

**PENGEMBANGAN SISTEM DATA AKUISISI
ELECTRICAL CAPACITANCE VOLUME TOMOGRAPHY (ECVT)**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Magister Sains

**ARBA'I YUSUF
0806469262**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI FISIKA INSTRUMENTASI
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

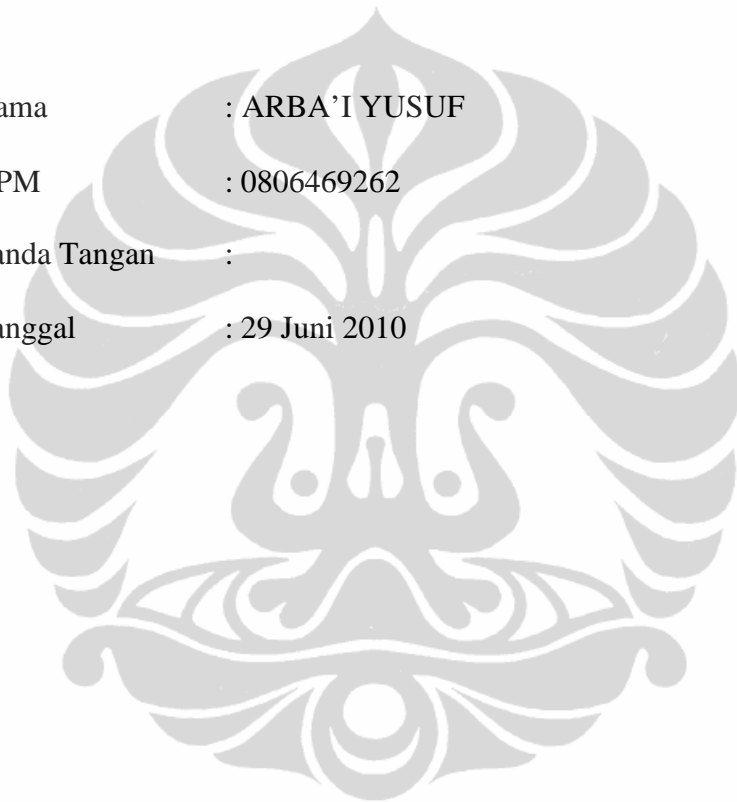
Tesis ini adalah hasil karya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : ARBA'I YUSUF

NPM : 0806469262

Tanda Tangan :

Tanggal : 29 Juni 2010



HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh

Nama : ARBA'I YUSUF
NPM : 0806469262
Program Studi : PASCASARJANA FISIKA INSTRUMENTASI
Judul Tesis : PENGEMBANGAN SISTEM DATA AKUISISI
ELECTRICAL CAPACITANCE VOLUME TOMOGRAPHY (ECVT)

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperkenankan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Pascasarjana Fisika Instrumentasi, Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Warsito ()
Pembimbing : Dr. Prawito ()
Penguji : Dr. Wahyu Widada ()
Penguji : Dr. Sastra Kusuma Wijaya ()
Penguji : Dr. Martarizal ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 29 Juni 2010

*Jangan putus harapan karena cobaan
Jangan berkecil hati karena nasibnya diri
Jangan berpangku tangan penuh angan-angan
karena penderitaan.....
Jangan pernah ada kata terlambat
Apalagi putus asa.....*

*Lapangkan dadamu kejar cita-citamu
Gerakkan penamu jangan bosan-bosan usaha
Curahkan pikiranmu jangan malas bekerja
Bangkitkan semangatmu
Jangan melamun saja.....*

*Ubahlah nasibmu sebelum hari tua
Agar deritamu menjadi bahagia
Selagi masih ada waktu
Ayo terus saja melangkah
Masa depan tanggung jawa kita
Dan jangan lupakan Tuhanmu
Yang mengatur isi jagad raya*

*Ingatlah.. Rintangannya paling besar
Untuk mencapai cita-cita adalah
KEMALASAN dan KEBOSANAN*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah swt penguasa sekalian alam yang telah memberikan kasih sayang, karunia, petunjuk, dan ilmu-Nya kepada hamba-hambanya, sehingga saya bisa menyelesaikan tesis ini dengan baik. Tak lupa sholawat dan salam saya panjatkan bagi junjungan kita Nabi besar Muhammad SAW.

Tesis ini merupakan puncak dari keseluruhan tugas program strata-2, dimana tesis ini adalah makalah penelitian dari seorang mahasiswa untuk mencapai gelar magister sains. Tesis saya berjudul “*Pengembangan Sistem Data Akuisisi Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT)*”. Tesis ini dapat selesai karena dukungan dari berbagai pihak, khususnya istriku dan anakku beserta ayahanda dan ibunda yang telah memberikan dukungan baik materiil maupun spirituil. Tak lupa saya ucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Warsito, dan Dr. Prawito selaku dosen pembimbing yang telah banyak membimbing dan mengarahkan hingga terselesainya tesis ini.
2. Semua dosen pengajar dan staf jurusan fisika instrumentasi departemen fisika.
3. Dr. Wahyu Widada dan Dr. Edi Sukur yang banyak memberikan ide dan sarannya.
4. Seluruh tim tomography yang telah banyak membantu dan memberikan saran-saran dan ide-idenya.
5. Seluruh karyawan PT. Edward Technonology seperti Rohmadi, Sulis, Yanto, dan rekan-rekan lainnya.
6. Seluruh teman-teman fisika instrumentasi angkatan 2008.
7. Terimakasih buat Sri Maryati yang telah membantu mengambil data percobaan dan juga buat Marlin Arbi dalam pembuatan algoritma ECVT.
8. Dan seluruh teman-teman lainnya yang tidak bisa saya sebutkan disini.

Besar harapan saya semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi penulis sendiri khususnya dan rekan-rekan yang mempelajarinya, Amin. Dan tak lupa penulis mengharapkan saran dan kritik yang berhubungan dengan tesis ini untuk pengembangan lebih lanjut.

Depok, 29 Juni 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TESIS UNTUK
KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : ARBA'I YUSUF
NPM : 0806469262
Program Studi : Pascasarjana Fisika Instrumentasi
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

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

**PENGEMBANGAN SISTEM DATA AKUISISI ELECTRICAL CAPACITANCE
VOLUME TOMOGRAPHY (ECVT)**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini. Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tesis saya tanpa meminta izin dari 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 tanggal : 29 Juni 2010

Yang menyatakan,

(ARBA'I YUSUF)

RINGKASAN

Nama : Arba'i Yusuf
Program Studi : S2 Fisika Instrumentasi
Judul : Pengembangan Sistem Data Akuisisi Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT).

Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT) merupakan salah satu metode visualisasi gambar tiga dimensi menggunakan efek kapasitansi. Perkembangan algoritma rekonstruksi sinyal ini sangat pesat, tetapi perkembangan hardware ECVT belum banyak dilakukan. Tulisan ini menjelaskan cara mendesain rangkaian ECVT berbasis teknologi CMOS switch dengan resolusi dan sensitivitas tinggi. Metode yang digunakan dalam mengukur kapasitansi ini adalah sistem charge discharge dengan rangkaian aktif differensial dengan clock sebesar 500KHz dan kemiringan pulsa sebesar 240 ns. Pengujian sinyal mulai dari clock, sistem charge discharge, penguatan dan pemfilteran menggunakan alat ukur berupa oscilloscope digital Tektronix TDS2002B. Setelah dilakukan pengujian didapatkan bahwa sistem data akuisisi (DAS ECVT) ini mampu mengukur perubahan kapasitansi dengan resolusi sebesar 0.21 femto farad untuk elektroda yang dekat dengan transmitter dan 0.42 femto farad untuk elektroda yang jauh dengan transmitter. Sedangkan sensitifitas sistem DAS ini adalah 0.2551 fF/mV (femto farad per milivolt). Besarnya noise yang terukur sebesar 0.0822 mV untuk elektroda yang dekat dengan transmitter dan 0.1644 mV untuk elektroda yang jauh dari transmitter. Setelah dilakukan eksperimen rekonstruksi citra, sistem DAS ECVT ini mampu menghasilkan citra yang bagus dan dengan bentuk yang mirip dengan aslinya.

Kata Kunci: ECVT, CMOS switch, Tomography, Sensitifitas dan Resolusi, Rekonstruksi Citra.

ABSTRACT

Name : Arba'i Yusuf
Studies Program : S2 Physics Instrumentation
Title : Development of Data Acquisition System for Electrical Capacitance
Volume Tomography (ECVT).

Electrical capacitance volume tomography (ECVT) is one of the three-dimensional image visualization method using capacitance effects. Development of the signal reconstruction algorithm is very fast, but development has not done a lot ECVT hardware. This paper describes how to design technology-based ECVT CMOS circuit switches with high resolution and sensitivity. The method used in measuring this capacitance discharge charge system with active circuit with a differential slope of the clock at 500KHz and pulse of 240 ns. Test signal from the clock, discharge charge system, strengthening and filtering using measuring instruments such as Tektronix TDS2002B digital oscilloscope. After testing it was found that the data acquisition system (DAS ECVT) is capable of measuring changes in capacitance with resolution of 0.21 femto farad to close to the transmitter electrode and 0.42 femto farad are far from the transmitter electrode. Meanwhile the sensitivity of this DAS is 0.2551 FF / mV (femto farad per milivolt). The amount of noise measured at 0.0822 mV for electrodes close to the transmitter and 0.1644 mV for the electrode distance from the transmitter. After doing the experimental image reconstruction, ECVT DAS system is capable of producing a good image and a shape similar to the original.

Keywords: ECVT, CMOS Switches, Tomography, Sensitivity and Resolution, Image Reconstruction.

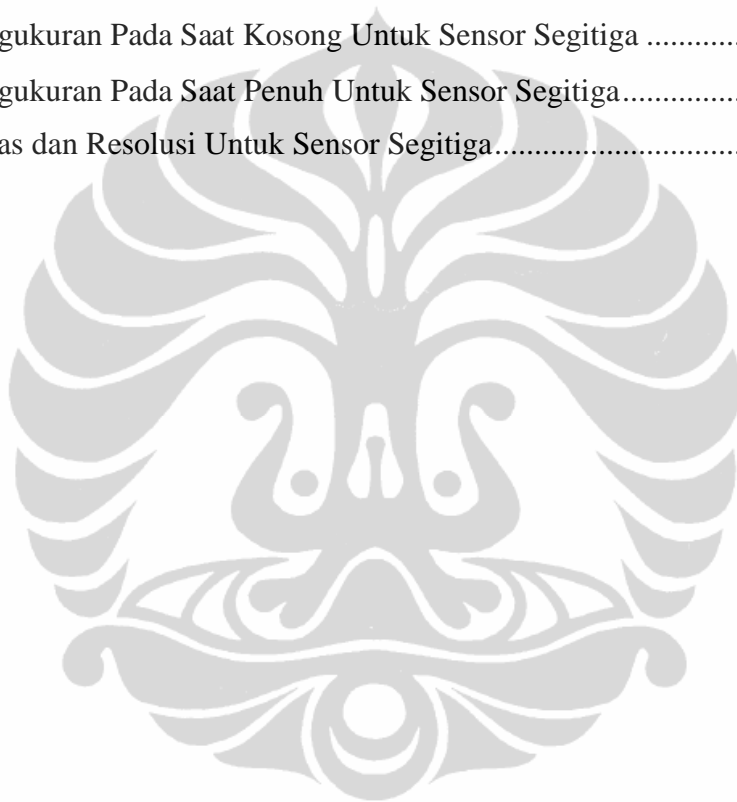
DAFTAR ISI

| | Halaman |
|--|----------------|
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | i |
| HALAMAN PENGESAHAN | ii |
| KATA PENGANTAR | iv |
| HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS | v |
| RINGKASAN | vi |
| ABSTRACT | vii |
| DAFTAR ISI | viii |
| DAFTAR TABEL | x |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| BAB 1 | 1 |
| PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Rumusan Masalah | 1 |
| 1.3. Tujuan Penulisan | 2 |
| 1.4. Batasan Masalah | 2 |
| 1.5. Metodologi Penelitian | 2 |
| 1.6. Sistematika Penulisan | 3 |
| BAB 2 | 4 |
| DASAR TEORI | 4 |
| 2.1. Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT) | 4 |
| 2.1.1. Sistem ECVT | 4 |
| 2.1.2. Prinsip ECVT | 5 |
| 2.2. Teori Charge Discharge | 8 |
| BAB 3 | 11 |
| SISTEM DATA AKUISISI ECVT | 11 |
| 3.1. <i>Clock Generator</i> (Pembangkit Pulsa) | 12 |
| 3.2. Multiplexer Analog | 14 |
| 3.3. Rangkaian Charge Discharge | 16 |
| 3.4. Gain Awal | 17 |
| 3.5. Full Wave Rectifier dan Peak Detektor | 19 |
| 3.6. Low Pass Filter | 22 |

| | |
|--|----|
| 3.7. Programmable Gain Amplifier (PGA) | 22 |
| 3.8. Analog to Digital Converter (ADC) | 23 |
| 3.9. Digital to Analog Converter (DAC) | 23 |
| 3.10. Mikrokontroler | 23 |
| 3.11. Alur Program | 26 |
| 3.12. Parameter Yang Mempengaruhi Kecepatan Sampling Data | 34 |
| BAB 4 | 35 |
| PENGUJIAN DAN ANALISA | 35 |
| 4.1. Pengujian Clock Generator (Pembangkit Pulsa) | 35 |
| 4.2. Pengujian Rangkaian Charge Discharge | 36 |
| 4.3. Pengujian Rangkaian Gain Awal..... | 36 |
| 4.4. Pengujian Rangkaian Full Wave Rectifier | 38 |
| 4.5. Pengujian Rangkaian Peak Detektor | 38 |
| 4.6. Pengujian Rangkaian Filter | 39 |
| 4.7. Pengukuran Kapasitansi DAS ECVT | 40 |
| 4.7.1. Setting DAS ECVT | 42 |
| 4.7.2. Pengukuran Kapasitansi dengan Geometri Sensor Hexagonal | 42 |
| 4.7.2.1. Pengukuran Kapasitansi Pada Saat Kosong Untuk Sensor Hexagonal (Udara $\epsilon = 1$)..... | 43 |
| 4.7.2.2. Pengukuran Kapasitansi Pada Saat Penuh Untuk Sensor Hexagonal (Air $\epsilon = 80$) | 45 |
| 4.7.2.3. Perhitungan Sensitifitas dan Resolusi Untuk Sensor Hexagonal | 47 |
| 4.7.3. Pengukuran Kapasitansi dengan Geometri Sensor Segitiga..... | 48 |
| 4.7.3.1. Pengukuran Kapasitansi Pada Saat Kosong (Udara $\epsilon = 1$)..... | 49 |
| 4.7.3.2. Pengukuran Kapasitansi Pada Saat Penuh Untuk Sensor Segitiga (Air $\epsilon = 80$)..... | 51 |
| 4.7.3.3. Perhitungan Sensitifitas dan Resolusi Untuk Sensor Segitiga..... | 52 |
| 4.8. Eksperimen DAS ECVT | 53 |
| 4.8.1. Percobaan Menggunakan Air dan Udara..... | 54 |
| 4.8.2. Percobaan Menggunakan Benda Lain | 59 |
| BAB 5 | 64 |
| PENUTUP | 64 |
| 5.1. Kesimpulan..... | 64 |
| 5.2. Saran | 65 |
| DAFTAR REFERENSI..... | 66 |
| LAMPIRAN 1 | 67 |
| LAMPIRAN 2 | 68 |
| LAMPIRAN 3 | 69 |

DAFTAR TABEL

| | Halaman: |
|--|-----------------|
| Tabel 3.1. Fungsi Pin Kontrol Pada AD8037AN | 20 |
| Tabel 3.2. Pengaruh Sampling Data Terhadap Kecepatan Transfer Data ke Komputer Untuk 32 Elektroda..... | 34 |
| Tabel 4.1. Data Pengukuran Pada Saat Kosong Untuk Sensor Hexagonal | 43 |
| Tabel 4.2. Data Pengukuran Pada Saat Penuh Untuk Sensor Hexagonal..... | 45 |
| Tabel 4.3. Sensitifitas dan Resolusi Untuk Sensor Heksagonal | 48 |
| Tabel 4.4. Data Pengukuran Pada Saat Kosong Untuk Sensor Segitiga | 49 |
| Tabel 4.5. Data Pengukuran Pada Saat Penuh Untuk Sensor Segitiga..... | 51 |
| Tabel 4.6. Sensitifitas dan Resolusi Untuk Sensor Segitiga..... | 53 |



DAFTAR GAMBAR

| | Halaman: |
|---|-----------------|
| Gambar 2.1. Sistem ECVT | 4 |
| Gambar 2.2. Sistem Scanning ecvt Konvensional..... | 6 |
| Gambar 2.3. Radiasi Medan Listrik Antar Dua Elektroda | 6 |
| Gambar 2.5. Rangkaian Aktif Differensial..... | 8 |
| Gambar 2.6. Timing Diagram Sinyal Secara Ideal..... | 10 |
| Gambar 3.1. Blok Diagram Sistem Data Akuisisi ECVT | 11 |
| Gambar 3.2. Foto Sistem Data Akuisisi ECVT..... | 12 |
| Gambar 3.3. Rangkaian Pembangkit Pulsa; (a) High Speed cmos Gate; | 12 |
| (b) Rangkaian Integrator..... | 12 |
| Gambar 3.4. Diagram Waktu Pembangkit Pulsa..... | 14 |
| Gambar 3.5. Rangkaian Multiplexer Analog | 15 |
| Gambar 3.6. Rangkaian Aktif Differensial..... | 16 |
| Gambar 3.7. Diagram Waktu Sinyal Charge Discharge..... | 17 |
| Gambar 3.8. Rangkaian Gain Awal..... | 17 |
| Gambar 3.9. Diagram Waktu Sinyal Pada Gain Awal | 18 |
| Gambar 3.10. Rangkaian Full Wave Rectifier | 19 |
| Gambar 3.11. Diagram Waktu Sinyal Full Wave Rectifier..... | 20 |
| Gambar 3.12. Rangkaian Peak Detektor | 21 |
| Gambar 3.13. Diagram Waktu Sinyal Peak Detektor..... | 21 |
| Gambar 3.14. Rangkaian Low Past Filter | 22 |
| Gambar 3.15. Programmable Gain Amplifier (PGA)..... | 22 |
| Gambar 3.16. Rangkaian Mikrokontroler AT32UC3A1512..... | 24 |
| Gambar 3.17. Foto Mikrokontroler AT32UC3A1512 | 25 |
| Gambar 3.18. Alur Program Utama Sistem ECVT | 26 |
| Gambar 3.19. Alur Program Subrutine Interrupt Serial | 27 |
| Gambar 3.20. Alur Program Subrutine Menu Kallibrasi..... | 31 |
| Gambar 3.21. Alur Program Subrutine Menu Run..... | 33 |
| Gambar 4.1. Hasil Pengujian Rangkaian Pembangkit Pulsa..... | 35 |
| Gambar 4.2. Sinyal Pulsa dan Sinyal Charge Discharge..... | 36 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.3. Sinyal Pada Gain Awal. (a) Sinyal Pulsa dan Sinyal Penguatan Pertama; (b) Sinyal Pulsa dan Sinyal Penguatan Kedua | 37 |
| Gambar 4.4. Sinyal Pulsa dan Sinyal Full Wave Rectifier..... | 38 |
| Gambar 4.5. Sinyal Pulsa dan Sinyal Peak Detektor..... | 39 |
| Gambar 4.6. Sinyal Pulsa dan Sinyal Filter | 40 |
| Gambar 4.7. Susunan Alat Untuk Eksperimen ECVT | 41 |
| Gambar 4.8. Sensor ECVT Hexagonal 4 Tingkat | 43 |
| Gambar 4.9. Grafik Bar Kapasitansi Dalam Keadaan Kosong Untuk Sensor Hexagonal .. | 44 |
| Gambar 4.10. Grafik Bar Kapasitansi Dalam Keadaan Penuh Untuk Sensor Hexagonal... | 46 |
| Gambar 4.11. Sensor ECVT Segitiga Sama Sisi 4 Tingkat..... | 49 |
| Gambar 4.12. Grafik Bar Kapasitansi Dalam Keadaan Kosong Untuk Sensor Segitiga | 50 |
| Gambar 4.13. Grafik Bar Kapasitansi Dalam Keadaan Penuh Untuk Sensor Segitiga..... | 52 |
| Gambar 4.14. Hasil Rekonstruksi Citra Menggunakan Air Dalam Keadaan Penuh..... | 54 |
| Gambar 4.15. Hasil Rekonstruksi Citra Menggunakan Udara | 55 |
| Gambar 4.16. Hasil Rekonstruksi Citra Aliran Air Pada Saat Pengisian Tabung | 56 |
| Gambar 4.17. Hasil Rekonstruksi Citra Tabung Berisi Air Sedikit | 56 |
| Gambar 4.18. Hasil Rekonstruksi Citra Tabung Berisi Air Agak Banyak..... | 57 |
| Gambar 4.19. Hasil Rekonstruksi Citra Tabung Berisi Air Hampir Penuh | 57 |
| Gambar 4.20. Hasil Rekonstruksi Citra Tabung Berisi Air Penuh dan Diberi Tabung Aqua Yang Berisi Pasir | 58 |
| Gambar 4.21. Hasil Rekonstruksi Citra Tabung Berisi Air Penuh dan Diberi Tabung Aqua Yang Berisi Udara | 58 |
| Gambar 4.22. Hasil Rekonstruksi Akrilic Dan Bola Karet Pejal | 59 |
| Gambar 4.23. Hasil Rekonstruksi Campuran Parafin, Air, Dan Udara..... | 60 |
| Gambar 4.24. Hasil Rekonstruksi Citra Untuk Bola Karet Pejal | 61 |
| Gambar 4.25. Hasil Rekonstruksi Citra Tangan Manusia | 61 |
| Gambar 4.26. Hasil Rekonstruksi Citra Seekor Kucing..... | 62 |

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tomografi adalah proses visualisasi gambar dua dimensi maupun tiga dimensi yang banyak digunakan dalam proses industri, seperti dalam memvisualisasikan dua aliran cairan dalam pipa (gas dengan minyak atau minyak dengan air). Terdapat beberapa cara dalam proses tomografi, yaitu menggunakan *ultrasonic*, *electrical resistance tomography*, *electrical inductance tomography*, *electrical capacitance tomography*, *electrical capacitance volume tomography*, dll.

Electrical capacitance volume tomography (ECVT) merupakan salah satu cara dalam proses tomografi. ECVT terdiri dari tiga bagian utama yaitu sensor, sinyal kondisioning (sistem data akuisisi), dan komputer. Sensor terbuat dari plat tembaga yang berfungsi sebagai elektroda untuk mengukur perubahan kapasitansi, sinyal kondisioning (sistem data akuisisi) berupa rangkaian elektronik yang bertugas mengkonversi sinyal dari elektroda menjadi data digital, sedangkan komputer berfungsi sebagai pengolah data dan merekonstruksi data tersebut menjadi gambar dua dimensi atau tiga dimensi.

ECVT diaplikasikan untuk pencitraan volume secara terus menerus (*real time volumetric imaging*) seperti pencitraan antara gas-cairan, gas-zat padat, dan antara gas-cairan-zat padat. ECVT dapat juga diaplikasikan untuk diagnostik medis, optimasi pada proses industri yang meliputi pengeringan (*drying*), penanganan zat padat (*solids handling*), pipa minyak (*oil pipelines*), proses campuran (*mixing processes*), pembasahan (*wetting*), *pneumatic conveyor*, *fluidization system*, dan *powder processing*.

1.2. Rumusan Masalah

Sampai saat ini hardware tomografi yaitu sistem data akuisisi telah mulai dikembangkan. Dimulai tahun 1994 sebuah perusahaan dengan nama *Process Tomography Ltd* dari UMIST (*University of Manchester Institute of Science and Technology*) Inggris telah memulai mengembangkan hardware ECT dua dimensi. Sistem yang dikembangkan menggunakan metode scanning konvensional dengan jumlah elektroda sebanyak 12. Masing-masing elektroda menggunakan satu rangkaian sinyal kondisioning, jika ada 12 elektroda berarti ada 12 sinyal kondisioning sehingga dimensi hardware ECT juga besar. Dalam tulisan tesis ini dikembangkan sistem data akuisisi ECVT dengan banyak elektroda cukup dengan satu rangkaian sinyal kondisioning sehingga bentuk menjadi lebih kompak.

Sistem data akuisisi yang dikembangkan dalam tesis ini mampu mencitra gambar secara tiga dimensi dan *real time*, yaitu apa yang ada dalam tabung sensor dapat ditampilkan dalam bentuk gambar pada saat itu juga dengan bentuk volumetrik tiga dimensi.

1.3. Tujuan Penulisan

Tujuan pembuatan tesis ini adalah untuk membuat hardware sistem data akuisisi *electrical capacitance volume tomography (ECVT)* dengan satu rangkaian sinyal kondisioning untuk banyak elektroda.

1.4. Batasan Masalah

Dalam pembuatan tesis ini dibatasi beberapa hal, diantaranya:

- Jumlah elektroda yang digunakan dibatasi sampai 32 kanal.
- Pembuatan sensor tidak dibahas dalam tesis ini.
- Pembuatan algoritma untuk rekonstruksi image dalam komputer tidak dibahas, dalam tesis ini digunakan algoritma yang sudah ada.
- Pembahasan dibatasi untuk pembuatan sistem data akuisisi mulai dari perancangan sinyal kondisioning, sistem charge discharge, penguatan, pemfilteran, pengambilan data hingga pengiriman data ke komputer.
- Komunikasi data ke komputer menggunakan serial rs232.

