pembagian fungsi, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Pembagian Lapisan Cortex [5].

- b. Lapisan dalam merupakan lapisan yang berwarna putih (*white matter*) yang banyak mengandung sel glia.

b. Otak Tengah

Otak tengah merupakan bagian yang cukup kecil dan terletak didepan otak belakang. Otak ini berfungsi untuk membantu pergerakan mata, menyempit dan melebarnya pupil mata, refleks pendengaran, dan juga mengandung pusat pengendalian yang keseimbangan serta serabut saraf yang menghubungkan bagian belakang otak dengan bagian depan otak.

c. Otak Belakang

Otak belakang terdiri dari tiga bagian utama yaitu :

a. Otak kecil (*Cerebellum*)

Otak kecil adalah bagian terbesar dari otak belakang yang berada dibawah lobus occipital. Otak kecil juga terdiri dari dua belahan (kiri dan kanan) berfungsi sebagai pengatur keseimbangan tubuh. Sikap dan posisi tubuh, serta koordinasi gerakan otot ketika sadar.

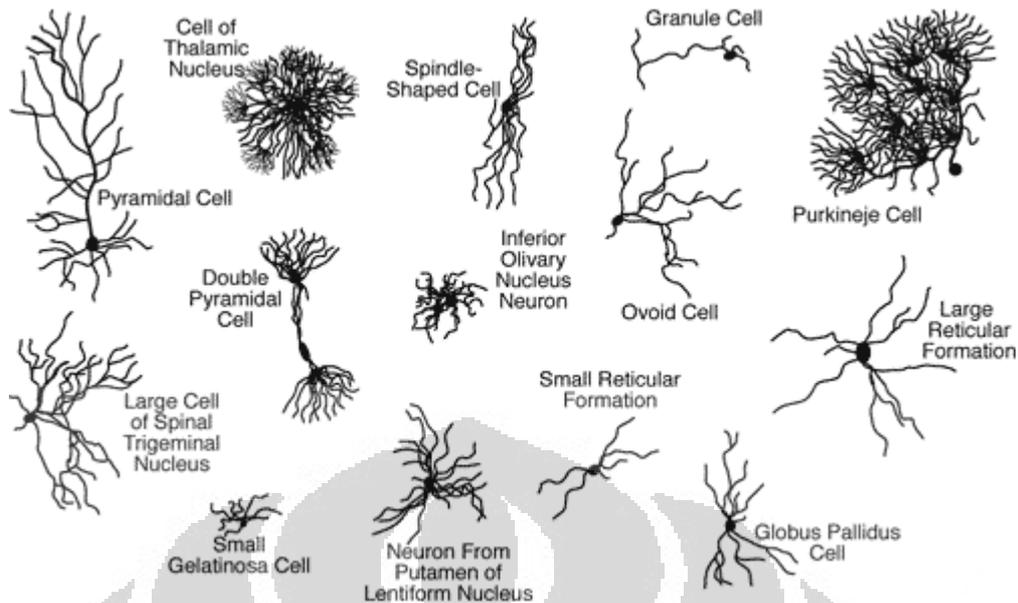
b. Jembatan Varol

Jembatan Varol merupakan saraf penghubung antara otak kecil dengan otak besar, dan belahan kiri dan kanan dari otak kecil.

c. Sumsum Lanjutan (*Medula Oblongata*)

2.2 Sel Saraf

Sel saraf manusia dikenal dengan sebutan neuron. Neuron adalah sel yang menghasilkan listrik yang memproses dan mentransmisikan informasi dengan sinyal elektrokimia melalui saluran penghubung dengan neuron lainnya yang disebut dengan sinaps. Ada sekitar 10.000 jenis neuron yang dalam otak manusia [3], beberapa jenis neuron ditunjukkan pada Gambar 2.3.



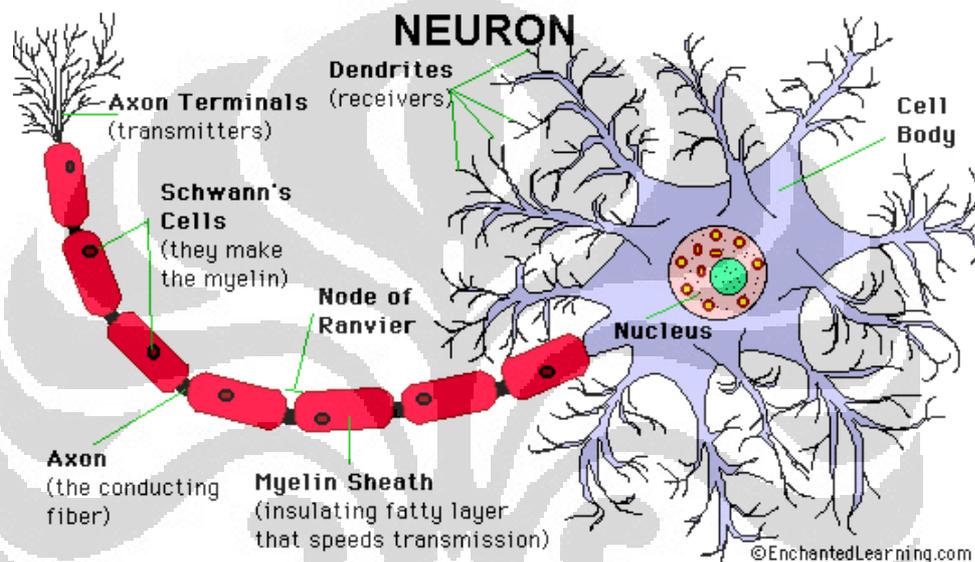
Gambar 2.3 Jenis-Jenis Neuron [3].

Secara fungsional neuron diklasifikasikan menurut arah hantaran impuls saraf terbagi kepada 3 golongan besar yaitu :

- a. Neuron Sensory atau Neuron Bipolar membawa pesan dari penerima rangsangan tubuh (mata, hidung dan lain-lain) ke sistem saraf pusat untuk merespon sentuhan, suara, cahaya, dan lainnya yang merangsang sel yang mempengaruhi organ sensory yang kemudian mengirim sinyal ke spinal cord dan otak. Jumlah neuron sensory sekitar 0.9% dari semua neuron.
- b. Motoneurons atau Neuron Multipolar membawa sinyal dari CNS ke otot dan kelenjar. Motoneurons terhitung sebanyak 9% dari semua neuron.
- c. Interneuron atau Pseudopolare (*Spelling*) menghubungkan neuron dengan neuron lainnya. Interneuron memiliki dua axon (disamping axon dan dendrit). Satu axon berkomunikasi dengan spinal cord, satunya dengan kulit atau otot.

Sebuah neuron terdiri dari beberapa bagian penting yaitu pertama badan sel (*soma*) yang berfungsi sebagai pusat kontrol dari neuron. Badan sel neuron mengandung inti neuron (DNA dan organel inti). Kedua, dendrite yang

merupakan penerima informasi yang datang dari neuron lainnya, yang ketiga adalah akson yang menghantarkan informasi ke neuron lainnya. Disamping itu ada beberapa bagian lainnya yang ada pada beberapa neuron yaitu selubung myelin terbuat dari sel Schwann yang mengandung 70-80% lipid (lemak) dan 20-30% protein berfungsi mempertahankan atau melindungi aliran sinyal listrik sepanjang neuron [6]. Nodus Ranvier merupakan bagian dari akson yang tidak dibungkus oleh selubung myelin yang berfungsi untuk meningkatkan potensial aksi yang berjalan sepanjang akson [4].



Gambar 2.4 Struktur Neuron [6].

Neuron menghantarkan sinyal listrik secara kimiawi melalui neurotransmitter. Neurotransmitter adalah media kimia yang melewatkan sinyal dari satu neuron ke neuron lainnya, melalui celah sinaps. Sebuah jenis neuron sekitar 1000 sampai 10.000 sinaps yang mengkomunikasikan 1000-10.000 neuron lainnya, sel otot, kelenjar dan lain-lain [6]. Neuron tidak dapat tumbuh kembali setelah rusak.

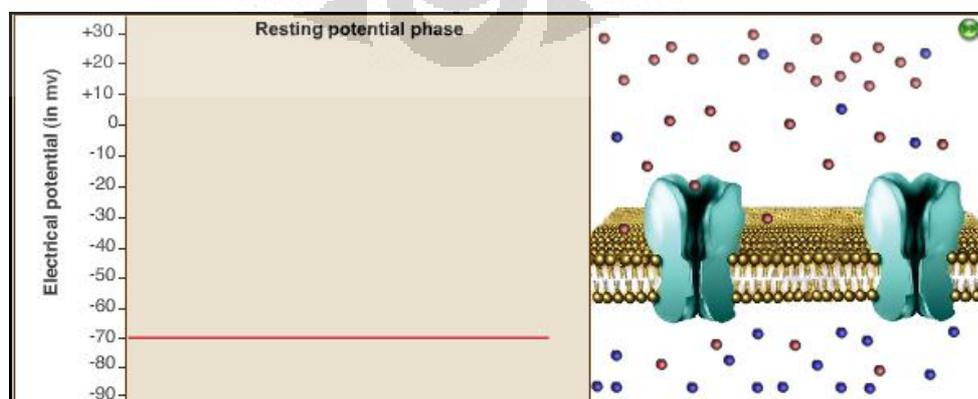
2.3 Potensial Listrik Otak Manusia

Neuron mengandung berbagai ion yang terdistribusi didalam sel saraf. Pada neuron tercipta gradient ionik antara kedua sisi membran plasmanya melalui proses pemompaan ion-ion tertentu. Pemompaan yang seringkali dilibatkan ialah pemompaan ($\text{Na}^+ - \text{K}^+$) yang terkait dengan enzim ($\text{Na}^+ - \text{K}^+$)-ATPase [7]. Proses ini memompa ion K kedalam sel namun memompa ion Na keluar sel sehingga

menghasilkan konsentrasi ionik intrasel maupun ekstrasel. Perubahan kerapatan ion (muatan) pada membran menimbulkan arus ionik muncul pada neuron, sehingga dihasilkan potensial listrik pada otak manusia dalam bentuk gelombang listrik. Neuron secara listrik menghantarkan rangsangan dalam gelombang-gelombang berjalan ini dalam rentang waktu tertentu sepanjang sel saraf.

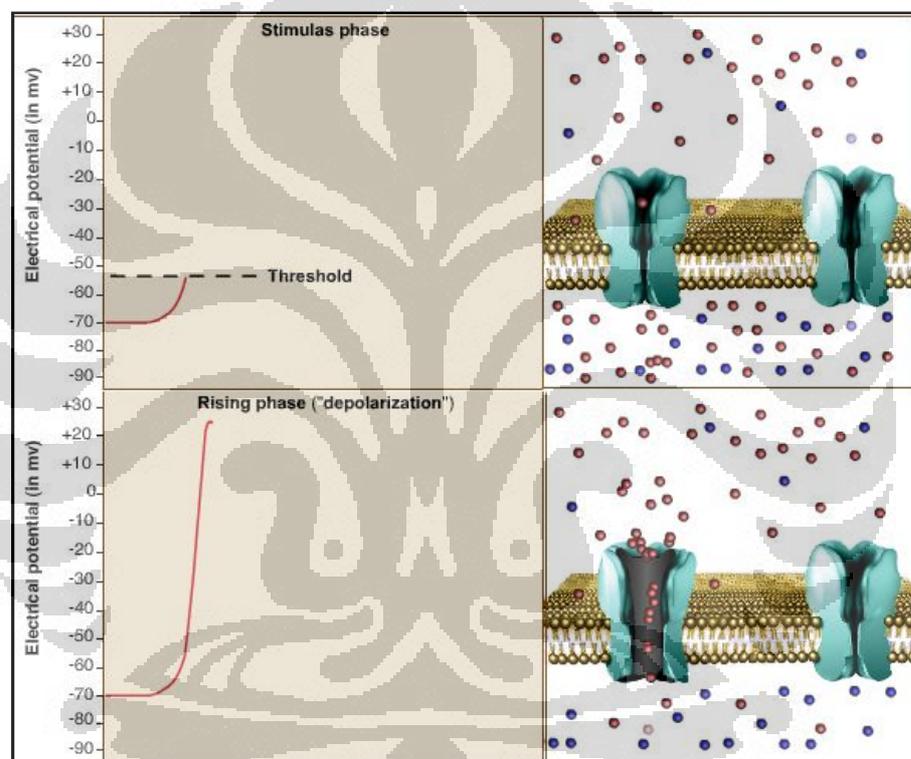
Neuron mempunyai dua kemampuan yaitu *intracellular signaling* (berkomunikasi didalam sel) dan *interceluler signaling* (berkomunikasi antar sel). Untuk menempuh jarak yang panjang, komunikasi yang cepat, neuron akan mengirim sinyal listrik (potensial aksi) sepanjang akson. Mekanisme ini disebut dengan konduksi.

Konduksi dimulai dengan menghasilkan sebuah potensial aksi. Potensial aksi merupakan sinyal listrik yang terjadi karena pergerakan ion melewati membran neuron. Pergerakan ion melewati membrane menggunakan channel ion yang membuka dan menutup bergantung kepada ada tidaknya neurotransmitter. Channel ion adalah struktur protein yang mengizinkan ion mengalir kedalam dan keluar sel. Ketika konsentrasi ion didalam neuron berubah, potensial listrik membran juga berubah. Normalnya, potensial membrane neuron pada kondisi istirahat adalah -70 mV disebut dengan “resting potential/membrane potensial” [7]. Potensial membran adalah perbedaan tegangan didalam dan diluar membrane sel. Perbedaan tegangan ini muncul karena ion. Ion adalah partikel yang bermuatan listrik. Protein membrane dari sebuah sel mencegah sel masuk dan keluar. Karena konsentrasi ion positif (bola merah) lebih besar diluar, sedangkan konsentrasi ion negatif (bola biru) lebih besar didalam, maka kondisi ini disebut dengan kondisi *resting potential membrane* yang bernilai sekitar -70 mV.



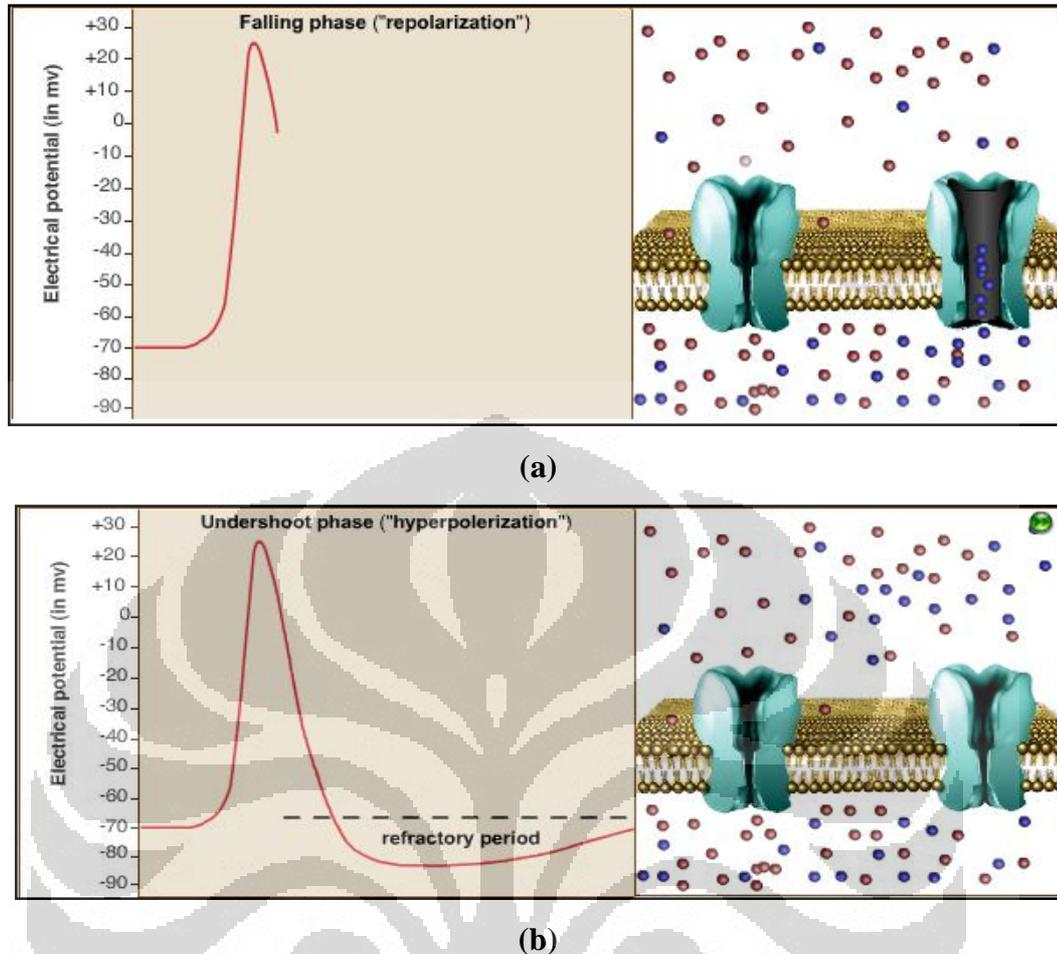
Gambar 2.5 Resting Potential [3].

Pada kondisi *resting potential*, neuron terpolarisasi, channel ion tertutup. Keluar masuknya ion ke dalam membran sel saraf akan menyebabkannya potensial menjadi lebih positif (*depolarisasi*) atau negatif (*repolarisasi*). Ketika neuron dirangsang sebagai akibat dari neurotransmisi, potensial membrane menjadi lebih positif, disebut dengan depolarisasi dimana sodium (Na^+) channel terbuka dan ion sodium (Na^+) masuk kedalam sel. Sehingga didalam sel menjadi lebih positif dari pada diluar sel. Jika depolarisasi mencapai batas ambang, yaitu 10 mV lebih positif dari kondisi resting, neuron akan menghasilkan potensial aksi pada Gambar 2.6 (a) berikut.



Gambar 2.6 (a) Neurotransmisi, (b) Potensial Aksi [3].

Selanjutnya *sodium* (Na^+) *channel* akan menutup, sementara itu *potassium* (K^+) *channel* terbuka, sehingga beberapa ion potassium mengalir keluar sel. Aliran keluar masuk ion tujuannya untuk mencapai kondisi kesetimbangan. Proses mengalirnya ion potassium keluar sel disebut dengan repolarisasi yang menurunkan potensial aksi, sehingga mencapai posisi *resting potential* pada saat channel potassium tertutup.

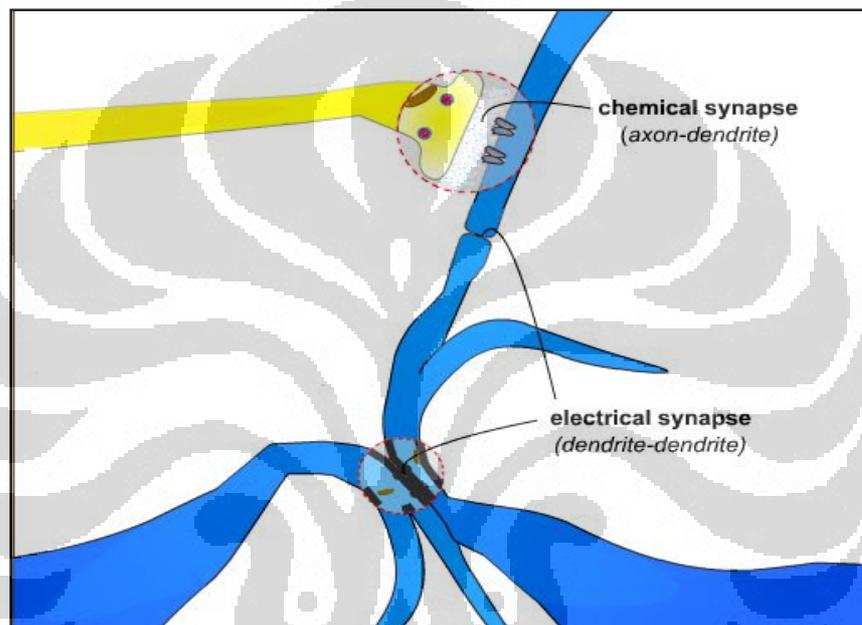


Gambar 2.7(a) Repolarisasi, (b) Hyperpolarisasi [3].

Disini ada *refractory period*, dimana pada masa ini neuron tidak bisa menghasilkan potensial aksi yang lain. Ketika potensial membrane kembali ke resting potensial, maka neuron siap kembali untuk menghasilkan potensial aksi lainnya. Sekali muncul potensial aksi, maka dia akan cepat menyebar ke sepanjang membrane akson seperti sebuah gelombang sampai dia mencapai terminal akson. Pada celah sinaps akan terjadi neurotransmisi kimia.

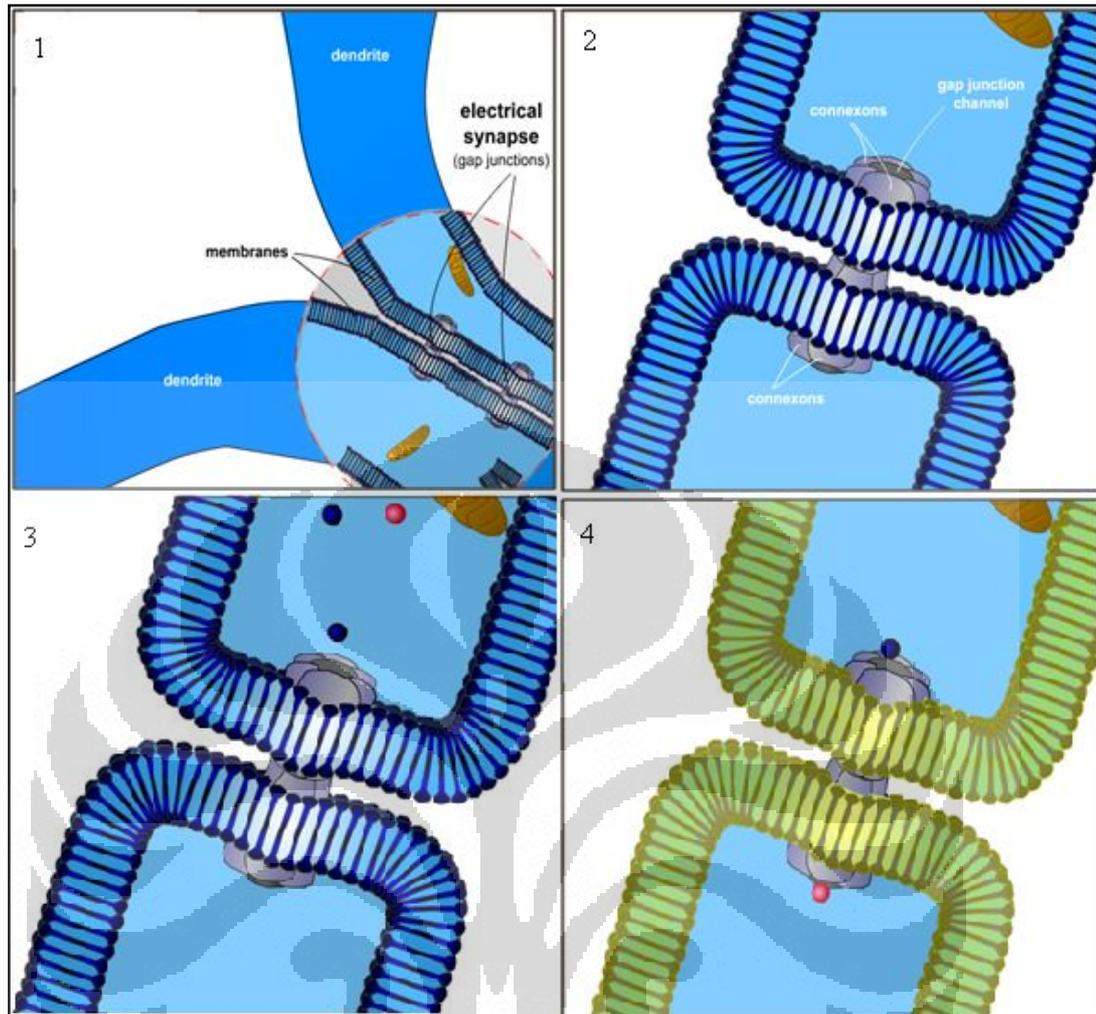
Potensial aksi yang merupakan sinyal listrik ini akan merambat sepanjang akson sampai mencapai terminal akson. Konduksi berakhir pada terminal akson dan neurotransmitter dimulai. Terminal akson adalah dimana neuron mengirimkan outputnya ke neuron lainnya melalui celah sinaps. Pada sinaps listrik, output akan menjadi sinyal listrik dan pada sinaps kimia output akan menjadi neurotransmitter dikenal dengan sebutan Neurotransmisi.

Neurotransmisi (transmisi sinaps) adalah komunikasi antar neuron yang dilakukan oleh pergerakan sinyal kimia dan listrik melewati sinaps. Neuron menerima informasi input dari neuron lainnya melewati sinaps, untuk memproses informasi tersebut, kemudian mengirimkan informasi sebagai output ke neuron lainnya melewati sinaps. Potensial aksi akan berjalan sepanjang akson sampai dia mencapai sinaps, disana dia akan menghasilkan neurotransmitter yang menyebabkan potensial sinaptik pada postsinaptik neuron yang baru.



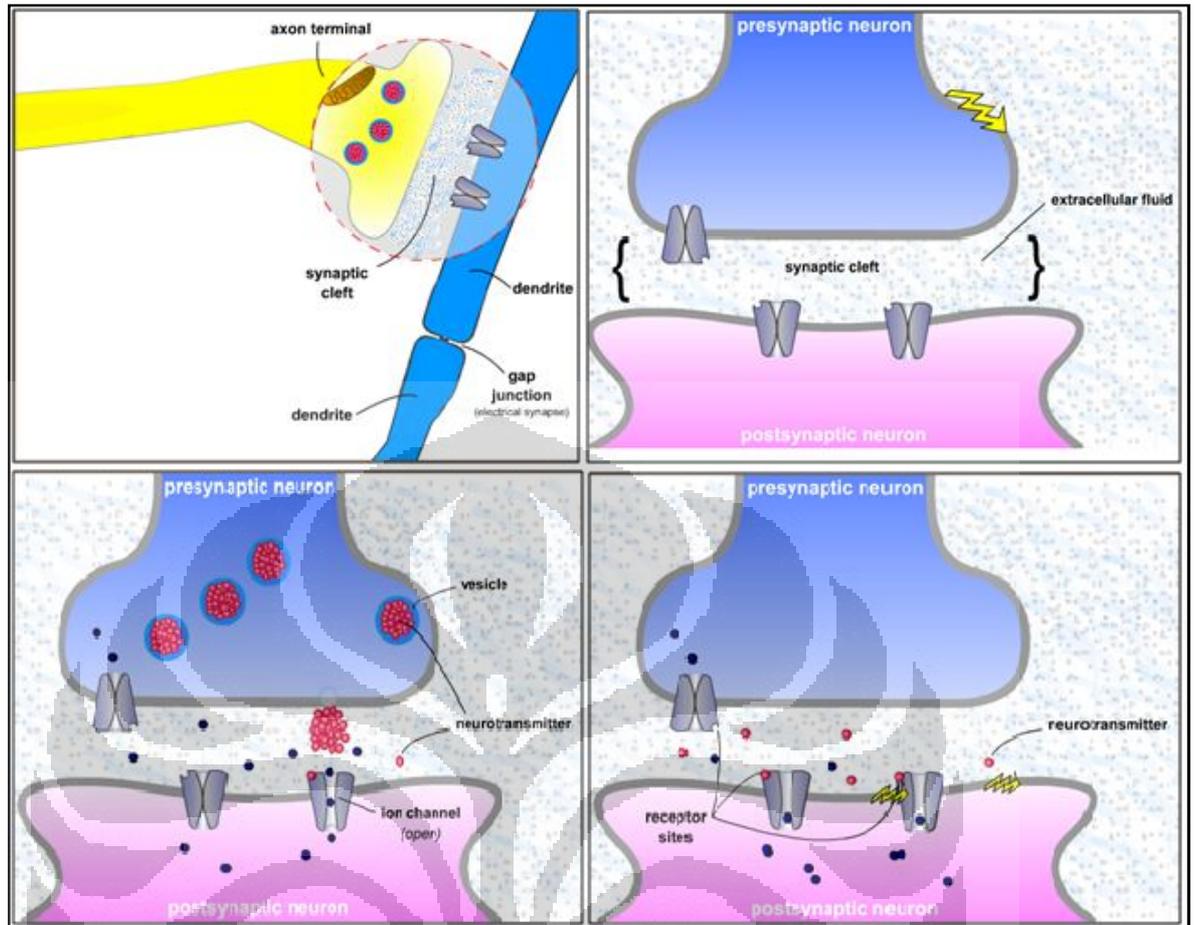
Gambar 2.8 *Electrical dan chemical neurotransmission* [3].