1.5. Metodologi Penelitian

Pelaksanaan pembuatan tesis ini meliputi beberapa tahap, yaitu:

- Studi literatur tentang proses tomografi meliputi *electrical capacitance volume tomography (ECVT)*, rangkaian charge discharge, filtering, penguatan, dan komunikasi data.
- Mendesain rangkaian menggunakan perangkat lunak desain grafik elektronik misal protel.
- Merakit rangkaian yang telah didesain.
- Melakukan tes fungsional secara per bagian untuk mengetahui kinerja masing-masing bagian.
- Melakukan tes sistem data akuisisi secara keseluruhan untuk mengetahui unjuk kerja sistem.
- Melakukan kalibrasi sistem data akuisisi yang telah dibuat.

- Merakit sistem data akuisisi dengan tabung sensor dan juga komputer yang berisi perangkat lunak ECVT.
- Melakukan uji coba pencitraan benda padat dan cair, kemudian dilihat dan dianalisis gambarnya di komputer.

1.6. Sistematika Penulisan

Pembuatan tesis ini meliputi lima bab, yaitu:

- BAB 1: merupakan pendahuluan yang meliputi latar belakang, tujuan penulisan, rumusan masalah, batasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.
- BAB 2: membahas dasar teori tentang proses tomografi meliputi *electrical capacitance volume tomography*, teori *charge discharge*, dan komunikasi data.
- BAB 3: membahas mengenai desain rancangan sistem data akuisisi ECVT.
- BAB 4: membahas mengenai analisis data terhadap hasil pengukuran ECVT.
- BAB 5: merupakan penutup yang berisi kesimpulan dan saran.

BAB 2

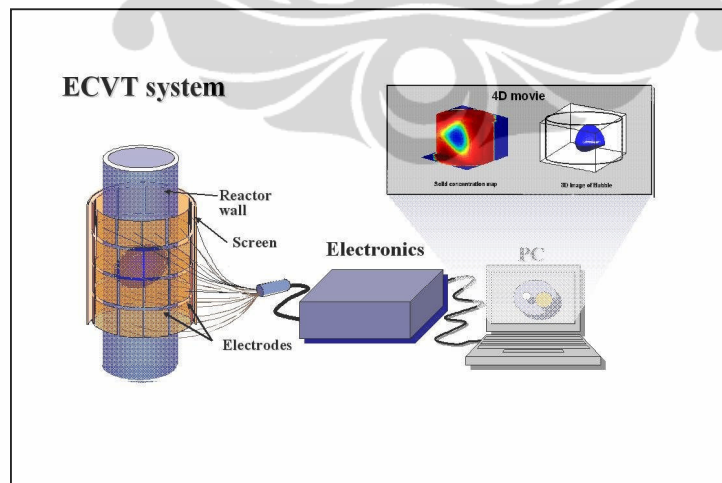
DASAR TEORI

2.1. Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT)

Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT) adalah salah satu teknik tomografi volume berbasis pengukuran kapasitansi listrik. Metode ini dikembangkan oleh Warsito et al, (IEEE sensor jurnal, 2007) yang telah merevolusi dan menggantikan metode tomografi klasik yaitu slicing dua dimensi. Dalam perkembangan algoritma ini ECVT dapat menampilkan gambar secara terus menerus (*real time*), 3 dimensi obyek volume ditambah dengan waktu, dengan kata lain ECVT merupakan sistem tomografi 4 dimensi.

2.1.1. Sistem ECVT

Untuk proses rekonstruksi *image* menjadi suatu gambar dibutuhkan sedikitnya 8 hingga 32 elektroda. Semakin banyak elektroda yang dipakai semakin detil gambar yang dihasilkan. Gambar 2.1 memperlihatkan blok diagram sistem ECVT. Elektroda tersebut ditempelkan pada tabung percobaan. Rangkaian sinyal kondisioning digunakan untuk mengukur perubahan kapasitansi menjadi data pengukuran. Kemudian data pengukuran tersebut direkonstruksi menjadi gambar dua dimensi atau tiga dimensi menggunakan komputer. Secara garis besar sistem ECVT terdiri atas tiga bagian utama, yaitu sensor, sistem data akuisisi dan kontrol, rekonstruksi *image* dan *display*.



Gambar 2.1. Sistem ECVT

Tabung percobaan pada umumnya terbuat dari bahan isolator seperti dari plastik, akrilik, atau keramik yang tidak menghantarkan listrik secara langsung. Sensor terbuat dari lembaran tembaga tipis yang mudah dibentuk. Bentuk sensor bisa bermacam-macam

seperti kotak, segitiga, persegi panjang, atau segienam sama sisi. Macam-macam bentuk sensor akan berpengaruh pada pembuatan algoritma rekonstruksi. Jadi satu bentuk sensor mempunyai satu jenis algoritma sendiri.

2.1.2. Prinsip ECVT

Sesuai dengan prinsip pengukuran kapasitansi, bahwa dua plat yang saling berhadapan akan mempunyai nilai kapasitansi. Begitu juga dengan prinsip ecvt, bahwa dari sekian banyak elektroda sensor tersebut hanya ada dua elektroda yang aktif, satu sebagai pemancar sinyal dan yang satu lagi sebagai penerima sinyal. Seperti sebuah pemancar radio dan penerima radio yang menghasilkan medan listrik. Elektroda yang ada pada ecvt juga memancarkan medan listrik yang mempunyai pola radiasi tertentu tergantung dari bentuk sensor yang dibuat.

Dari hal tersebut prinsip tomografi adalah proses pengumpulan data dari suatu interaksi macam-macam radiasi dan kemudian mentransfer data-data tersebut kedalam gambar (*image*) menggunakan algoritma matematika yang spesifik menggunakan program komputasi seperti matlab. Prinsip ECVT sama dengan prinsip tomografi secara umum, radiasi yang dikumpulkan adalah berupamedan listrik yaitu dengan melakukan pengukuran terhadap perubahan kapasitansi dielektrik. Jumlah data yang diperoleh tergantung dari jumlah elektroda dan sistem scanning yang digunakan. Untuk sistem scanning konvensional, jumlah data dapat diketahui dengan persamaan berikut:

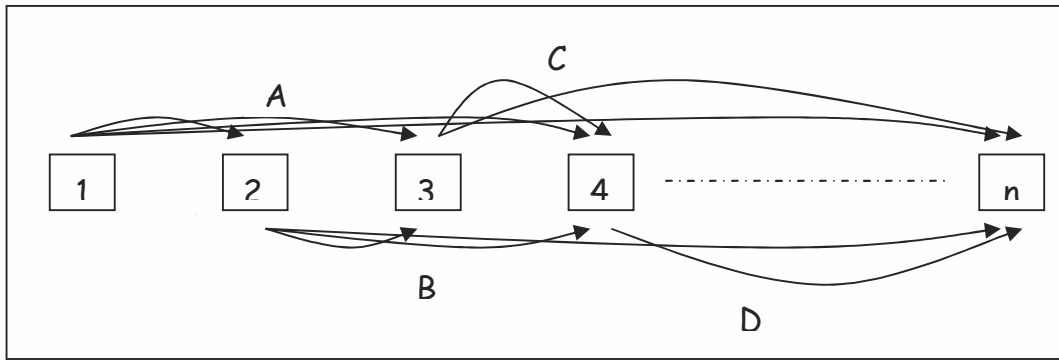
$$N = n(n - 1) / 2 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana:

N : Jumlah data yang dihasilkan.

n : Jumlah elektroda yang digunakan.

Gambar 2.2 berikut menjelaskan sistem scanning secara konvensional.

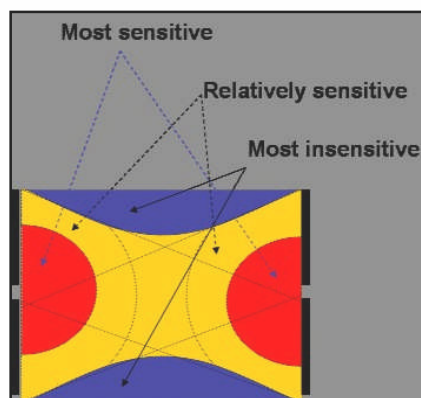


Gambar 2.2. Sistem Scanning ecvt Konvensional

Gambar 2.2 menjelaskan sistem scanning ecvt secara konvensional. Terdapat elektroda dengan jumlah n elektroda. Scanning dimulai dari elektroda pertama dengan elektroda kedua, elektroda pertama dengan elektroda ketiga begitu seterusnya berurutan hingga elektroda ke- n . Setelah itu dimulai lagi scanning dari elektroda kedua dan ketiga hingga elektroda ke- n dan seterusnya hingga seluruh elektroda discan. Berikut penjelasannya:

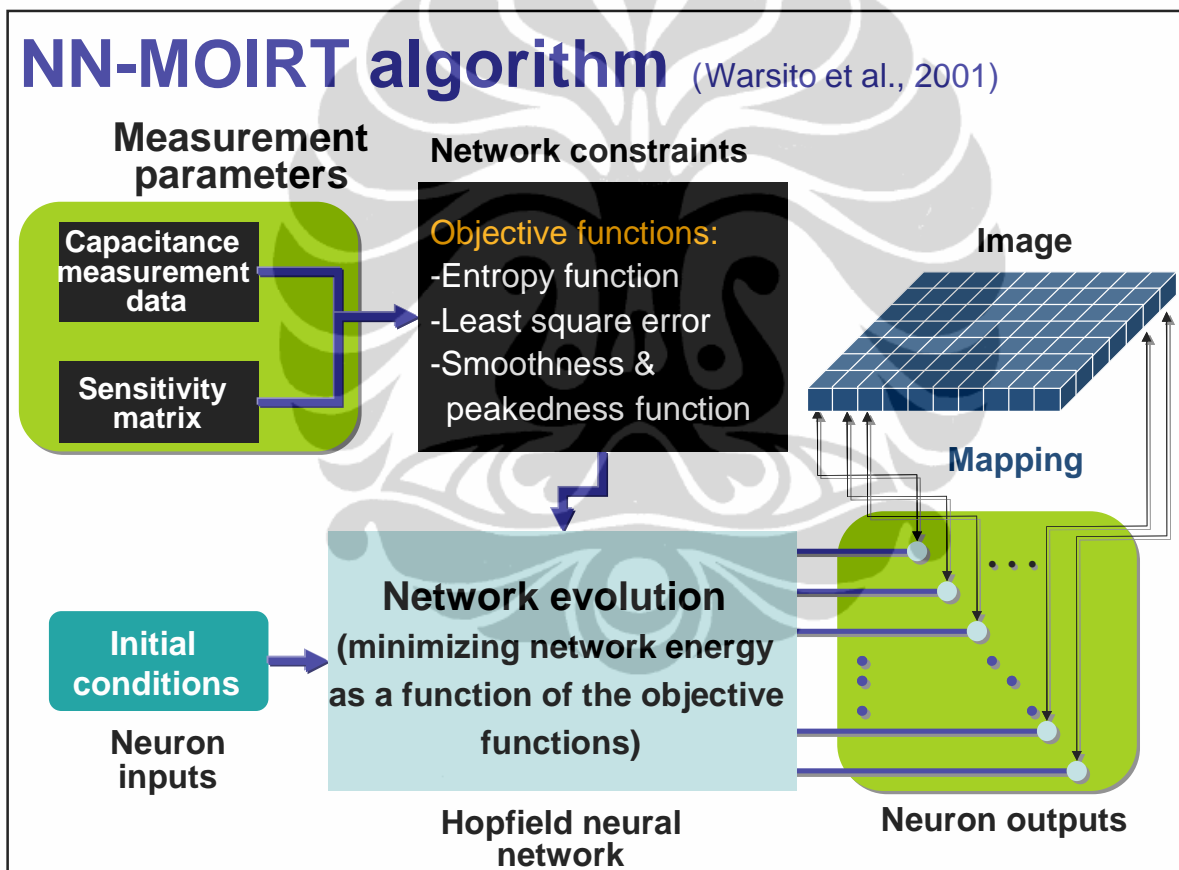
- A : 1 – 2; 1 – 3; 1 – 4; 1 – n ;
- B : 2 – 3; 2 – 4; 2 – n ;
- C : 3 – 4; 3 – n ;
- D : 4 – n ;

Dari masing-masing scanning antar elektroda akan didapatkan kapasitansi dengan sensitifitas yang unik, sehingga masing-masing pasangan elektroda mempunyai nilai gain tersendiri. Gambar 2.3 berikut menjelaskan radiasi medan listrik antar dua elektroda. Radiasi yang paling sensitif adalah yang paling dekat dengan elektroda, yang kurang sensitif adalah ditengah-tengah dua elektroda, kemudian yang paling tidak sensitif adalah yang berada di sebelah atas dan bawah.



Gambar 2.3. Radiasi Medan Listrik Antar Dua Elektroda

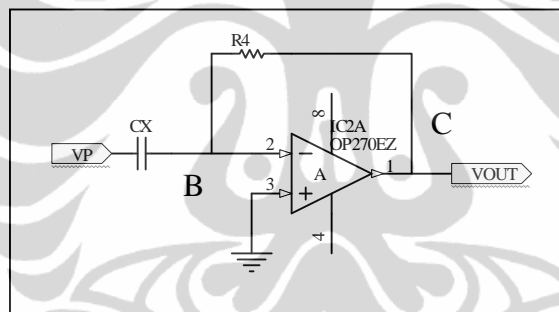
Dalam proses imaging ECVT sangat dipengaruhi oleh desain sensor kapasitansi 3-D dimana desain sensor tersebut berpengaruh pada teknik rekonstruksi volume image. Bentuk dari variasi pancaran medan listrik dalam ruang tiga dimensi merupakan dasar dari volume imaging hingga pembentukan pola dan juga sebagai acuan dalam konfigurasi penempatan elektroda sensor ECT. Pola rekonstruksi image dibuat dengan menerapkan *neural-network multicreation optimization image reconstruction (NN-MOIRT)*, dimana algoritma tersebut telah digunakan dalam ECT 2-D. Sedangkan teknik rekonstruksi image 3-D adalah dengan memodifikasi algoritma 2-D tersebut kedalam algoritma 3-D sensitivity matrix dengan menambahkan network constraint yang mengandung 3 – 2-D fungsi image. Gambar 2.4 berikut menggambarkan algoritma NN-MOIRT.



Gambar 2.4. Rekonstruksi 3-D dengan Domain Sensor Kapasitansi Menggunakan *Soft-Computing Algorithm*

2.2. Teori Charge Discharge

Rangkaian ECVT yang didesain menggunakan prinsip charge discharge transfer dalam mengukur nilai kapasitansi dengan memanfaatkan rangkaian aktif differensial. Rangkaian aktif differensial berfungsi untuk mengukur perubahan nilai kapasitansi yang terjadi dalam tabung. Gambar 2.5 memperlihatkan rangkaian aktif differensial. CX adalah elektroda yang terpasang pada tabung yang berfungsi sebagai sensor kapasitansi. Pulsa tegangan (VP) dengan frekuensi tertentu diberikan untuk menghasilkan gelombang elektromagnetik. Adanya perubahan tegangan dengan kemiringan pulsa tertentu akan menghasilkan arus charge discharge pada kedua elektroda. Besarnya arus charge discharge ini tergantung konstanta dielektrik dari obyek yang dideteksi oleh kedua elektroda. Sebuah penguat operasional dan resistor digunakan untuk mengubah arus charge discharge menjadi tegangan output (vout) supaya lebih mudah untuk mengolahnya.



Gambar 2.5. Rangkaian Aktif Differensial

Nilai C_x dapat dicari menggunakan persamaan:

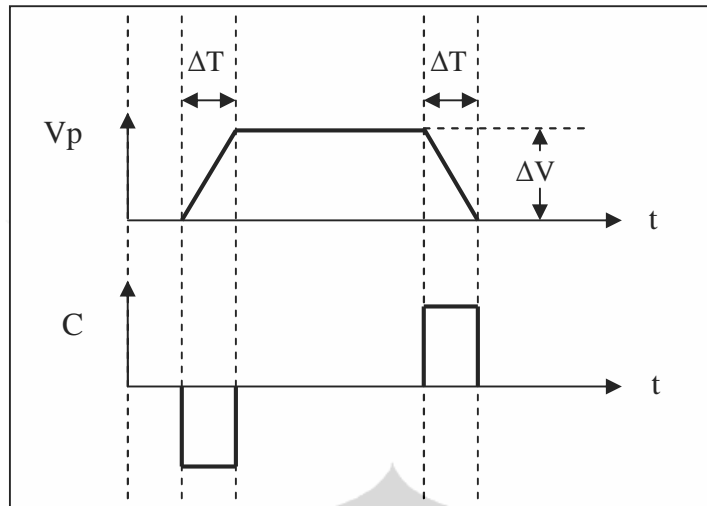
$$C_x = \frac{V_{out}}{2R(\Delta V / \Delta T)} \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana:

- C_x : Nilai kapasitansi yang terukur (Farad).
- V_{out} : Tegangan keluaran Charge Discharge (volt).
- R : Resistansi Charge Discharge (ohm).
- ΔV : Tegangan Pulsa (volt).
- ΔT : Kemiringan Pulsa (detik).

Sensitifitas dan resolusi dapat ditingkatkan dengan mengubah tiga variabel dalam persamaan 2.2 di atas. Pertama adalah dengan memperbesar nilai resistansi R, semakin tinggi nilai R semakin besar pula tegangan yang dihasilkan. Tetapi efek samping dari nilai R tinggi adalah *noise*, *noise* yang dihasilkan akan semakin tinggi pula. Untuk itu nilai R ada batasnya, dalam perancangan sebaiknya menggunakan nilai resistansi kurang dari 5000 ohm. Kedua adalah dengan memperbesar tegangan ΔV , semakin tinggi tegangan pulsa semakin besar tegangan yang dihasilkan dan pengukuran akan lebih sensitif. Keuntungan mempertinggi tegangan adalah *noise* tidak ikut naik, tetapi komponen elektronika punya batasan sumber catu daya terutama untuk switch dan operasional amplifier. Dalam rancangan ecvt, komponen elektronik menggunakan tegangan tidak lebih dari 15 volt dan biasanya tegangan pulsa yang dihasilkan lebih rendah dari tegangan catu daya. Dan yang ketiga adalah dengan mengubah-ubah kemiringan pulsa (ΔT), semakin kecil ΔT semakin tinggi tegangan tetapi pulsa yang dihasilkan semakin lancip yang menyerupai pulsa impulse, dengan demikian semakin sulit untuk mendeteksi tegangan tersebut. Semakin besar ΔT semakin rendah tegangan, jika ΔT lebih lebar lagi tegangan yang dihasilkan akan semakin kecil dan mendekati nol, dengan demikian sulit juga untuk mendeteksinya. Dengan pengaturan ΔT akan didapatkan tegangan output yang optimum sehingga mudah dideteksi.

Pada saat pengukuran satu siklus pulsa, tegangan pulsa mengalami kenaikan (*time rise*) dari 0 ke VP volt akan menghasilkan tegangan pada vout (titik B) berupa tegangan negatif dengan amplitudo tertentu. Begitu juga pada saat tegangan pulsa mengalami penurunan (*time fall*) dari VP volt ke 0 volt akan menghasilkan tegangan pada vout (titik B) berupa tegangan positif dengan amplitudo tertentu. Besarnya amplitudo, bentuk sinyal yang dihasilkan oleh rangkaian charge discharge, dan fluktuasi tegangan (*noise*) yang timbul akan dicari nilai optimalnya untuk diterapkan di rangkaian ECVT. Nilai yang paling bagus adalah mempunyai tegangan keluaran besar, tidak berbentuk impulse, dan nilai tegangan fluktuasi (*noise*) kecil. Gambar 2.6 berikut menjelaskan timing diagram secara ideal sinyal yang dihasilkan oleh rangkaian aktif differensial.



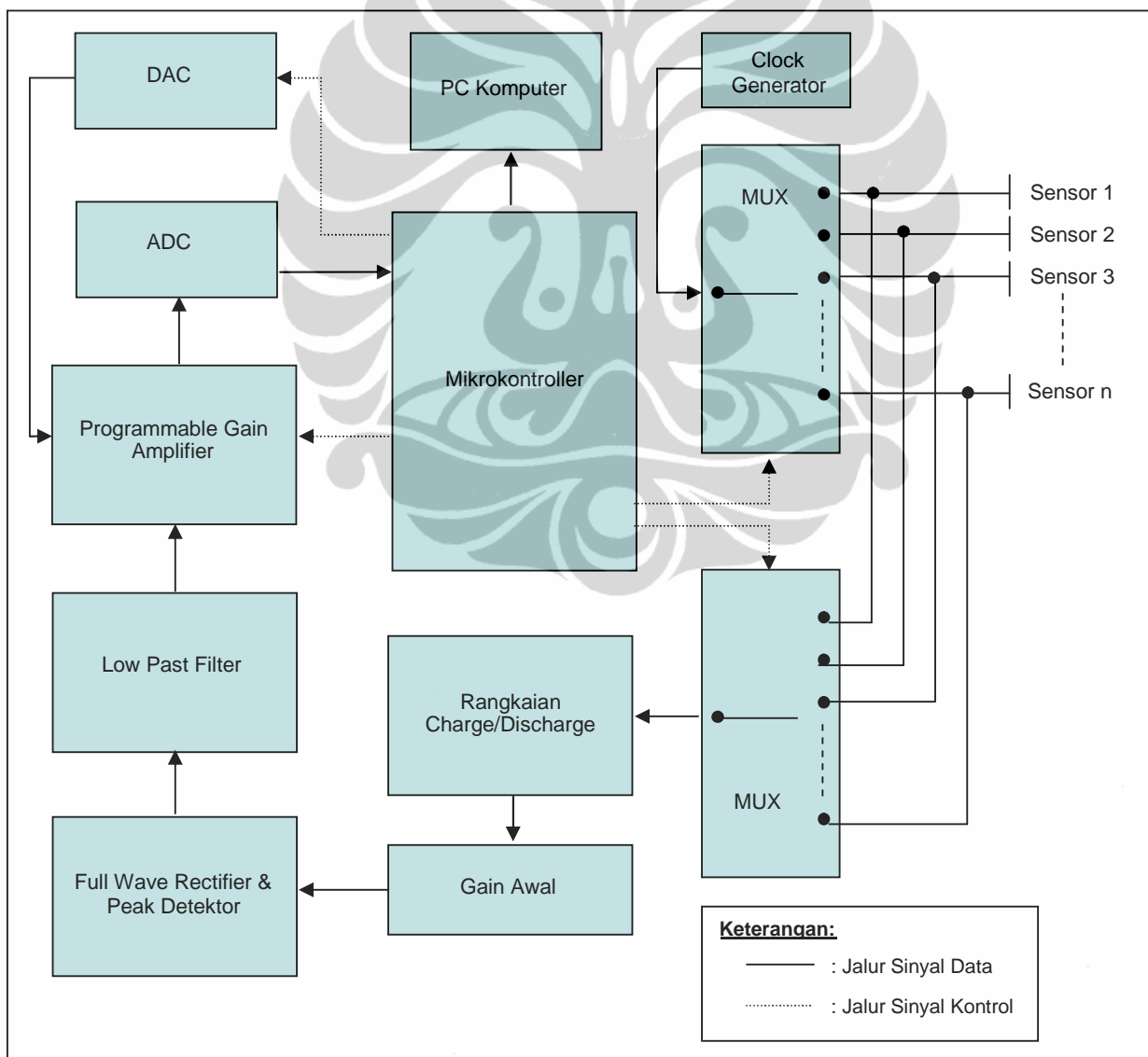
Gambar 2.6. Timing Diagram Sinyal Secara Ideal

Gambar 2.6 di atas menjelaskan hubungan antara pulsa tegangan V_p terhadap sepasang elektroda sebagai sensor kapasitansi. Secara ideal sinyal keluaran yang dihasilkan berupa pulsa dengan lebar pulsa tergantung dari kemiringan (Δt) tegangan pulsa input V_p . Besar kecilnya tegangan keluaran ditentukan oleh nilai kapasitansi yang terukur oleh elektroda. Sinyal keluaran ini nanti yang akan diukur dan dikirim ke komputer setelah melalui pemfilteran.

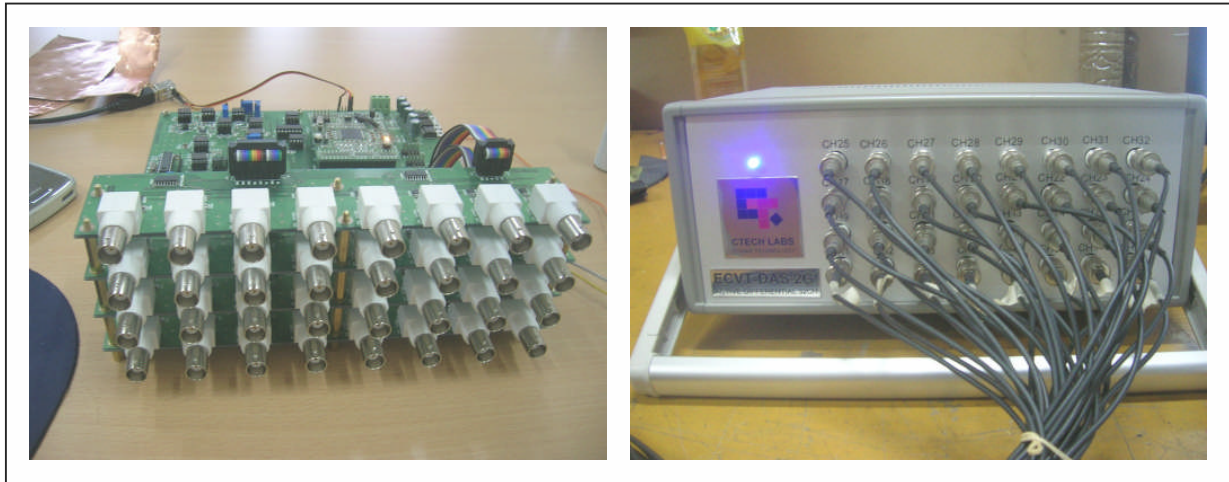
BAB 3

SISTEM DATA AKUISISI ECVT

Permasalahan yang dihadapi dalam mendesain sistem data akuisisi ECVT ini adalah bagaimana membuat sinyal kondisioning yang dapat mengukur perubahan kapasitansi diantara 0 fF sampai 100 fF. Dalam sistem data akuisisi ECVT ini terdapat empat bagian utama, yaitu bagian pertama adalah *clock generator*, bagian kedua adalah rangkaian multiplekser analog, kemudian bagian ketiga adalah rangkaian sinyal kondisioning yang berisi rangkaian charge discharge, low past filter, *programmable gain amplifier* (PGA) dan adc dac. Kemudian bagian keempat adalah mikrokontroler. Gambar 3.1 berikut menjelaskan blok diagram sistem data akuisisi ECVT.



Gambar 3.1. Blok Diagram Sistem Data Akuisisi ECVT

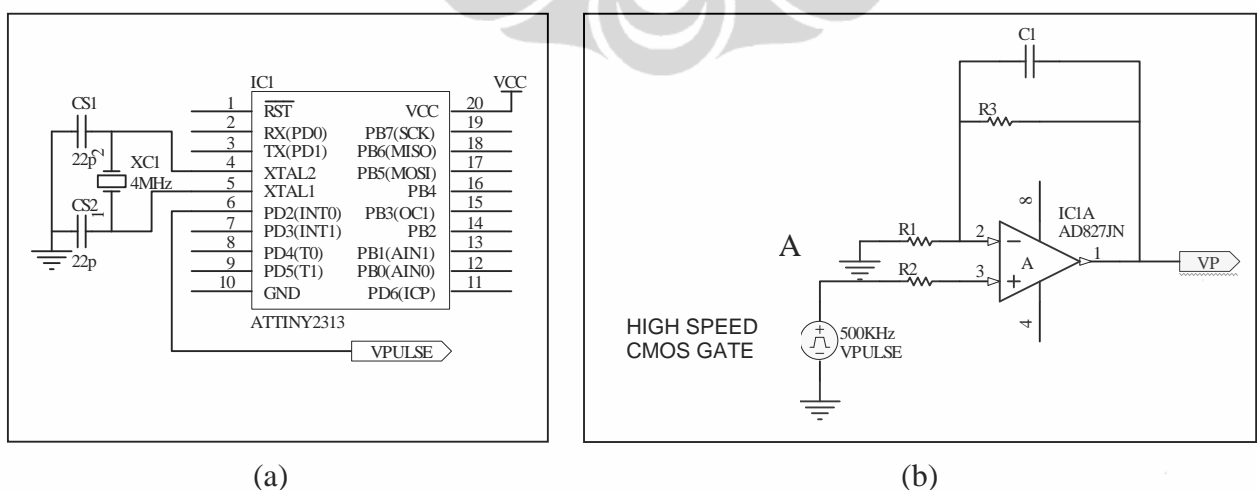


Gambar 3.2. Foto Sistem Data Akuisisi ECVT

Gambar 3.2 adalah sistem data akuisisi ECVT yang telah dibuat, Gambar sebelah kiri menunjukkan DAS ECVT setelah selesai dirakit, Gambar sebelah kanan menunjukkan DAS ECVT setelah di box dan diberi label. Sistem data akuisisi (DAS) ECVT yang kami desain mempunyai kanal maksimal 32 buah, tetapi juga bisa diprogram untuk jumlah kanal sebanyak 8, 12, 16, 24, dan 32.

3.1. Clock Generator (Pembangkit Pulsa)

Rangkaian *clock generator* berfungsi sebagai pembangkit pulsa yang nantinya digunakan untuk memberikan sinyal kepada elektroda. Frekuensi yang digunakan sebesar 500 KHz dengan menerapkan rangkaian *integrator*. Rangkaian *integrator* berfungsi untuk mengatur kemiringan pulsa supaya menghasilkan sinyal charge discharge yang optimal. Gambar 3.3 menunjukkan rangkaian pembangkit pulsa.



Gambar 3.3. Rangkaian Pembangkit Pulsa; (a) High Speed cmos Gate;
(b) Rangkaian Integrator

Dalam Gambar 3.3 (a) adalah rangkaian pembangkit pulsa kotak dengan frekuensi 500 KHz. Dalam rancangan ecvt ini digunakan mikrokontroler Attiny2313 sebagai pembangkit pulsa karena mempunyai fasilitas *clock out (CKOUT)* pada pin PD2. Kristal yang digunakan sebesar 4 MHz, kemudian pada *fuse bit* CKOUT dan CKDIV8 diaktifkan sehingga menghasilkan frekuensi sebesar 500 KHz pada PD2. Sinyal pulsa yang dihasilkan masih berupa gelombang kotak dengan kemiringan pulsa ΔT sangat kecil untuk itu perlu ditambah rangkaian integrator supaya dapat menghasilkan ΔT tertentu.

Dalam Gambar 3.3 (b), titik A diberikan sinyal pulsa yang berasal dari *high speed cmos gate* dengan amplitudo sebesar 5 volt kemudian diumpankan ke rangkaian integrator. Operasional amplifier yang digunakan adalah jenis opamp high speed dengan penguatan tak terbalik (*non-inverting*). Tegangan output V_p dapat dihasilkan dengan mengeset gain dari perbandingan R_3 dan R_1 seperti ditunjukkan dalam persamaan 3.1 berikut.

$$V_p = \left(1 + \frac{R_3}{R_1} \right) V_{in} \dots\dots\dots (3.1)$$

dimana:

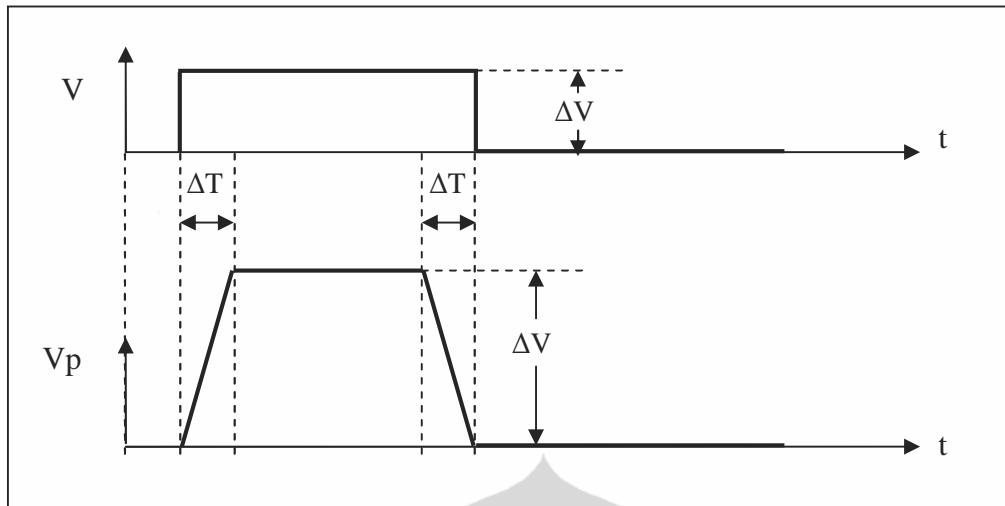
V_p : Tegangan pulsa output.

V_{in} : Tegangan pulsa input.

R_3, R_1 : Gain.

Tegangan catu daya yang diberikan pada seluruh rangkaian ecvt sebesar 12 volt, untuk itu tegangan V_p tidak bisa lebih dari 12 volt, V_p diset sebesar 10 volt. Untuk mendapatkan V_p sebesar 10 volt adalah dengan mengatur gain pada R_3 dan R_1 . Dengan mengabil V_{in} sebesar 5 volt dan $R_3 = R_1$ sebesar 1000 Ω akan didapatkan tegangan pulsa sebesar 10 volt. Sedangkan untuk mengeset kemiringan pusa (*time rise* dan *time fall*) ΔT dapat mengeset nilai resistor R_1 dan kapasitor C_1 . Untuk resistor R_1 sudah diset tetap sebesar 1000 Ω , maka untuk menentukan ΔT adalah dengan mengeset kapasitor C_1 .

Gambar 3.4 berikut menjelaskan diagram waktu rangkaian pembangkit pulsa ECVT secara ideal. Terdapat dua buah sinyal, yaitu sinyal pulsa dengan tegangan 5 volt yang berasal dari rangkaian gerbang cmos dalam hal ini digunakan mikrokontroler Attiny2313. Sinyal yang kedua adalah sinyal pulsa yang keluar dari opamp dari rangkaian integrator. Sinyal pulsa tersebut dikalikan dua sehingga menjadi 10 volt dengan kemiringan pulsa (ΔT) tertentu.



Gambar 3.4. Diagram Waktu Pembangkit Pulsa

3.2. Multiplexer Analog

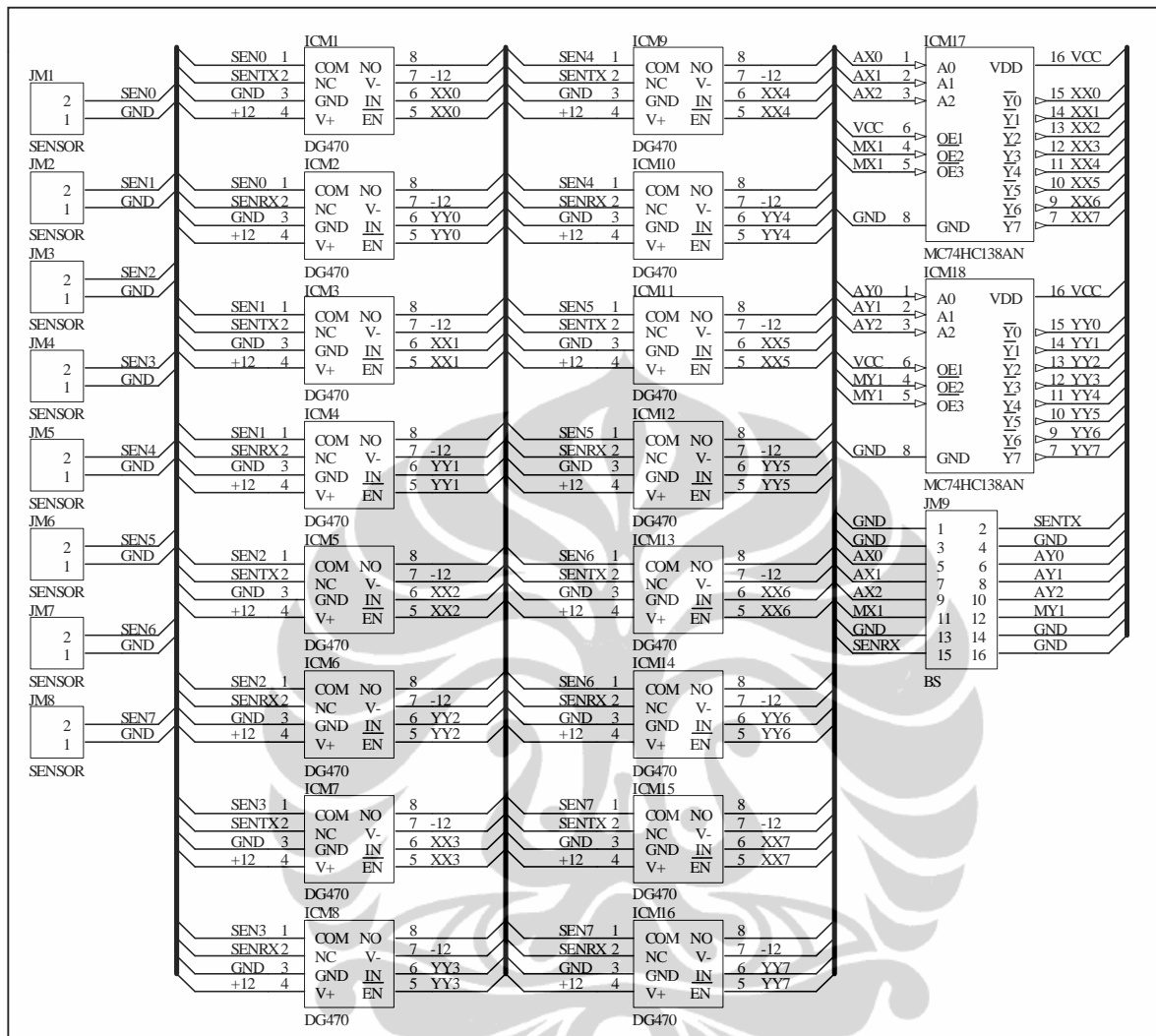
Multiplexer analog adalah suatu komponen yang dapat memilih dan meneruskan sinyal analog. Multiplexer ini digunakan untuk memilih elektroda-elektroda yang aktif dan kemudian meneruskan sinyal ke bagian sinyal kondisioning yang terdiri dari rangkaian charge discharge, peak detektor, low pass filter, dll. Dengan diterapkannya multiplexer analog ini rangkaian hanya dibutuhkan satu sinyal kondisioning. Berbeda dengan sistem yang lama atau sistem dari UMIST (*University of Manchester Institute of Science and Technology*), Inggris, yang menerapkan sistem satu elektroda untuk satu sinyal kondisioning. Dalam penelitian tesis ini diterapkan satu sinyal kondisioning untuk banyak elektroda dengan memasang multiplexer analog. Multiplexer analog ini dikontrol oleh mikrokontroler.

Multiplexer analog dipilih yang mempunyai hambatan *switch* yang rendah dan juga mempunyai kapasitansi rendah supaya tidak banyak mengganggu pengukuran sensor nantinya. Dalam tesis ini digunakan IC DG470 dari Vishay Siliconix, *switch* ini merupakan jenis *single pole dual tap* (SPDT) yang mempunyai hambatan sebesar 3.6 ohm dan kapasitansi sebesar 3.7 pf.

Untuk perancangan sistem data akuisisi ecvt ini maksimal elektroda yang dapat diukur adalah 32 kanal. Satu elektroda harus bisa bertindak sebagai transmitter dan receiver, untuk itu satu elektroda membutuhkan dua buah *switch* analog. Jadi untuk 32 kanal elektroda dibutuhkan sebanyak 64 *switch* analog yang membentuk satu rangkaian multiplexer. Rangkaian multiplexer ini dibagi menjadi dua, yaitu multiplexer untuk

transmitter sebanyak 32 *switch* dan multiplexer untuk receiver sebanyak 32 *switch*.

Gambar 3.5 berikut menjelaskan rangkaian multiplexer analog.



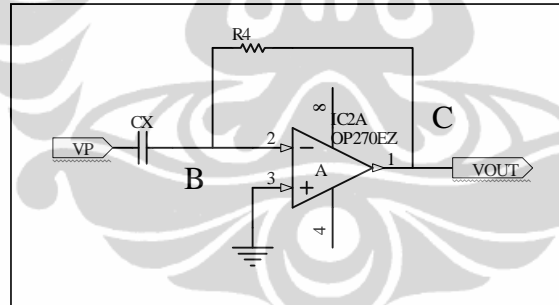
Gambar 3.5. Rangkaian Multiplexer Analog

Dalam Gambar 3.5 adalah rangkaian multiplexer analog untuk 8 kanal elektroda. Dalam perancangan ecvt ini rangkaian multiplexer dibagi menjadi 4 buah modul multiplexer, masing-masing modul multiplexer digunakan untuk 8 kanal elektroda dengan jumlah *switch* sebanyak 16 buah. Layaknya sebuah *switch* pada umumnya, DG470 juga mempunyai 3 buah *input output*, yaitu *COM*, *NO* (*Normally Open*), dan *NC* (*Normally Close*). Elektroda sensor dihubungkan ke jalur *COM*, sedangkan *NC* dihubungkan dengan jalur transmitter atau jalur receiver. Dengan mengatur *chip enable* menjadi *low* dan *input enable* menjadi *low*, elektroda akan bisa bertindak sebagai transmitter atau sebagai receiver. Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa hanya ada dua buah elektroda yang aktif dari 32 buah elektroda. Untuk itu elektroda yang tidak aktif harus dalam keadaan *floating* atau impedansi tinggi, untuk itu pada jalur *NO* (*Normally Open*) tidak disambung

kemana-mana, dan untuk membuat *NO (Normally Open)* berimpedansi tinggi maka *chip enable* dan *input enable* dibuat *high*.

3.3. Rangkaian Charge Discharge

Seperti telah dijelaskan dalam BAB 2 bahwa rangkaian ECVT yang didesain menggunakan prinsip charge discharge transfer dalam mengukur nilai kapasitansi dengan memanfaatkan rangkaian aktif differensial. Rangkaian aktif differensial berfungsi untuk mengukur perubahan nilai kapasitansi yang terjadi dalam tabung. Gambar 3.6 memperlihatkan rangkaian aktif differensial. CX adalah elektroda yang terpasang pada tabung yang berfungsi sebagai sensor kapasitansi. Pulsa tegangan (VP) dengan frekuensi 500KHz diberikan untuk menghasilkan medan listrik. Adanya perubahan tegangan dengan kemiringan pulsa tertentu akan menghasilkan arus charge discharge pada kedua elektroda. Besarnya arus charge discharge ini tergantung konstanta dielektrik dari obyek yang dideteksi oleh kedua elektroda. Sebuah penguat operasional dan resistor digunakan untuk mengubah arus charge discharge menjadi tegangan output (vout) supaya lebih mudah untuk mengolahnya.

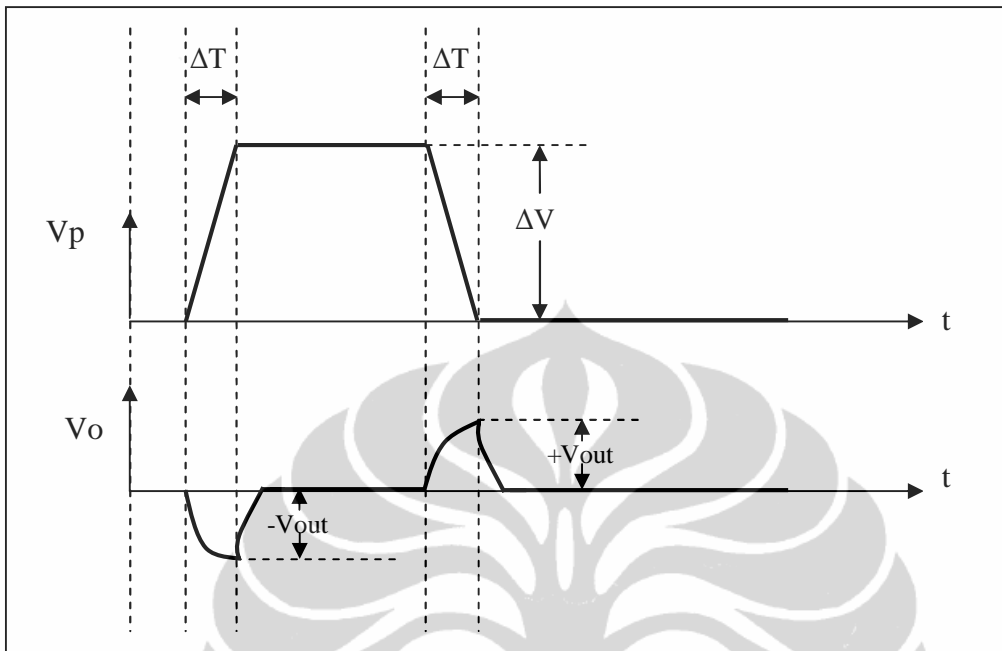


Gambar 3.6. Rangkaian Aktif Differensial

Dalam perancangan ini digunakan penguat operasional OP270 dari Analog Device, opamp OP270 termasuk jenis *very low noise amplifier* jadi sangat sesuai untuk digunakan dalam mengukur nilai kapasitansi yang sangat kecil. Persamaan untuk menghitung nilai kapasitansi dapat dilihat dalam persamaan 2.2 dalam BAB 2.

Gambar 3.7 memperlihatkan bentuk sinyal charge discharge dari rangkaian aktif differensial. Sepasang elektroda yang aktif diberikan sinyal pulsa dengan tegangan 10 volt, dan elektroda yang lain akan terinduksi oleh medan listrik. Pada saat pengukuran satu siklus pulsa, tegangan pulsa mengalami kenaikan (*time rise*) dari 0 ke 10 volt akan menghasilkan tegangan pada vout (titik C) berupa tegangan negatif dengan amplitudo

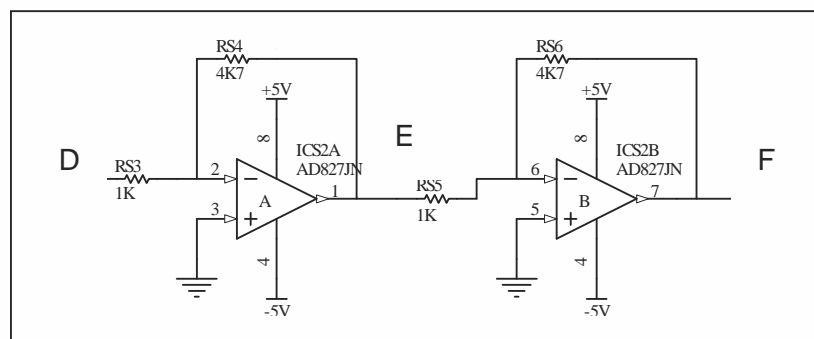
tertentu. Begitu juga pada saat tegangan pulsa mengalami penurunan (*time fall*) dari 10 volt ke 0 volt akan menghasilkan tegangan pada v_{out} (titik C) berupa tegangan positif dengan amplitudo tertentu.



Gambar 3.7. Diagram Waktu Sinyal Charge Discharge

3.4. Gain Awal

Sinyal yang dihasilkan oleh rangkaian charge discharge sangat kecil, yaitu sekitar 60 mV – 70 mV. Tegangan sekecil ini masih belum cukup untuk mendriver rangkaian peak detektor untuk itu perlu dikuatkan dahulu. Tegangan minimal yang dibutuhkan oleh rangkaian peak detektor adalah 0.3 volt. Untuk mencapai tegangan di atas 0.3 volt tersebut diperlukan dua buah penguat operasional seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Rangkaian Gain Awal

Gambar 3.8 merupakan rangkaian penguat operasional bertingkat, masing-masing opamp menghasilkan penguatan 4.7 kali sehingga total penguatan pada gain awal sebesar 22.09 kali. Dengan demikian sinyal yang dihasilkan menjadi 1325 mV – 1546 mV lebih dari cukup untuk mendriver rangkaian peak detektor. Untuk menghitung nilai penguatan pada Gambar 3.5 menggunakan persamaan:

$$V_f = \left(-\frac{R_{s_4}}{R_{s_3}} V_d \right) * \left(-\frac{R_{s_6}}{R_{s_5}} V_e \right) \dots\dots\dots (3.2)$$

dimana:

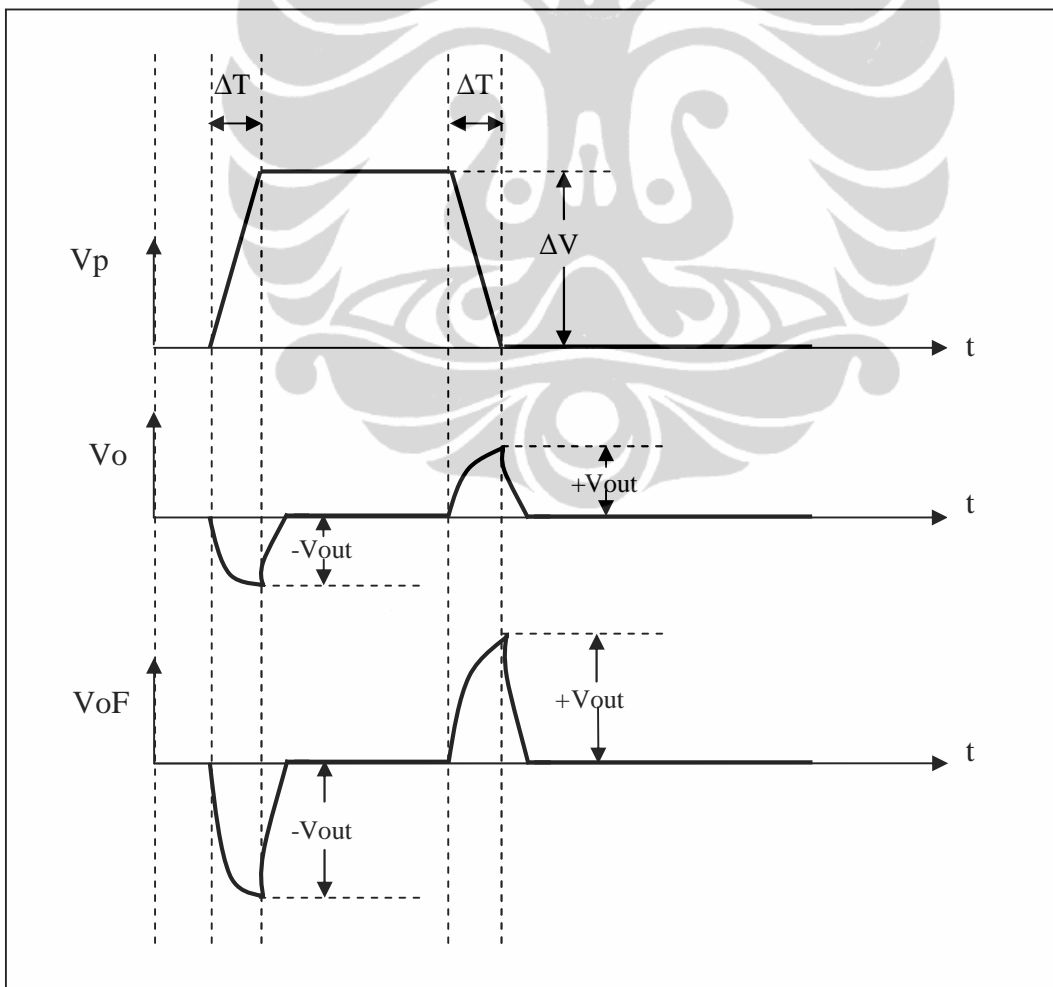
V_d : Sinyal input dari rangkaian charge discharge.