Electrical Neurotransmission adalah proses dimana sebuah rangsangan (potensial sinaptik) pada satu neuron akan menyebabkan sebuah *synchronous impulse* (potensial sinaptik) pada lainnya. Pada sinaps listrik, dua neuron secara fisik berhubungan satu sama lainnya dengan melewati *gap junction*. *Gap junction* channel membrane yang menghubungkan dua neuron yang memberikan perubahan potensial listrik dari satu neuron yang mempengaruhi neuron lainnya. *Electrical Neurotransmission* mengkomunikasikan dua neuron pada sinaps listrik. *Electrical Neurotransmission* terjadi pada sinaps antara dendrite. Sinaps listrik antara dua neuron terjadi ketika sebuah *gap junction* menggabungkan sepasang dendrite.



Gambar 2.9 Sinaps Listrik [3].

Chemical Neurotransmission terjadi pada sinaps kimia, presinaptik dan postsinaptik neuron dipisahkan oleh sebuah gap kecil disebut celah sinaptik. Celah sinaptik diisi dengan cairan ekstraseluler. Walaupun sangat kecil, dalam orde nanometer, celah sinaps merupakan barrier fisika untuk sinyal listrik yang dibawa oleh neuron untuk diberikan ke neuron lainnya. Fungsi dari neurotransmitter adalah sebagai *chemical messenger*, yang menghubungkan potensial aksi dari satu neuron dengan potensial sinaptik pada lainnya.



Gambar 2.10 Sinaps Kimia [3].

2.4 Gelombang Otak Manusia

Pada tahun 1929, Hans Berger, berasal dari Jerman, membuat peralatan untuk mencatat dan mengukur gelombang listrik yang terjadi di otak. Alat ini disebut dengan *Electroencephalograph* (EEG). Gelombang otak manusia dipengaruhi oleh perbedaan aksi dan pikiran. Reaksi kimia dengan milyaran neuron pada *cortex* menghasilkan radiasi gelombang elektromagnetik dalam bentuk pulsa yang lebih dikenal dengan sebutan gelombang otak manusia.

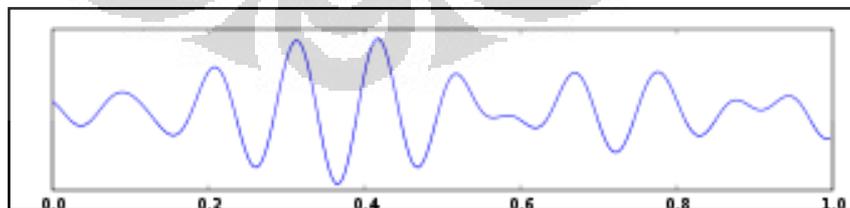
Gelombang otak dihasilkan oleh aktifitas neuron didalam otak manusia. Aktifitas neuron ini menghasilkan sinyal listrik sebagai pembawa informasi sensori, motorik, maupun kognitif. Otak tidak pernah berhenti bekerja sekalipun, setiap detiknya ada aliran muatan yang terjadi pada otak. Gelombang otak manusia adalah rambatan dari potensial aksi sepanjang wilayah tertentu pada otak dan dalam waktu tertentu. Apabila dilakukan pengamatan dengan EEG selama

selang waktu tertentu, akan muncul bentuk gelombang otak pada monitor EEG, yang dihasilkan oleh pengukuran beda potensial antara posisi peletakkan elektroda EEG. Rangsangan yang lebih kuat, akan meningkatkan frekuensi dari gelombang otak yang menunjukkan bahwa kecepatan pergerakan ion-ion pada membran sel saraf meningkat.

Berdasarkan riset selama bertahun-tahun di berbagai negara maju diperoleh bahwa frekuensi otak manusia berbeda-beda untuk setiap fase sadar, tidur ringan, nyenyak, panik dan sebagainya. Melalui penelitian yang panjang, akhirnya para ahli saraf mengelompokkan gelombang otak manusia berdasarkan frekuensi mejadi 4 macam [8]: Alpha (8-13Hz), beta (14-50Hz), theta (4-7Hz) dan Delta (3-5Hz). Gelombang alpha dan beta dikelompokkan pada gelombang cepat, sedangkan gelombang theta dan delta dikelompokkan kedalam gelombang lambat [1]. Dengan penjabaran sebagai berikut :

1. Gelombang Alpha

Gelombang yang terjadi pada frekuensi 8 sampai 13 Hz, ditemukan pada EEG orang normal ketika mereka dalam keadaan diam, kondisi beristirahat dan tidak berfikir, khusyu', relaks, meditatif, nyaman dan ikhlas. Gelombang ini sebagian besar dihasilkan oleh bagian occipetal, terkadang pada bagian pariental dan frontal. Tegangan yang dihasilkan oleh gelombang alpha ini adalah kira-kira 20-200 mV [8]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa gelombang alpha berkaitan dengan rangsangan visual [8]. Gelombang alpha diblok secara temporal, membuka mata, aktifitas mental, dan yang paling efektif dalam membuka mata [9].

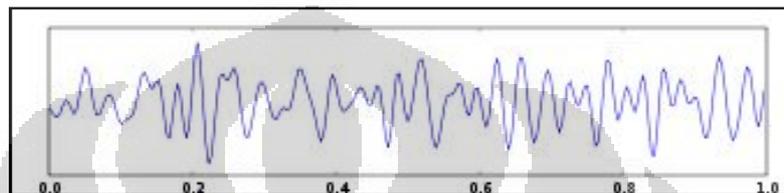


Gambar 2.11 Gelombang Alpha

2. Gelombang Beta

Gelombang Beta secara normal terjadi pada frekuensi 14 sampai 30 Hz, terkadang bisa lebih tinggi tergantung kepada aktifitas mental, bisa mencapai 50 Hz. Gelombang beta paling periodik direkam di area frontal

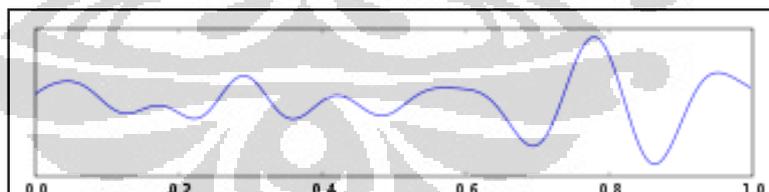
dan pariental [8]. Gelombang beta memiliki amplitudo sebesar 30 mV [9]. Dalam frekuensi ini kita tengah berada pada kondisi aktif terjaga, sadar penuh dan didominasi oleh logika. Inilah kondisi normal yang kita alami sehari-hari ketika sedang terjaga (tidak tidur). Kita berada pada frekuensi ini ketika kita bekerja, berkonsentrasi, berbicara, berpikir tentang masalah yang kita hadapi, dll. Dalam frekuensi ini kerja otak cenderung memantik munculnya rasa cemas, khawatir, stres, dan marah.



Gambar 2.12 Gelombang Beta

3. Gelombang Theta

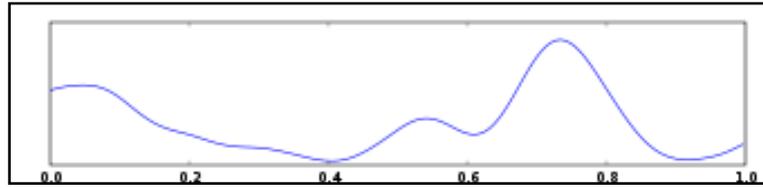
Gelombang Theta memiliki frekuensi antara 4-7 Hz dan amplitudo sekitar 10 mV . Terutama dihasilkan pada area temporal dan pariental pada otak manusia [8]. Contohnya seseorang yang sedang kelelahan dan mulai mengantuk. Hal ini terutama terjadi pada area pariental dan temporal pada anak-anak, dan juga terjadi pada orang dewasa, ketika periode kekecewaan dan frustrasi [9].



Gambar 2.13 Gelombang Theta

4. Gelombang Delta

Gelombang Delta adalah gelombang EEG dibawah 3.5 Hz. Kadang-kadang gelombang ini terjadi hanya setiap 2 atau 3 detik. Terjadi pada tidur yang sangat lelap [8]. Amplitudo gelombang delta adalah sekitar 50-100 mV [9]. Ada dua sumber untuk gelombang Delta yaitu berasal dari thalamus dan lainnya berasal dari cortex ,



Gambar 2.14 Gelombang Delta

2.5 Perkembangan Detektor Sinyal dan Tomografi Otak Manusia

Elektroencepalografi (EEG)

EEG adalah alat untuk mendeteksi sinyal otak manusia dengan mengukur perbedaan potensial antara dua titik elektroda yang diletakkan pada permukaan kepala dengan cara tertentu. Metode lokalisasi sumber EEG menggunakan model sumber arus dan volume konduktor dimana tempat arus menyebar [10]. Pada EEG, rekaman dari 1 elektroda merupakan rata-rata dari aktifitas neuron dalam wilayah tertentu.

Perekaman EEG menggunakan elektroda yang diletakkan dikepala dengan aturan tertentu yaitu *The 10-20 elektroda system*. Hasil rekaman EEG adalah berupa sinyal listrik yang merambat sepanjang sel saraf. Sinyal listrik ini dikenal dengan gelombang otak manusia yang berdasarkan frekuensinya dibagi menjadi 4 bagian besar yaitu gelombang alpha, betha, delta dan theta.

Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)

fMRI menggunakan dasar yang sama dengan MRI. MRI biasanya menggambarkan struktur anatomik sedangkan fMRI menggambarkan fungsi metabolik. Gambar yang dihasilkan oleh fMRI merupakan penggambaran dari aktifitas metabolic dari struktur anatomi ini.

fMRI adalah jenis dari MRI yang mengukur respon hemodinamik (perubahan pada aliran darah) berhubungan dengan aktifitas saraf pada otak atau spinal cord dari manusia. Aliran darah dan oksigenasi darah pada otak sangat erat hubungannya dengan aktifitas saraf. Sel saraf yang aktif akan meningkatkan konsumsi darah. Darah menghasilkan oksigen dengan laju yang lebih besar kepada neuron yang aktif dibandingkan dengan neuron yang tidak aktif.

Perbedaan sinyal sangat kecil merepresentasikan sebuah pikiran, aksi, metode statistik yang dapat digunakan untuk menentukan area dari otak yang berkemungkinan menunjukkan area mana dari otak aktif selama berpikir atau melakukan suatu aksi. Kekurangannya adalah biasanya pemeriksaan yang mahal dan tidak bisa menampilkan gelombang sinyal otak manusia.

CT-Scan

CT-Scan menggunakan radiasi sinar X yang diberikan kepada otak manusia. Radiasi sinar X yang melewati jaringan akan teratenuasi. Sinar X yang telah diatenuasi ini akan ditangkap oleh detektor dan dilakukan rekonstruksi citra. Atenuasi ini dipengaruhi oleh karakteristik dari otak yang diamati. CT-Scan melakukan rekonstruksi berdasarkan anatomi structural. Kekurangan CT-Scan adalah sedikit banyaknya berbahaya menggunakan radiasi sinar X untuk kepala manusia karena kepala mengandung organ-organ penting yang sensitive terhadap radiasi sinar X.

Positron Emission Tomography (PET)

PET berfungsi untuk mengamati aliran darah atau metabolisme pada beberapa bagian dari otak. Pada PET, subjek disuntikkan dengan glukosa radioaktif dengan jumlah yang sangat kecil. PET kemudian menangkap radiasi radioaktif dari luar tengkorak. Sel otak menggunakan glukosa sebagai bahan bakar, dan PET bekerja pada teori yang jika sel otak menjadi lebih aktif, mereka akan mengkonsumsi glukosa radioaktif, dan jika tidak aktif, mereka hanya mengosumsi sedikit glukosa.

Kekurangan dari PET adalah pengaruh dari radioaktif terhadap organ tubuh lainnya dan pemeriksaannya yang kurang nyaman bagi pasien yaitu dengan menyuntikkan suatu bahan radioaktif, disamping itu juga membutuhkan biaya yang mahal.

Electrical Impedance Tomography (EIT)

EIT adalah teknik perkembangan baru dimana pengukuran impedansi dari permukaan sebuah objek yang kemudian direkonstruksi kedalam gambar impedansi. Prinsip EIT adalah menggunakan aliran darah cerebral regional dan volume darah berubah yang terjadi selama aktivitas otak manusia akan merubah

impedansi lokal dari area cortical, seperti aliran darah mempunyai impedansi yang lebih rendah dari otak. Secara teoritis, perubahan impedansi dapat diukur dari elektroscalp dan direkonstruksi ke dalam image dari impedansi internal didalam otak.

2.5.6 Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT)

ECVT baru pertama kali dikembangkan sebagai detektor sinyal dan rekonstruksi citra otak manusia. Sistem ECVT merekonstruksi citra volume yang didapatkan dari sensor tiga dimensi atau secara volumetrik dan citra yang dihasilkan langsung dari sensor tersebut tanpa melakukan proses penumpukan citra 2D [2] sehingga citra yang dihasilkan berupa citra 3D secara *real time*.

ECVT adalah sistem yang berbasis perhitungan nilai kapasitansi dari sensor multi elektroda yang mengelilingi sebuah ruangan sensor yang bentuknya bisa sembarang yang didalamnya mengandung material yang berbeda permitivitasnya.

ECVT didukung sebagai tomografi karena kecepatan data akuisisinya yang cepat, biaya konstruksi yang rendah, aman dan mudah dipakai serta cocok untuk berbagai bentuk sistem.

Pengembangan ECVT yang akan diaplikasikan untuk pencitraan otak manusia diharapkan dapat mengatasi masalah radiasi karena ECVT menggunakan besaran kapasitansi listrik. Ditambah lagi pencitraan pada ECVT dapat dilakukan dalam bentuk 3D secara *real time*.

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Kelistrikan Otak Manusia

Medan Elektromagnetik pada materi dikelompokkan oleh Maxwell menjadi dua kelompok besar yaitu makroskopik dan mikroskopik [14]. Mikroskopik memberikan penjelasan hubungan muatan, arus, medan listrik dan medan magnet secara detail, sedangkan pendekatan makroskopik menjelaskan hubungan dalam skala rata-rata [14].

Pada jaringan biologi, ada 3 parameter yang dibutuhkan yaitu konstanta dielektrik untuk insulator, konduktivitas (resistivitas) untuk konduktor, dan permeabilitas untuk material magnetik. Sebuah dielektrik (insulator) adalah sebuah material yang mana muatannya bebas untuk bergerak hanya melebihi jarak atomik. Muatan disimpan oleh material pada skala mikroskopik. Lawannya, muatan dalam sebuah konduktor mengalir dengan bebas dibawah pengaruh dari medan listrik. Banyak material, khususnya jaringan biologi, memerankan kedua properti yaitu dielektrik dan konduktor [14]. Hal ini tidak mengejutkan karena semua material mengandung jenis muatan yang berbeda dari muatan yang bisa dibedakan oleh mobilitas mereka yang berbeda.

Efek dielektrik (*capacitive*) dalam semua material adalah berkaitan dengan polarisasi yaitu pemisahan muatan internal [14]. Ketika sebuah medan listrik eksternal diaplikasikan, inti akan ditarik pada satu arah dan elektron pada arah lainnya. Atom yang terdistorsi adalah sebuah dipol muatan yang kecil, dimana menghasilkan sebuah medan listrik yang sangat kecil ditunjukkan dalam arah yang berlawanan dari medan yang diaplikasikan (atau eksternal).

Pendekatan makroskopik yang merupakan pendekatan quasi statis, otak manusia diasumsikan sebuah volume konduktor yang mengandung sumber arus didalamnya. Neuron aktif (yaitu neuron yang memperoleh potensial aksi) bertindak sebagai sumber arus.

Penelitian yang dilakukan ini dengan menggunakan pendekatan elektrostatik. Dimana tidak bergantung kepada waktu. Pendekatan elektrostatik menggunakan pendekatan mikroskopik pada persamaan Maxwell. Otak terdiri dari sel saraf yang disebut dengan neuron yang didalamnya terdapat rapat muatan.

Distribusi muatan ρ terdapat divolume otak, menggunakan persamaan Maxwell pada kondisi mikroskopik [15] :

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon} \rho \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (3.2)$$

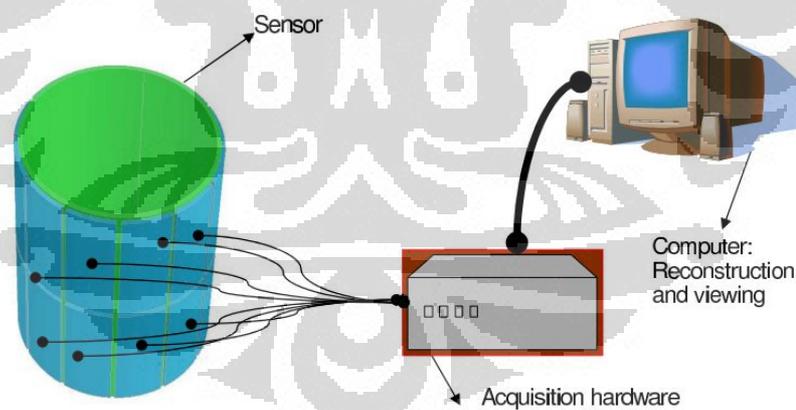
$$\vec{E} = -\nabla\phi \quad (3.3)$$

Sehingga diperoleh persamaan Poisson untuk kondisi Elektrostatik

$$\nabla \cdot \epsilon(\nabla\phi) = -\rho \quad (3.4)$$

3.2 Prinsip Electrical Capacitance Volume Tomography

ECVT merupakan teknik tomografi yang memanfaatkan sifat kapasitansi listrik dari benda yang bersifat nonkonduktif. Pada ECVT terdapat pasangan sensor atau elektroda yang secara bergantian menghasilkan kapasitansi yang terukur yang dipengaruhi oleh distribusi permitivitas yang berada didalamnya. Untuk itu pada bab ini akan dibahas mengenai teori medan listrik yang berhubungan dengan listrik statis untuk mendapatkan hubungan antara kapasitansi listrik dengan distribusi permitivitas yang mendasari teknik tomografi ini.



Gambar 3.1 Sistem ECVT

3.2.1 Teori Medan Elektromagnet

3.2.1.1 Teorema Gauss

Medan listrik dapat dihitung di setiap titik dalam ruang di sekitar sistem muatan atau sebaran muatan. Jadi $\vec{E} = \vec{E}(r)$ adalah fungsi titik vektor, atau medan vektor. Teknik lain untuk menghitung medan listrik adalah dengan menggunakan

hukum Gauss, dengan mendefinisikan sebuah besaran fisis yang digunakan, yaitu fluks listrik. Fluks listrik adalah banyaknya garis medan listrik yang menembus sebuah permukaan luas didefinisikan sebagai perkalian titik medan listrik E dan luas yang dilewatinya.

Hukum Gauss menyatakan bahwa jumlah garis gaya yang keluar dari suatu permukaan tertutup (atau fluks) sebanding dengan jumlah muatan listrik yang dilingkupi oleh permukaan tertutup itu.

Medan listrik di titik r yang ditimbulkan oleh muatan titik q yang terletak di titik asal adalah

$$\vec{E}(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\hat{r}}{r^3} \quad (3.5)$$

Dengan ϵ_0 merupakan permtivitas di ruang vakum (hampa).

Integral permukaan dari komponen normal medan listrik ini pada permukaan tertutup yang melingkupi titik asal, yang juga melingkupi muatan q , adalah

$$\oint_S \vec{E} \cdot n \, da = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \oint_S \frac{\hat{r} \cdot n}{r^3} \, da \quad (3.6)$$

Integral pada ruas kanan dapat ditulis sebagai berikut

$$\oint_S \frac{\hat{r} \cdot n}{r^3} \, da = 4\pi \quad (3.7)$$

Persamaan (3.6) dapat ditulis

$$\oint_S \vec{E} \cdot n \, da = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} 4\pi = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (3.8)$$

Jika beberapa muatan titik q_1, q_2, \dots, q_N dilingkupi oleh permukaan tertutup S . Untuk beberapa muatan titik yang terdapat di dalam permukaan tertutup, Persamaan (3.8) menjadi

$$\oint_S \vec{E} \cdot n \, da = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i \quad (3.9)$$

Untuk kondisi sebuah volume yang terdapat sejumlah muatan, maka muatan dalam volume tersebut dipandang sebagai $\rho \, dv$ dimana ρ adalah rapat muatan untuk suatu volume tertentu. Oleh karena itu integral permukaan totalnya sama dengan jumlah semua unsur tambahan dalam bentuk itu yang disebabkan

muatan yang terletak di dalam permukaan tersebut. Jadi jika S merupakan permukaan tertutup yang membatasi volum V , maka

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{n} \, da = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho \, dv \quad (3.10)$$

Hukum gauss dapat juga dinyatakan dalam bentuk lain yaitu dengan menggunakan teorema divergensi yang menyatakan bahwa

$$\oint_S \vec{F} \cdot \vec{n} \, da = \int_V \nabla \cdot \vec{F} \, dv \quad (3.11)$$

Jika teorema ini diterapkan pada integral permukaan dari komponen garis normal medan listrik E , maka diperoleh

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{n} \, da = \int_V \nabla \cdot \vec{E} \, dv \quad (3.12)$$

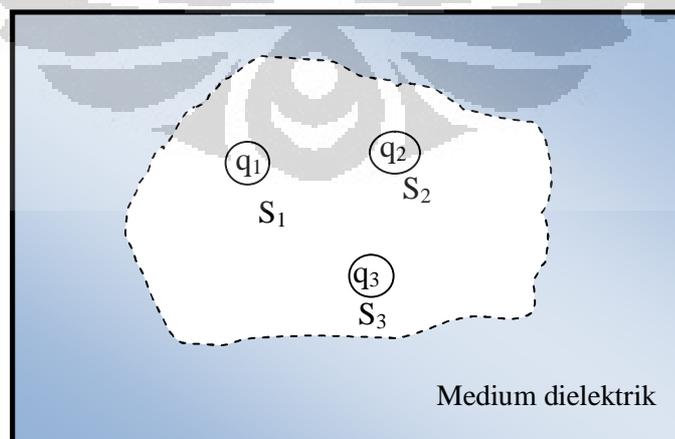
Persamaan ini dimasukkan ke dalam persamaan (3.10), diperoleh

$$\int_V \nabla \cdot \vec{E} \, dv = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho \, dv \quad (3.13)$$

Persamaan (3.13) berlaku untuk semua jenis volum, yaitu untuk sebarang pilihan volum V . Hasil ini dapat dituliskan dalam bentuk lain yaitu

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (3.14)$$

Untuk kondisi medium dielektrik seperti dicontohkan pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3. 2 Hukum Gauss pada Medium Dielektrik.

Garis putus-putus pada Gambar 3.2 merupakan permukaan Gauss pada medium dielektrik. Di dalam permukaan tersebut terdapat sejumlah muatan bebas Q dalam volume yang dibatasi oleh S . Diasumsikan muatan bebas tersebut berada pada permukaan 3 konduktor dalam jumlah q_1 , q_2 , dan q_3 , maka berdasarkan hukum Gauss

$$\oint_S \vec{E} \cdot \hat{n} da = \frac{1}{\epsilon_0} (Q + Q_p) \quad (3.15)$$

Q merupakan total muatan bebas, dengan $Q = q_1 + q_2 + q_3$ dan Q_p merupakan muatan polarisasi.

$$Q_p = - \oint_S P \cdot n da \quad (3.16)$$

P merupakan polarisasi listrik. Dari Persamaan (3.16), maka Persamaan (3.15) dapat ditulis

$$\oint_S (\epsilon_0 E + P) \cdot \hat{n} da = Q \quad (3.17)$$

Persamaan (3.17) menunjukkan bahwa flux dari vektor $\epsilon_0 E + P$ yang melewati suatu permukaan tertutup sama dengan total muatan pada permukaan. Kita mendefinisikan vektor D sebagai *electric displacement* dimana

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (3.18)$$

Pada kasus material sederhana, nilai polarisasi sebanding dengan medan listrik dengan pendekatan

$$D = \epsilon_r \epsilon_0 E \quad (3.19)$$

ϵ_r merupakan permitivitas relatif statis (medium) dari material.

Permitivitas atau biasa disebut sebagai konstanta dielektrik merupakan konstanta yang menunjukkan rapat fluks elektrostatik dalam suatu bahan ketika diberi potensial listrik. Nilai permitivitas bergantung pada jenis material yang berhubungan dengan *susceptibility* listriknya. *Susceptibility* yaitu kemampuan suatu bahan mengalami polarisasi sebagai respon dari medan listrik.

3.2.1.2 Persamaan Poisson

Pada medan listrik statis, E dapat dituliskan sebagai minus gradien dari potensial ϕ

$$E = -\nabla\phi \quad (3.20)$$

dengan mensubstitusikan Persamaan (3.20) ke dalam Persamaan (3.14), maka dihasilkan

$$\nabla \cdot (\nabla\phi) = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3.21)$$

Persamaan (3.21) disebut sebagai persamaan Poisson, dengan ρ merupakan kerapatan muatan listrik.

3.2.1.3 Kapasitansi

Hubungan linear antara potensial dan muatan dapat dituliskan sebagai berikut

$$V_i = \sum_{j=1}^N p_{ij} Q_j \quad (3.22)$$

dengan p merupakan koefisien potensial. Jika kita mempunyai dua konduktor masing-masing memiliki muatan $+Q$ dan $-Q$ maka dapat dituliskan potensial dari dua konduktor tersebut yaitu

$$\begin{aligned} V_1 &= p_{11}Q + p_{12}(-Q) \\ V_2 &= p_{12}Q + p_{22}(-Q) \end{aligned} \quad (3.23)$$

Jika Persamaan (3.23) dikurangkan maka

$$\Delta V = V_1 - V_2 = (p_{12} + p_{22} - 2p_{12})Q \quad (3.24)$$

Dari Persamaan (3.24) dapat disimpulkan bahwa beda potensial dari dua buah konduktor sebanding dengan muatan yang tersimpan diantaranya. Sehingga Persamaan (3.25) dapat ditulis sebagai berikut

$$Q = C\Delta V \quad (3.25)$$

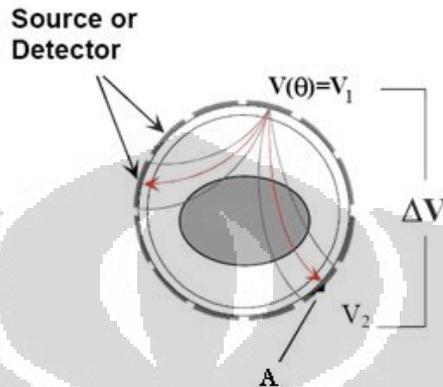
Dengan $C = (p_{11} + p_{22} - 2p_{12})^{-1}$ disebut sebagai kapasitansi dan Q merupakan muatan total yang terdapat pada sistem tersebut, dimana, nilai Q dapat diturunkan dengan persamaan Gauss, sehingga dihasilkan:

$$Q_j = \oint_{\Gamma} \epsilon(x, y) \nabla\phi(x, y) \hat{n} dl \quad (3.26)$$

Sehingga persamaan (3.26) dapat ditulis

$$C_{ij} = -\frac{1}{\Delta V_{ij}} \oint_{\Gamma} \epsilon(x, y) \nabla\phi(x, y) \hat{n} dl \quad (3.27)$$

Dari Persamaan (3.27) kita dapat melihat hubungan antara kapasitansi dan permitivitas. Dengan nilai distribusi permitivitas yang berbeda-beda yang terdapat di antara pasangan elektroda, akan mempengaruhi nilai kapasitansi yang terukur pada elektroda tersebut. Hubungan ini menjadi prinsip dasar dari teknik tomografi ECT pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Kapasitans ECVT [16]

Pada persamaan (3.27), nilai distribusi potensial $\phi(x, y, z)$ bergantung pada distribusi permitivitas $\epsilon(x, y, z)$. Bila nilai permitivitas berubah maka nilai potensial akan berubah. Dalam kasus ini, persamaan (3.27) tidak bisa disederhanakan/non-linear. Oleh karena itu dilakukan pendekatan dimana nilai permitivitas adalah konstan, sehingga

$$C_i = \sum_{i=1}^n -\frac{1}{\Delta V_{ij}} \epsilon_i \int_{A_i} \nabla \phi_i dA_i \quad (3.28)$$

dengan pendekatan nilai sensitivitas

$$S_{ij} \cong \frac{E_{si}(x, y, z) \cdot E_{di}(x, y, z)}{v_{si}v_{di}} \quad (3.29)$$

maka nilai persamaan (3.29) menjadi

$$C_i = \sum_j \epsilon_j S_{ij} \quad (3.30)$$

dalam bentuk matriks, persamaan (3.30) menjadi

$$C = SG \quad (3.31)$$

dimana C adalah matriks distribusi kapasitans, S adalah sensitivitas matriks dan G adalah matriks distribusi permitivitas.