V_e : Sinyal output pada gain 1.

V_f : Sinyal output pada gain 2.

R_{s_4}, R_{s_3} : Gain 1.

R_{s_6}, R_{s_5} : Gain 2.

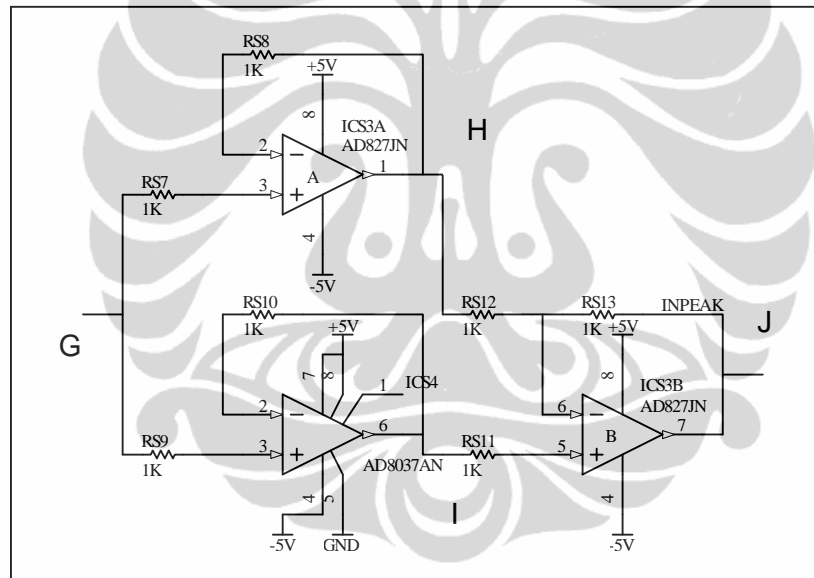


Gambar 3.9. Diagram Waktu Sinyal Pada Gain Awal

Gambar 3.9 menunjukkan diagram waktu sinyal pada gain awal, gain dengan penguatan bertahap sebanyak dua kali menghasilkan penguatan total sebesar 22.09 kali sehingga menghasilkan sinyal dengan amplitudo lebih besar.

3.5. Full Wave Rectifier dan Peak Detektor

Sinyal yang dikeluarkan oleh gain awal mempunyai tegangan positif dan negatif, sedangkan sinyal yang akan diloloskan adalah sinyal positif saja, untuk itu diperlukan rangkaian *full wave rectifier*. Rangkaian ini bertugas membalik sinyal negatif menjadi sinyal positif. Sedangkan peak detektor adalah rangkaian yang bertugas mendeteksi sinyal puncak dan mengubahnya menjadi tegangan dc. Gambar 3.10 memperlihatkan rangkaian full wave rectifier.



Gambar 3.10. Rangkaian Full Wave Rectifier

Sinyal input pada titik G adalah sinyal sinus simetris dengan amplitudo tegangan positif negatif. Opamp pada ICS3A hanya digunakan sebagai buffer sehingga output pada titik H sama dengan input pada titik G. Inti dari rangkaian full wave rectifier adalah *clamping* sinyal. Dalam tesis ini digunakan AD8037AN dari Analog Device yang memiliki dua buah pin kontrol untuk meloloskan sinyal positif atau negatif. Sinyal kontrol tersebut terletak pada pin 5 dan pin 8. Tabel 3.1 berikut memperlihatkan fungsi pin kontrol pada AD8037AN.

Tabel 3.1. Fungsi Pin Kontrol Pada AD8037AN

| No | Pin 5 | Pin 8 | Clamping |
|----|-------|-------|--|
| 1 | L | L | Semua di clamping (sinyal output nol) |
| 2 | L | H | Clamping negatif |
| 3 | H | L | Clamping positif |
| 4 | H | H | Tidak ada yang di clamping (sinyal sesuai input) |

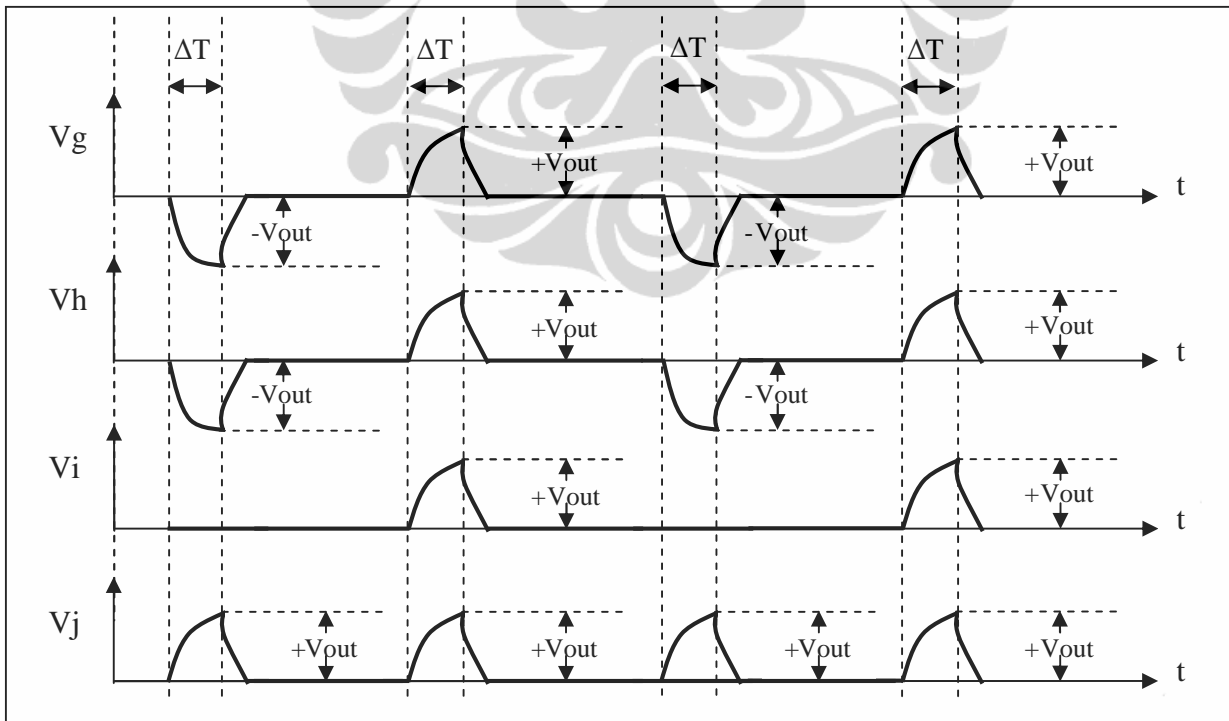
Sinyal yang akan di clamping adalah sinyal negatif sehingga pada titik I akan dihasilkan sinyal positif setengah gelombang. Kemudian opamp terakhir ICS3B adalah penguatan differensial dengan gain 1 x. Persamaan untuk menghitung tegangan pada titik J adalah sebagai berikut:

$$V_j = (V_i - V_h)G \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

dimana:

- V_j : Tegangan pada titik J (tegangan output).
- V_i : Tegangan pada titik I (tegangan clamping).
- V_h : Tegangan pada titik H (tegangan sinyal input).
- G : Penguatan (1 x).

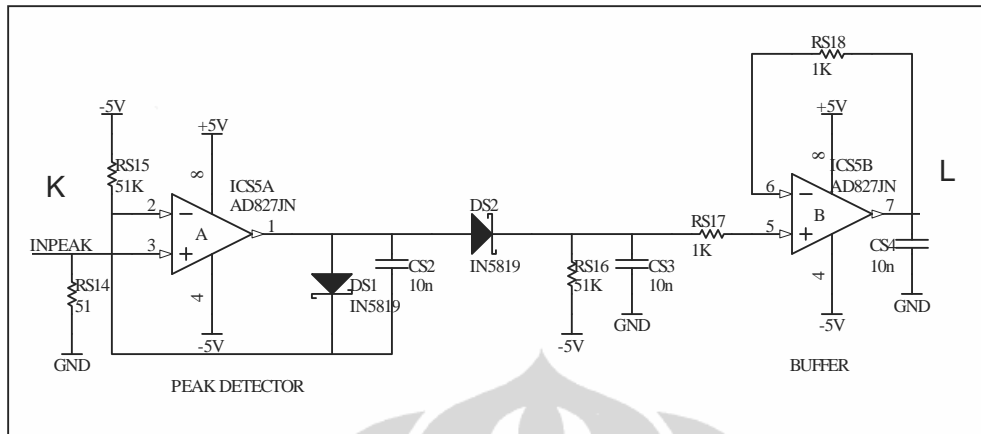
Dengan menggunakan persamaan 3.3 akan dihasilkan sinyal positif dengan gelombang penuh.



Gambar 3.11. Diagram Waktu Sinyal Full Wave Rectifier

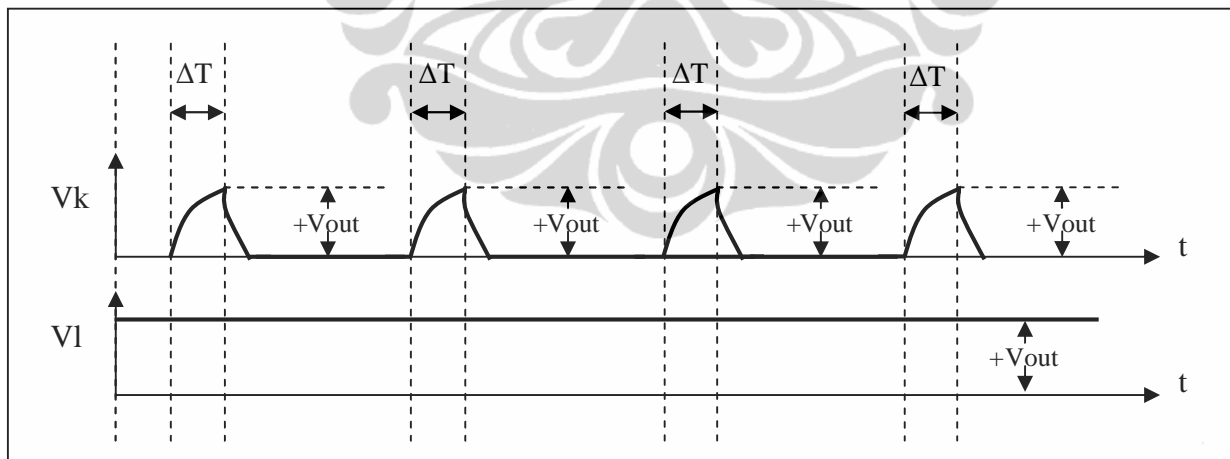
Gambar 3.11 memperlihatkan sinyal dari rangkaian full wave rectifier. Sinyal pada titik G adalah sinyal input, pada titik H sinyalnya sama dengan input karena fungsi opamp

hanya sebagai buffer. Kemudian pada titik I sinyal diclamp negatif, hanya sinyal positif yang diloloskan. Hasil akhirnya pada titik J yaitu sinyal dengan gelombang penuh.



Gambar 3.12. Rangkaian Peak Detektor

Setelah dihasilkan sinyal positif dengan gelombang penuh selanjutnya sinyal tersebut dijadikan tegangan dc dengan menerapkan rangkaian peak detektor seperti terlihat dalam Gambar 3.12. Prinsip dasar peak detektor adalah *low pass filter* dengan kecepatan tinggi. Komponen utama yang diperlukan adalah opamp dan dioda DS_2 untuk mendeteksi puncak sinyal. Kapasitor CS_2 berfungsi untuk mempercepat *slew rate*. Sedangkan opamp kedua digunakan sebagai buffer tegangan dc.

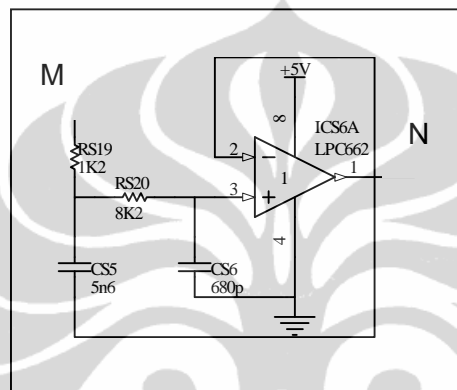


Gambar 3.13. Diagram Waktu Sinyal Peak Detektor

Gambar 3.13 memperlihatkan diagram waktu sinyal dari rangkaian peak detektor. Sinyal yang dihasilkan dari rangkaian tersebut adalah sinyal dc dengan amplitudo tegangan sama dengan tegangan puncak sinyal input.

3.6. Low Past Filter

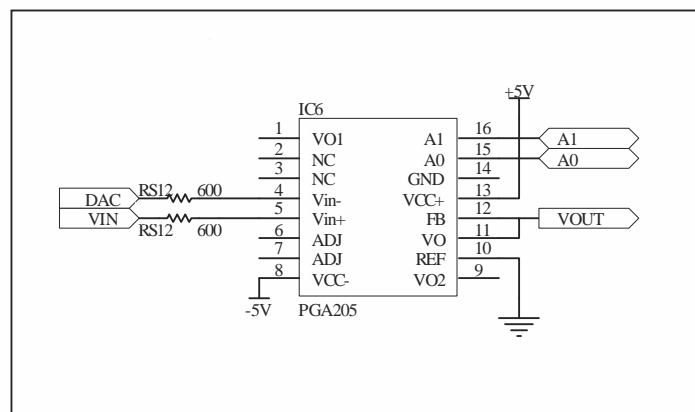
Sinyal dc yang dihasilkan oleh rangkaian peak detektor masih terdapat *noise* frekuensi tinggi yang disebabkan oleh rangkaian internal sistem. Besarnya *noise* tersebut adalah 100 KHz, 200 KHz, 300 KHz, 400 KHz, dan 500 KHz. Filter yang digunakan sebesar 25 KHz orde dua. Desain filter menggunakan perangkat lunak *filter pro* dari Texas Instrument sehingga desain lebih cepat. Dengan adanya low past filter tersebut sinyal dc yang dihasilkan menjadi lebih bersih. Gambar 3.14 berikut memperlihatkan rangkaian low past filter.



Gambar 3.14. Rangkaian Low Past Filter

3.7. Programmable Gain Amplifier (PGA)

Masing-masing sinyal data yang diperoleh dari pasangan elektroda akan mempunyai sensitifitas yang berbeda-beda, untuk itu diperlukan chip yang dapat mengatur gain untuk masing-masing data. Chip tersebut adalah *programmable gain amplifier* (pga). Gambar 3.15 berikut menjelaskan rangkaian *programmable gain amplifier*.



Gambar 3.15. Programmable Gain Amplifier (PGA)

IC yang digunakan adalah PGA205 dari Burr-Brown. Pga ini memiliki input sinyal differensial dengan penguatan 4 kombinasi yaitu 1, 2, 4, dan 8 yang dapat diatur dari pin A0 dan A1. Sinyal dc dari low pass filter dihubungkan dengan vin+ pada pga205, sedangkan vin- berasal dari *digital to analog converter* (dac). Fungsi dac ini adalah untuk mengatur level sinyal output penguatan. Pengaturan gain didapat pada saat kalibrasi dan dikontrol oleh mikrokontroller kemudian disimpan dalam register untuk digunakan kembali pada pengukuran berikutnya. Gain yang diberikan sebanyak jumlah data yang diperoleh dari persamaan 2.1 dalam BAB 2.

3.8. Analog to Digital Converter (ADC)

Analog to digital converter (ADC) adalah untuk mengubah sinyal analog yang berupa tegangan menjadi data-data digital yang bisa langsung dibaca oleh mikrokontroller. Dalam sistem ini digunakan adc internal mikrokontroller yang memiliki resolusi 10 bit, dengan demikian adc ini mampu mendeteksi tegangan 4.8 mV. Noise rangkaian sistem data akuisisi ecvt masih cukup tinggi yaitu sekitar 30mV – 50 mV, jadi dengan adc 10 bit sudah cukup untuk digunakan.

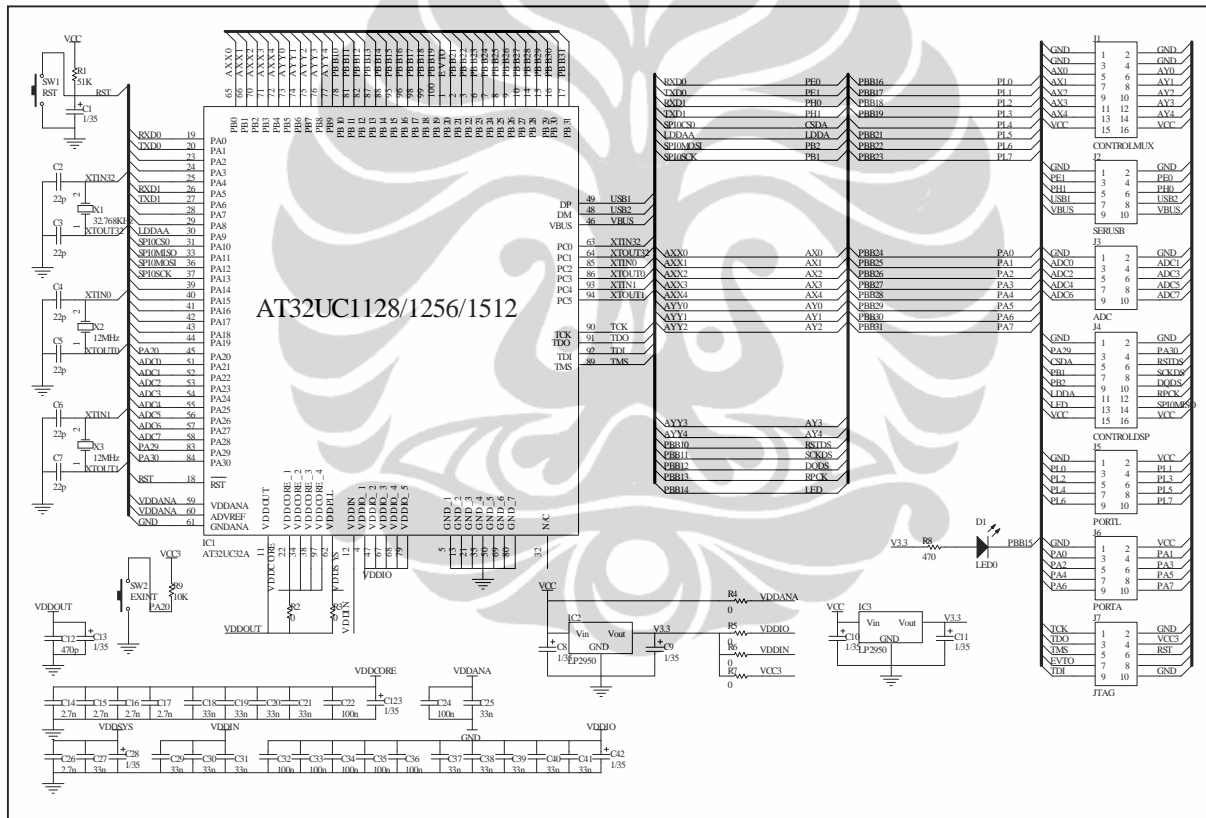
3.9. Digital to Analog Converter (DAC)

Digital to analog converter (DAC) adalah suatu komponen yang berfungsi mengubah data digital menjadi tegangan analog. Dac dalam sistem ini digunakan untuk mengatur level sinyal output dari *programmable gain amplifier* (PGA). Dalam sistem ini digunakan dac mcp4822 dari Microchip yang memiliki resolusi 12 bit, dengan demikian dac ini mampu mengkonversi tegangan 1 mV/bit.

3.10. Mikrokontroller

Bagian terakhir dari sistem data akuisisi ECVT adalah mikrokontroller, mikrokontroller mempunyai peranan sangat banyak mulai dari mengontrol multiplexer, mengatur *programmable gain amplifier* (PGA), mengatur dac, dan mengambil data dari adc. Data-data dari adc tersebut dikumpulkan dan diatur menjadi satu paket data kemudian dikirim ke komputer untuk direkonstruksi menjadi gambar. Pengiriman data ke komputer menggunakan komunikasi data serial dengan kecepatan 115200 bps. Mikrokontroller yang digunakan adalah AT32UC3A1512, yaitu jenis mikrokontroller 32 bit dan termasuk ke dalam mikrokontroller highspeed dengan kecepatan clock hingga 320MHz.

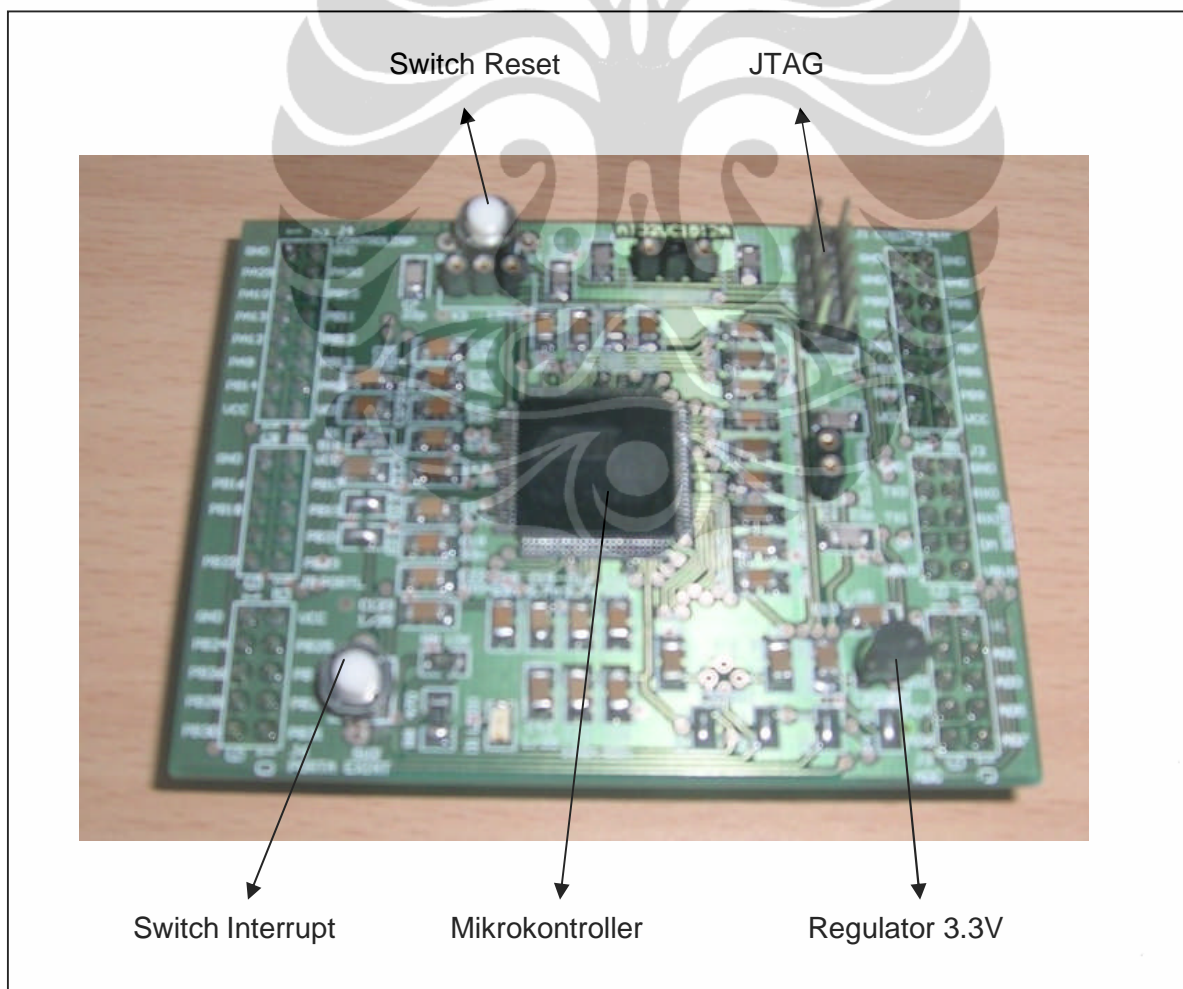
Mikrokontroler ini mempunyai beberapa fitur diantaranya adalah mampu mengeksekusi instruksi dengan kecepatan hingga 83 DMIPS (*dhrystone million instruction per second*). Mempunyai kapasitas flash memori program 512 KB, dan internal SRAM 64 KB. Juga mempunyai adc internal 8 channel 10 bit, 16 dac audio bit stream. Adanya fasilitas *phase lock loop* (PLL) dimana dapat menaikkan frekuensi clock cpu yang berasal dari eksternal kristal hingga 320 MHz. Terdapat juga fasilitas on chip debug sistem menggunakan interface JTAG, dan NEXUS 2.0. Pemrograman menggunakan bahasa C dengan compiler avr32 studio dari atmel. Selain itu mikrokontroler ini termasuk jenis low power dengan catu daya 3.3 volt untuk input output (I/O) dan catu daya core 1.8 volt. Gambar 3.16 berikut menjelaskan rangkaian mikrokontroler.



Gambar 3.16. Rangkaian Mikrokontroler AT32UC3A1512

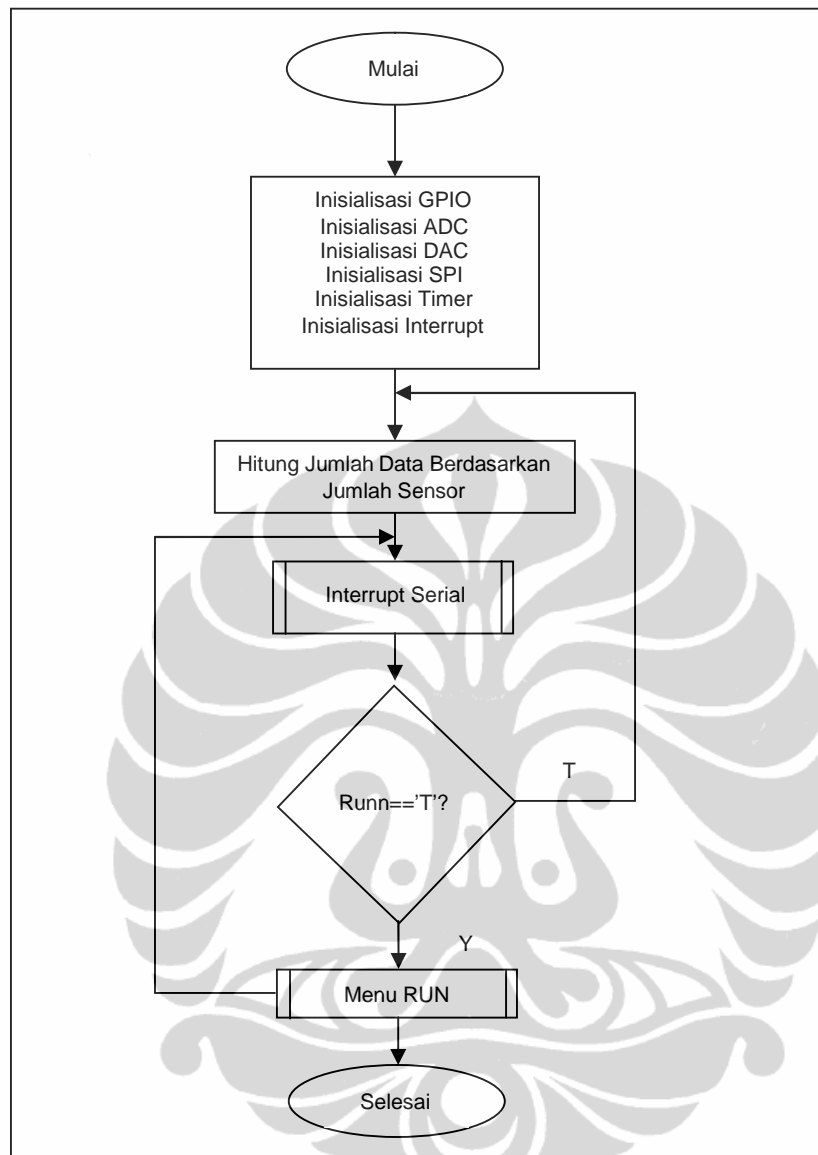
Terdapat tiga port dalam mikrokontroler AT32UC3A1512, yaitu port A, port B, dan port C. Port A dan port B digunakan sebagai *general purpose input output* (GPIO) masing-masing sebanyak 32 bit, sedangkan port C digunakan sebagai sumber eksternal clock. Port B0 hingga port B9 digunakan untuk mengontrol multiplexer analog, port A21 hingga port A28 digunakan sebagai input ADC, port A9 hingga port A13 digunakan untuk mengontrol DAC mcp4822. Untuk serial komunikasi digunakan port A0 dan port A1.

Port usb pada mikrokontroller ini mempunyai dua fungsi, yaitu sebagai jalur komunikasi data dan bisa digunakan *in system programming* untuk update program. Untuk update program melalui jalur ini dibutuhkan kristal eksternal 8 MHz, 12 MHz, atau 16 MHz. Penggunaan kristal lebih besar dari 16 MHz tidak bisa menggunakan jalur usb, hanya bisa menggunakan JTAG atau NEXUS 2.0. Keuntungan update program melalui jalur usb ini adalah hanya dibutuhkan satu kabel usb saja, tidak membutuhkan peralatan tambahan, hanya dengan menambah program *flip* pada compiler avr32 studio. Ada dua switch yang diperlukan untuk dapat menggunakan *in system programming*, yaitu switch reset dan switch interrupt yang dihubungkan ke port A20 seperti dalam Gambar 3.10. Untuk mengaktifkan mode *in system programming* cukup dengan menekan switch reset dan switch interrupt bersamaan kemudian melepas switch reset terlebih dahulu dan dikuti oleh switch interrupt. Gambar 3.17 menunjukkan foto mikrokontroller AT32UC3A1512.



Gambar 3.17. Foto Mikrokontroller AT32UC3A1512

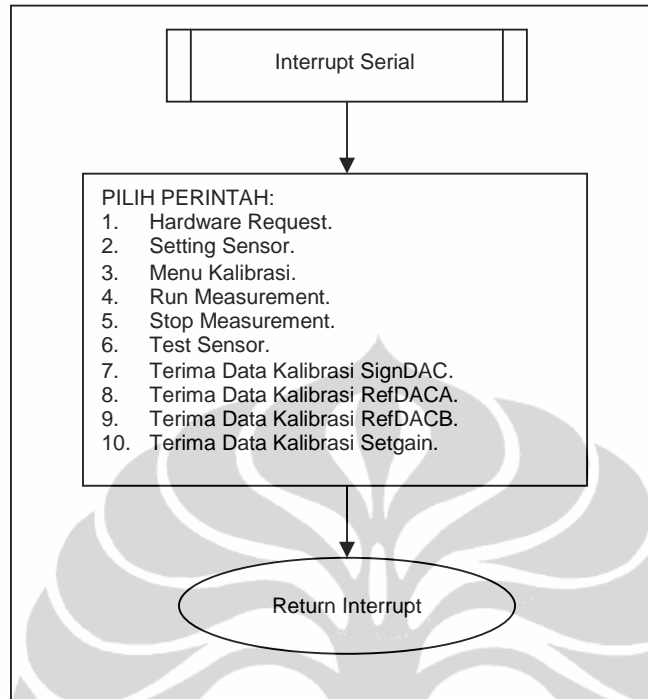
3.11. Alur Program



Gambar 3.18. Alur Program Utama Sistem ECVT

Gambar 3.18 memperlihatkan alur program utama sistem ECVT. Pada saat pertama kali sistem dinyalakan, mikrokontroller akan menginisialisasi beberapa periperal diantaranya adalah GPIO, ADC, DAC, SPI, timer, dan interrupt. Inisialisasi perlu dilakukan untuk mengeset port mikrokontroller akan fungsikan sebagai apa. Setelah itu program akan menghitung jumlah data berdasarkan jumlah sensor yang diberikan melalui perintah setting kanal dari interrupt serial. Secara *default* jumlah sensor akan diset sebanak 32 kanal. Kemudian program akan mengecek interrupt serial apakah ada perintah dari komputer. Kemudian program masuk pada mode percabangan dan looping, percabangan

akan mengecek variabel *runn* apakah bernilai 'T' atau tidak, jika bernilai 'T' maka program akan menjalankan menu *RUN*.



Gambar 3.19. Alur Program Subrutine Interrupt Serial

Gambar 3.19 menjelaskan alur program pada subroutine interrupt serial. Interrupt serial digunakan untuk komunikasi data antara sistem data akuisisi ECVT dengan komputer. Komputer akan mengirimkan perintah berupa kode ascii ke sistem ECVT, jika salah satu perintah sesuai dengan pilihan perintah di atas, maka sistem akan menjalankan subprogram di atas.

Hardware request merupakan kode perintah dari komputer yang digunakan untuk meminta informasi tentang sistem data akuisisi ECVT. Perintah tersebut adalah: "\$IDN?". Setelah mikrokontroler menerima perintah tersebut, maka akan dikirimkan informasi tentang sistem data akuisisi ECVT. Isi informasi tersebut adalah tentang versi, dan spesifikasi sebagai berikut:

```

$ECVT 32 09 09 3.0
=====SPESIFIKASI=====
uP: AT32UC1512A
Xtal: 16 MHz
Switch: DG470
Clock Source: Attiny2313 500 KHz 10 volt
ADC: internal 10 bit
DAC: MCP4822 12 bit
Power Supply: +- 12 volt 600 mA
Data Rate: +- 4 frame/detik
=====
-----Copy right PT. EDWAR TECHNOLOGY-----
  
```

Setting sensor digunakan untuk mengeset jumlah sensor yang akan digunakan. Selain itu juga digunakan untuk mengeset berapa frame per detik data yang dikirim ke komputer, mengeset nilai rata-rata pengambilan data adc, dan mengontrol data kalibrasi apakah diinginkan dikirim ke komputer atau tidak. Perintah tersebut adalah: \$ECTSET,A,B,C,D,*. 'A' adalah jumlah sensor, jumlah sensor yang dapat dipilih adalah 8, 12, 16, 23, dan 32. 'B' adalah data rate yang menyatakan frame per detik, tetapi dalam rancangan ini belum digunakan. 'C' adalah nilai rata-rata pengambilan data adc, nilainya adalah integer dari 1 – 10. Kemudian yang terakhir adalah 'D' adalah nilai yang digunakan untuk mengontrol data kalibrasi apakah akan dikirim ke komputer atau tidak, nilai '1' tidak dikirim atau '0' dikirim. Mikrokontroller akan mengirim balik perintah yang diterima tersebut ke komputer sebagai verifikasi.

Menu kalibrasi digunakan untuk proses kalibrasi sistem, subrutin programnya akan dijelaskan tersendiri. *Run measurement* digunakan untuk memulai proses pengukuran kapasitansi pada sistem dan pengiriman data ke komputer. Perintah tersebut adalah: \$ECTRUN. Perintah tersebut akan memberikan nilai 'T' pada variabel *runn*.

Stop measurement digunakan untuk menghentikan proses pengukuran kapasitansi dan penghentian pengiriman data ke komputer. Perintahnya adalah: \$ECTOUT. Perintah tersebut akan memberikan nilai 'F' pada variabel *runn*.

Test sensor digunakan untuk mengetes sepasang sensor, sensor yang akan dites bisa dari kanal berapapun. Perintahnya adalah: \$ECTTES,A,B,*. 'A' adalah kanal untuk transmitter, sedangkan 'B' adalah kanal untuk receiver. Setelah ada perintah tersebut mikrokontroller juga akan mengirim balik perintah itu ke komputer untuk verifikasi.

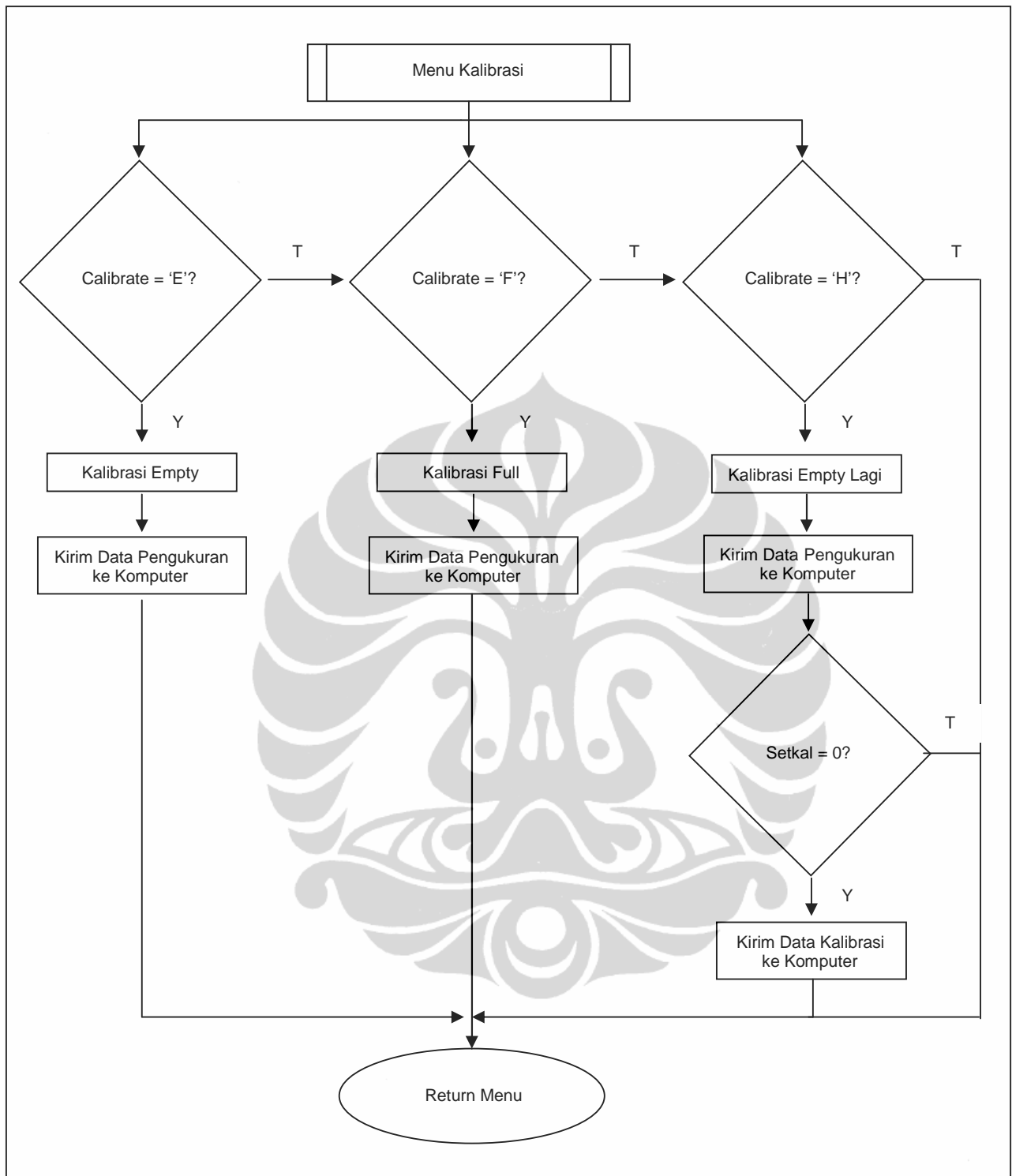
Terima Data Kalibrasi SignDAC digunakan untuk menerima data kalibrasi *signadc* dari komputer. Perintahawali oleh header dan diikuti oleh data kalibrasi sebanyak jumlah data, dalam contoh jumlah data sebanyak 496 data. Komputer akan mengirimkan perintah sebagai berikut:

```
$SIGNDAC 0001001110100000000000000000000000001000001111010  
111001100110100001010000000000000000000010000000000000  
0000000000000000000000000000000000000000000000000000  
0000000000000000000000000000000000000000000000000000  
0000000000000000000000000000000000000000000000000000  
10000000000000000100100000000000110111110000010100  
00000000000000000000000000000100010000110001110111001001  
111010000000000000100000100000000101000000000000000  
011111000001010110000000000100101010101001000000000  
000000000001101110100011000000000000000000000000000  
000000000000*
```

Terima Data Kalibrasi RefDAC A digunakan untuk menerima data kalibrasi DAC A yang digunakan untuk programable gain amplifier. Perintahawali oleh header dan diikuti oleh data kalibrasi sebanyak jumlah data, dalam contoh jumlah data sebanyak 496 data. Komputer akan mengirimkan perintah sebagai berikut:

```
$REFDAC A 870 695 685 2383 710 795 2283 2393 2383 765 2403 680 780 715 760 775 715 710
680 765 740 715 680 760 760 685 750 715 685 695 2418 710 680 680 740 740 2348 2403 2378
2298 660 2368 810 2383 2338 2313 695 715 2398 2313 715 695 2383 2298 725 2378 715 740 710
710 2408 800 2378 740 800 790 685 740 805 705 715 695 725 725 700 800 800 695 2298 800
785 725 740 800 750 800 700 735 780 725 715 725 715 740 730 695 740 725 735 790 710 710
765 730 715 690 715 760 715 710 720 720 715 725 780 775 725 715 710 715 715 725 735 710 715
730 755 745 740 740 720 715 725 715 740 720 740 730 715 730 715 745 740 710 740 715 740
710 725 740 715 740 790 715 715 765 740 715 710 725 760 715 695 725 720 710 715 780 765 725
725 780 705 710 765 700 690 800 710 710 810 765 760 720 760 795 760 715 710 760 725 760
760 750 760 695 715 715 740 730 740 800 725 730 775 740 725 705 725 765 740 720 735 735
740 730 795 780 715 740 710 725 715 715 715 715 730 740 715 725 715 715 740 710 685 740 715
2343 715 715 740 715 740 760 715 740 790 735 715 775 740 735 715 720 2298 725 715 2338 735
735 735 795 775 715 740 720 740 760 745 2313 2338 740 2348 2313 2338 2338 2338 740 740
725 725 740 2313 740 2323 740 730 750 725 740 735 740 740 740 760 740 725 750 750
715 740 740 750 745 740 750 800 800 750 2193 790 740 835 2323 805 740 800 790 2253 2273
750 740 835 2323 2303 2298 760 2313 2313 2303 740 760 2323 760 760 2323 2298 2323 2298
760 2318 775 765 725 835 830 740 800 760 820 740 760 835 2288 830 715 720 820 760 2303
740 740 760 745 740 740 750 745 2303 740 2313 760 740 740 740 820 815 760 805 835 795
760 740 795 750 790 2243 2228 2283 2338 2313 740 740 740 745 740 2318 745 2328 740 2313
2338 725 740 760 780 790 775 740 715 775 720 2298 800 820 2303 725 2328 740 2338 730
2323 725 2343 725 750 2323 715 740 750 715 740 730 715 725 735 760 740 730 740 725 740
740 740 725 740 2298 2303 740 2313 2323 2313 750 2303 760 740 740 2303 2303 730 740 740
740 740 715 725 740 715 715 715 700 725 715 710 710 740 790 775 715 710 695 760 740 700 715
750 735 715 715 715 720 740 730 750 740 *
```

Terima Data Kalibrasi RefDAC B digunakan untuk menerima data kalibrasi DAC B yang digunakan oleh gain awal. Perintahawali oleh header dan diikuti oleh data kalibrasi sebanyak jumlah data, dalam contoh jumlah data sebanyak 496 data. Komputer akan mengirimkan perintah sebagai berikut:

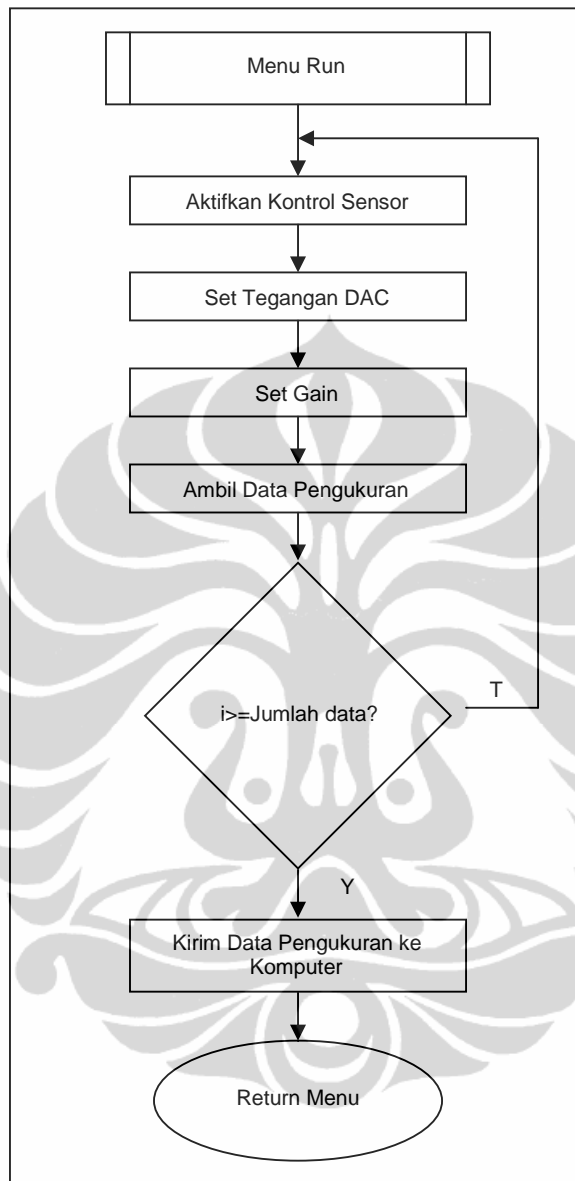


Gambar 3.20. Alur Program Subrutine Menu Kallibrasi

Gambar 3.20 menunjukkan alur program pada subrutine menu kalibrasi. Sistem ECVT akan melakukan kalibrasi sebanyak tiga kali, yaitu kalibrasi empty, kalibrasi full, dan kalibrasi empty lagi. Kalibrasi dilakukan pada saat akan dilakukan pengukuran dengan sensor yang baru, atau pada saat pengukuran dengan obyek berbeda. Data kalibrasi akan

dikirimkan ke komputer untuk disimpan dan dapat dikirimkan ulang ke mikrokontroler untuk digunakan kembali. Terdapat tiga perintah untuk masing-masing kalibrasi, yaitu: \$ECTCAL,E,1000,*; \$ECTCAL,F,3500,*; \$ECTCAL,H,1000,*. Masing-masing perintah diawali dengan header dan diikuti dengan karakter 'E', 'F', atau 'H'. Karakter tersebut akan disimpan dalam register dengan variabel *calibrate*. Jika variabel *calibrate* bernilai 'E', maka program akan menjalankan mode kalibrasi empty kemudian mengirimkan data hasil pengukuran kapasitansi empty ke komputer. Jika variabel *calibrate* bernilai 'F', maka program akan menjalankan mode kalibrasi full kemudian mengirimkan data hasil pengukuran kapasitansi full ke komputer. Jika variabel *calibrate* bernilai 'H', maka program akan menjalankan mode kalibrasi empty lagi dan hasil pengukuran kapasitansi dikirimkan ke komputer. Kemudian program akan mengecek variabel *setkal* apakah bernilai '0' atau '1', jika bernilai '0' maka program akan mengirimkan data kalibrasi ke komputer, jika bernilai '1', maka program akan langsung ke return. Angka 1000, dan 3500 adalah nilai pengesetan tegangan kalibrasi dengan satuan mV. Angka 1000 menandakan bahwa kalibrasi empty diset 1000 mV, sedangkan 3500 menandakan bahwa kalibrasi full diset 3500 mV.

Alur program yang terakhir adalah menu running, dimana menu ini digunakan untuk proses pengukuran kapasitansi dari obyek yang akan dideteksi. Gambar 3.21 menunjukkan diagram alur program pada subroutine menu run. Program akan mengaktifkan port untuk mengontrol switch pada masing-masing sensor, dimana hanya ada dua switch yang akan aktif dan switch yang lain floating atau berimpedansi tinggi. Kemudian program akan mengirimkan tegangan DAC pada *programmable gain amplifier* untuk megeset level keluaran gain. Selanjutnya program akan mengeset gain pada *programmable gain amplifier* sesuai dengan data kalibrasi. Kemudian dimulai proses pengambilan data melalui ADC. Proses tersebut akan diulang sampai tercapai jumlah sensor yang telah diset pada menu setting jumlah sensor. Jika increment telah mencapai sama dengan jumlah sensor, maka program akan mengirimkan data hasil pengukuran ke komputer.



Gambar 3.21. Alur Program Subrutine Menu Run

3.12. Parameter Yang Mempengaruhi Kecepatan Sampling Data

- Switch yang membentuk multiplexer.
- Rangkaian charge discharge.
- Rangkaian peak detektor.
- Rangkaian low pass filter.
- ADC.
- Kecepatan proses dalam mikrokontroler.
- Baud rate.