Dengan pendekatan ini, masalah forward non-linier telah disederhanakan kepada pendekatan linier.

Permasalahan dari rekonstruksi citra ECVT adalah menyelesaikan distribusi permitivitas $\epsilon(x, y, z)$ dari vektor kapasitansi C yang diukur. Dalam bentuk diskrit adalah mencari G yang tidak diketahui dari C menggunakan persamaan diatas, dimana S adalah matriks konstan untuk sederhananya dan S akan berubah sesuai dengan distribusi permitivitas.

3.2.2 Sensitivitas Matriks

Sensitivitas matriks diukur pada setiap sensor. Metode untuk menghitung koefisien sensitivitas S dari pixel pada pasangan elektroda (i, j) adalah

$$S = -\frac{1}{\Delta V_{ij}} \int_{A_i} E_i \cdot E_j dA \quad (3.32)$$

dimana E_i & E_j adalah medan listrik antara dua buah sensor dimana medan E_i dinyatakan sebagai elektroda sumber dan E_j dinyatakan sebagai elektroda detektor. Dot produk dari kedua medan listrik diintegrasikan sepanjang daerah A pada pixel.

Sensitivitas matriks merupakan gambaran intensitas medan listrik dari ruang pengukuran yang memiliki daerah kapasitans tertentu. Sensitifitas adalah seberapa besar pengaruh nilai kapasitansi jika pada suatu volume tertentu yang didalamnya terdapat benda yang memiliki permitivitas tinggi. Sensitivitas dicari untuk mengetahui letak distribusi posisi kapasitans terhadap daerah pengukuran sensor.

3.3 Rekonstruksi Citra ECVT

Dalam pencitraan ECVT, tidak mudah untuk mendapatkan solusi agar performa pixel pada citra akan baik (terbatasnya pada hubungan banyaknya pengukuran sebanding dengan jumlah pixel yang didapat) karena umumnya jumlah pixel pada citra akan melebihi jumlah pengukuran kapasitansi.

Selain itu, distorsi pada citra dapat terjadi karena ECVT merupakan metode *soft-field imaging* (medan listrik didistorsikan oleh distribusi material dalam sensor). Namun, karena nilai permitivitas dalam sensor kecil maka distorsi yang terjadi cukup kecil. Hal ini membolehkan adanya algoritma pendekatan linier yang digunakan untuk menghubungkan pengukuran kapasitansi C dengan nilai pixel pada citra.

3.3.1 Problema Maju

Problema Maju adalah persamaan yang menghubungkan seperangkat pengukuran inter-elektroda kapasitansi C dengan set nilai pixel permitivitas G . Transformasi ini mengasumsikan bahwa dengan diukurnya inter-elektroda C maka dihasilkan distribusi permitivitas G dalam sensor yang identik dengan yang didapat dari penjumlahan komponen C yang meningkat dan terjadi ketika setiap pixel memiliki nilai permitivitasnya.

$$C = SG \quad (3.33)$$

dimana C adalah matriks $M \times 1$ (tipikal 496 untuk 32 sensor), G adalah matriks $N \times 1$ (bernilai 32768 untuk $32 \times 32 \times 32$ grid). S adalah transformasi maju atau lebih dikenal dengan sensitivitas matriks yang berupa matriks $M \times N$, terdiri dari seperangkat M (atau map) dari N (nilai tipikal 32768) koefisien (1 map untuk setiap pasang M pencitraan), dimana koefisien merepresentasikan perubahan relatif pada kapasitansi C di setiap pasang kapasitans ketika perubahan identik terjadi pada setiap permitivitas dari N pixel.

3.3.2 Problema Inversi

Problema inversi adalah bagaimana mendapatkan hasil rekonstruksi citra nilai G dari invers matriks S pada persamaan 3.33 sementara invers matriks S tidak terdapat. Dari persamaan tersebut, sekali dari nilai inter-elektroda kapasitansi C diukur, maka distribusi permitivitas G dapat diperoleh dari pengukuran menggunakan transformasi invers Q , yaitu :

$$G = QC \quad (3.34)$$

dimana Q adalah matriks $N \times M$ atau merupakan invers dari matriks S . Namun, matriks invers hanya mungkin didapat dari matriks kuadrat (*square matrix*) dimana nilai $M=N$. Dalam istilah fisika, hal ini menunjukkan ketidakmungkinan untuk mendapatkan nilai individu dari pixel berjumlah besar dari sejumlah pengukuran kecil kapasitansi.

3.4 Metode Rekonstruksi Citra ECVT

3.4.1 Linear Back Projection (LBP)

LBP merupakan algoritma yang pertama kali digunakan untuk merekonstruksi gambar dari data kapasitans. Algoritma ini masih umum digunakan sebagai teknik rekonstruksi tomografi berbasis kapasitans. Algoritma ini didasarkan pada asumsi bahwa nilai sensitivitas konstan dalam daerah sensitivitas. Selain itu, sensitivitas diasumsikan sama untuk berbagai daerah sensitivitas.

LBP menggunakan hubungan antara kapasitans yang diukur dengan citra untuk mencari vektor image berdasarkan vektor kapasitans yang diukur. Metode ini merupakan metode pendekatan dimana dari persamaan

$$C = SG \quad (3.35)$$

Persamaan ini memiliki solusi mendapatkan image G dengan menginverskan nilai S menjadi

$$G = S^{-1}C \quad (3.36)$$

Karena pengukuran untuk invers pada Persamaan 3.36 tidak terdapat, maka sebuah pendekatan matriks digunakan. Algoritma LBP (*Linear Back Projection*) menggunakan nilai transpos dari sensitivitas matriks sebagai inversnya, sehingga memiliki dimensi NxM. Skema metode LBP ditunjukkan oleh Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Metode LBP

Elemen image diperoleh dari

$$G = S^T C \quad (3.37)$$

atau

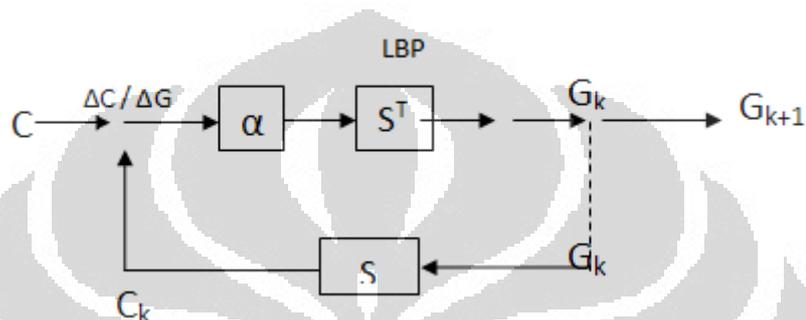
$$G(x, y, z) = S^T(x, y, z) \sum_i^{Ne} \sum_j^{Ne} \frac{C_{i,j}^{meas} - C_{i,j}^{empty}}{C_{i,j}^{full} - C_{i,j}^{empty}} \quad (3.38)$$

dimana $C_{i,j}^{meas}$ adalah kapasitans yang diukur antara elektroda i dan j, $C_{i,j}^{empty}$ adalah kapasitans antara elektroda pasangan i dan j ketika diberikan material dengan permitivitas rendah, daerah $C_{i,j}^{full}$ adalah kapasitans antara

elektroda i dan j ketika daerah pengukuran diberikan material dengan permitivitas tinggi sedangkan N_e adalah jumlah elektroda.

3.4.2 Metode Iterasi (Landweber Equation)

Fungsi algoritma Landweber dilakukan menurut Gambar 3.5, dimana nilai G/C adalah problema maju untuk mendapatkan vektor kapasitasns C_k dari vektor image G_k ke- k .



Gambar 3.5 Iterasi Landweber

Algoritma iterasi juga dapat diekspresikan dengan persamaan berikut :

$$G_o = S^T C \quad (3.39)$$

$$G_k + 1 = G_k + \alpha \cdot S^T \Delta C_k = G_k + \alpha \cdot S^T (C - S G_k) \quad (3.40)$$

Sangat dimungkinkan untuk meningkatkan resolusi dan akurasi citra ke nilai pendekatan dengan menggunakan teknik iterasi ini. Prosesnya adalah menggunakan persamaan (3.40). Secara terperinci, metode iterasi beroperasi sebagai berikut :

1. Set dari kapasitasns C untuk satu frame citra diukur dan set dari nilai inisial pixel G_o dihitung menggunakan persamaan (3.39).
2. Nilai pendekatan permitivitas G_o kemudian digunakan untuk menghitung kembali set kapasitasns C_1 menggunakan persamaan (3.35). Maka sebuah set kapasitasns error (*error capacitance*) $\Delta C = (C - C_1)$ diukur dan digunakan untuk menghasilkan set permitivitas error (*error permittivity*) $\Delta G_o = S^T \Delta C_o$ menggunakan persamaan (3.35) memberikan

$$\Delta C = C^* - S G_o \quad (3.41)$$

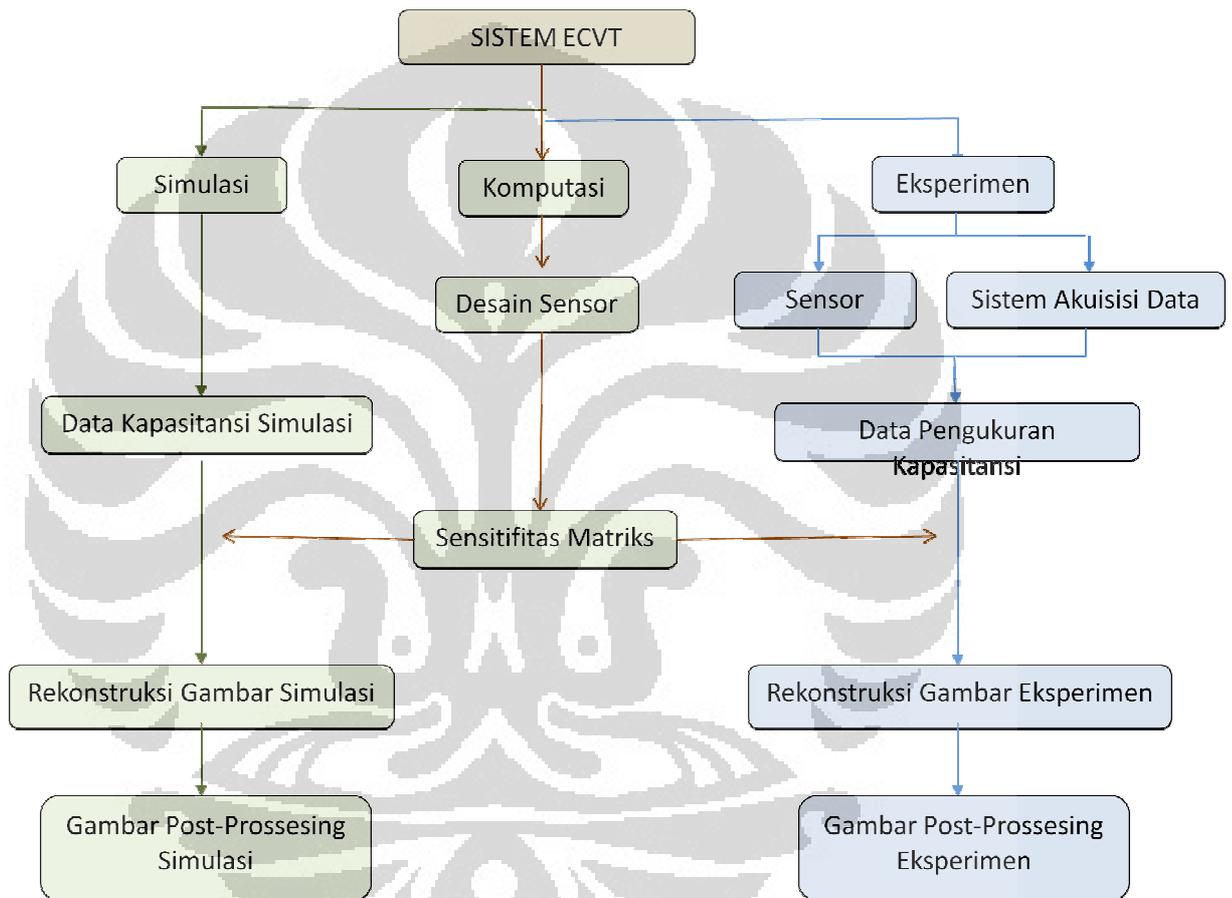
3. Permittivitas error kemudian digunakan untuk mengkoreksi set permitivitas sebelumnya untuk menghasilkan nilai set pixel G_2 yang baru, dimana $G_2 = G_1 + \Delta G$. Nilai permitivitas G_2 kemudian digunakan untuk menghasilkan nilai set kapasitansi C_2 yang baru dan pengulangan ini dilakukan berulang hingga nilai permitivitas konvergen menuju solusi yang sebenarnya.
4. Didapat persamaan iterative atau yang lebih dikenal dengan persamaan Landweber, yaitu :

$$G_{k+1} = G_k + \alpha S^T (C - S G_k) \quad (3.42)$$

dimana α adalah faktor penalti atau relaksasi [17]. Teknik penambahan faktor α digunakan oleh Reinecke dan Mewes yang digunakan untuk meningkatkan akurasi serta kekonvergenan, namun penggunaannya meningkatkan teknik penghitungan waktu.

BAB IV METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai penelitian yang dilakukan meliputi proses simulasi dan eksperimen. Gambar 4.1 merupakan skema penelitian yang dilakukan.



Gambar 4.1 Skema Penelitian

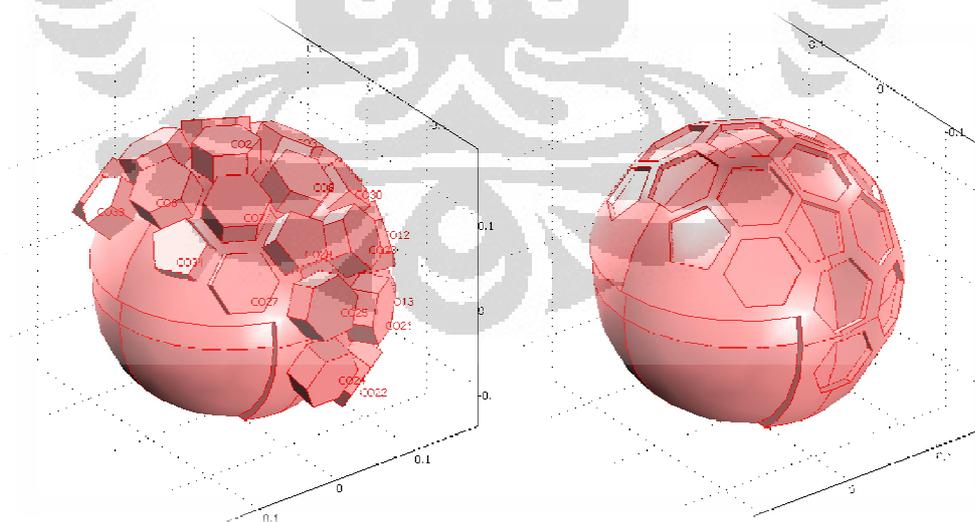
Komputasi dan Simulasi sistem ECVT dilakukan dengan menggunakan software COMSOL Multiphysics. Ver.3.4 dan MATLAB R2007b. Pada proses komputasi dilakukan desain sensor, perhitungan sensitifitas matrik, sedangkan simulasi melakukan pengukuran kapasitansi dengan variasi objek dengan distribusi muatan tertentu dan rekonstruksi gambar. Proses simulasi ini memanfaatkan metode elemen berhingga (*Finite Element Methode/FEM*) yang

ditandai dengan proses *meshing* pada software tersebut. FEM berguna untuk menyelesaikan permasalahan kompleks diantaranya adalah Persamaan Differensial Parsial, dengan melakukan diskretisasi dari suatu domain yang kontinu menjadi kumpulan subdomain yang berbeda. *Meshing* yang dilakukan disini adalah dalam kondisi objek 3D sehingga *meshing* berbentuk tetrahedral.

4.1 Komputasi Sistem ECVT

4.1.1 Desain Sensor

Desain sensor yang dibuat pada simulasi adalah berbentuk helm. Pembuatan sensor dimulai dengan pembuatan bola yang ukurannya hampir sama dengan ukuran kepala manusia pada bidang 3 dimensi. Untuk geometri elektroda yang digunakan adalah geometri segienam dan segilima. Pembuatan geometri elektroda sensor dilakukan pada bidang xy yang kemudian di *extrude* ke bidang 3 dimensi, tepatnya ke geometri bola yang telah dibuat pada bidang 3 dimensi. Bola memiliki boundary sebanyak 32 sensor elektroda, yang terdiri dari 26 sensor segienam dan 6 sensor segilima. Untuk membuat sensor sejumlah 32 sensor, geometri elektroda yang sudah di *extrude* tadi diputar dengan sudut 30° , 60° , 90° terhadap sumbu y dan kemudian diputar terhadap sumbu z 60° . Selanjutnya dilakukan *intersection* seperti pada gambar berikut:



Gambar 4.2 Model Desain Sensor

4.1.2 Parameter Fisika

Dalam melakukan simulasi ECVT, harus mengatur beberapa parameter fisika yang berperan pada sistem ECVT ini.

4.1.2.1 Parameter Subdomain

Subdomain merupakan bagian interior dari model sensor yang kita desain. Parameter fisika pada subdomain ini mengikuti persamaan Poisson seperti yang telah diturunkan pada bab sebelumnya.

$$\nabla(\epsilon(x, y)\nabla\phi(x, y)) = -\rho(x, y) \quad (4.1)$$

Untuk melakukan simulasi dilakukan pengaturan pada parameter ϵ (permitivitas), ρ (rapat muatan). Pengaturan parameter ini bergantung kepada simulasi apa yang ingin dilakukan. Untuk perhitungan sensitifitas, nilai rapat muatan ρ pada subdomain di set sama dengan nol karena dalam hal ini kita menggunakan media dielektrik, sedangkan untuk nilai permitivitas relatif dimasukkan nilai 1 yang menunjukkan bahwa di dalam sensor tersebut hanya terdapat udara (permitivitas relatif udara = 1). Sedangkan untuk perhitungan kapasitansi, nilai rapat muatan ρ dan ϵ diatur sesuai dengan kebutuhan. Simulasi untuk memperoleh nilai kapasitansi pada penelitian ini menggunakan nilai ρ bervariasi dari 0.1 dan 5 serta ϵ yang digunakan adalah 30, karena pada penelitian ini perhitungan kapasitansi yang ingin diperoleh berdasarkan pengaruh rapat muatan (ρ).

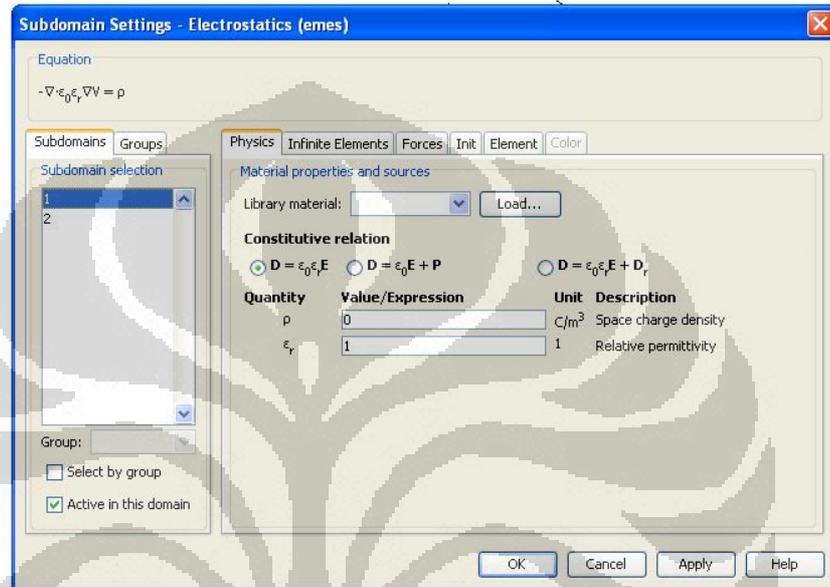
4.1.2.2 Parameter Boundary

Boundary merupakan bagian yang membatasi bagian luar dengan bagian dalam sensor. Pengaturan boundary merupakan pengaturan elektroda-elektroda yang dipasang pada sensor, sehingga elektroda tersebut di-*setting* sebagai input ketika dianggap sebagai sumber tegangan. Hal ini akan menimbulkan beda potensial antara elektroda satu dengan elektroda yang lainnya sehingga terdapat kapasitansi diantara elektroda-elektroda tersebut. Nilai kapasitansi ini dipengaruhi oleh distribusi permitivitas dan rapat muatan objek yang terdapat di dalam sensor.

4.1.2.3 Sensitivitas Matriks

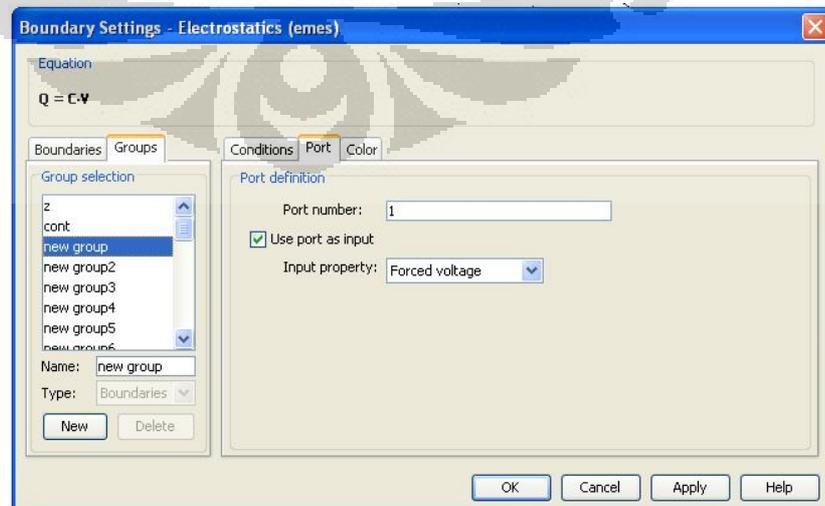
Setelah mendapatkan desain sensor yang memiliki 32 elektroda, melakukan proses perhitungan sensitivitas matriks dengan memasukkan data input kondisi sensor tersebut. Langkah-langkahnya sebagai berikut :

1. Memasukkan nilai ρ pada nilai nol di seluruh daerah subdomain karena simulasi dilakukan pada kondisi medium dielektrik.



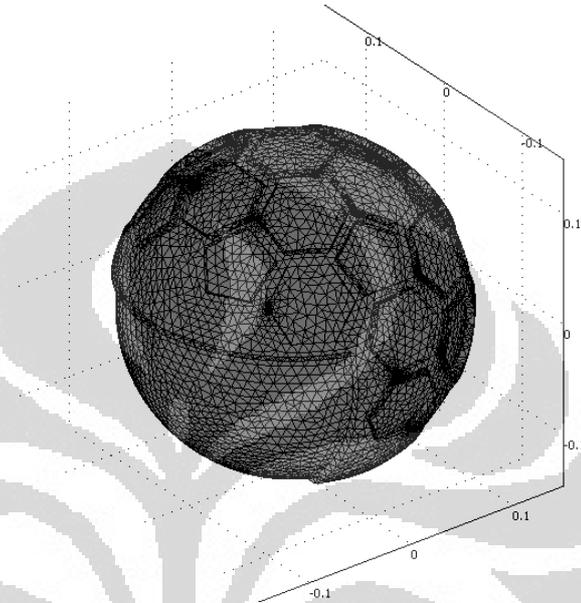
Gambar 4.3. Menu *Subdomain Setting*

2. Memasukkan nilai permittivitas ϵ bernilai 1 karena sensitivitas dicari dalam keadaan ruang kosong.
3. Memberikan kondisi *port force voltage* pada daerah boundary di setiap sensor. Diberikan dengan nilai 1 untuk port dalam kondisi aktif.



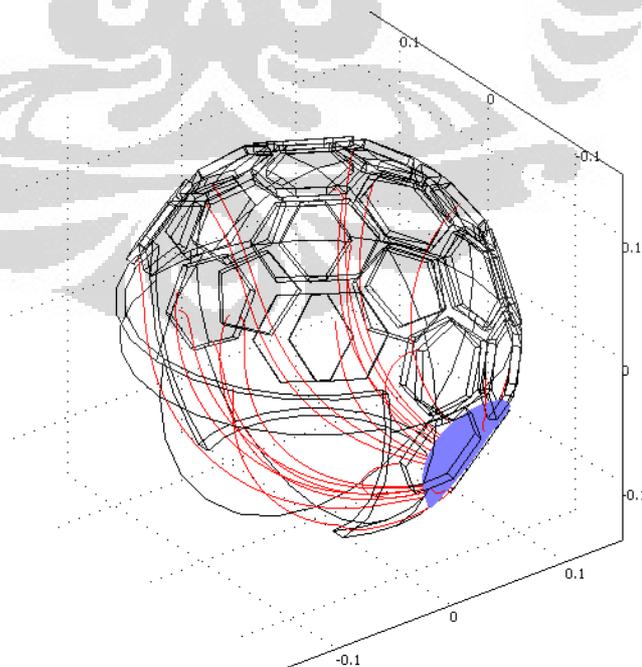
Gambar 4.4 Menu *Boundary Setting*

4. Proses meshing yaitu membagi keadaan menjadi bagian-bagian kecil (diskritisasi) dengan metode elemen berhingga sehingga memudahkan dalam mengambil data simulasi distribusi matriks sensitivitas pada komponen x, y dan z untuk masing-masing port aktif.



Gambar 4.5 Hasil Proses meshing

5. Setelah meshing selesai dilakukan, dilakukan *solve* untuk melihat distribusi medan listrik ketika tiap portnya aktif.

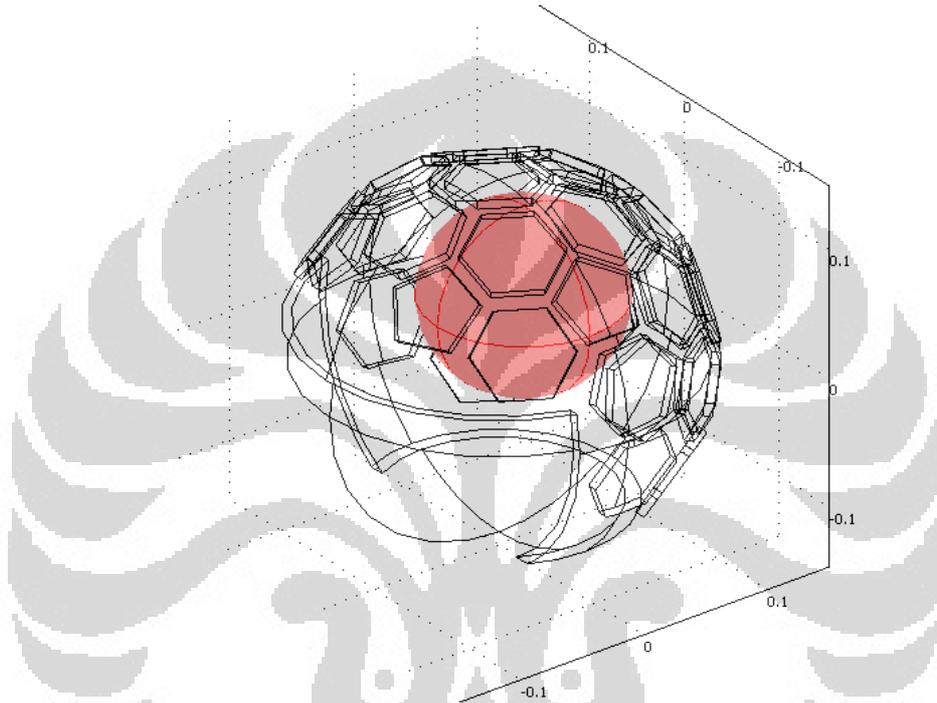


Gambar 4.6 Distribusi medan listrik.

6. Data pengukuran berupa distribusi medan listrik yang kemudian diekspor kedalam MATLAB untuk diproses menjadi data matriks sensitivitas.

4.2 Simulasi Sistem ECVT

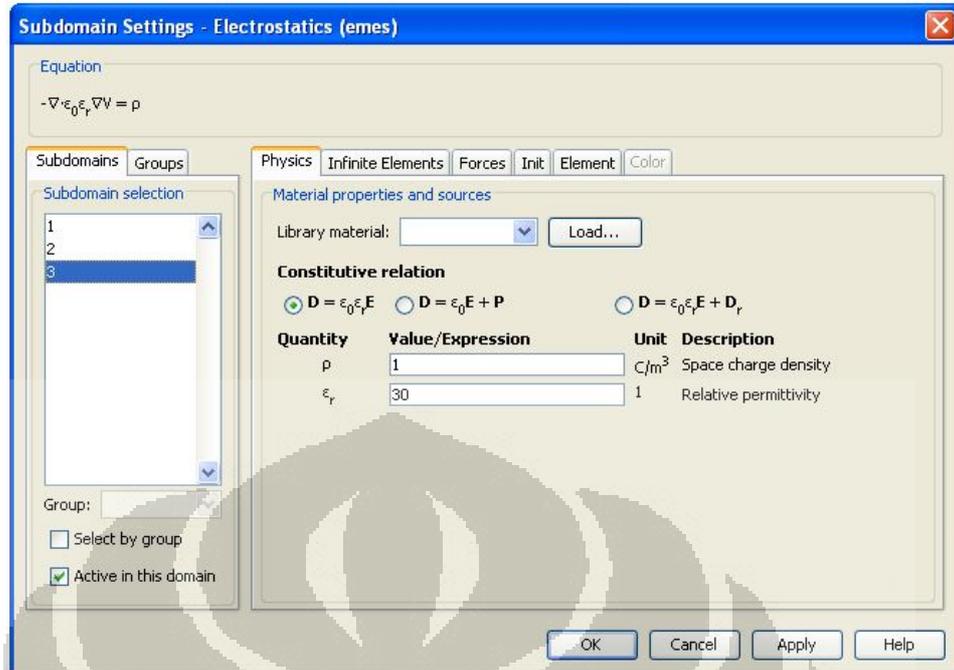
Simulasi rekonstruksi dilakukan dengan menggunakan sebuah bola yang berukuran jari-jari 7 cm diletakkan sedikit keatas pada bagian subdomain.



Gambar 4.7 Model Sensor dan Bola

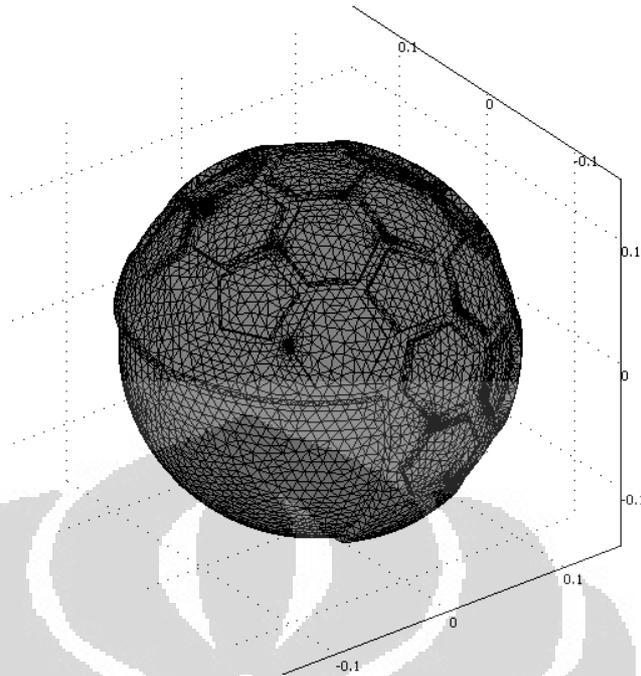
Selanjutnya dilakukan pengaturan subdomain dan boundary untuk memperoleh nilai kapasitans.

1. Mengatur subdomain seting dengan memasukkan nilai 0 untuk ρ dan 1 untuk ϵ pada poin 1 yang adalah merupakan bola subdomain dari sensor yang digunakan. Sedangkan untuk poin 2 yang merupakan objek berupa bola denga jari-jari 7 cm yang akan direkonstruksi menggunakan nilai 1 untuk ρ dan 30 untuk ϵ yang bermaksud bahwa bola tersebut memiliki rapat muatan yang nilainya adalah 1 C/m^3 .



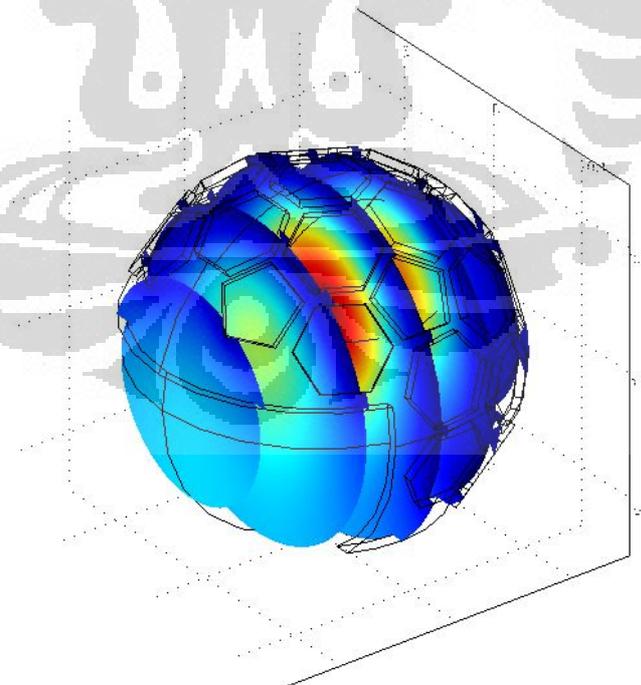
Gambar 4.8 Menu *Subdomain Setting* Objek Bola

2. Mengatur *Boundary setting* dengan menggunakan *port force voltage*, dimana satu elektroda sebagai input dan elektroda lainnya *floating*
3. Melakukan proses *meshing* yang merupakan penyelesaian suatu kasus (solve problem) dengan membagi domain kasus kedalam beberapa bagian kecil. Semakin kecil ukuran mesh, maka semakin akurat solusi yang diperoleh. Ukuran mesh yang digunakan pada simulasi yang dilakukan adalah ukuran mesh 0.01 pada *mapped mesh parameter* sehingga meshing merata diseluruh bagian model sensor dan objek.



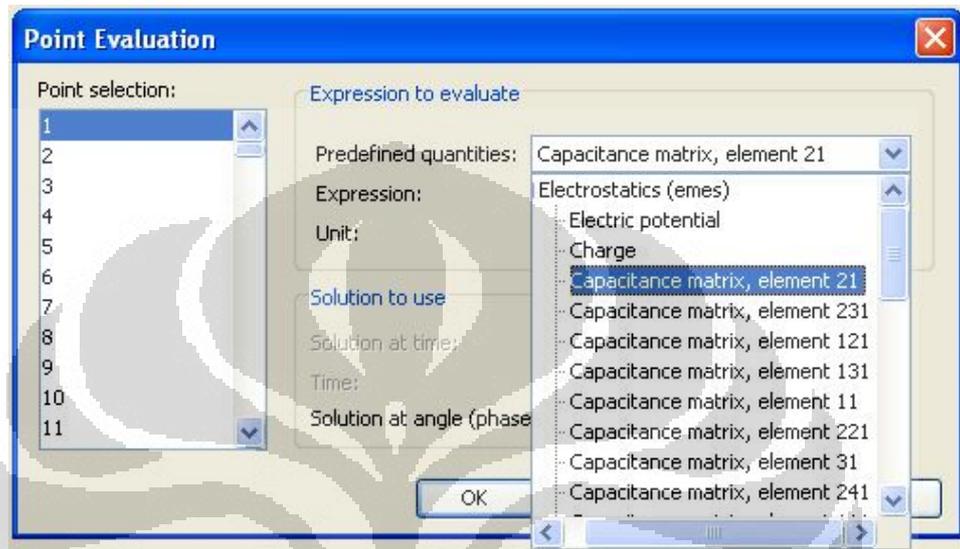
Gambar 4.9 Hasil Mesh Bola

4. Melakukan solve, sehingga diperoleh distribusi medan listriknya. Pada Gambar 4.11 dapat dilihat bahwa pada bagian bola terdapat bagian yang berwarna merah yang menandakan nilainya lebih tinggi dibandingkan dengan nilai sekelilingnya.



Gambar 4.10 Solve Bola

5. Untuk memperoleh nilai kapasitansinya, menggunakan option Point Evaluation. Data kapasitansi yang terukur merupakan matriks kapasitansi pasangan elektroda sebanyak jumlah pengukuran yaitu 496 pengukuran untuk sensor 32 elektroda.



Gambar 4.11 Menu Post Processing Objek Bola

4.3. Metode Eksperimen

4.3.1 Alat dan Bahan

Eksperimen dilakukan dengan menggunakan tiga komponen penting adalah sensor, Data Acquisition System (DAS), dan komputer seperti pada Gambar 4.13 berikut:



Gambar 4.12 Eksperimen Sistem ECVT

4.3.2 Pengambilan Data Kapasitans

Pengambilan data kapasitans dilakukan dengan melakukan kalibrasi terhadap dua keadaan, yaitu keadaan diisi udara (empty) dan keadaan diisi penuh dengan air (full). Langkah-langkah proses pengambilan data kapasitans pada sensor ECVT delapan elektroda yaitu :

1. Dalam keadaan kosong, diberikan beda potensial +5V pada salah satu sensor dan kemudian sensor lain dibuat dalam keadaan floating.
2. Pemberian beda potensial pada salah satu sensor memberikan distribusi medan listrik keluar terhadap seluruh sensor. Kemudian pemberian potensial dilakukan bergantian untuk setiap sensor. Sehingga didapat nilai keseluruhan untuk nilai kapasitans dalam keadaan kosong (empty)
3. Dilakukan proses yang sama pada keadaan full, sehingga didapat nilai kapasitans dalam keadaan terisi (full)
4. Selanjutnya, diberikan objek tertentu di dalam sensor dengan proses seperti pada point (1) dan (2) sehingga didapat distribusi medan listrik berbeda dan nilai kapasitans ketika terisi objek.

Dari proses pengambilan data pada sensor, didapat tiga data yaitu data dalam keadaan kosong (C_{empty}), data dalam keadaan penuh (C_{full}) dan data ketika terisi objek ($C_{measurement}$). Semua data dibuat dalam kondisi matriks.

Kapasitans diukur dengan persamaan :

$$C_{ij} = \sum_i^{Ne} \sum_{j=i+1}^{Ne} \frac{C_{i,j}^{meas} - C_{i,j}^{empty}}{C_{i,j}^{full} - C_{i,j}^{empty}} \quad (4.2)$$

Dimana $C_{i,j}^{meas}$ adalah kapasitansi yang diukur antara elektroda i dan j, $C_{i,j}^{empty}$ adalah kapasitansi antara elektorda padangan i dan j ketika diberikan material dengan permitivitas rendah, daerah $C_{i,j}^{full}$ adalah kapasitansi antara pasangan elektroda i dan j ketika daerah pengukuran diberikan material dengan permitivitas tinggi. Sedangkan Ne adalah jumlah elektroda.

4.3.3 Mental Task

Prinsip dari pemilihan perbedaan *mental task* adalah untuk menghasilkan gelombang otak yang dapat dideteksi dengan mudah dan berbeda. Aktifasi yang

dilakukan sebaiknya terjadi dekat dengan area cortex sehingga dapat dideteksi oleh elektroda. Dengan tujuan untuk menghasilkan pola sinyal listrik otak yang berbeda, *mental task* yang diberikan sebaiknya mengaktifkan bagian yang berbeda pada otak. Karena itu pengetahuan dari area cortical dan fungsinya dapat digunakan ketika memilih *mental task*. Sebagai contoh, pergerakan tangan kanan seharusnya mengaktifkan cortex motor bagian kiri dan sebaliknya. *Visual task* mengaktifkan area yang berhubungan dengan visual, kemudian *arithmetic task* seharusnya mengaktifkan cortex prefrontal.

Beberapa *mental task* yang diberikan adalah:

1. Baseline task (Relax), subjek dalam keadaan mata tertutup dan mencoba untuk relaks sebanyak mungkin.
2. Math Task untuk subjek yang diberikan masalah perkalian yang rumit seperti 59 kali 49, dan kemudian diminta untuk menyelesaikannya tanpa mengatakan atau membuat perpindahan fisik.
3. Tes Motorik yaitu melangkah menggerakkan tangan kanan dan tangan kiri secara bergantian
4. Mendengarkan musik untuk mengaktifkan bagian temporal

Pastikan bahwa mata terbuka pada semua mental tasks kecuali pada baseline task. Masing-masing mental task dilakukan selama 4 menit.

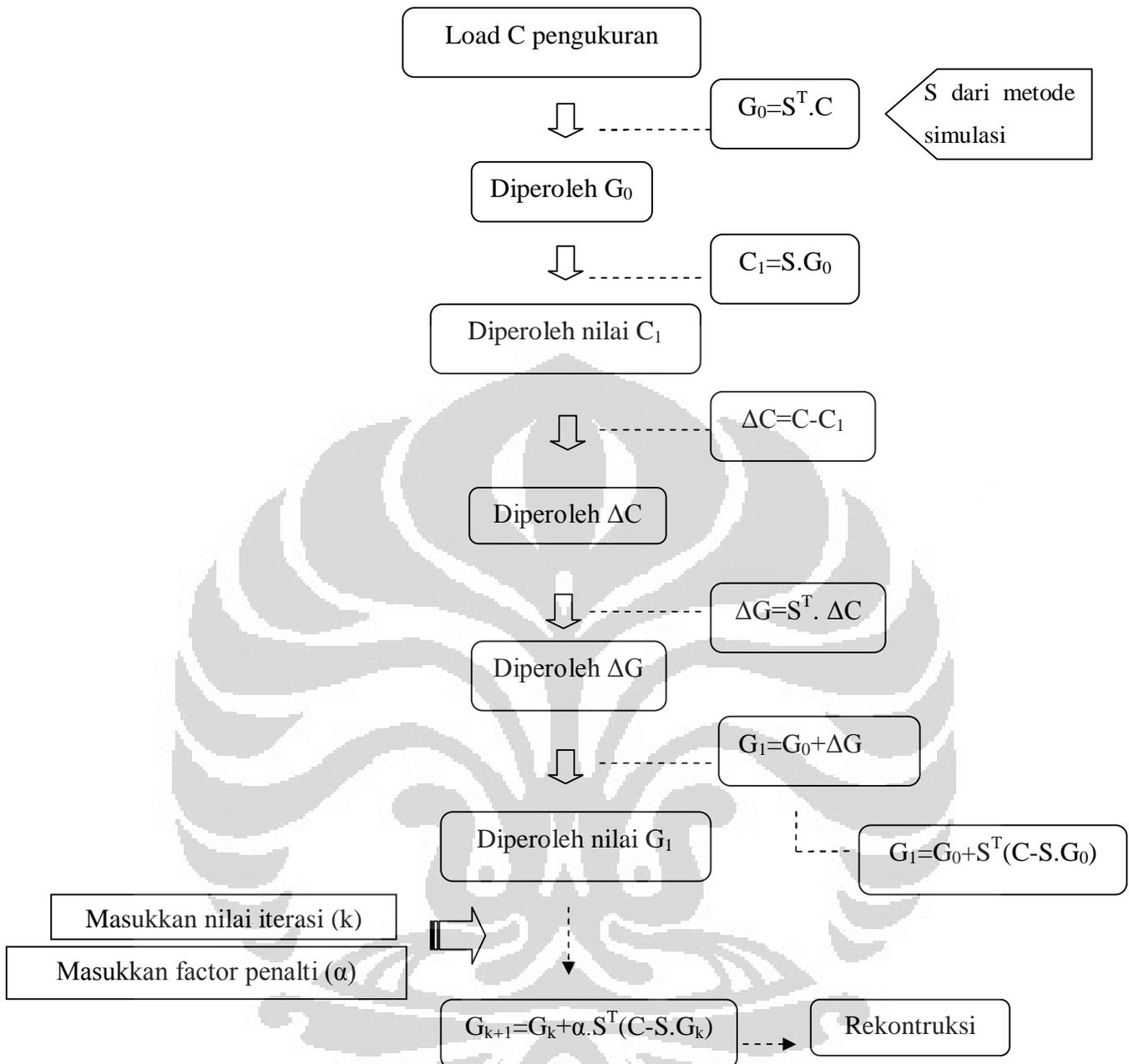
4.4 Rekonstruksi Citra

Sensitifitas dan data kapasitansi yang diperoleh digunakan untuk rekonstruksi citra objek yang telah dilakukan pada eksperimen. Proses rekonstruksi ini dilakukan melalui dua metode yaitu Linear Back Projection dan Landweber Equation script pada software MATLAB.

4.4.1 Metode Landweber Equation

Proses rekonstruksi metode Landweber Equation yaitu mencari nilai G dari nilai kapasitans terukur C (dari pengukuran sensor yang diambil oleh sistem akuisisi data berbentuk matriks) dan nilai sensitivitas matriks S yang didapat dari simulasi. Kemudian dilakukan proses iterasi dan penambahan faktor penalti.

Flowchart metode Landweber Equation, ditunjukkan oleh Gambar 4.15



Gambar 4.13 Langkah rekonstruksi metode Landweber

Pada perintah matlab sebagai berikut :

1. Mendapatkan nilai C dari pengukuran :

$$dn = (C_{means} - C_{empty}) ./ (C_{full} - C_{empty});$$

dn : nilai kapasitans total yang diambil setelah objek masuk

C_{means} : nilai kapasitans ketika diisi objek tertentu

Empty : nilai kapasitans ketika diisi udara / tidak ada objek (empty)

Cfull : nilai kapasitans ketika diisi air / ada objek(full)

$$y1 = dn';$$

y1 : data kapasitans dn dalam bentuk tranpos

2. Mencari nilai ΔC

$$\text{phi1} = y1 - \text{ant3d}' * v0$$

phi1 : mendapatkan nilai ΔC

y1 : nilai kapasitans dari point (1)

ant3d' : nilai matriks

v0 : nilai permitivitas G_K

3. Mencari nilai G_{k+1}

$$v = v0 + \text{alpha0} * (\text{an3d}' * \text{phi1});$$

phi1 : nilai ΔC dari point (2)

alpha0 : nilai alpha

an3d : nilai matriks sensitivitas

v0 : nilai permitivitas G_k

v : nilai permitivitas G_{k+1}

Perintah (command) untuk metode Landweber Equation selengkapnya terdapat di lampiran.

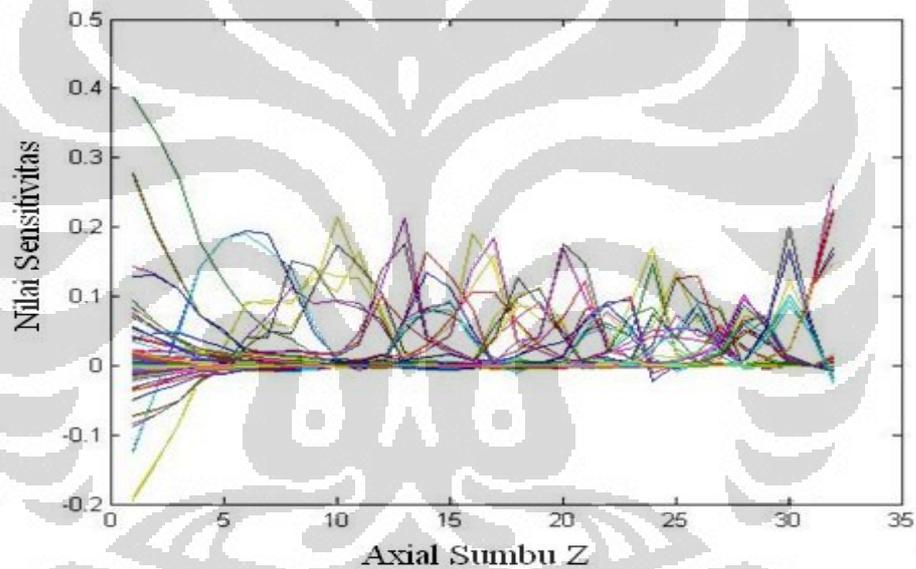
BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

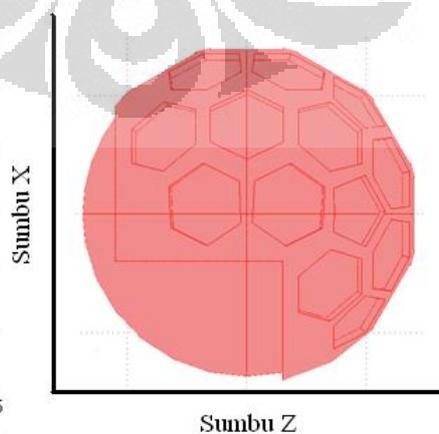
5.1 Distribusi Sensitivitas Matriks

5.1 Distribusi Sensitivitas Matriks

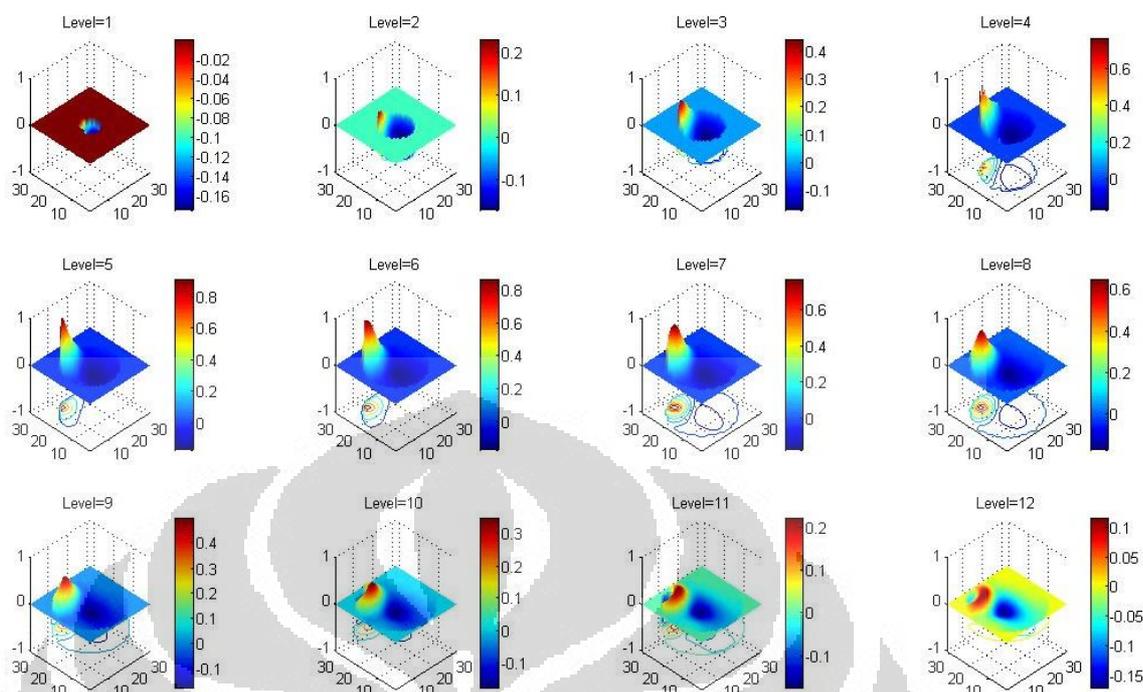
Sensitivitas matrik yang diperoleh untuk Sensor Helm ECVT 32 sensor cukup baik dapat dilihat dengan banyaknya variasi medan listrik sepanjang sumbu z yang merupakan *sensing area*. Grafik distribusi medan listrik masing-masing pasangan sensor yang dinormalisasi terhadap sumbu z menunjukkan variasi yang menggambarkan daerah yang sensitive terhadap sensor ECVT (voksel 32x32x32) ditunjukkan pada Gambar 5.1(a), (b) dan (c).



(a)



(b)



Gambar 5.1(a) Grafik distribusi sensitivitas ternormalisasi pada sumbu z, **(b)** Model Sensor posisi xz, **(c)** Plot Sensitivitas 3D untuk pasangan sensor 1 dan 2

Gambar 5.1(a) menunjukkan distribusi medan listrik dari 32 sensor dalam bentuk garis yang berbeda warna. Total garis berjumlah 496 garis. Masing garis mewakili distribusi pasangan sensor. Warna pada garis menunjukkan perbedaan antara pasangan sensor. Sumbu horizontal adalah sumbu z yang merupakan banyak pixel yang digunakan sebanyak 32 dimulai dari 0 sampai 32. Sedangkan sumbu vertikal mewakili nilai medan listrik.

Pada Gambar 5.1(a) dapat dilihat bahwa banyak terdapat variasi pada bagian tengah dari *sensing area*. Banyaknya variasi ini menandakan bahwa sensitivitas pada posisi tersebut semakin tinggi, artinya apabila objek dengan permitivitas tertentu diletakkan pada area ini, maka akan dapat dideteksi dengan baik oleh sensor. Sedangkan pada bagian pinggir sebelah kanan tidak terdapat banyak variasi, daerah yang tidak memiliki banyak variasi ini disebut dengan *dead zone*, yang mana pada daerah ini sensor tidak dapat mendeteksi perubahan kapasitansi apabila diletakkan objek yang memiliki permitivitas lebih tinggi dengan sekelilingnya. Munculnya *dead zone* ini disebabkan oleh pada bagian bawah tersebut tidak terdapat sensor, dan pada pixel selanjutnya sensor hanya

terdapat pada bagian setengah lingkaran saja, sehingga sensitivitas pada posisi ini lebih rendah dapat dilihat pada Gambar 5.1(b).

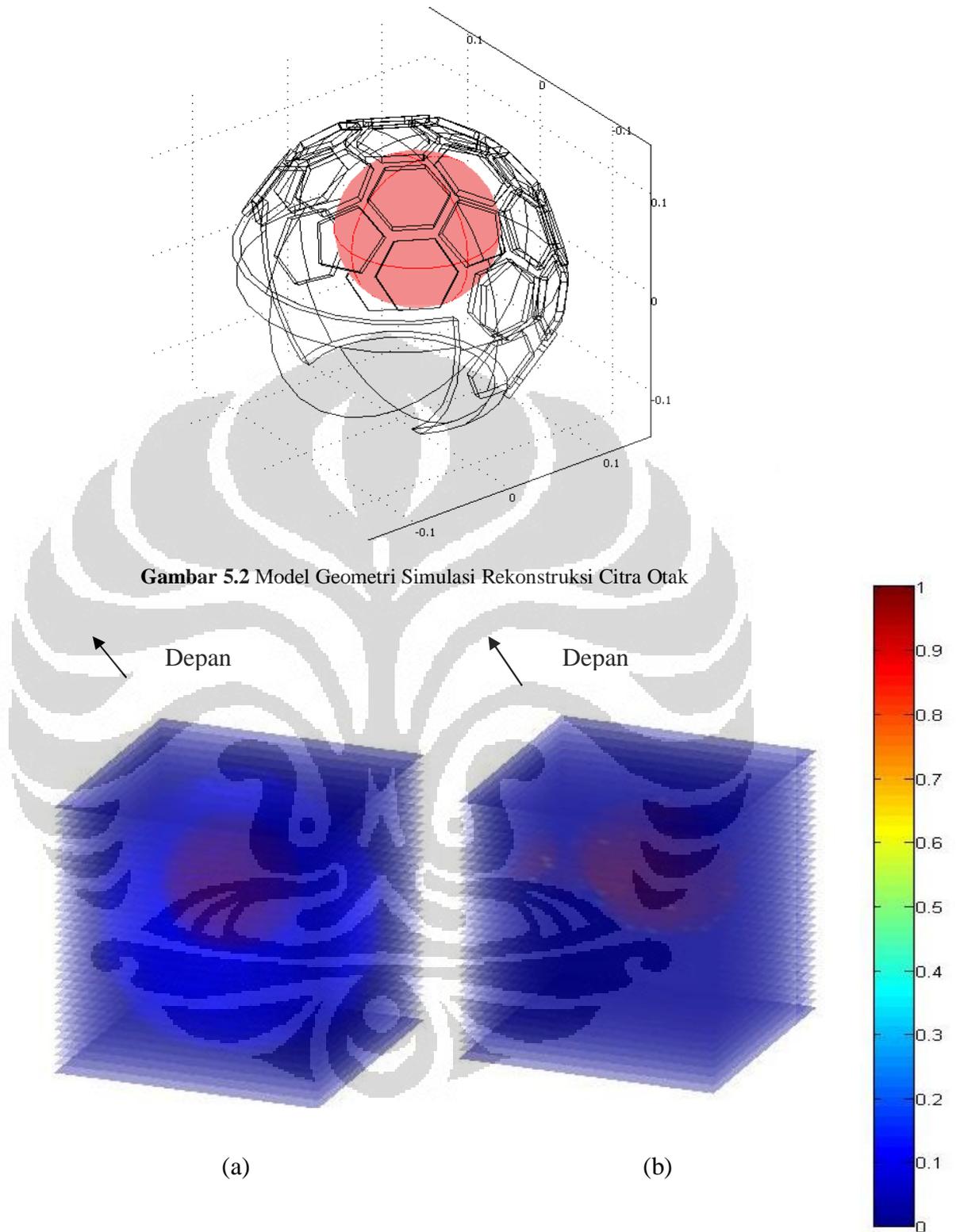
Pada Gambar 5.1(a) sensitivitas tertinggi adalah sensitivitas pada pasangan sensor yang berada satu tingkat sejajar (terutama posisi parallel). Sensor Helm 32 Sensor Heksagonal terdiri dari 8 tingkat sehingga diperoleh distribusi sensitivitas seperti pada Gambar 5.1(a). Semakin banyak variasi distribusi sensitivitas akan semakin baik sensitivitasnya. Sensitivitas yang diperoleh ini memiliki variasi yang cukup banyak sehingga kemampuan untuk mendeteksi objek semakin baik.