Tabel 3.2. Pengaruh Sampling Data Terhadap Kecepatan Transfer Data ke Komputer Untuk 32 Elektroda

| No | Mux/Dmux | C/D | Peak Detektor | LPF | ADC | Mikrokontroler | Baud rate | Kec Transfer Data (frame/detik) |
|----|------------------|-----------------|------------------|-------|---------|------------------------|------------------|---------------------------------|
| 1 | DG470 (335ns) | OP270 (42ns) | AD827 (500ns) | 25KHz | 100Ksps | Atmega1280 (3.9ms) | 115200 (45ms) | 0.5 |
| 2 | DG470 (335ns) | OP270 (42ns) | AD827 (500ns) | 25KHz | 100Ksps | AT32UC1512A (400us) | 115200 (45ms) | 4 |
| 3 | DG470 (335ns) | OP270 (42ns) | AD827 (500ns) | 25KHz | 100Ksps | ATXmega128 (200us) | 115200 (45ms) | 7 |

Berdasarkan Tabel di atas memperlihatkan bahwa parameter paling dominan yang berpengaruh terhadap kecepatan transfer data adalah kecepatan pengolahan data dalam mikrokontroler dan baudrate, sedangkan parameter yang lain pengaruhnya sedikit karena delaynya masih di bawah 1 us. Untuk menghitung kecepatan transfer data menggunakan persamaan berikut:

$$v = \frac{B}{\Sigma} \dots\dots\dots (1.1)$$

Keterangan:

v : Kecepatan transfer data (frame/detik).

V_{mk} : Kecepatan proses dalam mikrokontroler (detik).

Σdata: Jumlah data.

B : Baud rate (bps).

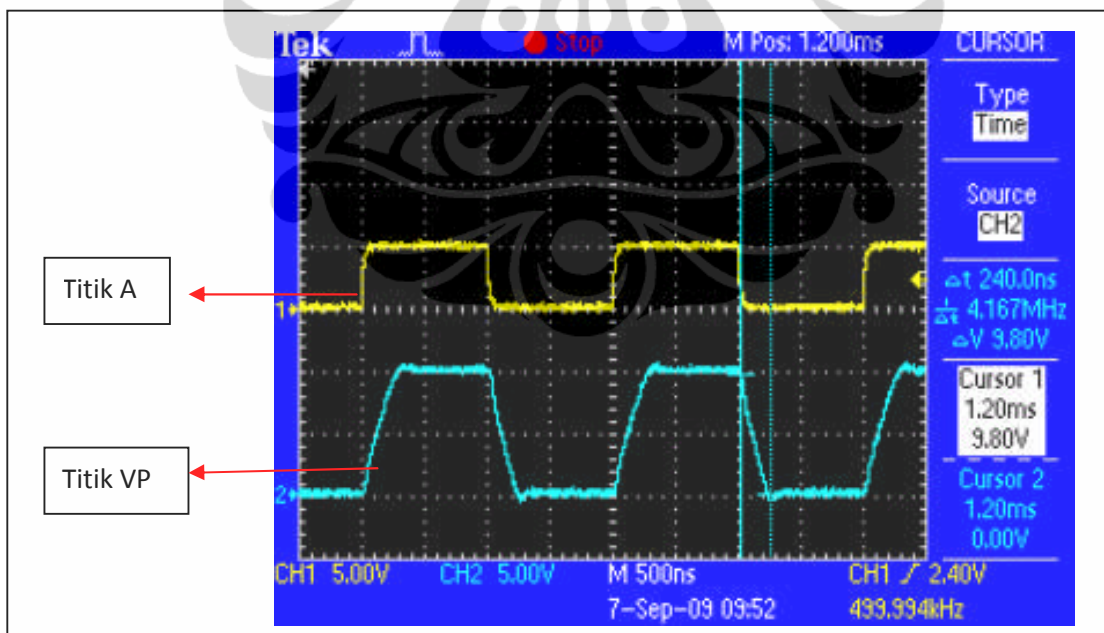
BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISA

Dalam BAB 4 ini akan dibahas tentang pengujian dan analisa sistem data akuisisi *electrical capacitance volume tomography* (ECVT). Pengujian ini meliputi pengujian sinyal, yang meliputi sistem charge discharge, penguatan, filter, dan programmable gain amplifier. Pengujian kedua adalah pengujian sensitivitas dan resolusi, untuk mengetahui sensitivitas alat yang dibuat. Dan yang terakhir adalah pengujian rekonstruksi *image* menggunakan air, beras, dan benda lain sebagai alat uji yang didesain dengan bentuk tertentu. Juga dilakukan eksperimen menggunakan tangan dan binatang kecil seperti kucing.

4.1. Pengujian Clock Generator (Pembangkit Pulsa)

Pembangkit pulsa pada rangkaian ECVT digunakan untuk memberikan sinyal pada elektroda. Pengujian dilakukan untuk mengetahui bentuk pulsa dan berapa kemiringan pulsa yang dihasilkan. Alat uji berupa oscilloscope digital merk Tektronik TDS2002B. Gambar 4.1 berikut memperlihatkan hasil pengujian rangkaian pembangkit pulsa.



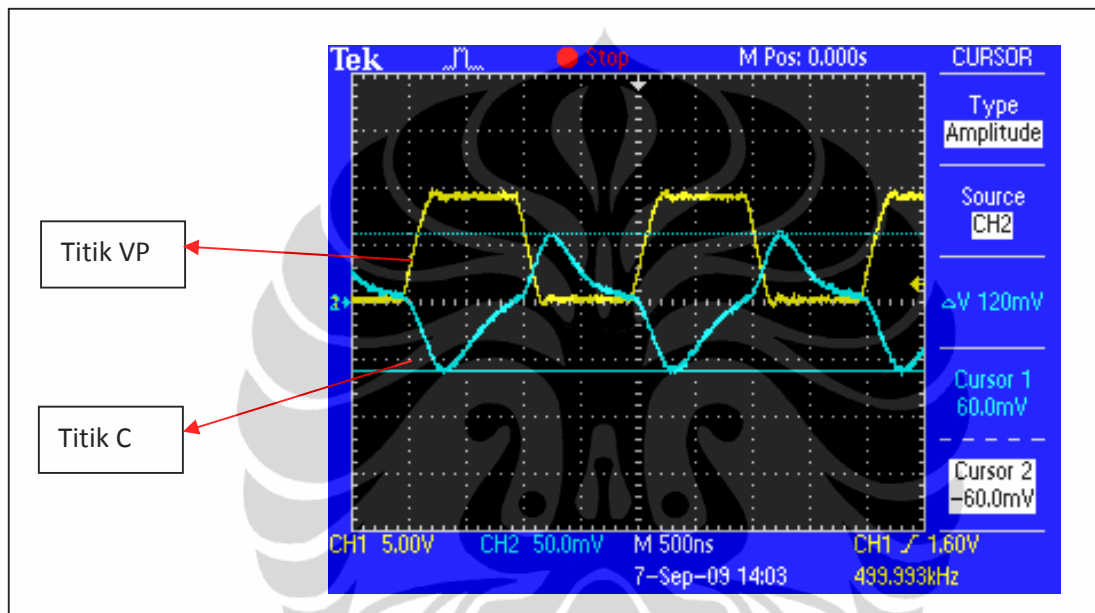
Gambar 4.1. Hasil Pengujian Rangkaian Pembangkit Pulsa

Pada Gambar 4.1 terdapat dua sinyal clock, yaitu clock input dengan warna kuning dan clock output dengan warna biru. Clock input berasal dari rangkaian clock generator dengan frekuensi 500KHz berbentuk pulsa. Sedangkan clock output berasal dari rangkaian

integrator dengan frekuensi 500KHz dengan kemiringan pulsa (*timerise dan time fall*) sebesar 240 ns.

4.2. Pengujian Rangkaian Charge Discharge

Sinyal yang datang dari elektroda penerima akan dihubungkan dengan rangkaian charge discharge. Pengujian dilakukan untuk mengetahui bentuk sinyalnya seperti apa dan berapa amplitudonya. Peralatan yang digunakan adalah digital merk Tektronik TDS2002B. Gambar 4.2 berikut memperlihatkan hasil pengujian rangkaian charge discharge.



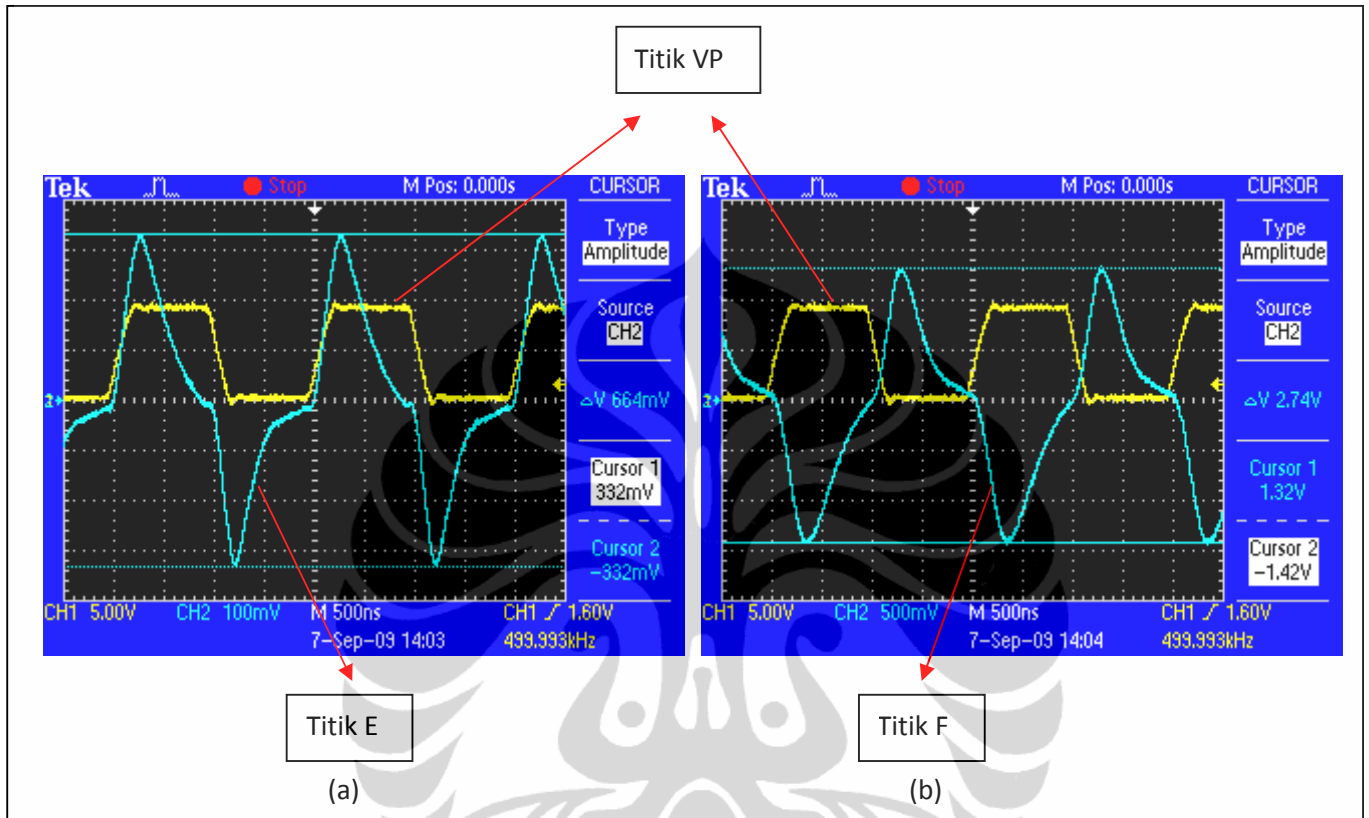
Gambar 4.2. Sinyal Pulsa dan Sinyal Charge Discharge

Pada Gambar 4.2 terdapat dua buah sinyal yaitu sinyal pulsa dengan warna kuning dan sinyal charge discharge dengan warna biru. Sinyal pulsa dengan amplitudo sebesar 10 volt diberikan pada elektroda pemancar. Sedangkan pada elektroda penerima dihubungkan dengan rangkaian charge discharge, sinyal yang diperoleh seperti terlihat pada Gambar 4.2. Skala yang diberikan pada CH2 oscilloscope sebesar 50 mV 500 ns sehingga bentuk sinyal dapat diamati dengan jelas. Amplitudo sinyal charge discharge yang diperoleh sebesar 60 mV. Amplitudo sebesar ini masih terlalu kecil untuk dimasukkan ke rangkaian peak detektor untuk itu perlu dikuatkan lagi menggunakan gain awal.

4.3. Pengujian Rangkaian Gain Awal

Gain awal pada rangkaian ECVT ini berfungsi sebagai penguat sinyal yang berasal dari rangkaian charge discharge. Penguatan yang digunakan dengan model bertingkat

dengan masing-masing penguatan sebesar 4.7 kali sehingga total penguatan sebesar 22.09 kali. Peralatan yang digunakan adalah digital merk Tektronik TDS2002B. Gambar 4.3 berikut memperlihatkan hasil pengujian rangkaian gain awal.

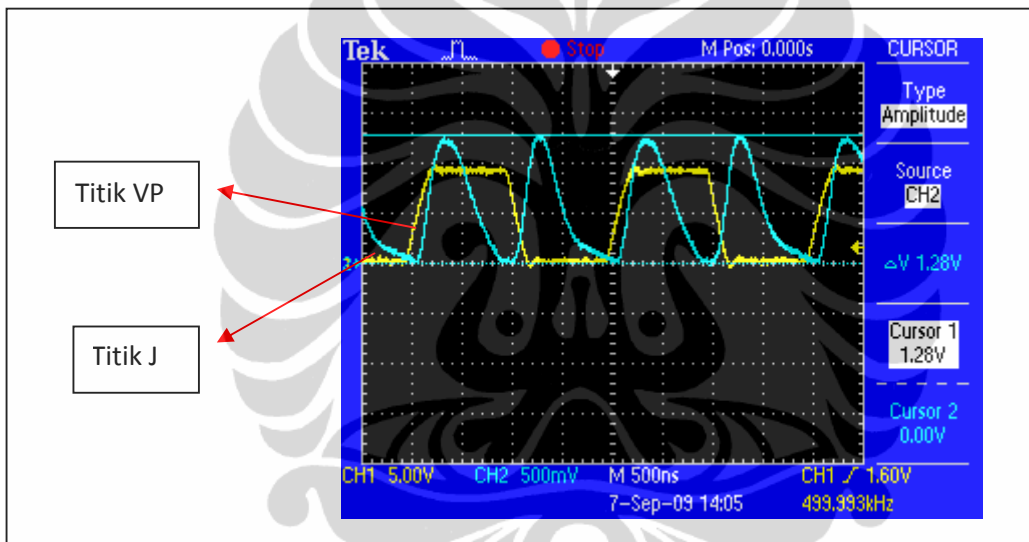


Gambar 4.3. Sinyal Pada Gain Awal. (a) Sinyal Pulsa dan Sinyal Penguatan Pertama; (b) Sinyal Pulsa dan Sinyal Penguatan Kedua

Sinyal yang berwarna kuning adalah sinyal pulsa sedangkan seinyal yang berwarna biru adalah sinyal pada gain awal. Perlu diketahui bahwa rangkaian peak detektor mempunyai sinyal input masukan minimal 300 mV supaya dapat bekerja normal. Pada Gambar 4.3 (a) adalah sinyal pada penguatan pertama, amplitudo yang dihasilkan sebesar 332 mV. Amplitudo tersebut sebenarnya sudah memenuhi standar input peak detektor tetapi masih terlalu dekat dengan level amplitudo minimum dikhawatirkan akan banyak noise untuk itu sinyal tersebut perlu dikuatkan lagi seperti terlihat pada Gambar 4.3 (b). Sinyal yang dihasilkan pada Gambar 4.3 (b) mempunyai amplitudo sebesar 1320 mV sudah memenuhi standar amplitudo minimum peak detektor. Skala yang digunakan pada Gambar 4.3 (a) sebesar 100 mV 500 ns, sedangkan pada Gambar 4.3 (b) sebesar 500 mV 500 ns.

4.4. Pengujian Rangkaian Full Wave Rectifier

Sebelum dihubungkan dengan rangkaian peak detektor untuk diambil nilai tegangan puncaknya, sinyal tersebut terlebih dahulu diubah untuk diambil nilai tegangan positifnya saja. Tegangan negatif tidak dibuang tetapi akan diubah menjadi tegangan positif menggunakan rangkaian full wave rectifier. Tujuan dari pengubahan sinyal negatif menjadi tegangan positif adalah untuk meminimalisasi *ripple* tegangan yang dihasilkan oleh rangkaian peak detektor nantinya. Peralatan yang digunakan adalah digital merk Tektronik TDS2002B. Gambar 4.4 berikut memperlihatkan hasil pengujian rangkaian full wave rectifier.



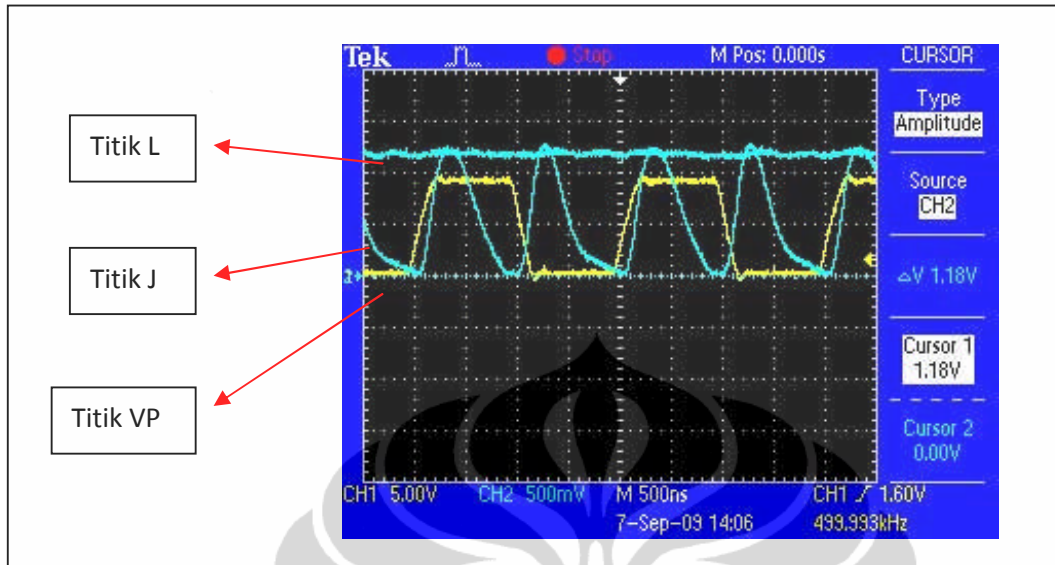
Gambar 4.4. Sinyal Pulsa dan Sinyal Full Wave Rectifier

Pada Gambar 4.4 memperlihatkan dua sinyal yaitu sinyal pulsa dengan warna kuning dan sinyal dari rangkaian full wave rectifier dengan warna biru. Skala yang diberikan sebesar 500 mV 500 ns. Amplitudo yang dihasilkan oleh rangkaian tersebut sebesar 1280 mV. Disitu terlihat bahwa hanya sinyal positif saja yang dihasilkan oleh rangkaian full wave rectifier sedangkan sinyal negatif telah diubah menjadi sinyal positif.

4.5. Pengujian Rangkaian Peak Detektor

Rangkaian peak detektor adalah suatu rangkaian yang digunakan untuk mendeteksi tegangan puncak dari sinyal tertentu dan mengubah sinyal tersebut menjadi tegangan dc sehingga bisa dibaca oleh *analog to digital conversion* (ADC). Peralatan yang digunakan

adalah digital merk Tektronik TDS2002B. Gambar 4.5 berikut memperlihatkan hasil pengujian rangkaian peak detektor.

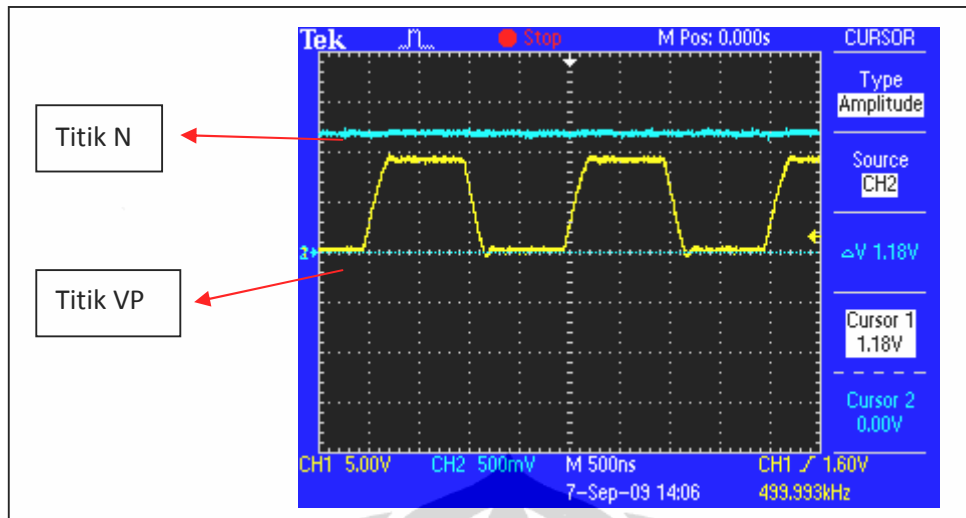


Gambar 4.5. Sinyal Pulsa dan Sinyal Peak Detektor

Pada Gambar 4.5 terdapat dua sinyal yaitu sinyal pulsa yang berwarna kuning dan sinyal peak detektor yang berwarna biru. Skala yang diberikan sebesar 500 mV 500 ns. Dari Gambar tersebut dihasilkan sinyal dc dengan tegangan sebesar 1180 mV dengan noise ripple sebesar 150 mV. Sinyal tersebut masih mempunyai noise ripple cukup tinggi dan ini bisa mengurangi sensitivitas rangkaian ECVT untuk itu perlu diberikan filter supaya noisanya bisa turun.

4.6. Pengujian Rangkaian Filter

Rangkaian filter adalah suatu rangkaian yang digunakan untuk mengurangi dan meredam noise yang dihasilkan oleh rangkaian peak detektor. Filter yang diberikan sebesar 25 KHz. Peralatan yang digunakan adalah digital merk Tektronik TDS2002B. Gambar 4.6 berikut memperlihatkan hasil pengujian rangkaian filter.



Gambar 4.6. Sinyal Pulsa dan Sinyal Filter

Pada Gambar 4.6 memperlihatkan sinyal pulsa dengan warna kuning dan sinyal filter dengan warna biru. Dari Gambar tersebut terlihat bahwa tegangan yang dikeluarkan masih tetap sama dengan input yaitu sebesar 1180 mV dengan noise ripple 50 mV. Ini sudah cukup bagus daripada sinyal yang tidak diberi filter.

4.7. Pengukuran Kapasitansi DAS ECVT

Pada sub bab 4.1 hingga sub bab 4.6 menjelaskan jalannya sinyal mulai dari pembangkit pulsa hingga keluar tegangan dc yang siap diambil oleh adc. Pada sub bab 4.7 dan seterusnya ini akan dibahas mengenai eksperimen-eksperimen tentang ECVT dan data-data yang didapat.

Pada sub bab ini akan dilakukan eksperimen rangkaian ECVT. Gambar 4.7 memperlihatkan susunan alat eksperimen ECVT. Peralatan yang dibutuhkan adalah sensor dengan jumlah elektroda 32 buah, sistem data akuisisi (DAS ECVT), dan sebuah komputer untuk merekam data.



Gambar 4.7. Susunan Alat Untuk Eksperimen ECVT

Data yang dikirimkan ke komputer berupa data amplitudo tegangan dari masing-masing pasangan elektroda yang sedang aktif. Data-data tersebut masih berupa nilai tegangan yang mencerminkan nilai kapasitansi. Untuk itu perlu dibuat persamaan untuk menghitung besarnya kapasitansi yang terukur tersebut. Untuk mengubah data tegangan menjadi nilai kapasitansi menggunakan persamaan 2.2 dalam BAB 2, yaitu

$$C_x = \frac{V_{out}}{2R(\Delta V / \Delta T)} \dots\dots\dots (4.1)$$

keterangan:

V_{out} : Tegangan Output Charge Discharge

R : 4700 ohm

ΔV : 10000 mV

ΔT : 240 ns

Kita misalkan 2 (Δ Δ) adalah K maka akan kita dapatkan nilai konstanta K adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} &= 2 (\Delta \Delta) \\ &= 2 \times 4700(10000 \ 240.10 \) \\ &= 3.92 .10 \end{aligned}$$

Dengan demikian persamaan 2.2 atau persamaan 4.1 dapat disederhanakan menjadi:

$$= \text{---} \dots\dots\dots (4.2)$$

keterangan:

Vout : Tegangan Output Charge Discharge (mvolt)

K : Konstanta

Tegangan output pada charge discharge (Vout) dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$V_{out} = \frac{V_{data}}{304.05 \times Gain} + 0.0183V_{DACB} + 0.0033V_{DACA} + 22.63 \dots\dots\dots (4.3)$$

Keterangan:

Vdata : Tegangan yang diterima komputer (mvolt).

Gain : Gain terakhir yang diterima komputer.

Vdacb : Tegangan DAC pada saat empty pertama (mvolt).