Gambar 5.1(c) adalah merupakan plot sensitivitas 3D untuk pasangan sensor 1 dan 2. Warna merah menunjukkan intensitas yang tinggi, sedangkan warna biru menunjukkan intensitas yang rendah. Rendah tingginya intensitas ditentukan oleh interaksi medan listrik. Makna dari warna merah adalah jika ada suatu benda dengan permitivitas yang lebih besar dibandingkan permitivitas sekitarnya yang diletakkan pada posisi warna merah maka akan sangat mempengaruhi nilai kapasitansi yang diukur karena suatu nilai kapasitansi sangat bergantung pada distribusi sensitivitas medan listrik. Makna warna biru adalah jika suatu benda dengan permitivitas yang lebih besar dibandingkan permitivitas disekelilingnya, yang diletakkan pada posisi warna biru maka tidak akan mempengaruhi nilai kapasitansi yang diukur karena pada posisi tersebut nilai dari interaksi medan listriknya bernilai negatif. Ketentuan ini berlaku untuk semua sensitivitas yang telah di normalisasi.

Pengukuran sensitivitas juga bergantung dengan efek desain sensor, bentuk objek dan ukuran sensor. Pemetaan sensitivitas juga tergantung pada banyaknya sensor yang dibuat dan vokal yang diinginkan [2].

5.2 Hasil Rekonstruksi Simulasi

Simulasi dilakukan dengan menggunakan bola yang diberi rapat muatan yang bervariasi yang tujuannya adalah mensimulasikan aktifitas otak manusia. Simulasi dilakukan dengan menggunakan sebuah bola yang memiliki jari-jari sebesar 7 cm dengan permitivitas 30. Bola ini dianalogikan sebagai otak manusia, kemudian diberikan distribusi rapat muatan yang berbeda untuk mensimulasikan aktivitas otak manusia yang berbeda.

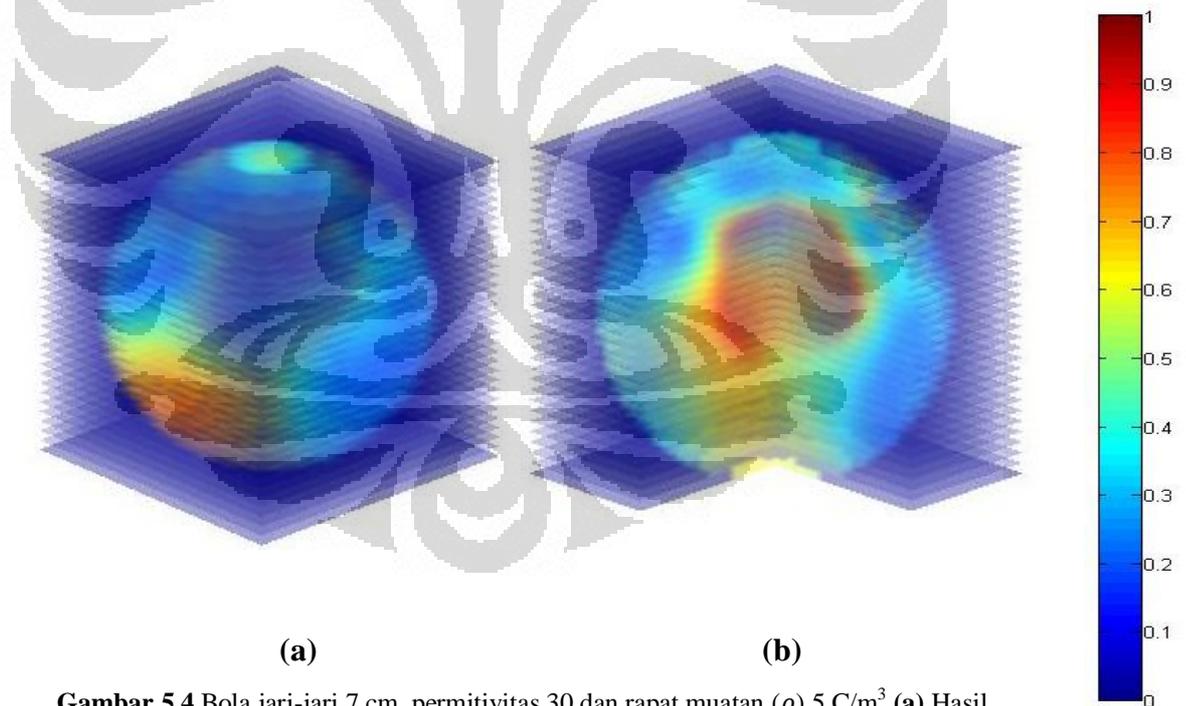


Gambar 5.3 Bola dengan jari-jari 7 cm, permitivitas 30, ρ adalah 0 (a) Sebelum Rekonstruksi, (b) Setelah Rekonstruksi

Ketika dilakukan simulasi dengan menggunakan nilai permitivitas saja yaitu bernilai 30 sedangkan nilai rapat muatan adalah 0 diperoleh hasil

rekonstruksi seperti pada Gambar 5.3. Gambar 5.3(a) adalah gambar asli dimana bola diletakkan didalam sensor. Gambar 5.3(b) adalah gambar hasil rekonstruksi dari gambar asli Gambar 5.3(a). Hasil rekonstruksi yang diperoleh cukup bagus. Sensor helm mampu merekonstruksi bola yang berada didalam sensor. Namun, hasil rekonstruksi yang diperoleh belum merupakan bola penuh, ada beberapa bagian bola yang tertarik beberapa sisi. Hal ini terjadi karena bagian depan adalah merupakan deadzone sehingga tidak mampu mendeteksi perubahan permitivitas didalam sensor. Ada beberapa bagian dari bola yang memiliki sensitivitas tinggi. Dan juga sebagian dari objek dilingkupi oleh sensor penuh ada bagian dari objek yang tidak dilingkupi oleh sensor. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.2, bagian depan sensor, yaitu bagian wajah tidak ditutupi oleh elektroda.

Selanjutnya dilakukan simulasi dengan memberikan nilai rapat muatan yang bervariasi pada bola untuk mensimulasikan aktivitas otak manusia yang terjadi karena ada nilai rapat muatan.



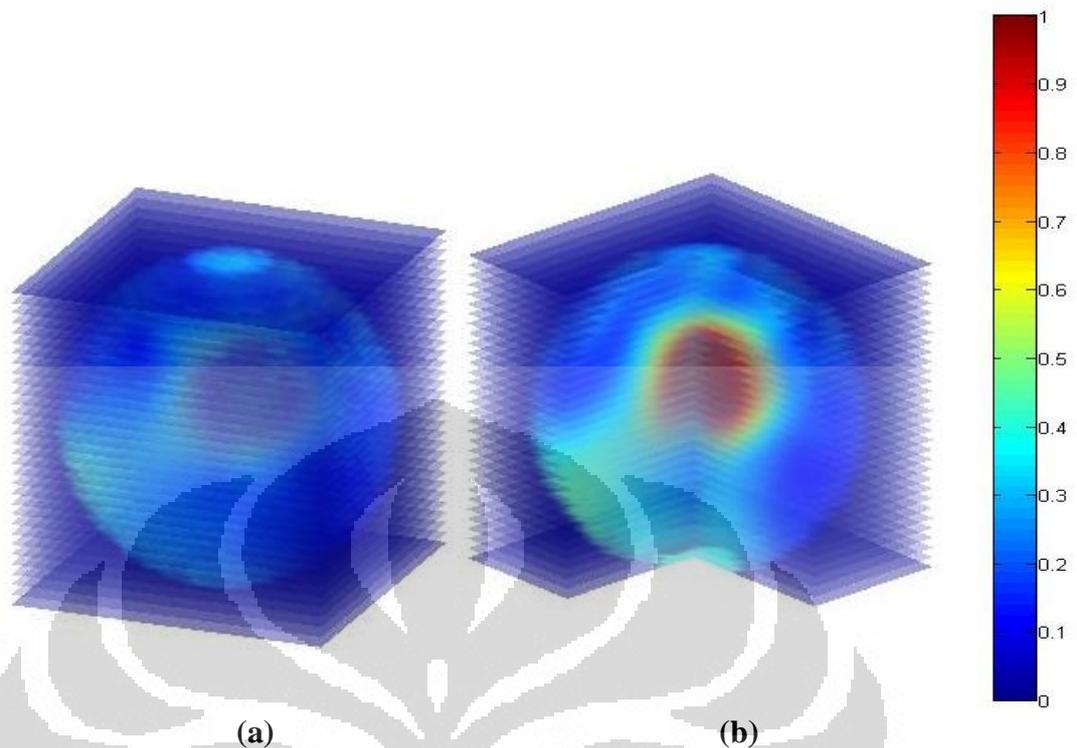
Gambar 5.4 Bola jari-jari 7 cm, permitivitas 30 dan rapat muatan (ρ) 5 C/m^3 (a) Hasil Rekonstruksi Full, (b) Hasil Rekonstruksi Sebagian

Simulasi yang dilakukan adalah dengan menggunakan objek bola merupakan analogi otak manusia yang diletakkan dibagian atas Sensor Helm ECVT sama dengan simulasi sebelumnya yaitu pada Gambar 5.2 dan Gambar 5.3

untuk kondisi posisi dari bola. Simulasi ini dilakukan dengan memberikan rapat muatan pada bola dimana rapat muatan adalah analogi dari distribusi muatan didalam otak manusia. Nilai rapat muatan yang diberikan adalah 5 C/m^3 dan permitivitas adalah 30.

Dilihat pada gambar, terdapat bagian yang berwarna merah, biru dan biru muda, warna ini menandakan nilai permitivitas objek yang telah direkonstruksi, warna merah menunjukkan nilai permitivitas yang lebih tinggi sedangkan warna biru tua menunjukkan nilai permitivitas yang lebih rendah, sedangkan warna biru muda adalah nilai permitivitas diantaranya. Dibandingkan dengan hasil rekonstruksi Gambar 5.3(b) terlihat sangat berbeda sekali dengan hasil rekonstruksi dari bola yang diberikan rapat muatan. Pada Gambar 5.3(b) bola hasil rekonstruksi terkonsentrasi pada satu daerah saja, sedangkan daerah disekeliling bola tetap berwarna biru tua, berbeda dengan Gambar 5.4, daerah disekeliling bola mengalami perubahan warna menjadi biru muda yang menandakan bahwa nilai permitivitasnya lebih tinggi dari kondisi berwarna biru tua. Hal ini terjadi karena adanya pemberian nilai rapat muatan pada bola. Keberadaan rapat muatan akan mempengaruhi distribusi medan listrik didalam sensor. Rapat muatan yang berasal dari bola akan memberikan medan listrik ke segala arah. Medan listrik dari rapat muatan akan dipengaruhi oleh medan listrik yang berasal dari elektroda sensor yang diaktifkan. Sehingga peristiwa polarisasi muatan yang terjadi didalam objek akan berubah, perubahan polarisasi ini akan mempengaruhi nilai kapasitansi yang diukur yang nantinya nilai permitivitas daerah disekeliling bola yang diberikan rapat muatan. Pemberian rapat muatan meningkatkan permitivitas daerah yang berada disekeliling bola bermuatan karena pengaruh dari medan listrik dari muatan didalam objek. Hasil rekonstruksi bola yang diperoleh cukup jelas, dengan memperlihatkan bola yang berpermitivitas dan bermuatan dengan jelas juga terdapat perubahan nilai kapasitansi disekeliling bola. Hal ini dikarenakan pengaruh rapat muatan terdistribusi kesemua arah pada bola dan mempengaruhi kondisi subdomain yang tidak diberi objek. Sehingga diperoleh hasil rekonstruksi Gambar 5.4.

Rekonstruksi yang diperoleh dengan kalibrasi rapat muatan 0.1 C/m^3 dan permitivitas 30 adalah Gambar 5.5 berikut :



Gambar 5.5 Bola dengan jari-jari 7 cm, rapat muatan (ρ) 0.1 C/m^3 dan permitivitas 30. (a) Hasil Rekonstruksi Full, (b) Hasil Rekonstruksi Sebagian

Gambar 5.5 mampu menunjukkan hasil rekonstruksi untuk bola dengan permitivitas 30 dan rapat muatan 0.1 C/m^3 . Hasil rekonstruksi berbeda dengan hasil rekonstruksi pada Gambar 5.4. Pada Gambar 5.5 ini nilai rapat muatan yang diberikan lebih kecil dari pada sebelumnya, dapat dilihat bahwa nilai permitivitas daerah yang disekitar bola sedikit lebih rendah dibandingkan dengan Gambar 5.4 sebelumnya menunjukkan bahwa rapat muatan lebih sedikit dibandingkan dengan yang sebelumnya.

5.3 Hasil Eksperimen

Eksperimen dilakukan kepada 5 orang yang berumur sekitar 21-23 tahun terdiri dari 2 orang laki-laki dan 3 orang perempuan dinamai dengan Orang A, B, C, D, dan E. Setiap orang diberikan 5 mental task yang masing-masingnya selama 1 menit (60 detik). Pemberian mental task kepada orang adalah pada kondisi duduk dan memakai sandal untuk mencegah kondisi ground dan orang tidak

memegang apapun. Gambar 5.6 menunjukkan kondisi saat melakukan eksperimen.



Gambar 5.6 Metode Eksperimen

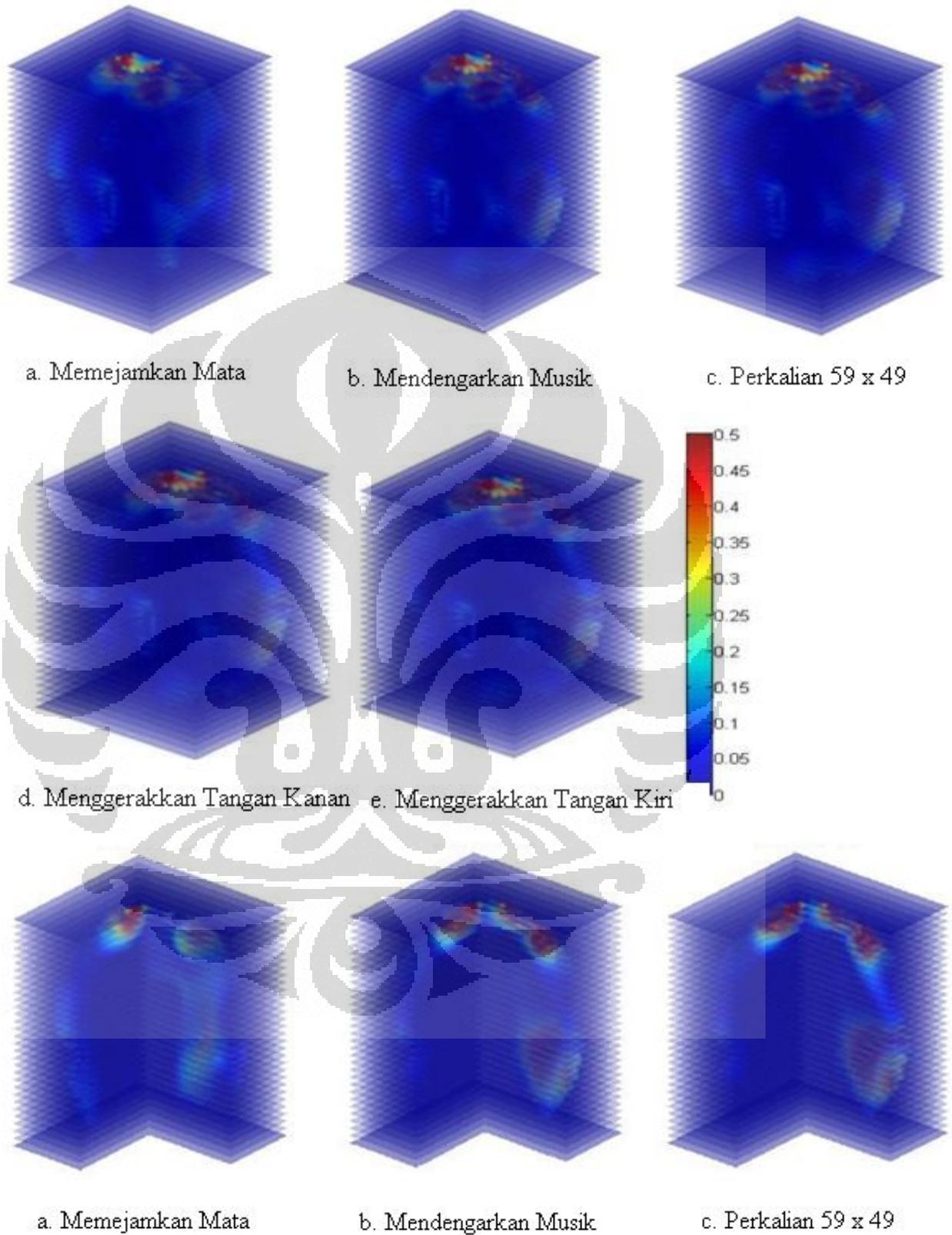
Hasil eksperimen adalah rekonstruksi otak manusia yang diberikan aktifitas otak yang berbeda.

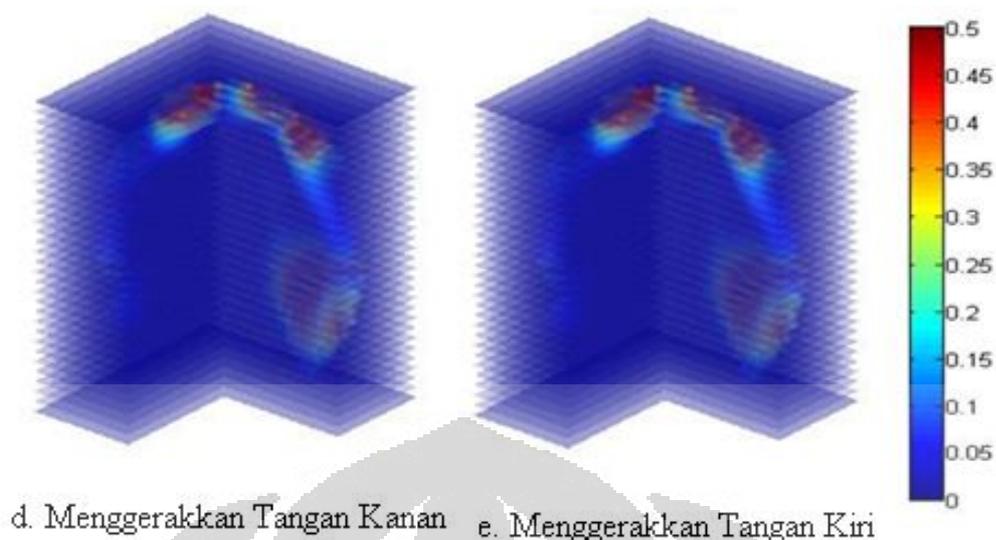
Tabel 5.1 Pemberian Mental Task dan Tujuan

No	Mental Task	Tujuan
1.	Memejamkan mata dan rileks sebanyak mungkin	Mengaktifkan gelombang Alpha
2.	Mendengarkan Musik	Mengaktifkan Otak Bagian Temporal
3.	Perkalian 59 x 49	Mengaktifkan otak dengan aktifitas yang tinggi
4.	Menggerakkan Tangan Kanan	Mengaktifkan otak sebelah kiri
5.	Menggerakkan Tangan Kiri	Mengaktifkan otak sebelah kanan

Dari eksperimen yang dilakukan diperoleh hasil rekonstruksi seperti berikut ini :

1. Objek A





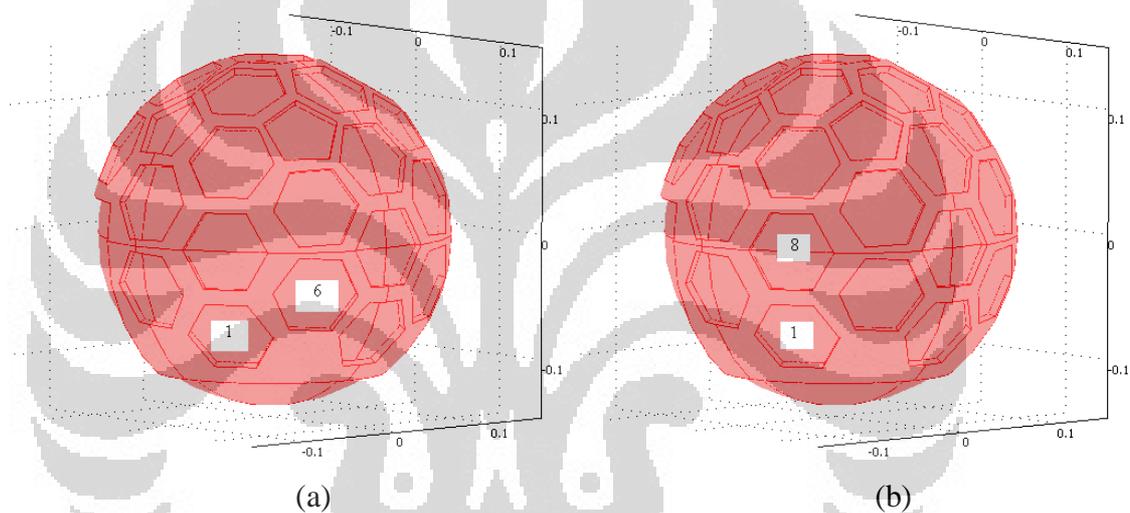
Gambar 5.7 Hasil Rekonstruksi Eksperimen Objek A

Gambar 5.7 adalah hasil rekonstruksi eksperimen yang dilakukan kepada objek A dengan 5 perlakuan. Hasil rekonstruksi tersebut diperoleh dari nilai kapasitansi yang diukur oleh Sensor ECVT. Dari kelima gambar diatas, hasilnya terlihat sama. Sensor ECVT baru bisa mendeteksi otak pada bagian atas dan beberapa bagian disamping, sedangkan beberapa bagian lainnya belum bisa diamati perubahannya pada gambar. Hal ini karena berdasarkan kurva sensitivitas sensitivitas pada bagian atas lebih baik, dan daerah itu tercover dengan baik oleh sensor. Disamping itu pada saat melakukan eksperimen, sensor berbentuk helm yang dipasangkan kepada objek langsung menempel dengan bagian atas kepala manusia. Sedangkan pada sisi-sisi lainnya tidak langsung menempel dengan kepala manusia, oleh karena itu jarak antara sensor dengan kepala manusia pada bagian atas akan semakin kecil sedangkan pada bagian lainnya cukup jauh. Sehingga dengan jarak yang lebih pendek antara sensor dengan objek yang diamati, maka aktifitas otakpun akan dideteksi dengan lebih baik yang menyebabkan nilai permitivitas yang diperoleh lebih besar.

Ketika diamati lebih teliti ada sedikit perbedaan pada Gambar 5.7a dengan keempat gambar lainnya. Pada Gambar 5.7a distribusi perubahan warna lebih sedikit dibandingkan dengan gambar lainnya. Gambar 5.7a merupakan kondisi objek memejamkan mata, dimana aktifitas otak lebih sedikit dibandingkan dengan mental task lainnya. Jadi nilai kapasitansi yang diperoleh pun akan lebih rendah

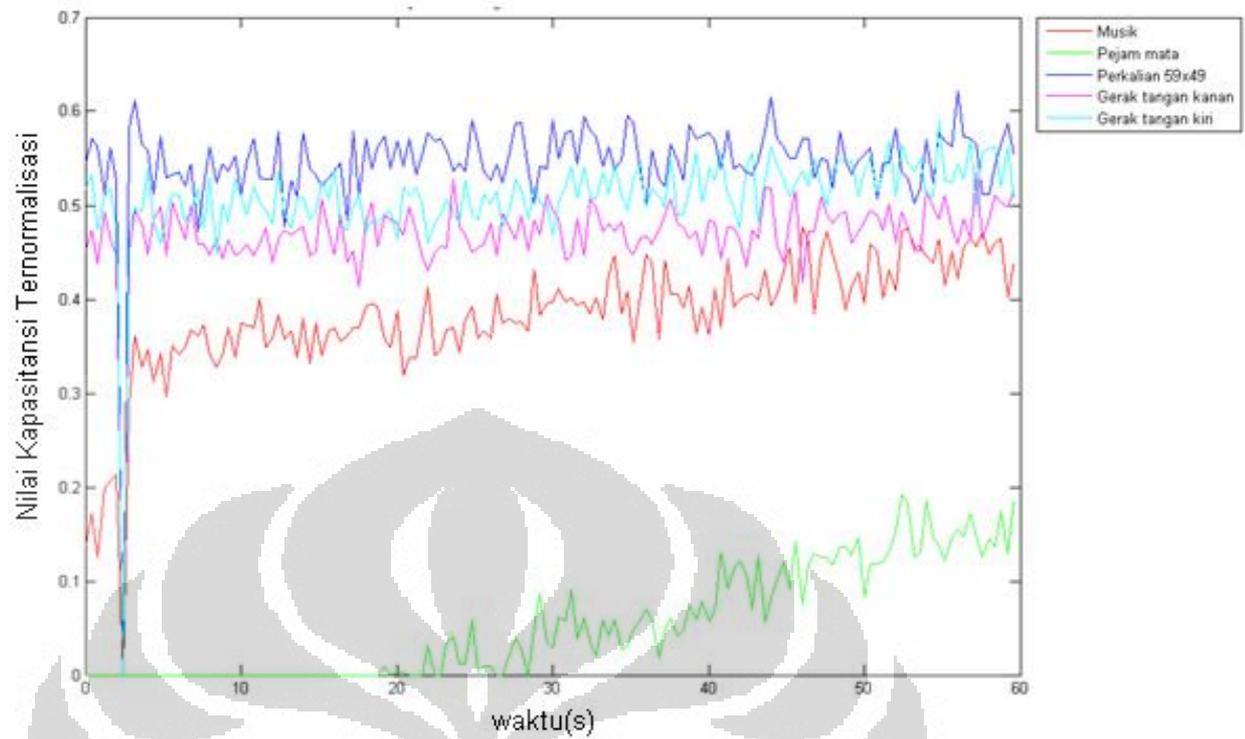
dibanding dengan kondisi lainnya, akibatnya distribusi perubahan warna pada hasil rekonstruksi semakin sedikit. Untuk Gambar 5.7b, 5.7c, 5.7d, dan 5.7e semua gambar terlihat sama tetapi perlakuan yang diberikan berbeda. Sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya sensitivitas sensor untuk masing-masing daerah berbeda.

Perubahan nilai kapasitansi yang paling bisa diamati adalah pada pasangan sensor sumber 1 dan pasangan sensor detektor 6, serta pasangan sensor sumber 1 dengan detektor 8. Kedua pasangan ini berada pada sisi samping kanan agak ke belakang. Untuk lebih jelasnya, posisi dari pasangan sensor ini dapat dilihat pada Gambar 5.8 (a) dan (b).