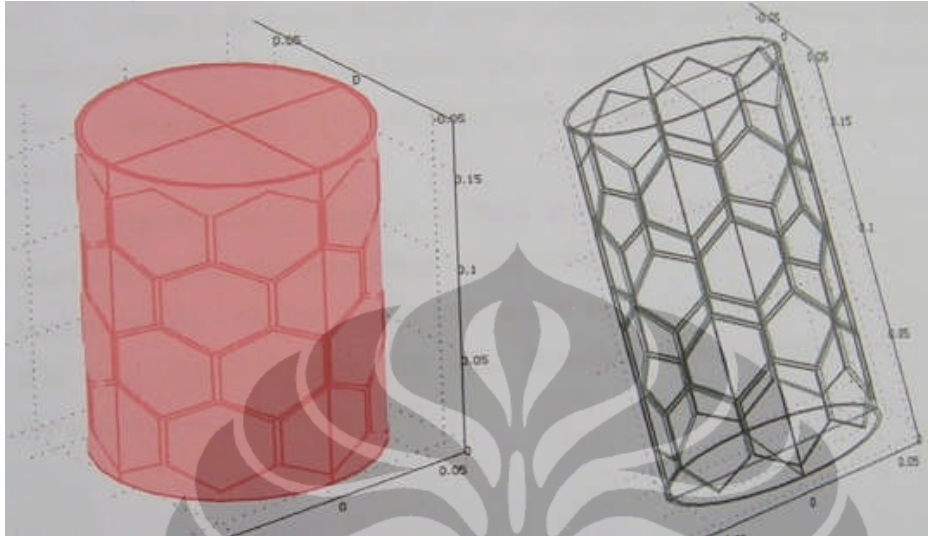
Vdaca : Tegangan DAC pada saat empty kedua (mvolt).

4.7.1. Setting DAS ECVT

Setting DAS ECVT dilakukan dengan dua keadaan, yaitu dalam keadaan kosong (*empty*) dan dalam keadaan penuh (*full*). Setting dalam keadaan kosong menggunakan benda yang mempunyai permitifitas kecil misalnya udara, sedangkan setting dalam keadaan penuh biasanya menggunakan akrilic, air, karet, atau benda lain yang mempunyai permitifitas besar. Selanjutnya adalah pengesetan batas bawah dan batas atas tegangan setting. Untuk batas bawah diset 1000 mV dan untuk batas atas diset 3500 mV. Angka 1000 menandakan bahwa setting kosong diset 1000 mV, sedangkan 3500 menandakan bahwa setting penuh diset 3500 mV.

4.7.2. Pengukuran Kapasitansi dengan Geometri Sensor Hexagonal

Pada sub bab ini akan dilakukan eksperimen pengambilan data kapasitansi dengan model geometri sensor hexagonal atau segienam. Sensor yang diuji sebanyak 32 buah dengan model 4 tingkat, masing-masing tingkat sebanyak 8 buah sensor. Gambar 4.8 berikut memperlihatkan sensor segienam 4 tingkat.



Gambar 4.8. Sensor ECVT Hexagonal 4 Tingkat

Pengukuran nilai kapasitansi cukup mudah, yaitu dengan melakukan kalibrasi terlebih dahulu seperti telah dijelaskan pada sub bab 4.7.1, kemudian merekam data tegangan yang diterima komputer. Dengan menggunakan persamaan 4.1, 4.2, dan 4.3 dapat diketahui nilai kapasitansinya.

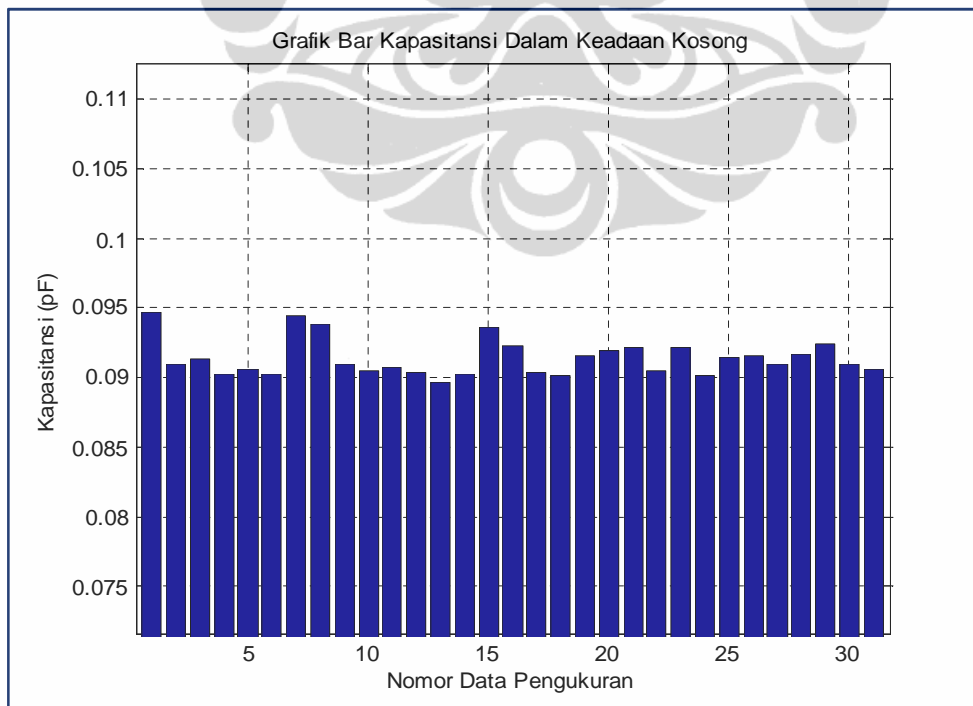
4.7.2.1. Pengukuran Kapasitansi Pada Saat Kosong Untuk Sensor Hexagonal (Udara $\epsilon=1$)

Sebagai contoh kami tampilkan data pengukuran untuk satu scan pertama yaitu sensor pertama sebagai transmitter dan yang lain sebagai receiver. Dalam satu scan pertama akan didapatkan data sebanyak 31 data. Tabel 4.1 berikut memperlihatkan data pengukuran pada saat kosong.

Tabel 4.1. Data Pengukuran Pada Saat Kosong Untuk Sensor Hexagonal

| No | Data Tegangan Kosong (mV) | Data SignDAC | Data Tegangan DACA (mV) | Data Tegangan DACB (mV) | Data Gain | Vout (mV) | Kapasitansi Kosong (pF) |
|----|---------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------|-----------|-------------------------|
| 1 | 1921 | 0 | 800 | 475 | 2 | 37.12 | 0.0947 |
| 2 | 1237 | 0 | 759 | 464 | 2 | 35.66 | 0.0910 |
| 3 | 2644 | 1 | -1180 | 458 | 1 | 35.81 | 0.0914 |

| | | | | | | | |
|----|------|---|-------|-----|---|-------|--------|
| 4 | 2839 | 1 | -1210 | 405 | 1 | 35.39 | 0.0903 |
| 5 | 2924 | 1 | -1185 | 393 | 1 | 35.53 | 0.0906 |
| 6 | 2529 | 1 | -1015 | 425 | 1 | 35.38 | 0.0902 |
| 7 | 1917 | 0 | 745 | 480 | 2 | 37.02 | 0.0945 |
| 8 | 2689 | 1 | -1265 | 519 | 1 | 36.80 | 0.0939 |
| 9 | 2599 | 1 | -1554 | 526 | 1 | 35.68 | 0.0910 |
| 10 | 2474 | 1 | -1440 | 516 | 1 | 35.46 | 0.0905 |
| 11 | 2589 | 1 | -1514 | 514 | 1 | 35.56 | 0.0907 |
| 12 | 2509 | 1 | -1475 | 513 | 1 | 35.40 | 0.0903 |
| 13 | 2609 | 1 | -1559 | 496 | 1 | 35.14 | 0.0897 |
| 14 | 2439 | 1 | -1345 | 501 | 1 | 35.38 | 0.0903 |
| 15 | 3059 | 1 | -1509 | 490 | 1 | 36.68 | 0.0936 |
| 16 | 2869 | 1 | -1554 | 506 | 1 | 36.20 | 0.0923 |
| 17 | 2968 | 1 | -1819 | 494 | 1 | 35.43 | 0.0904 |
| 18 | 2779 | 1 | -1584 | 481 | 1 | 35.35 | 0.0902 |
| 19 | 2943 | 1 | -1654 | 493 | 1 | 35.87 | 0.0915 |
| 20 | 2933 | 1 | -1644 | 503 | 1 | 36.06 | 0.0920 |
| 21 | 2993 | 1 | -1699 | 505 | 1 | 36.11 | 0.0921 |
| 22 | 2894 | 1 | -1649 | 478 | 1 | 35.45 | 0.0904 |
| 23 | 2988 | 1 | -1644 | 496 | 1 | 36.11 | 0.0921 |
| 24 | 3133 | 1 | -1804 | 456 | 1 | 35.33 | 0.0901 |
| 25 | 2973 | 1 | -1764 | 506 | 1 | 35.85 | 0.0914 |
| 26 | 2913 | 1 | -1794 | 525 | 1 | 35.90 | 0.0916 |
| 27 | 2884 | 1 | -1750 | 510 | 1 | 35.67 | 0.0910 |
| 28 | 2869 | 1 | -1733 | 525 | 1 | 35.95 | 0.0917 |
| 29 | 2889 | 1 | -1719 | 534 | 1 | 36.23 | 0.0924 |
| 30 | 2881 | 1 | -1723 | 506 | 1 | 35.68 | 0.0910 |
| 31 | 2877 | 1 | -1790 | 510 | 1 | 35.52 | 0.0906 |



Gambar 4.9. Grafik Bar Kapasitansi Dalam Keadaan Kosong Untuk Sensor Hexagonal

Gambar 4.9 memperlihatkan Grafik bar nilai kapasitansi dalam keadaan kosong (udara) dengan permitifitas $\epsilon = 1$. Data yang ditampilkan sebanyak 31 data untuk scan yang pertama. Ke 31 data tersebut terbagi menjadi 4 bagian, yaitu 7 data pertama untuk sensor tingkat pertama, 8 data untuk sensor tingkat kedua, 8 data untuk sensor tingkat ketiga, dan 8 data untuk sensor tingkat keempat. Dari Grafik terlihat bahwa sensor tingkat pertama dan kedua saja yang paling sensitif. Dari tingkat pertama data ke-1 dan data ke-7 mempunyai nilai kapasitansi paling tinggi yaitu 94.7 dan 94.5 femto farad. Kemudian pada tingkat kedua data ke-8 dan data ke-15 juga mempunyai nilai kapasitansi tinggi yaitu 93.9 dan 93.6 femto farad. Keempat data tersebut 1,7,8,15 mempunyai nilai kapasitansi tinggi karena berada paling dekat dengan transmitter. Sedangkan yang lain berada jauh dari transmitter.

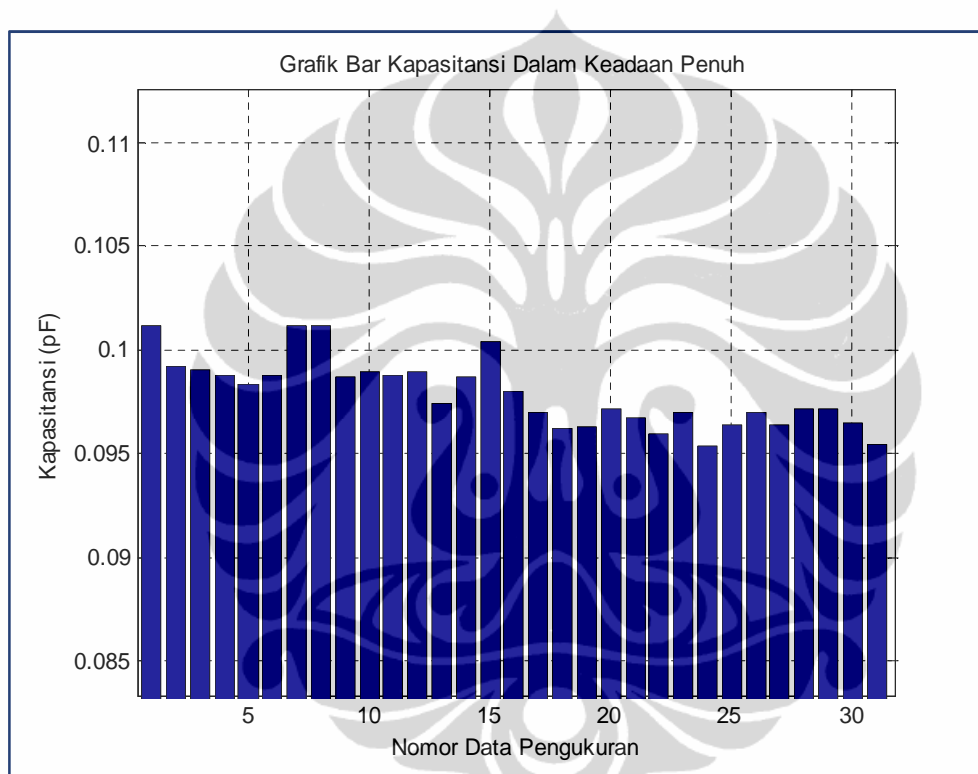
4.7.2.2. Pengukuran Kapasitansi Pada Saat Penuh Untuk Sensor Hexagonal (Air $\epsilon = 80$)

Setelah dilakukan pengukuran kapasitansi dalam keadaan kosong kemudian dilakukan pengukuran kapasitansi dalam keadaan penuh yang berisi air dengan permitifitas $\epsilon = 80$. Tabel 4.2 berikut memperlihatkan data pengukuran pada saat penuh.

Tabel 4.2. Data Pengukuran Pada Saat Penuh Untuk Sensor Hexagonal

| No | Data Tegangan Penuh (mV) | Data SignDAC | Data Tegangan DACA (mV) | Data Tegangan DACB (mV) | Data Gain | Vout (mV) | Kapasitansi Penuh (pF) |
|----|--------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------|-----------|------------------------|
| 1 | 3455 | 0 | 800 | 475 | 2 | 39.64 | 0.1011 |
| 2 | 3198 | 0 | 759 | 464 | 2 | 38.88 | 0.0992 |
| 3 | 3562 | 1 | -1180 | 458 | 1 | 38.83 | 0.0991 |
| 4 | 3847 | 1 | -1210 | 405 | 1 | 38.70 | 0.0987 |
| 5 | 3847 | 1 | -1185 | 393 | 1 | 38.56 | 0.0984 |
| 6 | 3542 | 1 | -1015 | 425 | 1 | 38.71 | 0.0987 |
| 7 | 3508 | 0 | 745 | 480 | 2 | 39.64 | 0.1011 |
| 8 | 3557 | 1 | -1265 | 519 | 1 | 39.65 | 0.1012 |
| 9 | 3517 | 1 | -1554 | 526 | 1 | 38.69 | 0.0987 |
| 10 | 3482 | 1 | -1440 | 516 | 1 | 38.77 | 0.0989 |
| 11 | 3552 | 1 | -1514 | 514 | 1 | 38.72 | 0.0988 |
| 12 | 3537 | 1 | -1475 | 513 | 1 | 38.78 | 0.0989 |
| 13 | 3537 | 1 | -1559 | 496 | 1 | 38.20 | 0.0974 |
| 14 | 3447 | 1 | -1345 | 501 | 1 | 38.70 | 0.0987 |
| 15 | 3877 | 1 | -1509 | 490 | 1 | 39.37 | 0.1004 |
| 16 | 3547 | 1 | -1554 | 506 | 1 | 38.43 | 0.0980 |
| 17 | 3752 | 1 | -1819 | 494 | 1 | 38.01 | 0.0970 |
| 18 | 3497 | 1 | -1584 | 481 | 1 | 37.71 | 0.0962 |
| 19 | 3512 | 1 | -1654 | 493 | 1 | 37.74 | 0.0963 |

| | | | | | | | |
|----|------|---|-------|-----|---|-------|--------|
| 20 | 3552 | 1 | -1644 | 503 | 1 | 38.09 | 0.0972 |
| 21 | 3537 | 1 | -1699 | 505 | 1 | 37.90 | 0.0967 |
| 22 | 3552 | 1 | -1649 | 478 | 1 | 37.62 | 0.0960 |
| 23 | 3562 | 1 | -1644 | 496 | 1 | 38.00 | 0.0969 |
| 24 | 3757 | 1 | -1804 | 456 | 1 | 37.38 | 0.0954 |
| 25 | 3562 | 1 | -1764 | 506 | 1 | 37.78 | 0.0964 |
| 26 | 3557 | 1 | -1794 | 525 | 1 | 38.02 | 0.0970 |
| 27 | 3523 | 1 | -1750 | 510 | 1 | 37.77 | 0.0964 |
| 28 | 3517 | 1 | -1733 | 525 | 1 | 38.09 | 0.0972 |
| 29 | 3448 | 1 | -1719 | 534 | 1 | 38.07 | 0.0971 |
| 30 | 3527 | 1 | -1723 | 506 | 1 | 37.80 | 0.0964 |
| 31 | 3453 | 1 | -1790 | 510 | 1 | 37.41 | 0.0954 |



Gambar 4.10. Grafik Bar Kapasitansi Dalam Keadaan Penuh Untuk Sensor Hexagonal

Gambar 4.10 memperlihatkan Grafik bar nilai kapasitansi dalam keadaan penuh yang berisi air dengan permitifitas $\epsilon = 80$. Data yang ditampilkan sebanyak 31 data untuk scan yang pertama. Ke 31 data tersebut terbagi menjadi 4 bagian, yaitu 7 data pertama untuk sensor tingkat pertama, 8 data untuk sensor tingkat kedua, 8 data untuk sensor tingkat ketiga, dan 8 data untuk sensor tingkat keempat. Dari Grafik terlihat bahwa sensor tingkat pertama dan kedua saja yang paling sensitif. Dari tingkat pertama data ke-1 dan data ke-7 mempunyai nilai kapasitansi paling tinggi yaitu 101.1 dan 101.1 femto farad. Kemudian pada tingkat kedua data ke-8 dan data ke-15 juga mempunyai nilai kapasitansi tinggi yaitu 101.2 dan 100.4 femto farad. Keempat data tersebut 1,7,8,15 mempunyai nilai kapasitansi

tinggi karena berada paling dekat dengan transmitter. Sedangkan yang lain berada jauh dari transmitter. Dalam keadaan penuh, nilai kapasitansi lebih tinggi dari pada dalam keadaan kosong.

4.7.2.3. Perhitungan Sensitifitas dan Resolusi Untuk Sensor Hexagonal

Sensitifitas adalah perubahan nilai kapasitansi terhadap perubahan tegangan, dihitung dari perbandingan keadaan kosong dan penuh dan dapat dicari dengan menggunakan persamaan 4.4.

$$s = \frac{C_f - C_e}{V_f - V_e} \dots\dots\dots (4.4)$$

Keterangan:

- s : Sensitifitas (fF/mV).
- C_f : Nilai kapasitansi pada saat penuh.
- C_e : Nilai kapasitansi pada saat kosong.
- V_f : Tegangan keluaran pada saat penuh.
- V_e : Tegangan keluaran pada saat kosong.

Sedangkan resolusi adalah kemampuan minimal rangkaian/sistem dalam mengukur kapasitansi, dihitung menggunakan persamaan 4.5.

$$r = \frac{C_f - C_e}{V_f - V_e} N \dots\dots\dots (4.5)$$

Keterangan:

- r : Resolusi (fF).
- C_f : Nilai kapasitansi pada saat penuh.
- C_e : Nilai kapasitansi pada saat kosong.
- V_f : Tegangan keluaran pada saat penuh.
- V_e : Tegangan keluaran pada saat kosong.
- N : Fluktuasi sinyal (*Noise*).

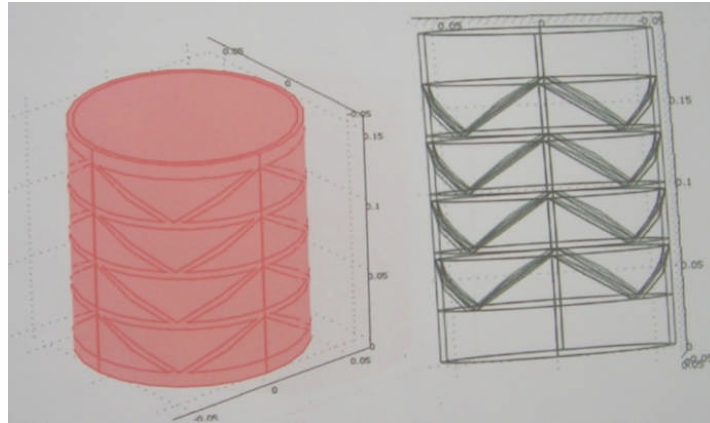
Noise untuk sistem ECVT ini diukur di titik C, masing-masing pasangan sensor atau elektroda mempunyai *noise* berbeda-beda. Resolusi dapat juga diartikan sebagai perkalian antara sensitifitas dengan *noise*. Tabel 4.3 memperlihatkan pengukuran sensitifitas dan resolusi untuk sensor hexagonal.

Tabel 4.3. Sensitifitas dan Resolusi Untuk Sensor Heksagonal

| No | Vout Kosong (mV) | Vout Penuh (mV) | Kapasitansi Kosong (pF) | Kapasitansi Penuh (pF) | Noise (mV) | Sensitifitas (fF/mV) | Resolusi (fF) |
|----|------------------|-----------------|-------------------------|------------------------|------------|----------------------|---------------|
| 1 | 37.12 | 39.64 | 0.0947 | 0.1011 | 0.0822 | 2.54 | 0.21 |
| 2 | 35.66 | 38.88 | 0.0910 | 0.0992 | 0.0822 | 2.54 | 0.21 |
| 3 | 35.81 | 38.83 | 0.0914 | 0.0991 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 4 | 35.39 | 38.70 | 0.0903 | 0.0987 | 0.1644 | 2.53 | 0.42 |
| 5 | 35.53 | 38.56 | 0.0906 | 0.0984 | 0.1644 | 2.57 | 0.42 |
| 6 | 35.38 | 38.71 | 0.0902 | 0.0987 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 7 | 37.02 | 39.64 | 0.0945 | 0.1011 | 0.0822 | 2.52 | 0.21 |
| 8 | 36.80 | 39.65 | 0.0939 | 0.1012 | 0.1644 | 2.56 | 0.42 |
| 9 | 35.68 | 38.69 | 0.0910 | 0.0987 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 10 | 35.46 | 38.77 | 0.0905 | 0.0989 | 0.1644 | 2.53 | 0.42 |
| 11 | 35.56 | 38.72 | 0.0907 | 0.0988 | 0.1644 | 2.56 | 0.42 |
| 12 | 35.40 | 38.78 | 0.0903 | 0.0989 | 0.1644 | 2.54 | 0.42 |
| 13 | 35.14 | 38.20 | 0.0897 | 0.0974 | 0.1644 | 2.52 | 0.41 |
| 14 | 35.38 | 38.70 | 0.0903 | 0.0987 | 0.1644 | 2.53 | 0.42 |
| 15 | 36.68 | 39.37 | 0.0936 | 0.1004 | 0.1644 | 2.53 | 0.42 |
| 16 | 36.20 | 38.43 | 0.0923 | 0.0980 | 0.1644 | 2.56 | 0.42 |
| 17 | 35.43 | 38.01 | 0.0904 | 0.0970 | 0.1644 | 2.56 | 0.42 |
| 18 | 35.35 | 37.71 | 0.0902 | 0.0962 | 0.1644 | 2.54 | 0.42 |
| 19 | 35.87 | 37.74 | 0.0915 | 0.0963 | 0.1644 | 2.56 | 0.42 |
| 20 | 36.06 | 38.09 | 0.0920 | 0.0972 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 21 | 36.11 | 37.90 | 0.0921 | 0.0967 | 0.1644 | 2.57 | 0.42 |
| 22 | 35.45 | 37.62 | 0.0904 | 0.0960 | 0.1644 | 2.59 | 0.43 |
| 23 | 36.11 | 38.00 | 0.0921 | 0.0969 | 0.1644 | 2.54 | 0.42 |
| 24 | 35.33 | 37.38 | 0.0901 | 0.0954 | 0.1644 | 2.58 | 0.42 |
| 25 | 35.85 | 37.78 | 0.0914 | 0.0964 | 0.1644 | 2.58 | 0.42 |
| 26 | 35.90 | 38.02 | 0.0916 | 0.0970 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 27 | 35.67 | 37.77 | 0.0910 | 0.0964 | 0.1644 | 2.57 | 0.42 |
| 28 | 35.95 | 38.09 | 0.0917 | 0.0972 | 0.1644 | 2.58 | 0.42 |
| 29 | 36.23 | 38.07 | 0.0924 | 0.0971 | 0.1644 | 2.56 | 0.42 |
| 30 | 35.68 | 37.80 | 0.0910 | 0.0964 | 0.1644 | 2.54 | 0.42 |
| 31 | 35.52 | 37.41 | 0.0906 | 0.0954 | 0.1644 | 2.53 | 0.42 |

4.7.3. Pengukuran Kapasitansi dengan Geometri Sensor Segitiga

Selanjutnya dilakukan pengukuran kapasitansi untuk sensor dengan geometri segitiga sama sisi. Sensor yang diuji sebanyak 32 buah dengan model 4 tingkat, masing-masing tingkat sebanyak 8 buah sensor. Gambar 4.11 berikut memperlihatkan sensor segitiga sama sisi 4 tingkat.