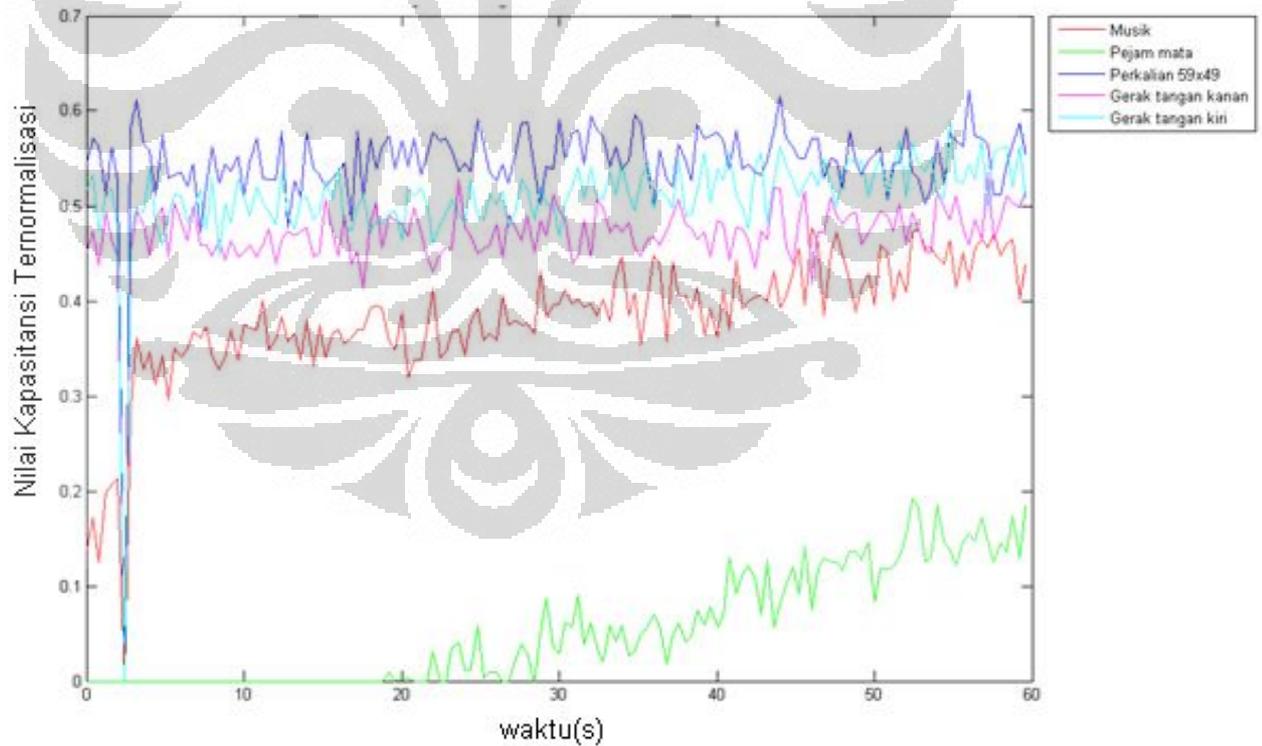


Gambar 5.8 (a) Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 6, (b) Pasangan Sensor Sumber 2 dan Detektor 8

Plot nilai kapasitansi Objek A untuk pasangan sensor pada Gambar 5.8 (a) dan (b) adalah pada Gambar 5.9 dan 5.10.



Gambar 5.9 Grafik Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 6 Objek A



Gambar 5.10 Grafik Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 8 Objek A

Dua grafik diatas menunjukkan nilai kapasitansi dari Objek A ketika diberikan 5 perlakuan untuk pasangan sensor sumber 1 detektor 6 dan pasangan sensor sumber 1 detektor 8. Warna hijau menunjukkan nilai kapasitansi pada saat objek diberikan perlakuan memejamkan mata, warna merah nilai kapasitansi ketika objek mendengarkan musik, warna merah muda ketika diberikan perlakuan menggerakkan tangan kanan, warna biru muda perlakuan menggerakkan tangan kiri sedangkan yang terakhir warna biru adalah nilai kapasitansi ketika diberikan perlakuan arimathic task yaitu perkalian 59×49 . Sumbu horizontal pada grafik adalah waktu dalam sekon sedangkan sumbu vertikal pada grafik adalah nilai kapasitansi yang telah dinormalisasi.

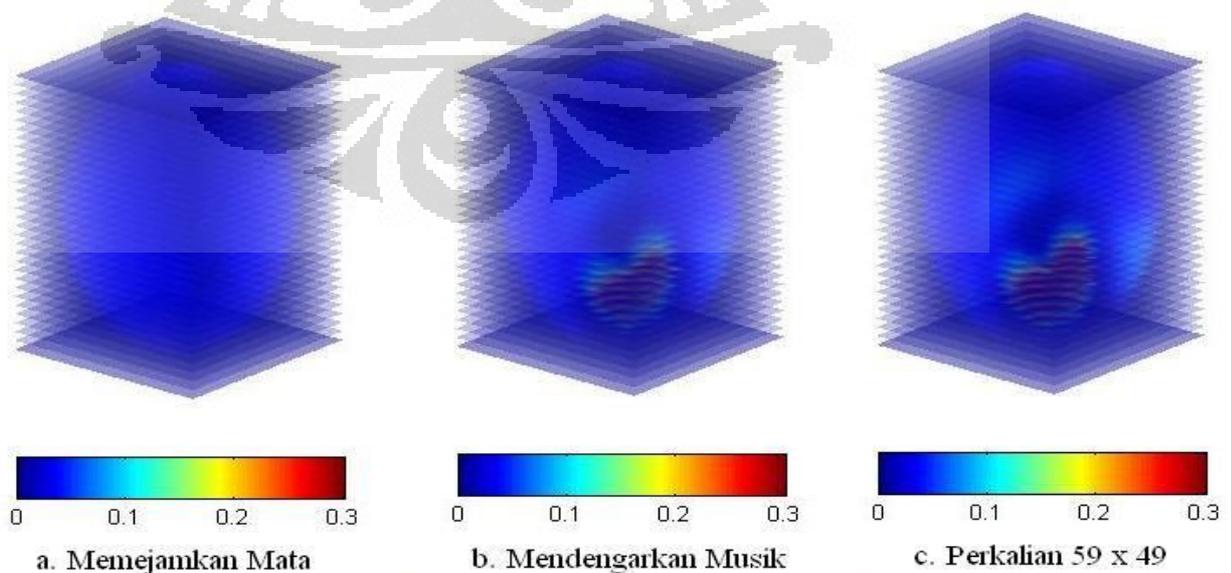
Pada grafik dapat dilihat bahwa untuk masing-masing perlakuan memberikan nilai kapasitansi yang berbeda. Masing-masing perlakuan akan mengaktifkan otak manusia dengan aktivasi yang berbeda. Grafik yang nilainya paling kecil adalah pada saat memejamkan mata, sedangkan grafik yang nilainya paling tinggi adalah pada saat perlakuan perkalian 59×49 . Berdasarkan teorinya pada saat memejamkan mata dan kondisi tubuh dalam keadaan rileks, otak pun akan rileks yang berarti bahwa tidak banyak aktifitas yang dilakukan. Sensor ECVT mendeteksi aktifitas otak yang lemah ini akan menghasilkan nilai kapasitansi yang rendah juga karena rapat muatan yang ditangkap oleh sensor ECVT sedikit, oleh karena itu pada saat memejamkan mata, nilai kapasitansi yang diperoleh kecil. Berdasarkan teori EEG kondisi memejamkan mata akan menghasilkan gelombang alpha frekuensinya berada pada 8-13 Hz dan dideteksi pada bagian visual dari otak yaitu bagian occipital.

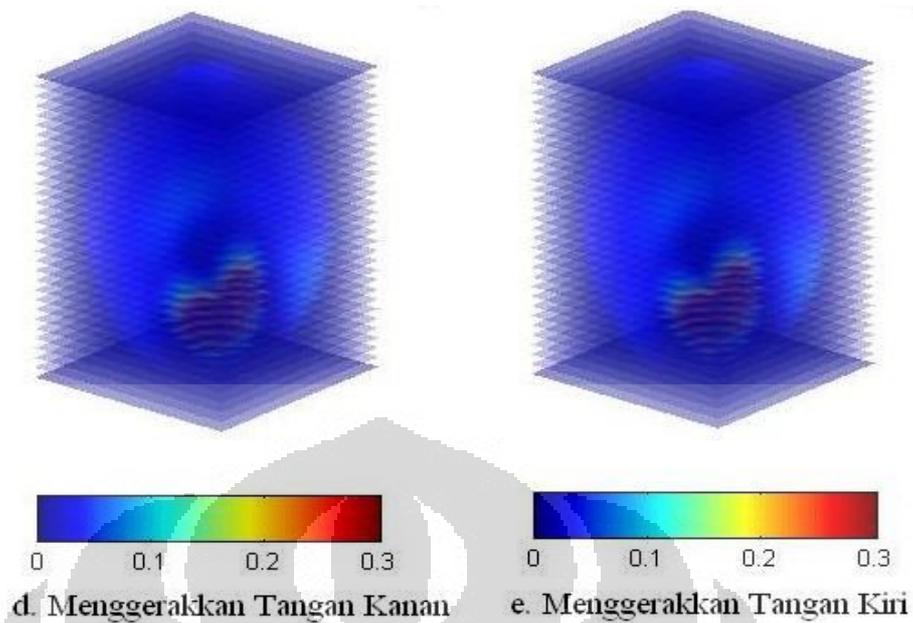
Selanjutnya untuk kondisi mendengarkan musik dengan keadaan mata terbuka, yang merupakan rangsangan dari luar. Diperoleh nilai kapasitansi pada grafik dengan warna merah. Pada kondisi ini objek diinstruksikan untuk menikmati dengan kondisi badan berada pada keadaan rileks. Diperoleh grafik yang lebih tinggi dari kondisi pertama yaitu saat memejaman mata. Yang artinya adalah otak melakukan aktifitas yang lebih tinggi dari kondisi memejamkan mata. Saat mendengarakan musik, secara teorinya akan mengaktifkan bagian temporal pada kedua sisi otak.

Perlakuan berikutnya adalah pada saat menggerakkan tangan kanan selama dan dilanjutkan dengan menggerakkan tangan kiri. Nilai kapasitansi yang diperoleh lebih tinggi dari dua nilai sebelumnya, artinya aktifitas otak lebih tinggi dari pada dua perlakuan sebelumnya. Pada saat memejamkan mata, tidak ada rangsangan sehingga kondisi otak dalam keadaan istirahat, pada kondisi kedua yaitu mendengarkan musik otak diberikan rangsangan dari luar, sehingga terdapat perubahan aktifitas dari otak karena pengaruh dari rangsangan luar tersebut, sedangkan kondisi menggerakkan tangan kanan dan kiri, rangsangan berasal dari tubuh manusia itu sendiri, sehingga aktifitas yang dilakukan oleh otak akan lebih tinggi daripada aktifitas yang dilakukan pada kondisi istirahat dan memperoleh rangsangan dari luar. Sehingga aktifitas yang lebih tinggi ini akan menghasilkan nilai kapasitansi yang lebih tinggi juga.

Grafik terakhir adalah berwarna biru, yang merupakan nilai kapasitansi antara pasangan elektroda pada saat diberikan perlakuan perkalian 59 x 49. Pada kondisi ini objek menghitung nilai perkalian tanpa melakukan pergerakan dan mata terbuka. Pada kondisi ini otak akan bekerja lebih keras untuk menghitung nilai tersebut. Sehingga aktifitas otak akan menjadi lebih tinggi dengan demikian nilai kapasitansi akan lebih tinggi. Pada grafik dilihat bahwa nilai kapasitansi yang diperoleh lebih tinggi dari perlakuan-perlakuan sebelumnya.

Hasil rekonstruksi untuk pasangan sensor sumber 1 dan detektor 6 serta pasangan sensor sumber 1 dan detektor 8 adalah sebagai berikut:

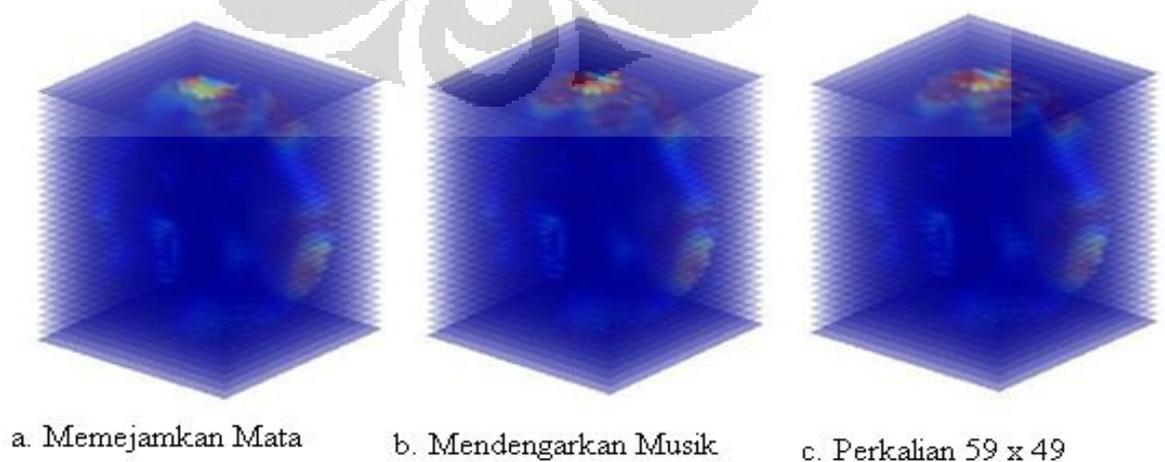


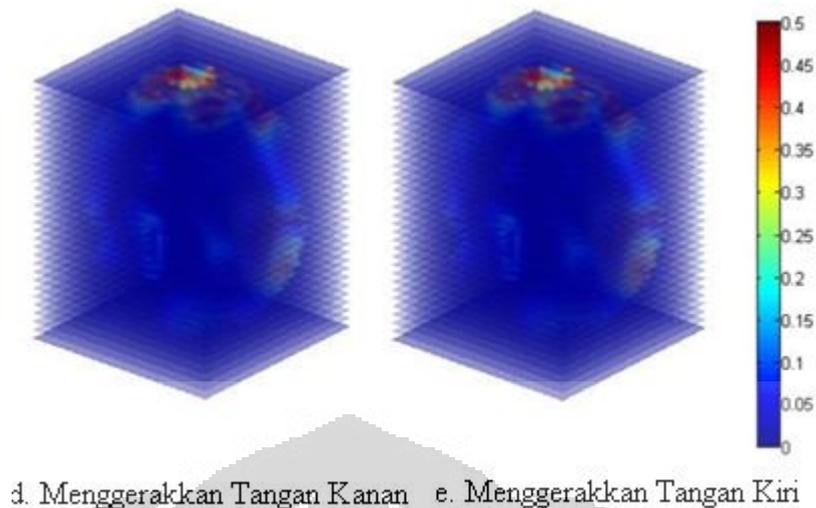


Gambar 5.11 Hasil Rekonstruksi Pasangan 61 dan 81 Objek A

Gambar 5.11 menunjukkan hasil rekonstruksi untuk pasangan sensor 61 dan 81 saja. Dapat dilihat perbedaannya untuk masing-masing perlakuan. Saat memejamkan mata tidak terdapat perubahan permitivitas, karena pada saat ini otak berada dalam keadaan rileks dimana aktivitasnya sangat rendah. Sedangkan pada kondisi lainnya terdapat perubahan permitivitas pada hasil rekonstruksi, menunjukkan bahwa otak melakukan aktivitas, muatan yang didistribusikan lebih besar, sehingga terdapat perubahan permitivitas pada hasil rekonstruksi.

2. Objek B

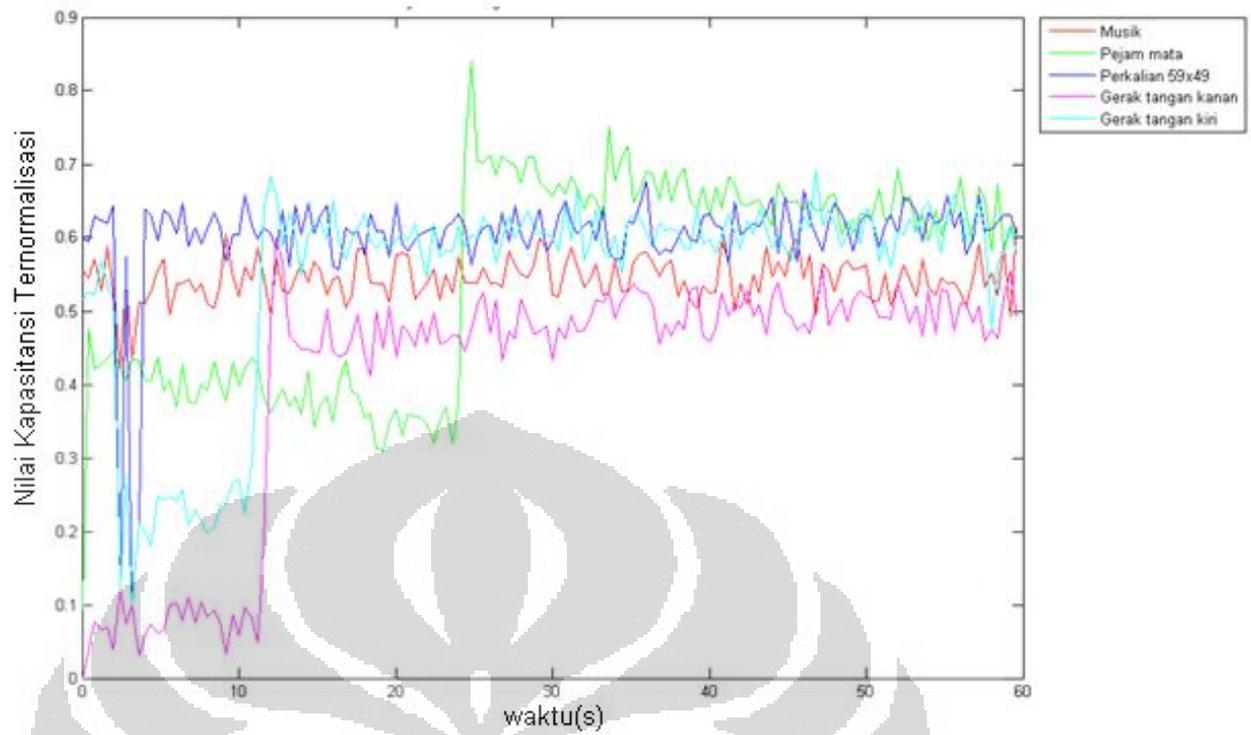




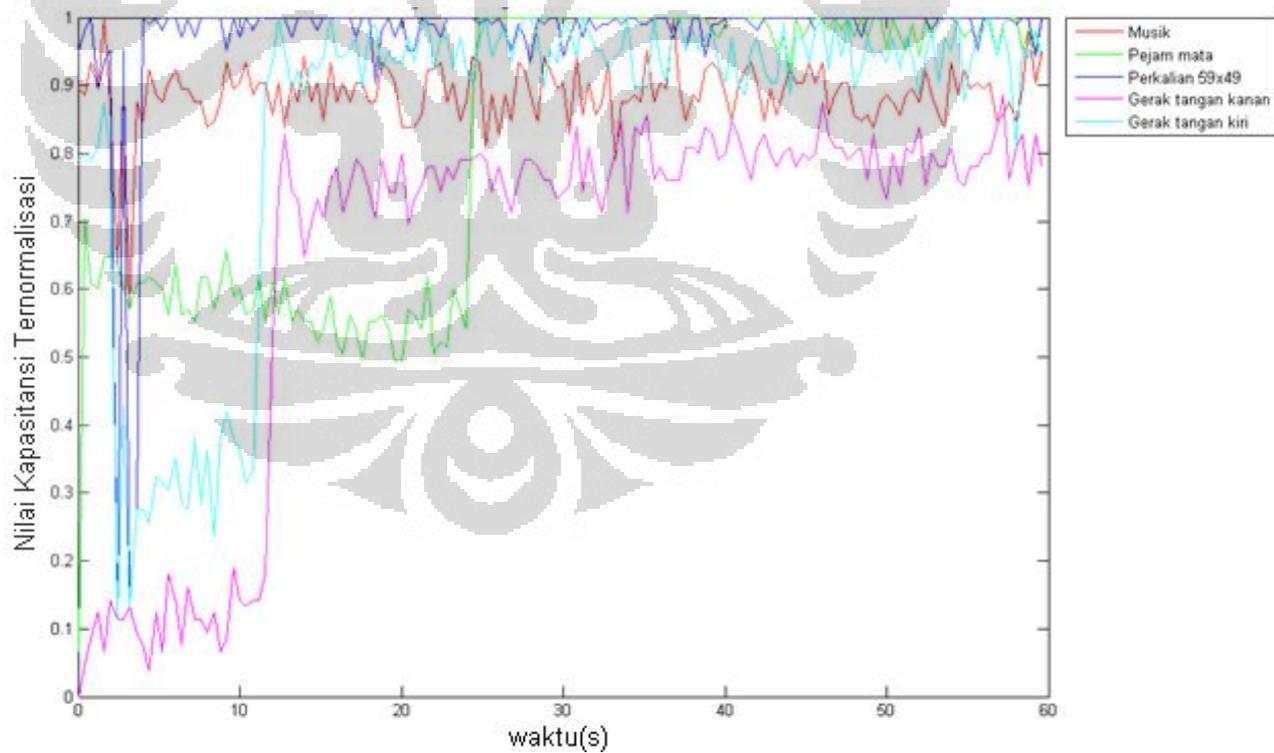
Gambar 5.12 Hasil Rekonstruksi Objek B

Gambar 5.12 menunjukkan hasil rekonstruksi dari eksperimen yang dilakukan pada objek B. Tidak jauh berbeda dengan hasil rekonstruksi yang diperoleh pada Objek A. Hasil rekonstruksi untuk semua perlakuan terlihat sama, tetapi ada sedikit perbedaan pada perlakuan memejamkan mata, distribusi warna nilai permitivitas yang diperoleh lebih sedikit dari pada perlakuan lainnya. Sama seperti objek A, pada kondisi memejamkan otak lebih rileks sehingga aktifitas yang dilakukan tidak begitu banyak sehingga nilai permitivitas yang diperoleh lebih sedikit.

Gambar 5.13 dan Gambar 5.14 berikut menunjukkan nilai kapasitansi masing-masing perlakuan pada objek B untuk pasangan sensor sumber 1 dengan detektor 6 dan pasangan sensor sumber 1 dan detektor 8.

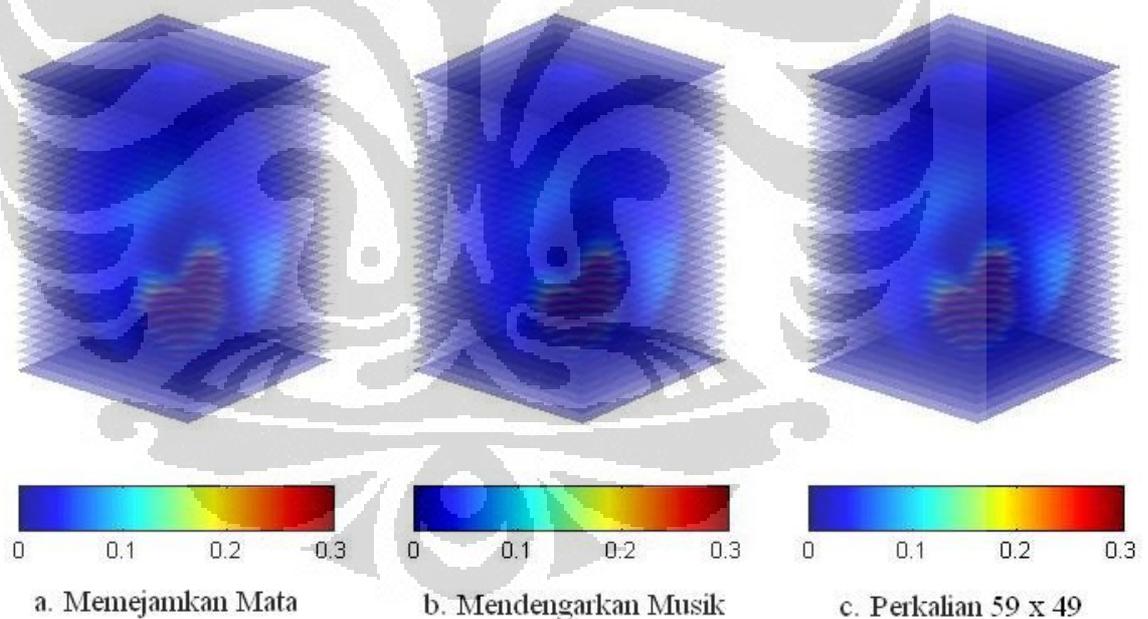


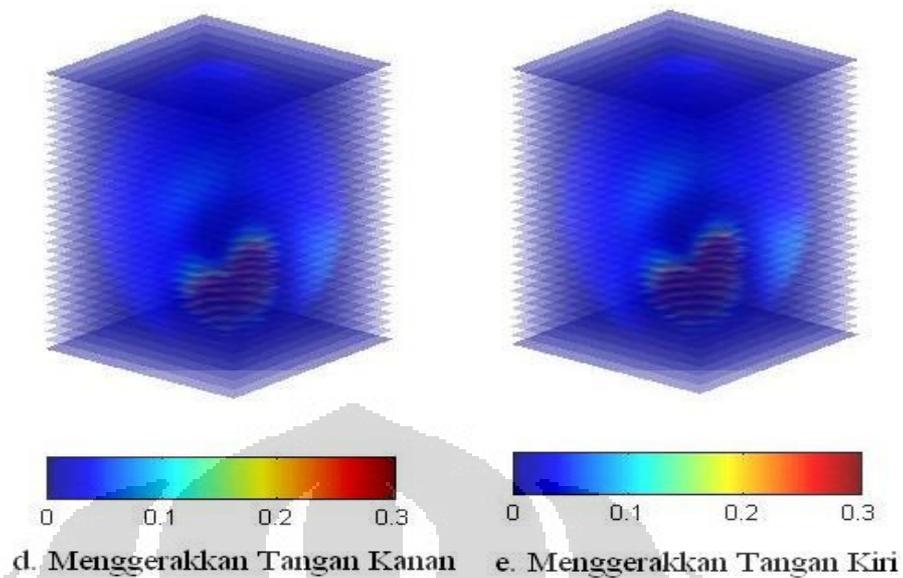
Gambar 5.13 Grafik Nilai Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 6 Objek B



Gambar 5.14 Grafik Nilai Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 8 Objek B

Nilai kapasitansi dari Objek B agak berbeda dengan Objek A. Pada kondisi memejamkan mata nilai kapasitansinya pada awal lebih rendah sedangkan pada waktu selanjutnya menjadi lebih tinggi dari perlakuan yang lainnya. Selanjutnya diiringi dengan nilai kapasitansi pergerakan tangan kanan, mendengarkan musik, menggerakkan tangan kiri dan terakhir adalah perkalian 59 x 49. Nilai kapasitansi ini menunjukkan bahwa aktifitas otak pada kondisi memejamkan mata lebih tinggi dari perlakuan lainnya, artinya pada kondisi memejamkan mata objek B mungkin tidak dalam keadaan rileks karena otak adalah merupakan parameter yang tidak bisa dikontrol. Berbeda dengan grafik sebelumnya kondisi mendengarkan musik, menggerakkan tangan kanan dan menggerakkan tangan kiri memiliki urutan nilai kapasitansi yang berbeda. Tetapi pada nilai kapasitansi pada saat melakukan perkalian adalah nilai yang paling tinggi, yang menandakan aktifitas tinggi pada saat memikirkan perkalian 59 x 49.



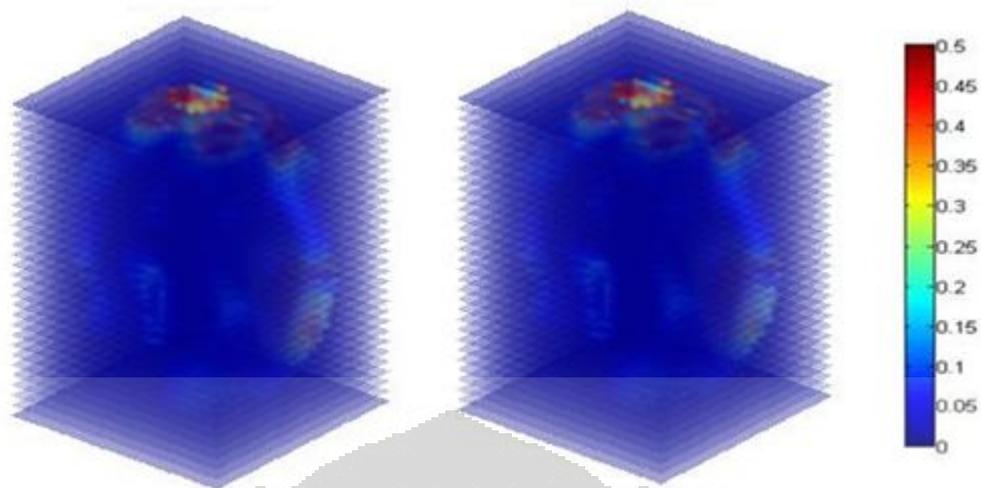


Gambar 5.15 Hasil Rekonstruksi Pasangan 61 dan 81 Objek B

Untuk Objek B, hasil rekonstruksi yang diperoleh untuk pasangan 61 dan 81 tidak begitu berbeda, terlihat sama untuk semua perlakuan. Hal ini terjadi karena pada plot kapasitansi, perbedaan kapasitansi antara perlakuan 1 dengan perlakuan lainnya tidak begitu signifikan sehingga pada hasil rekonstruksi terlihat mirip satu sama lainnya.

3. Objek C



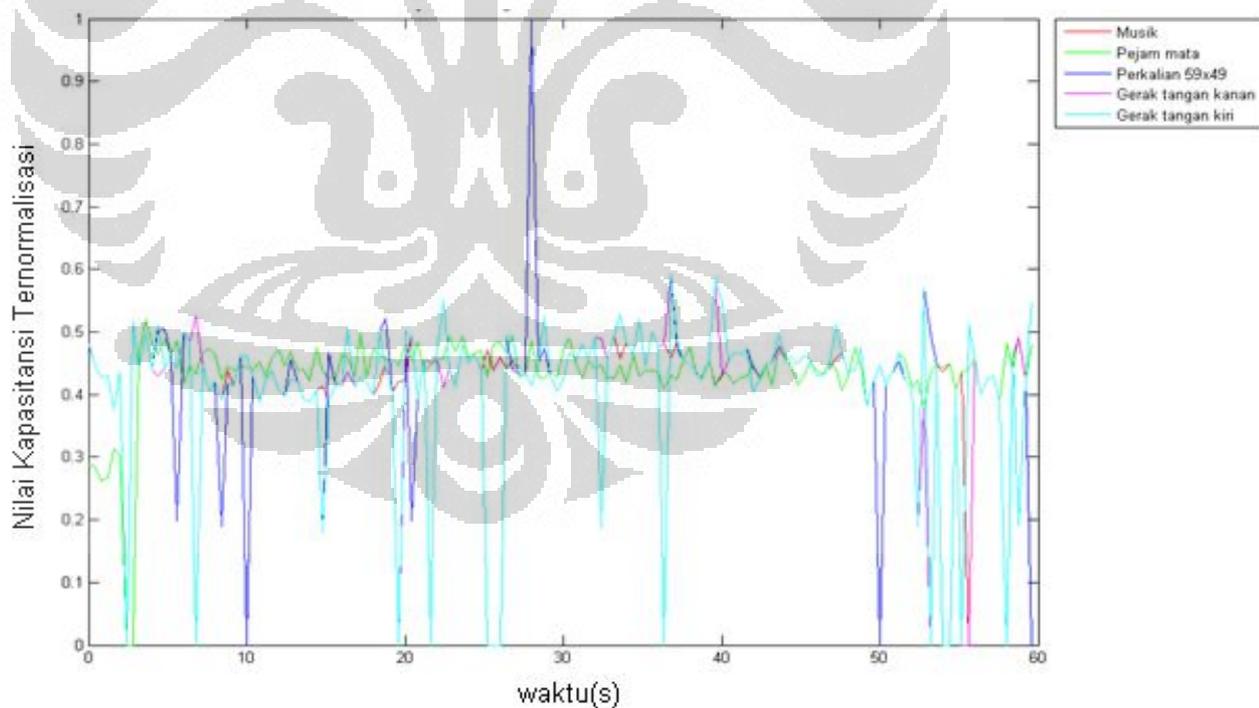


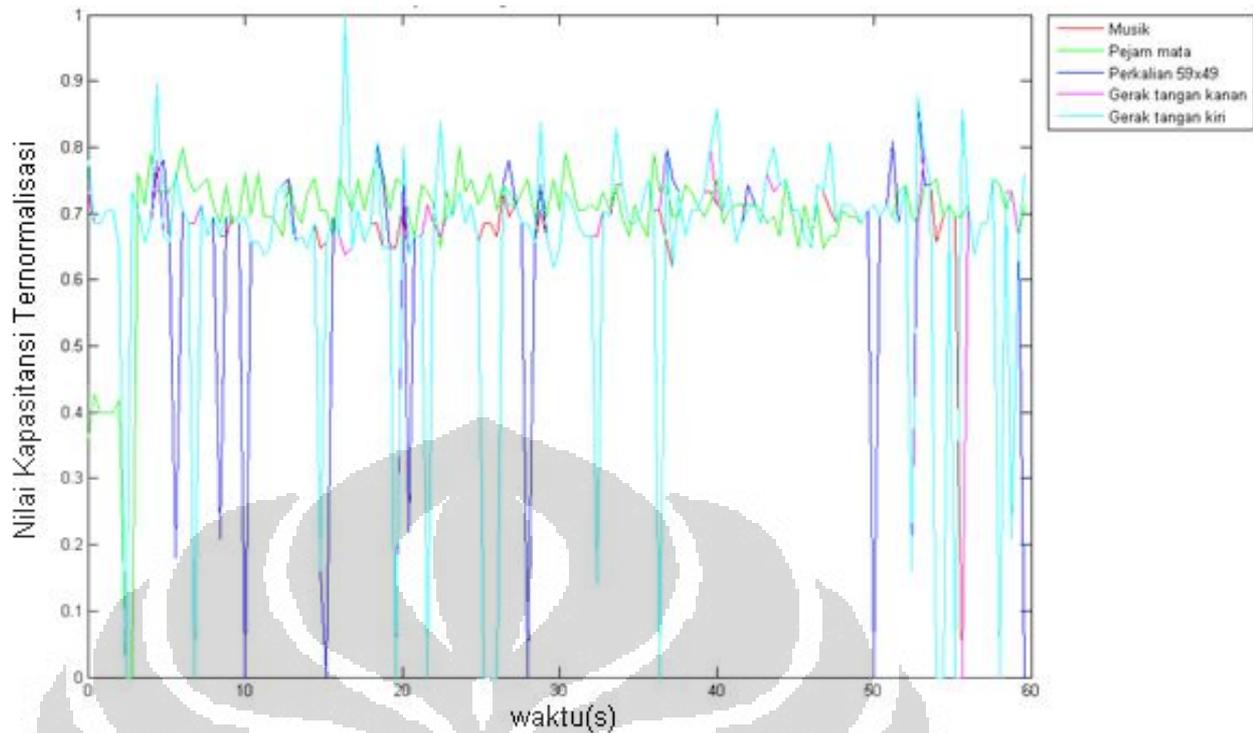
d. Menggerakkan Tangan Kanan

e. Menggerakkan Tangan Kiri

Gambar 5.16 Hasil Rekonstruksi Objek C

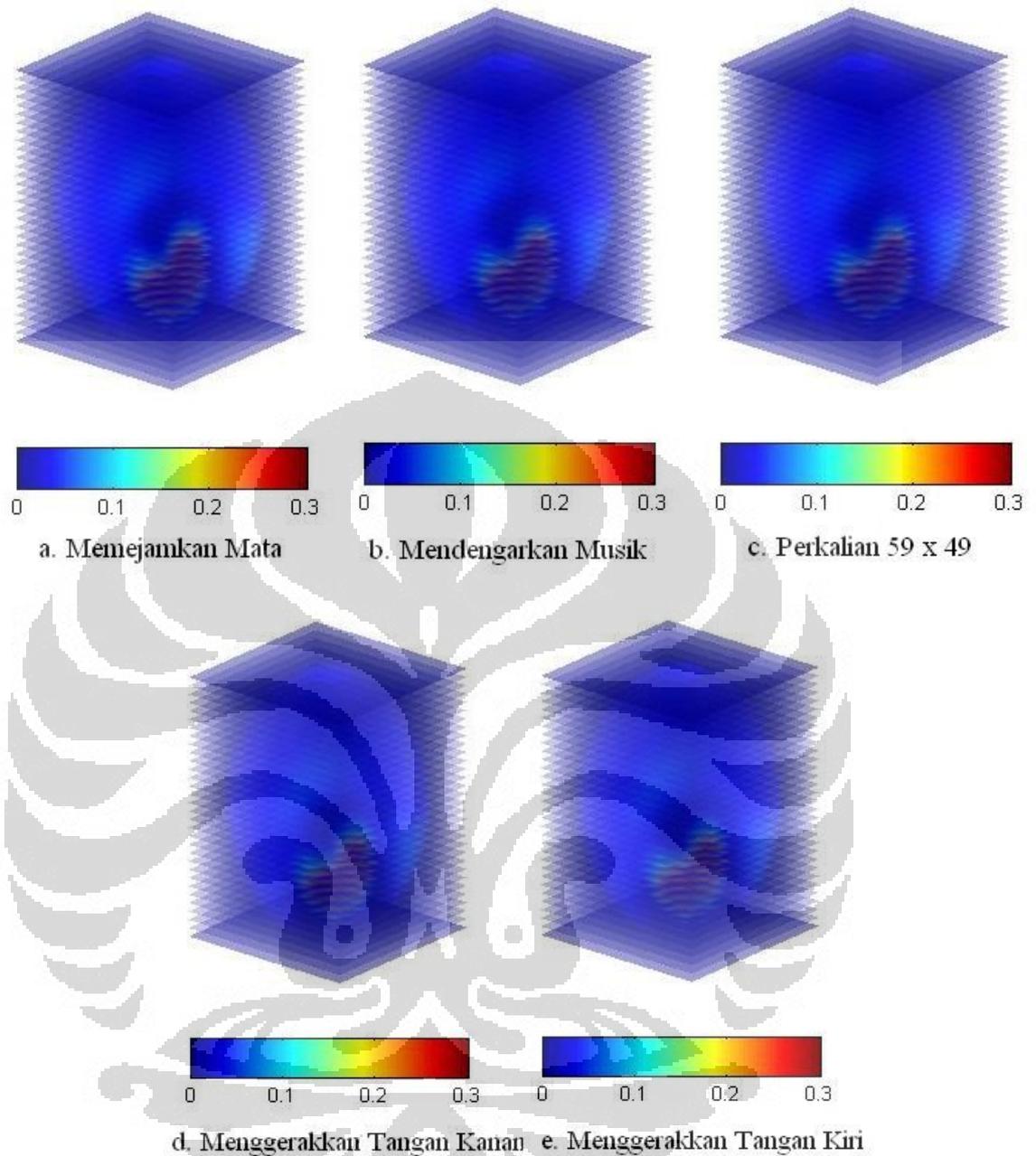
Hasil rekonstruksi yang diperoleh dari pengukuran nilai kapasitansi Objek C adalah pada Gambar 5.16. Dilihat pada gambar untuk semua perlakuan nilai distribusi warna nilai kapasitansi terlihat sama.

**Gambar 5.17** Grafik Nilai Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 6 Objek C



Gambar 5.18 Grafik Nilai Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 8 Objek C

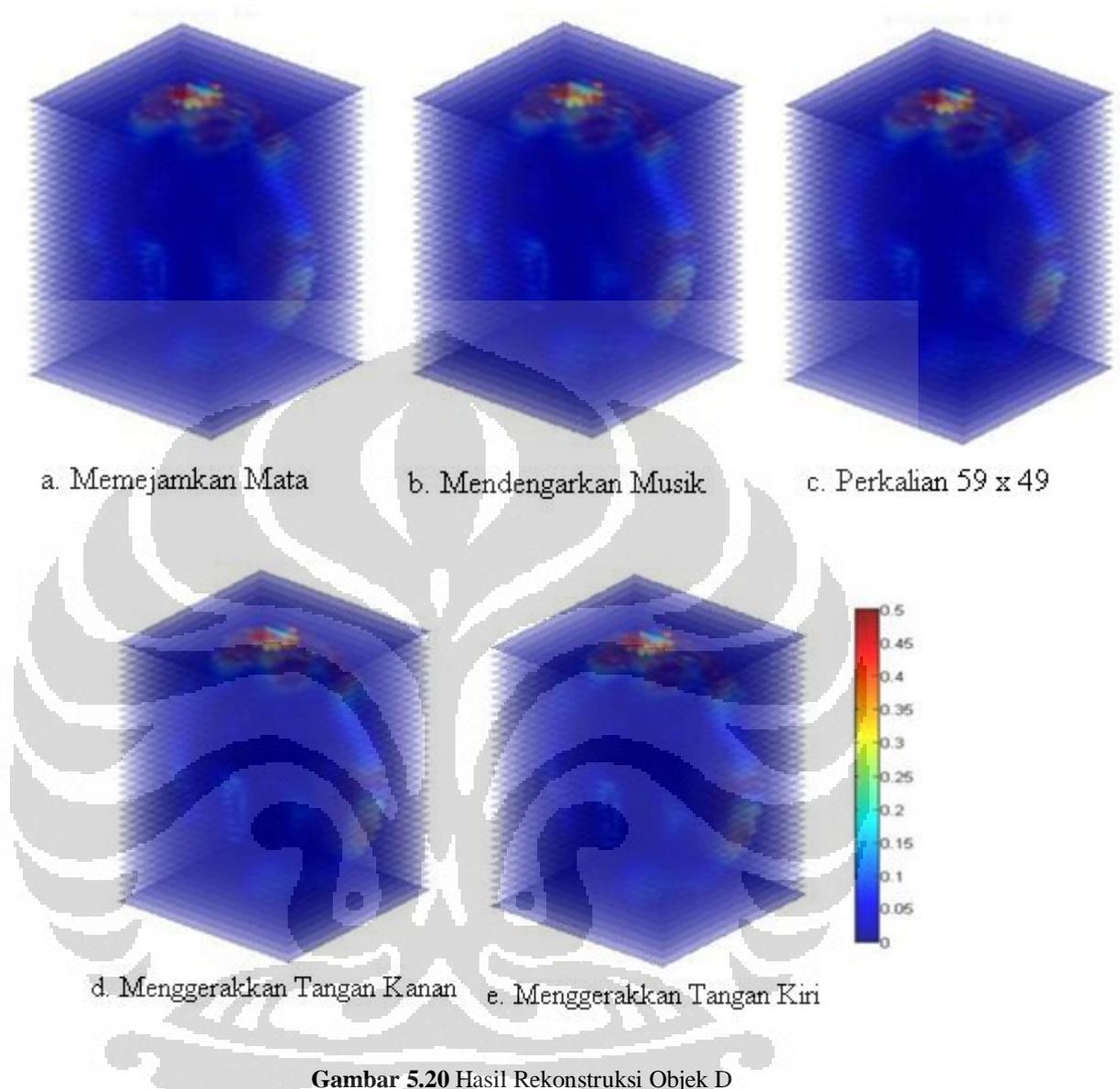
Dari hasil grafik pada Gambar 5.17 dan Gambar 5.18 untuk Objek C, tidak terdapat perbedaan nilai kapasitansi untuk masing-masing perlakuan. Objek C adalah objek yang ukuran kepalanya lebih kecil dibandingkan objek yang lainnya. Ukuran kepala yang kecil akan menimbulkan ruang kosong yang banyak antara sensor ECVT dengan kepala manusia. Sehingga ketika dipakaikan kepada objek, sensor tidak bisa mendeteksi perubahan yang terjadi pada aktifitas otak manusia apabila diberikan perlakuan.



Gambar 5.19 Hasil Rekonstruksi Pasangan 61 dan 81 Objek C

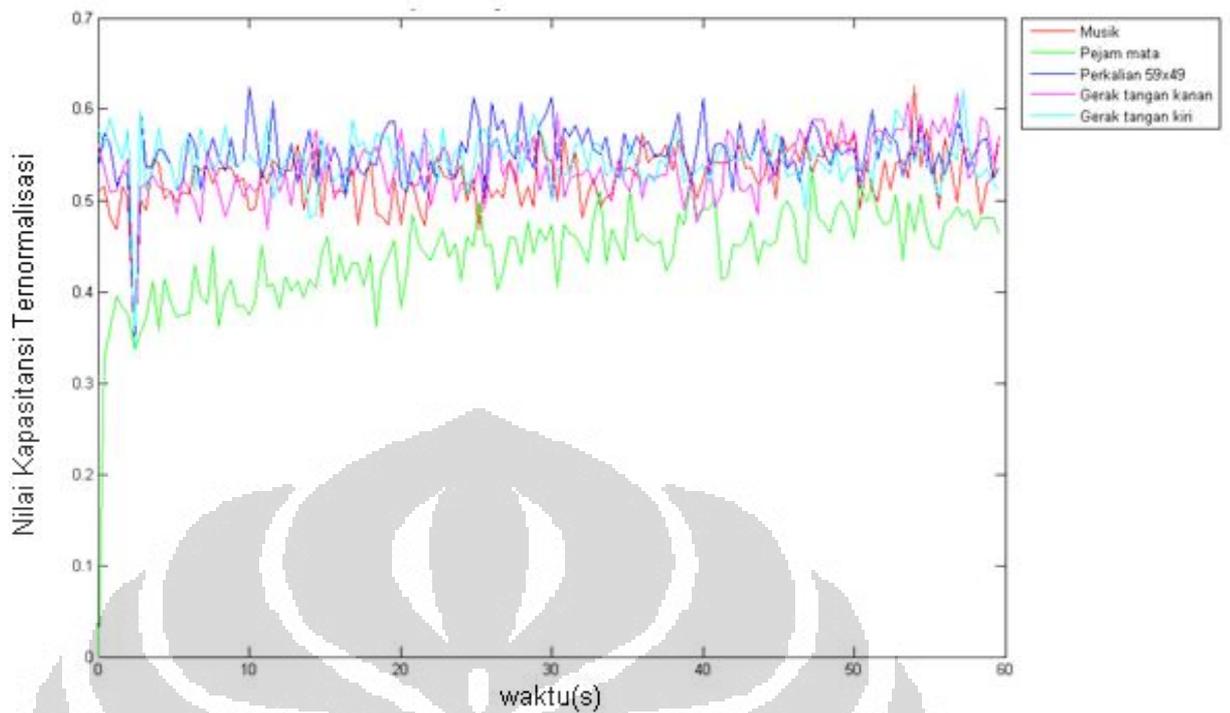
Sama dengan Objek sebelumnya, untuk hasil rekonstruksi pasangan sensor 1 dengan 6 dan pasangan sensor 1 dengan 8 objek C belum terlihat perbedaan antara perlakuan yang diberikan.

4. Objek D

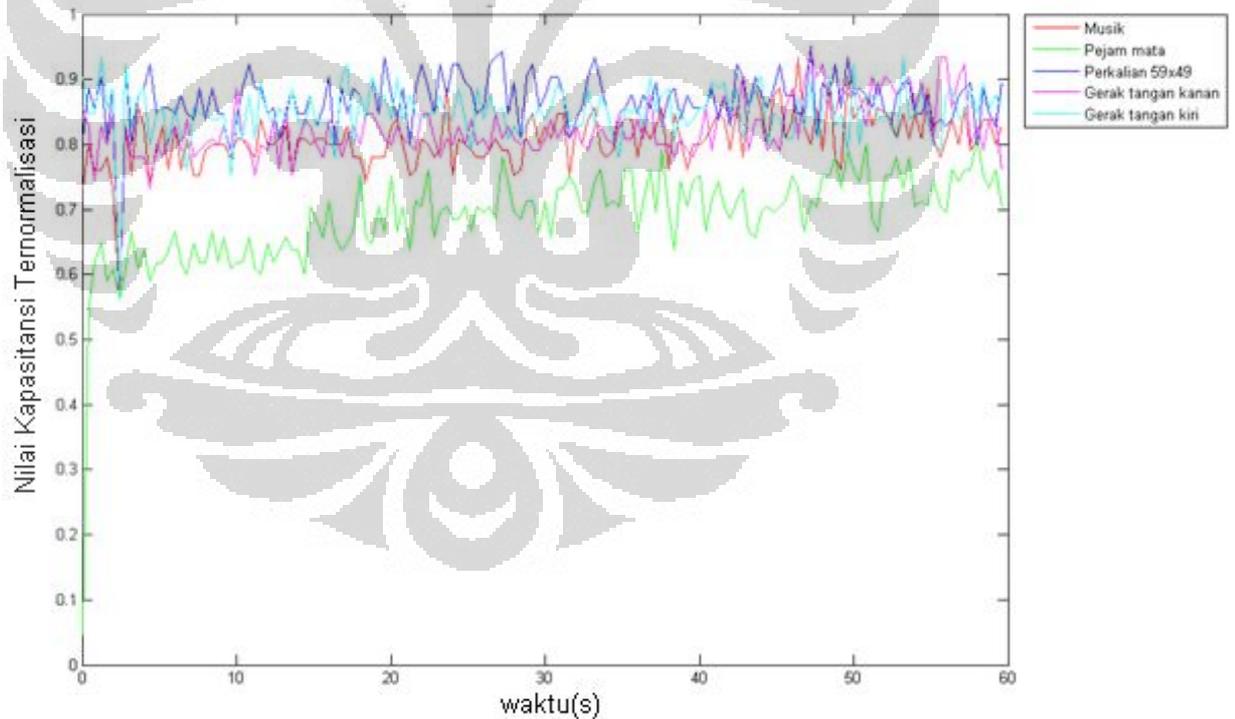


Gambar 5.20 Hasil Rekonstruksi Objek D

Gambar 5.20 adalah merupakan hasil rekonstruksi untuk objek D, sama seperti objek sebelumnya, pada hasil rekonstruksi belum terlihat perubahan kapasitansi walaupun diberikan perbedaan perlakuan. Selanjutnya dilihat nilai kapasitansinya untuk mengetahui apakah terhadap perubahan kapasitansi yang bisa dideteksi oleh sensor.



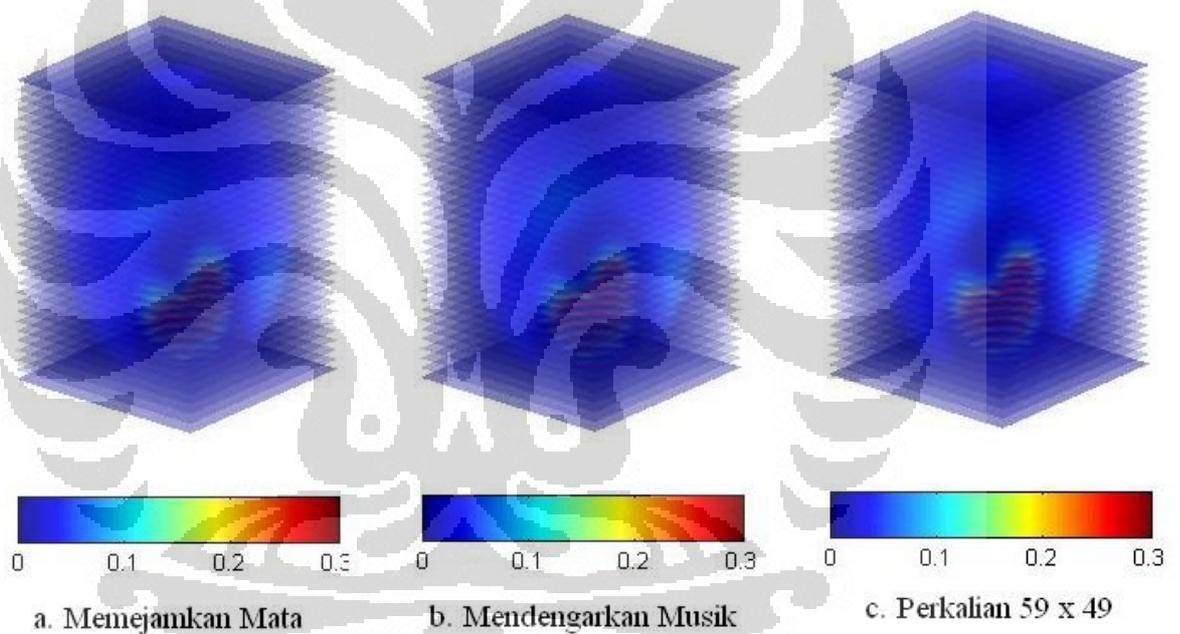
Gambar 5.21 Grafik Nilai Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 6 Objek D

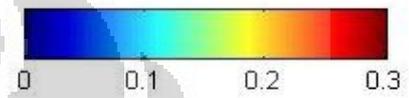
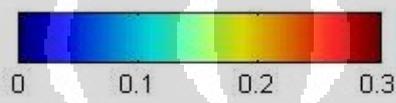
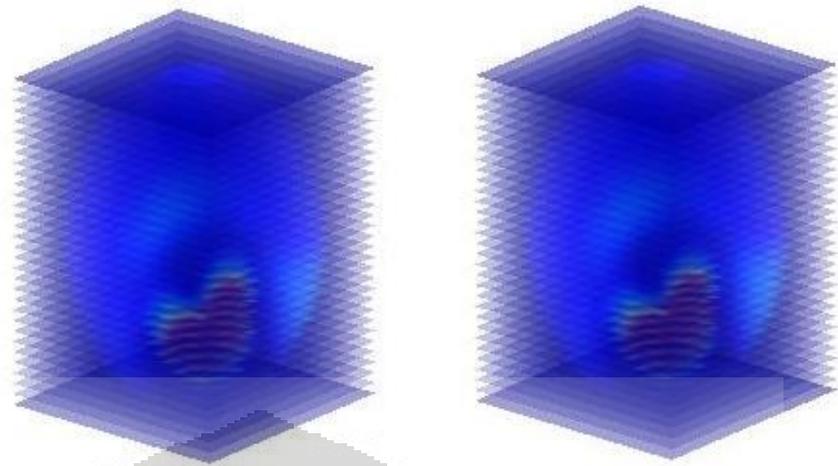


Gambar 5.22 Grafik Nilai Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 8 Objek D

Gambar 5.21 dan Gambar 5.22 merupakan grafik nilai kapasitansi untuk objek D. Dari grafik dapat dilihat bahwa nilai kapasitansi terendah adalah ketika

objek D memejamkan mata, kemudian diikuti dengan mendengarkan music, menggerakkan tangan kanan dan menggerakkan tangan kiri, terakhir adalah nilai kapasitansi pada saat melakukan perkalian 59×49 . Grafik nilai kapasitansi ini mirip dengan grafik kapasitansi yang diperoleh oleh Objek A. Dimana kondisi terendah adalah ketika memejamkan mata, diikuti dengan kondisi mendengarkan musik, menggerakkan tangan kanan dan tangan kiri serta yang palng tinggi adalah ketika menghitung perkalian 59×49 . Gambar 5.22 dibawah adalah rekonstruksi untuk pasangan sensor sumber 1 dan detektor serta pasangan sensor sumber 1 dan detektor 8. Hasil rekosntruksi juga belum menunjukkan hasil yang baik, sama seperti beberapa objek sebelumnya.



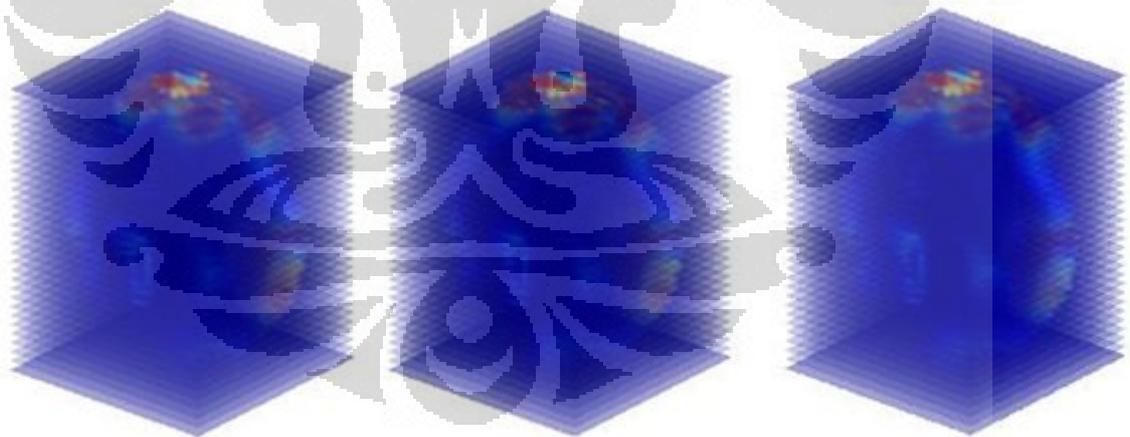


d. Menggerakkan Tangan Kanan

e. Menggerakkan Tangan Kiri

Gambar 5.23 Hasil Rekonstruksi Pasangan 61 dan 81 Objek D

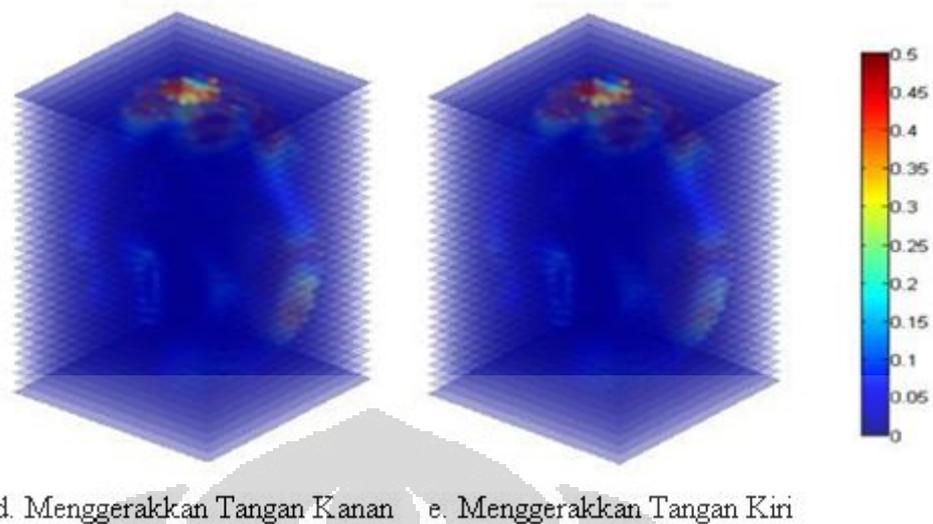
5. Objek E



a. Memejamkan Mata

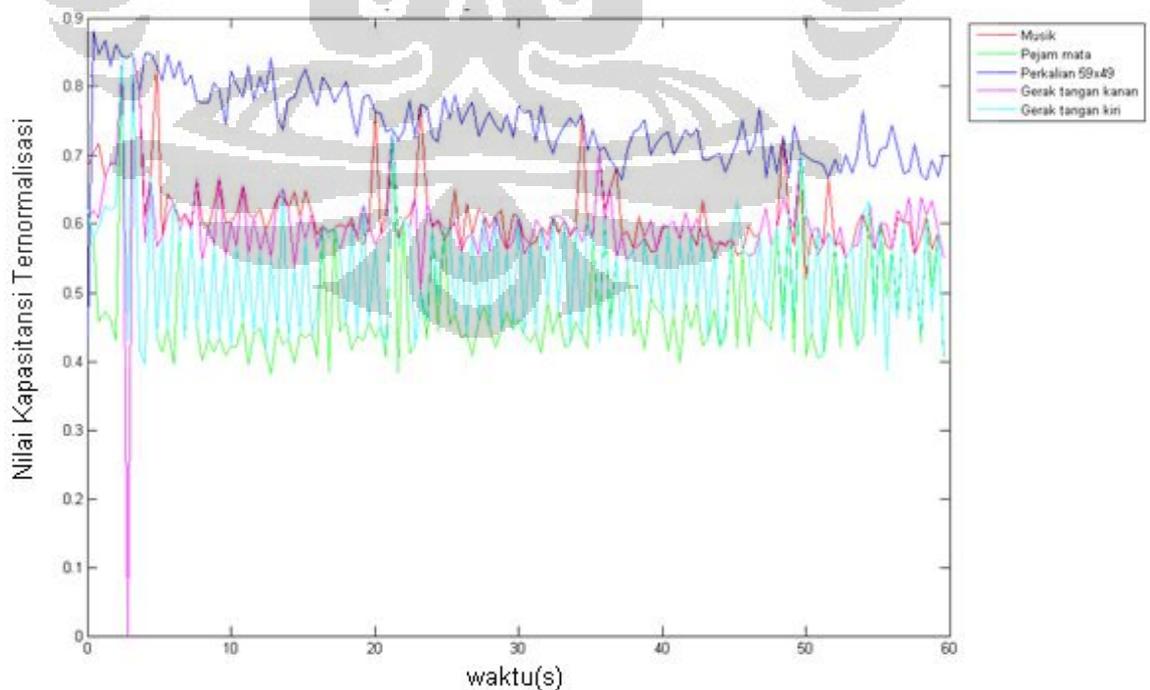
b. Mendengarkan Musik

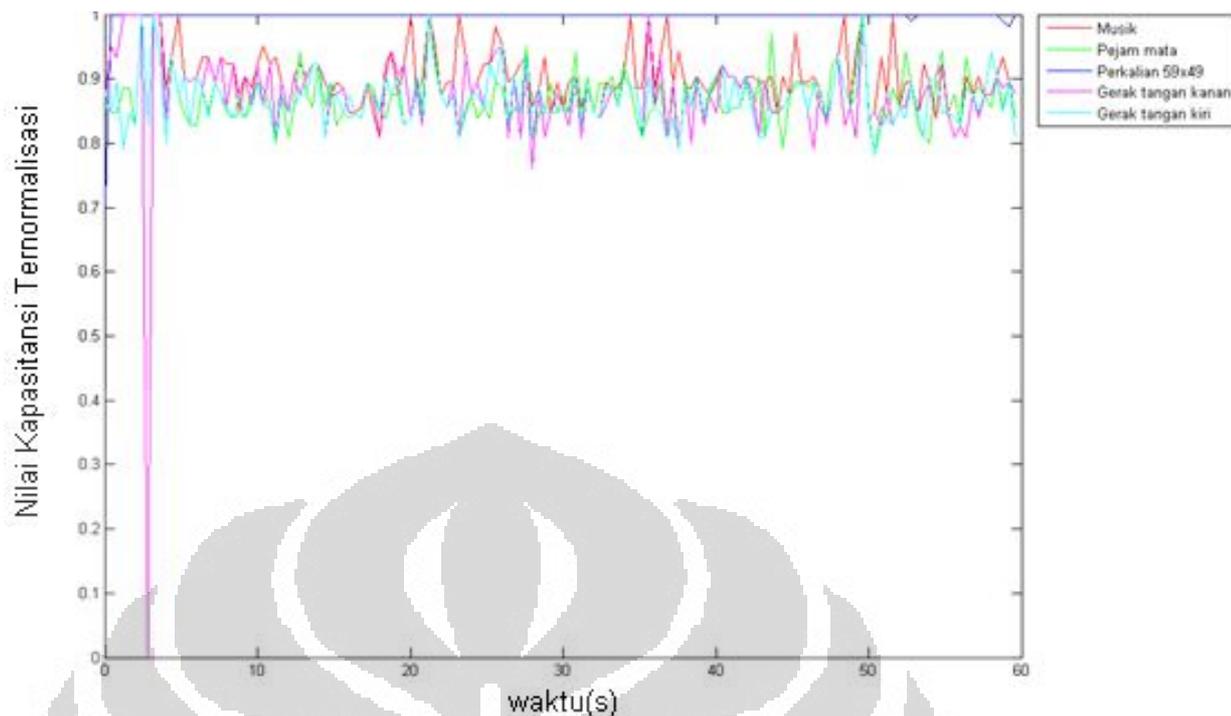
c. Perkalian 59×49



Gambar 5.24 Hasil Rekonstruksi Objek E

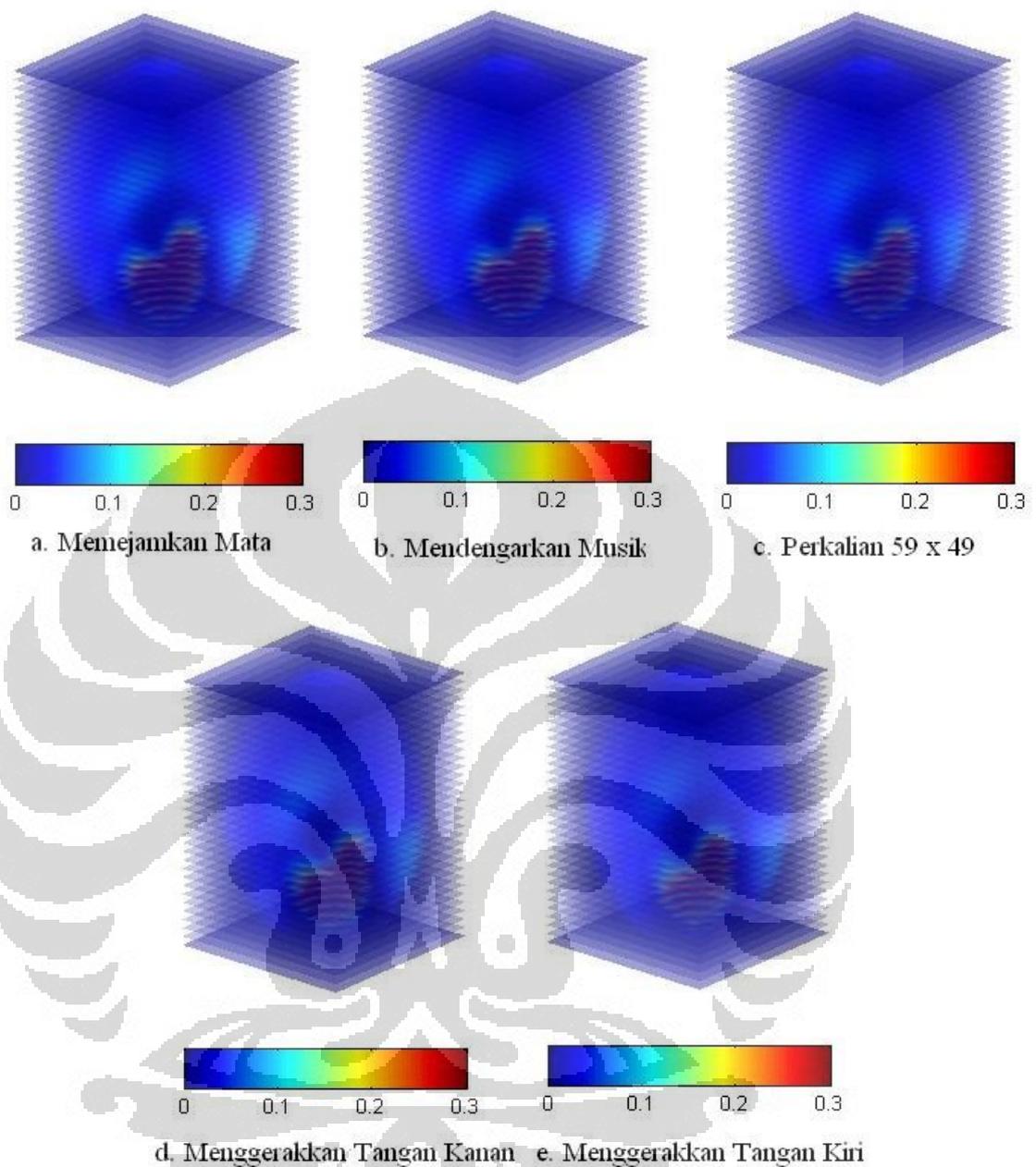
Gambar 5.24 adalah hasil rekonstruksi untuk Objek E ketika diberikan 5 perlakuan. Hasil yang diperoleh untuk semua perlakuan terlihat sama. Sama dengan hasil rekonstruksi sebelumnya. Selanjutnya dilakukan plot grafik untuk melihat nilai kapasitansi pada Gambar 5.25 dan Gambar 5.26 untuk melihat apakah ada perubahan aktifitas yang dapat dideteksi oleh sensor kapasitansi ketika dilakukan perubahan perlakuan. Sama dengan objek sebelumnya nilai kapasitansi yang diambil adalah nilai kapasitansi pada pasangan sensor sumber 1 detektor 6 dan sensor sumber 1 detektor 8.





Gambar 5.26 Grafik Nilai Kapasitansi Pasangan Sensor Sumber 1 dan Detektor 8 Objek E

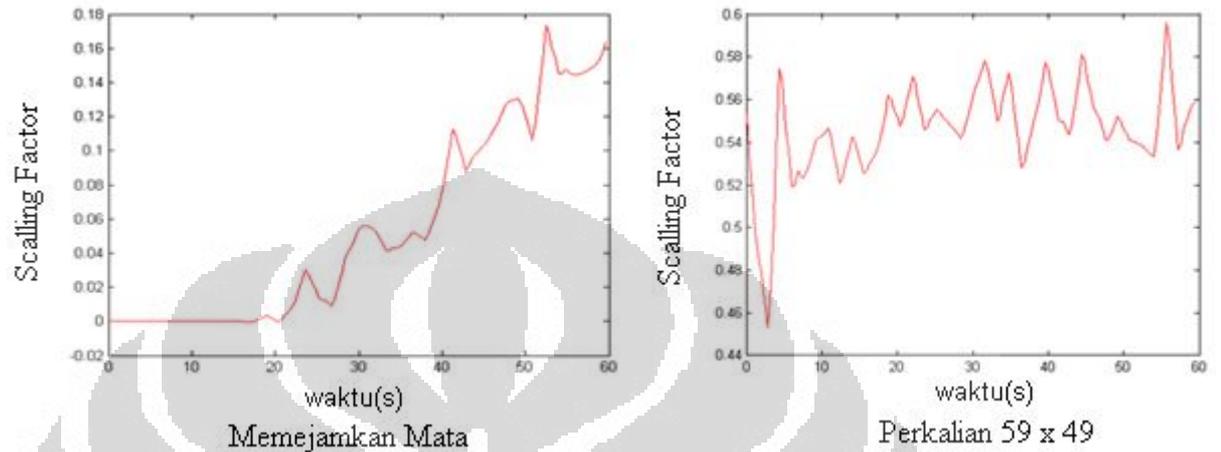
Pada Gambar 5.25 dan 5.26 dapat dilihat bahwa nilai kapasitansi yang diperoleh berbeda untuk masing masing perlakuan. Perbedaan nilai kapasitansi ini lebih terlihat jelas pada pasangan sensor 1 dan 6, dimana aktifitas otak yang paling rendah adalah pada kondisi memejamkan mata dan aktifitas paling tinggi adalah ketika melakukan perkalian 59×49 . Tetapi perubahan ini belum bisa dideteksi oleh pasangan sensor sumber 1 dan detektor 8. Pada pasangan sensor sumber 1 dan detektor 8 nilai kapasitansi untuk masing-masing perlakuan terlihat sama.



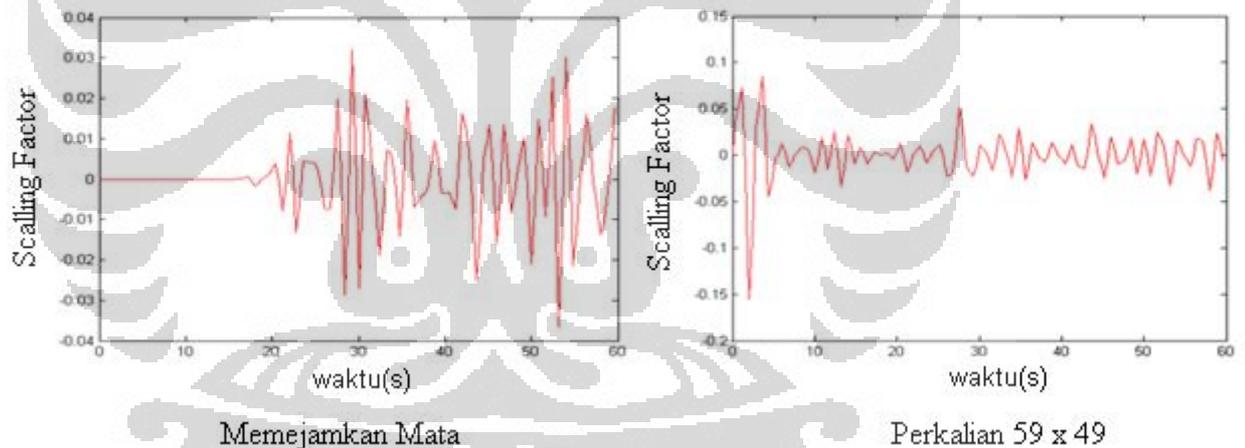
Gambar 5.27 Hasil Rekonstruksi Pasangan 61 dan 81 Objek E

Selanjutnya dilakukan dekomposisi wavelet untuk lihat membandingkan antara sinyal pejam mata dengan perkalian 59 x 49 Objek A. Dekomposisi wavelet digunakan untuk memisahkan sinyal utama dengan noisinya. Sinyal utama yang telah dikurangi noisinya disebut dengan aproksimasi dan sinyal noise yang dipisahkan dari sinyal utama disebut dengan detail. Dekomposisi wavelet yang dilakukan disini adalah dekomposisi sebagian, dimana hanya bagian

aproksimasinya saja. Proses yang digunakan adalah *Lowpass Filter* dan *Highpass Filter*. Proses *Lowpass Filter* menghasilkan aproksimasi dan *Highpass Filter* menghasilkan detail. Gambar 5.28 menunjukkan perbandingan hasil dekomposisi wavelet untuk kondisi memejamkan mata dan perkalian 59 x 49.



Gambar 5.28 Sinyal Utama Setelah Dekomposisi Wavelet



Gambar 5.29 Sinyal Noise

Gambar 5.28 merupakan sinyal utama dari kondisi memejamkan mata dan kondisi perkalian 59 x 49 setelah dikurangi noisennya. Dimana sinyal ini hasil *Lowpass Filter* yang merupakan frekuensi rendah. Gambar 5.28 sudah bisa menunjukkan bahwa frekuensi ketika memejamkan mata lebih rendah dari frekuensi ketika perkalian 59 x 49. Sedangkan 5.29 merupakan noise dari sinyal utama yang frekuensinya tinggi.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

1. Sudah dapat dikembangkan model sensor untuk kepala manusia yang berbentuk helm dengan sensitivitas matriks yang baik karena banyaknya variasi distribusi medan listrik.
2. Sistem ECVT sudah bisa melakukan rekonstruksi sinyal otak manusia tetapi hanya ada bagian atas dan bagian samping saja.
3. Pada simulasi, ECVT sudah bisa mendeteksi rapat muatan dalam proses rekonstruksi, rapat muatan akan mempengaruhi daerah disekitar objek yang diberi nilai rapat muatan.
4. Pada eksperimen, beberapa sensor ECVT sudah bisa mendeteksi sinyal lemah otak manusia dilihat dari nilai kapasitansi yang diperoleh. Perubahan kapasitansi akibat perubahan aktifitas sinyal lemah otak manusia paling bisa diamati pada pasangan sensor 1 dan 6, serta pasangan 1 dan 8.
5. 80% dari hasil eksperimen menunjukkan bahwa kondisi memejamkan mata menghasilkan nilai kapasitansi paling rendah, dan kondisi perkalian 59 x 49 menghasilkan nilai kapasitansi paling tinggi.
6. Nilai kapasitansi ternormalisasi untuk kondisi memejamkan mata adalah sekitar 0.3 sampai dengan 0.5, sedangkan untuk kondisi perkalian 59 x 49 adalah sekitar 0.6 sampai dengan 0.9.

6.2 Saran

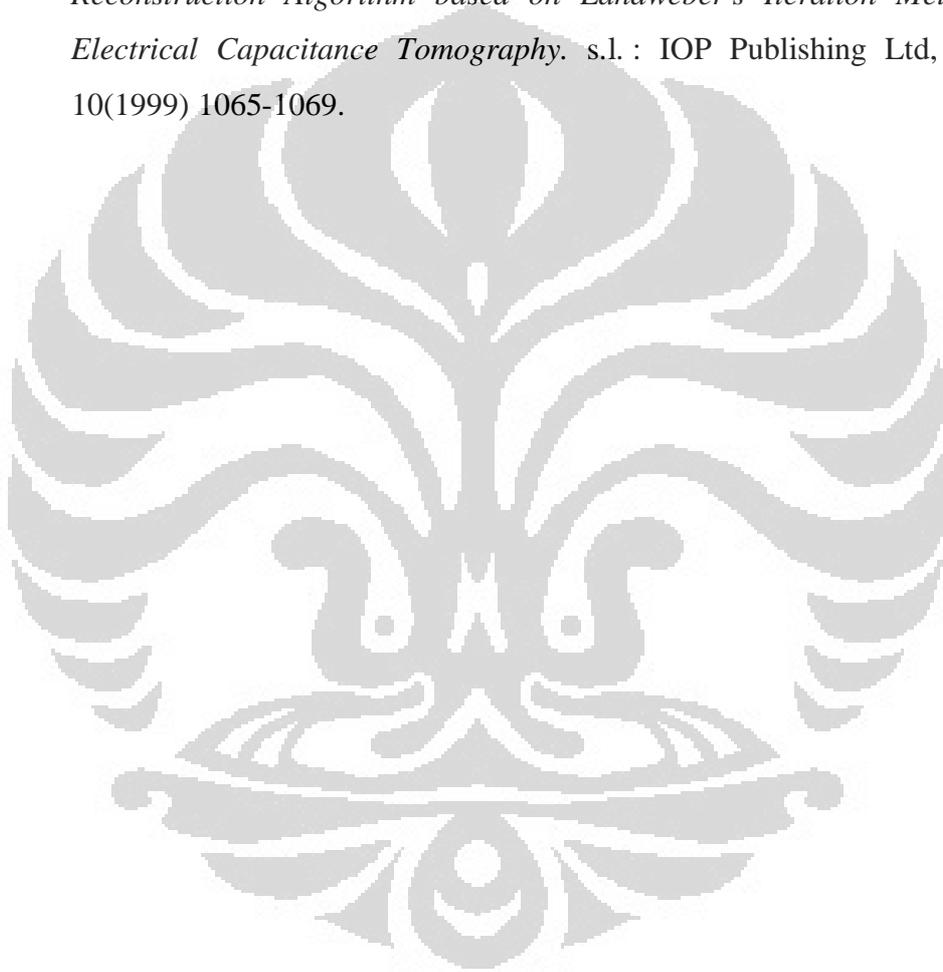
Saran penulis berkaitan dengan penelitian ini adalah untuk mengambil data lebih banyak lagi dengan variasi mental task yang lebih banyak. Disamping itu mencari metode kalibrasi yang lebih tepat untuk memperoleh hasil rekonstruksi yang lebih baik.

Sebaiknya parameter studi perlu ditambahkan agar dalam pengembangan ECVT untuk detektor sinyal dan rekonstruksi otak menjadi lebih baik, seperti parameter konduktivitas pada suatu materi. Jika kedua parameter bisa disatukan, maka yang diharapkan bisa membedakan dua aktifitas otak yang berbeda.

DAFTAR REFERENSI

- [1] Firwany, Ahmad. (2009). *Spektrum Frekuensi Gelombang Otak Manusia*. February 3, 2010. <http://com19.indonesianforum.net/biologi-f51/biofisika-spektrum-frekuensi-gelombang-otak-manusia-t44.htm>.
- [2] Warsito, Qussai M, & L.S Fan. (2007, April). *Electrical Capacitance Volume Tomography*. IEEE Sensors Journal, Vol. 7.
- [3] Stufflebeam, R. (2008). Neuron, Synaps, Action Potentials, and Neurotransmitter. April 21, 2010. http://www.mind.ilstu.edu/curriculum/neuron_intro/neuron_intro.php.
- [4] The Science of Audio Based Brainwave Entrainment. (1995-2010).Intelegen Inc. Februari 12, 2010. [http://www.web-us.com/thescience.htm#How It Works On The Brain](http://www.web-us.com/thescience.htm#How%20It%20Works%20On%20The%20Brain).
- [5] Allison, B. (1999). *Brain Computer Interface System*. Februari 14, 2010. <http://bci.ucsd.edu>
- [6] *The Brain-Brain Cells*. (n.d.). (2010). EnchantedLearning. February 30, 2010.<http://www.enchantedlearnin.com/subjects/anatomy/brain/Neuron.shtml>
- [7] Adi, G. (26 Februari 2002). *Mekanisme Penghantaran Dalam Neuron (Neurotransmisi)*.
- [8] Webster, John G. (1998). *Medical Instrumentation 3rd edition*. John Wiley & Sons, Inc. Page 156-167.
- [9] Lehtonen, J. (3 May 2002). *EEG-based Brain Computer Interfaces*.
- [10] Ioannides, A. A. (2009). *Basic concepts of MEG and EEG. Lab. for Human Brain Dynamics*. AAI Scientific Cultural Services Ltd., Nicosia, Cyprus .
- [11] Maarten van de Velde. (2000). *Signal Validation in Electroencephalography Research*. February 28, 2010. Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven.
- [12] fungsional Magnetic Resonance Imaging. Februari 26, 2010. Science Museum. <http://www.sciencemuseum.org.uk/on-line/brain/193.asp>.
- [13] Zulkarnien, Benny. *Neuro Imaging..* Dept Radiologi (neuroimaging).

- [14] Paul, L. Nunez. (2006). *Electric Fields of The Brain The Neurophysics of EEG Second Edition*. Oxford University Press.
- [15] Jackson JD. (1975). *Classical Electrodynamics, 2nd Edition*. New York:Wiley
- [16] Warsito, W. (2005). *Review: Komputasi Tomografi dan Aplikasinya*. Prosiding Semiloka Teknologi dan Komputasi Serta Aplikasi.
- [17] WQ Yang, DM Spink, TA York, and H McCann. (1999). *An Image Reconstruction Algorithm based on Landweber's Iteration Method for Electrical Capacitance Tomography*. s.l. : IOP Publishing Ltd, , Vols. 10(1999) 1065-1069.



A. Command Script untuk algoritma Sensitivitas

```

clear all
close all
clc
format long

% set jumlah pixel sebesar 32x32x32
nx=32;
ny=32;
nz=32;
n=1;
mm=2;
load domain3d -mat;
for l=1:31

    clear a b c d e f S Ex1 Ey1 Ez1 Ex2 Ey2 Ez2
    % ambil data "electric field" untuk komponen x pada elektroda
    pertama
    % yang dijadikan sensor
    a=load(['helm2besar' num2str(l) 'x.txt'],'-ascii');
    b=load(['helm2besar' num2str(l) 'y.txt'],'-ascii');
    c=load(['helm2besar' num2str(l) 'z.txt'],'-ascii');
    % a=a(:,4);a=squeeze(a);
    % b=b(:,4);b=squeeze(b);
    % c=c(:,4);c=squeeze(c);

    for m = mm:32

        d=load(['helm2besar' num2str(m) 'x.txt'],'-ascii');
        e=load(['helm2besar' num2str(m) 'y.txt'],'-ascii');
        f=load(['helm2besar' num2str(m) 'z.txt'],'-ascii');

        % d=d(:,4);d=squeeze(d);
        % e=e(:,4);e=squeeze(e);
        % f=f(:,4);f=squeeze(f);

        countV1=0;
        Ex1(1:nx,1:ny,1:nz)=0;
        Ey1(1:nx,1:ny,1:nz)=0;
        Ez1(1:nx,1:ny,1:nz)=0;
        Ex2(1:nx,1:ny,1:nz)=0;
        Ey2(1:nx,1:ny,1:nz)=0;
        Ez2(1:nx,1:ny,1:nz)=0;

        for k=1:nz;
            for i=1:nx;
                for j=1:ny;
                    countV1=countV1+1;
                    Ex1(i,j,k)=a(countV1);
                    Ey1(i,j,k)=b(countV1);
                    Ez1(i,j,k)=c(countV1);
                    Ex2(i,j,k)=d(countV1);
                    Ey2(i,j,k)=e(countV1);
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        Ez2(i,j,k)=f(countV1);
    end;
end;
end
Ex1=Ex1.*domain3d;
Ey1=Ey1.*domain3d;
Ez1=Ez1.*domain3d;
Ex2=Ex2.*domain3d;
Ey2=Ey2.*domain3d;
Ez2=Ez2.*domain3d;
% find sensitivity
S=-1*((Ex1.*Ex2)+(Ey1.*Ey2)+(Ez1.*Ez2));

% get S1 for next step
save(['Scrop' num2str(n)], 'S','nx','ny','nz','-mat')
l
m
n
n=n+1;
end
mm=mm+1;
end

%sensitivityall
% for k=1:32
%     subplot(4,8,k)
%     mesh(S(:, :,k))
%     title(['Level=' num2str(k)])
% end

%-----
----done

```

B. Command Script untuk algoritma Landweber Equation

```

%-----Rekonstruksi
% Initiation
    dn=(d-VoutE)./(VoutF-VoutE);
    subplot(1,2,1),bar(dn),grid
    axis([0,30,0,1.1])
    xlabel('Data')
    ylabel('Digital Value')
    y1 = dn';
    normcap(1:496,i)=y1(1:496,1);
    ncp(i,1:496)=y1;
    iter=100;
    alpha0=10;
    t=0;
    v0=(an3d'*y1);
    eval=1;
    t1=1;
    serr=0;
    v=v0;
    while t1<=iter
        phi1=y1-ant3d'*v0;
        v=v0+alpha0*(an3d'*phi1);
        err=abs(v-v0);
        serr=serr+sum(err.^2);
        v(find(v>1))=1;
        v(find(v<0))=0;
        v0=v;
        t1=t1+1;
    end
    imagel=reshape(v,nx,ny,nz);
    %figure(2)
    %imagesc(imagel)
    plot3d
%-----

```