Gambar 4.11. Sensor ECVT Segitiga Sama Sisi 4 Tingkat

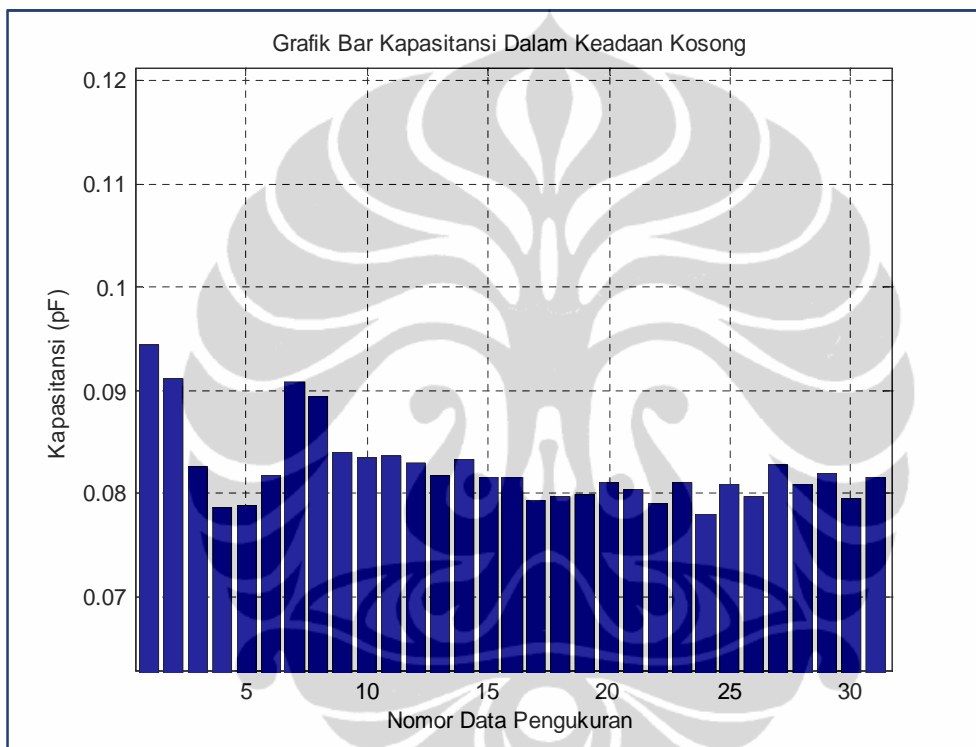
4.7.3.1. Pengukuran Kapasitansi Pada Saat Kosong (Udara $\epsilon = 1$)

Sebagai contoh kami tampilkan data pengukuran untuk satu scan pertama yaitu sensor pertama sebagai transmitter dan yang lain sebagai receiver. Dalam satu scan pertama akan didapatkan data sebanyak 31 data. Tabel 4.4 berikut memperlihatkan data pengukuran pada saat kosong.

Tabel 4.4. Data Pengukuran Pada Saat Kosong Untuk Sensor Segitiga

| No | Data Tegangan Kosong (mV) | Data SignDAC | Data Tegangan DACA (mV) | Data Tegangan DACB (mV) | Data Gain | Vout (mV) | Kapasitansi Kosong (pF) |
|----|---------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------|-----------|-------------------------|
| 1 | 1639 | 0 | 949 | 469 | 2 | 37.04 | 0.0945 |
| 2 | 1523 | 0 | 894 | 418 | 2 | 35.73 | 0.0912 |
| 3 | 1594 | 1 | -851 | 399 | 1 | 32.37 | 0.0826 |
| 4 | 1533 | 1 | -935 | 341 | 1 | 30.83 | 0.0786 |
| 5 | 1657 | 1 | -960 | 326 | 1 | 30.88 | 0.0788 |
| 6 | 1703 | 1 | -856 | 364 | 1 | 32.07 | 0.0818 |
| 7 | 1982 | 1 | -721 | 481 | 1 | 35.57 | 0.0907 |
| 8 | 1003 | 0 | 799 | 446 | 2 | 35.08 | 0.0895 |
| 9 | 1672 | 1 | -1001 | 441 | 1 | 32.90 | 0.0839 |
| 10 | 1621 | 1 | -996 | 439 | 1 | 32.71 | 0.0834 |
| 11 | 1646 | 1 | -1035 | 445 | 1 | 32.77 | 0.0836 |
| 12 | 1594 | 1 | -1015 | 438 | 1 | 32.54 | 0.0830 |
| 13 | 1612 | 1 | -1075 | 419 | 1 | 32.05 | 0.0818 |
| 14 | 1647 | 1 | -971 | 426 | 1 | 32.64 | 0.0833 |
| 15 | 1581 | 1 | -1060 | 419 | 1 | 32.00 | 0.0816 |
| 16 | 1652 | 1 | -1215 | 434 | 1 | 32.00 | 0.0816 |
| 17 | 1592 | 1 | -1355 | 420 | 1 | 31.08 | 0.0793 |
| 18 | 1614 | 1 | -1275 | 409 | 1 | 31.22 | 0.0796 |
| 19 | 1636 | 1 | -1320 | 418 | 1 | 31.30 | 0.0799 |
| 20 | 1628 | 1 | -1260 | 433 | 1 | 31.75 | 0.0810 |

| | | | | | | | |
|----|------|---|-------|-----|---|-------|--------|
| 21 | 1632 | 1 | -1340 | 434 | 1 | 31.52 | 0.0804 |
| 22 | 1567 | 1 | -1290 | 408 | 1 | 30.99 | 0.0791 |
| 23 | 1661 | 1 | -1235 | 426 | 1 | 31.81 | 0.0812 |
| 24 | 1527 | 1 | -1244 | 384 | 1 | 30.57 | 0.0780 |
| 25 | 1762 | 1 | -1380 | 430 | 1 | 31.74 | 0.0810 |
| 26 | 1606 | 1 | -1500 | 454 | 1 | 31.27 | 0.0798 |
| 27 | 967 | 1 | -1826 | 694 | 1 | 32.48 | 0.0829 |
| 28 | 1055 | 1 | -1874 | 645 | 1 | 31.72 | 0.0809 |
| 29 | 993 | 1 | -1889 | 679 | 1 | 32.09 | 0.0819 |
| 30 | 959 | 1 | -1806 | 619 | 1 | 31.15 | 0.0795 |
| 31 | 963 | 1 | -1779 | 657 | 1 | 31.95 | 0.0815 |



Gambar 4.12. Grafik Bar Kapasitansi Dalam Keadaan Kosong Untuk Sensor Segitiga

Gambar 4.12 memperlihatkan Grafik bar nilai kapasitansi untuk sensor segitiga dalam keadaan kosong (udara) dengan permitifitas $\epsilon = 1$. Data yang ditampilkan sebanyak 31 data untuk scan yang pertama. Ke 31 data tersebut terbagi menjadi 4 bagian, yaitu 7 data pertama untuk sensor tingkat pertama, 8 data untuk sensor tingkat kedua, 8 data untuk sensor tingkat ketiga, dan 8 data untuk sensor tingkat keempat. Dari Grafik terlihat bahwa sensor tingkat pertama dan kedua saja yang paling sensitif. Dari tingkat pertama data ke-1, data ke-2, dan data ke-7 mempunyai nilai kapasitansi paling tinggi yaitu 94.5, 91.2, dan 90.7 femto farad. Kemudian pada tingkat kedua data ke-8 saja yang mempunyai nilai kapasitansi tinggi yaitu 89.5 femto farad. Keempat data tersebut 1,2,7,8 mempunyai nilai

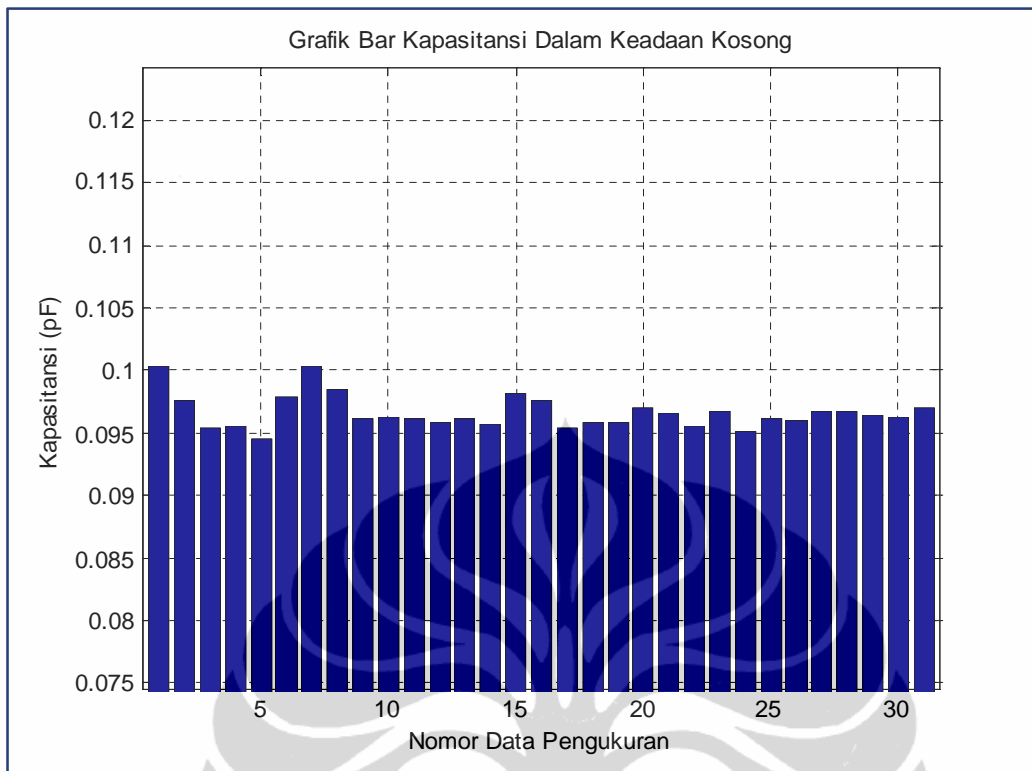
kapasitansi tinggi karena berada paling dekat dengan transmitter. Sedangkan yang lain berada jauh dari transmitter.

4.7.2.2. Pengukuran Kapasitansi Pada Saat Penuh Untuk Sensor Segitiga (Air $\epsilon = 80$)

Selanjutnya dilakukan pengukuran kapasitansi pada sensor segitiga dalam keadaan penuh dengan berisi air dengan $\epsilon = 80$. Tabel 4.5 berikut memperlihatkan data pengukuran pada saat penuh.

Tabel 4.5. Data Pengukuran Pada Saat Penuh Untuk Sensor Segitiga

| No | Data Tegangan Penuh (mV) | Data SignDAC | Data Tegangan DACA (mV) | Data Tegangan DACB (mV) | Data Gain | Vout (mV) | Kapasitansi Penuh (pF) |
|----|--------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------|-----------|------------------------|
| 1 | 3053 | 0 | 949 | 469 | 2 | 39.37 | 0.1004 |
| 2 | 3058 | 0 | 894 | 418 | 2 | 38.26 | 0.0976 |
| 3 | 3132 | 1 | -851 | 399 | 1 | 37.42 | 0.0955 |
| 4 | 3542 | 1 | -935 | 341 | 1 | 37.43 | 0.0955 |
| 5 | 3542 | 1 | -960 | 326 | 1 | 37.08 | 0.0946 |
| 6 | 3612 | 1 | -856 | 364 | 1 | 38.35 | 0.0978 |
| 7 | 3122 | 1 | -721 | 481 | 1 | 39.32 | 0.1003 |
| 8 | 3158 | 0 | 799 | 446 | 2 | 38.62 | 0.0985 |
| 9 | 3132 | 1 | -1001 | 441 | 1 | 37.70 | 0.0962 |
| 10 | 3152 | 1 | -996 | 439 | 1 | 37.74 | 0.0963 |
| 11 | 3147 | 1 | -1035 | 445 | 1 | 37.71 | 0.0962 |
| 12 | 3127 | 1 | -1015 | 438 | 1 | 37.58 | 0.0959 |
| 13 | 3327 | 1 | -1075 | 419 | 1 | 37.69 | 0.0962 |
| 14 | 3127 | 1 | -971 | 426 | 1 | 37.51 | 0.0957 |
| 15 | 3557 | 1 | -1060 | 419 | 1 | 38.50 | 0.0982 |
| 16 | 3557 | 1 | -1215 | 434 | 1 | 38.26 | 0.0976 |
| 17 | 3522 | 1 | -1355 | 420 | 1 | 37.43 | 0.0955 |
| 18 | 3547 | 1 | -1275 | 409 | 1 | 37.57 | 0.0958 |
| 19 | 3547 | 1 | -1320 | 418 | 1 | 37.59 | 0.0959 |
| 20 | 3542 | 1 | -1260 | 433 | 1 | 38.05 | 0.0971 |
| 21 | 3552 | 1 | -1340 | 434 | 1 | 37.83 | 0.0965 |
| 22 | 3542 | 1 | -1290 | 408 | 1 | 37.49 | 0.0956 |
| 23 | 3517 | 1 | -1235 | 426 | 1 | 37.92 | 0.0967 |
| 24 | 3567 | 1 | -1244 | 384 | 1 | 37.28 | 0.0951 |
| 25 | 3577 | 1 | -1380 | 430 | 1 | 37.71 | 0.0962 |
| 26 | 3547 | 1 | -1500 | 454 | 1 | 37.65 | 0.0961 |
| 27 | 2617 | 1 | -1826 | 694 | 1 | 37.91 | 0.0967 |
| 28 | 2947 | 1 | -1874 | 645 | 1 | 37.94 | 0.0968 |
| 29 | 2733 | 1 | -1889 | 679 | 1 | 37.81 | 0.0965 |
| 30 | 2960 | 1 | -1806 | 619 | 1 | 37.73 | 0.0963 |
| 31 | 2808 | 1 | -1779 | 657 | 1 | 38.02 | 0.0970 |



Gambar 4.13. Grafik Bar Kapasitansi Dalam Keadaan Penuh Untuk Sensor Segitiga

Gambar 4.13 memperlihatkan Grafik bar nilai kapasitansi untuk sensor segitiga dalam keadaan penuh (air) dengan permitifitas $\epsilon = 80$. Data yang ditampilkan sebanyak 31 data untuk scan yang pertama. Ke 31 data tersebut terbagi menjadi 4 bagian, yaitu 7 data pertama untuk sensor tingkat pertama, 8 data untuk sensor tingkat kedua, 8 data untuk sensor tingkat ketiga, dan 8 data untuk sensor tingkat keempat. Dari Grafik terlihat bahwa sensor tingkat pertama saja yang paling sensitif yang mempunyai nilai kapasitansi paling tinggi yaitu sensor 1 dan 7 saja dengan kapasitansi 100.4, dan 100.3 femto farad.

4.7.2.3. Perhitungan Sensitifitas dan Resolusi Untuk Sensor Segitiga

Sensitifitas adalah perubahan nilai kapasitansi terhadap perubahan tegangan, dihitung dari perbandingan keadaan kosong dan penuh. Sedangkan resolusi adalah kemampuan minimal rangkaian/sistem dalam mengukur kapasitansi. Sensitifitas dan resolusi dapat dihitung menggunakan persamaan 4.4 dan 4.5 di atas. Tabel 4.6 memperlihatkan pengukuran sensisitifitas dan resolusi untuk sensor segitiga.

Tabel 4.6. Sensitifitas dan Resolusi Untuk Sensor Segitiga

| No | Vout Kosong (mV) | Vout Penuh (mV) | Kapasitansi Kosong (pF) | Kapasitansi Penuh (pF) | Noise (mV) | Sensitifitas (fF/mV) | Resolusi (fF) |
|----|------------------|-----------------|-------------------------|------------------------|------------|----------------------|---------------|
| 1 | 37.04 | 39.37 | 0.0945 | 0.1004 | 0.0822 | 2.54 | 0.21 |
| 2 | 35.73 | 38.26 | 0.0912 | 0.0976 | 0.0822 | 2.54 | 0.21 |
| 3 | 32.37 | 37.42 | 0.0826 | 0.0955 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 4 | 30.83 | 37.43 | 0.0786 | 0.0955 | 0.1644 | 2.56 | 0.42 |
| 5 | 30.88 | 37.08 | 0.0788 | 0.0946 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 6 | 32.07 | 38.35 | 0.0818 | 0.0978 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 7 | 35.57 | 39.32 | 0.0907 | 0.1003 | 0.1644 | 2.56 | 0.42 |
| 8 | 35.08 | 38.62 | 0.0895 | 0.0985 | 0.0822 | 2.54 | 0.21 |
| 9 | 32.90 | 37.70 | 0.0839 | 0.0962 | 0.1644 | 2.56 | 0.42 |
| 10 | 32.71 | 37.74 | 0.0834 | 0.0963 | 0.1644 | 2.56 | 0.42 |
| 11 | 32.77 | 37.71 | 0.0836 | 0.0962 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 12 | 32.54 | 37.58 | 0.0830 | 0.0959 | 0.1644 | 2.56 | 0.42 |
| 13 | 32.05 | 37.69 | 0.0818 | 0.0962 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 14 | 32.64 | 37.51 | 0.0833 | 0.0957 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 15 | 32.00 | 38.50 | 0.0816 | 0.0982 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 16 | 32.00 | 38.26 | 0.0816 | 0.0976 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 17 | 31.08 | 37.43 | 0.0793 | 0.0955 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 18 | 31.22 | 37.57 | 0.0796 | 0.0958 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 19 | 31.30 | 37.59 | 0.0799 | 0.0959 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 20 | 31.75 | 38.05 | 0.0810 | 0.0971 | 0.1644 | 2.56 | 0.42 |
| 21 | 31.52 | 37.83 | 0.0804 | 0.0965 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 22 | 30.99 | 37.49 | 0.0791 | 0.0956 | 0.1644 | 2.54 | 0.42 |
| 23 | 31.81 | 37.92 | 0.0812 | 0.0967 | 0.1644 | 2.54 | 0.42 |
| 24 | 30.57 | 37.28 | 0.0780 | 0.0951 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 25 | 31.74 | 37.71 | 0.0810 | 0.0962 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 26 | 31.27 | 37.65 | 0.0798 | 0.0961 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 27 | 32.48 | 37.91 | 0.0829 | 0.0967 | 0.1644 | 2.54 | 0.42 |
| 28 | 31.72 | 37.94 | 0.0809 | 0.0968 | 0.1644 | 2.56 | 0.42 |
| 29 | 32.09 | 37.81 | 0.0819 | 0.0965 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 30 | 31.15 | 37.73 | 0.0795 | 0.0963 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |
| 31 | 31.95 | 38.02 | 0.0815 | 0.097 | 0.1644 | 2.55 | 0.42 |

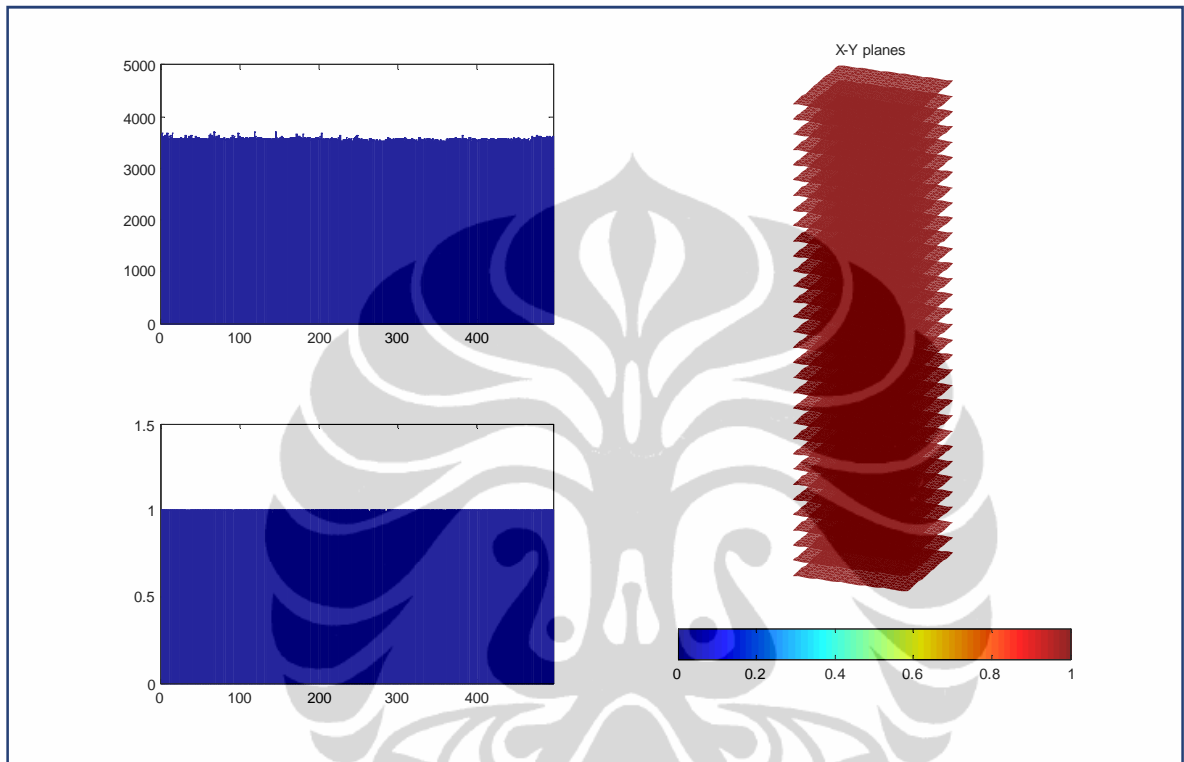
Dari Tabel 4.6 dan Tabel 4.3 terlihat bahwa sensitifitas dan resolusi sama walaupun nilai kapasitansi ada perbedaan dan noise juga ada perbedaan. Ini disebabkan luas area sensor segitiga dan hexagonal hampir sama sehingga menyebabkan sensitifitas dan resolusi sama.

4.8. Eksperimen DAS ECVT

Dalam sub berikut akan dilakukan percobaan DAS ECVT untuk rekonstruksi citra, sensor yang digunakan segienam 32 elektroda 4 tingkat.

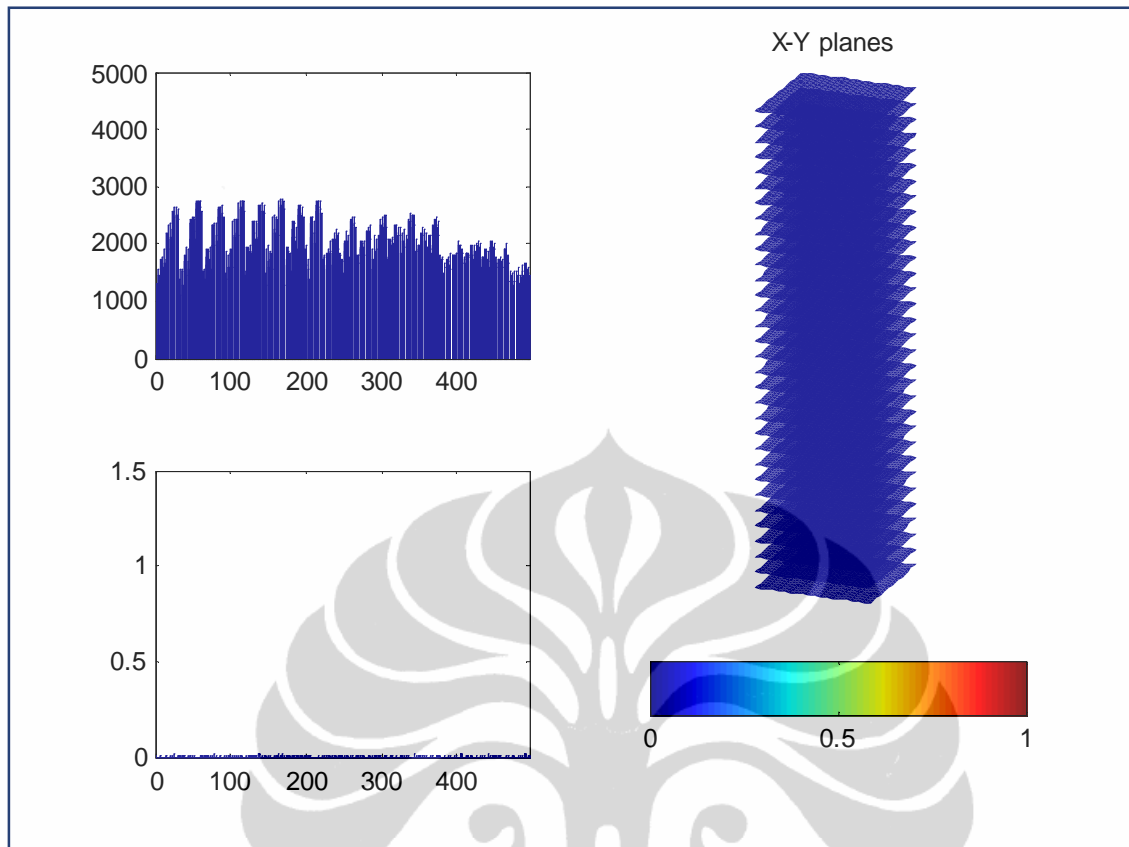
4.8.1. Percobaan Menggunakan Air dan Udara

Percobaan pertama digunakan air dan udara dengan permitifitas $\epsilon=80$ dan $\epsilon=1$. Kemudian air dalam tabung dikurangi dan diberi benda lain kemudian dilihat hasil rekonstruksinya. Gambar 4.14 dan Gambar 15 memperlihatkan hasil rekonstruksi air dan udara.



Gambar 4.14. Hasil Rekonstruksi Citra Menggunakan Air Dalam Keadaan Penuh

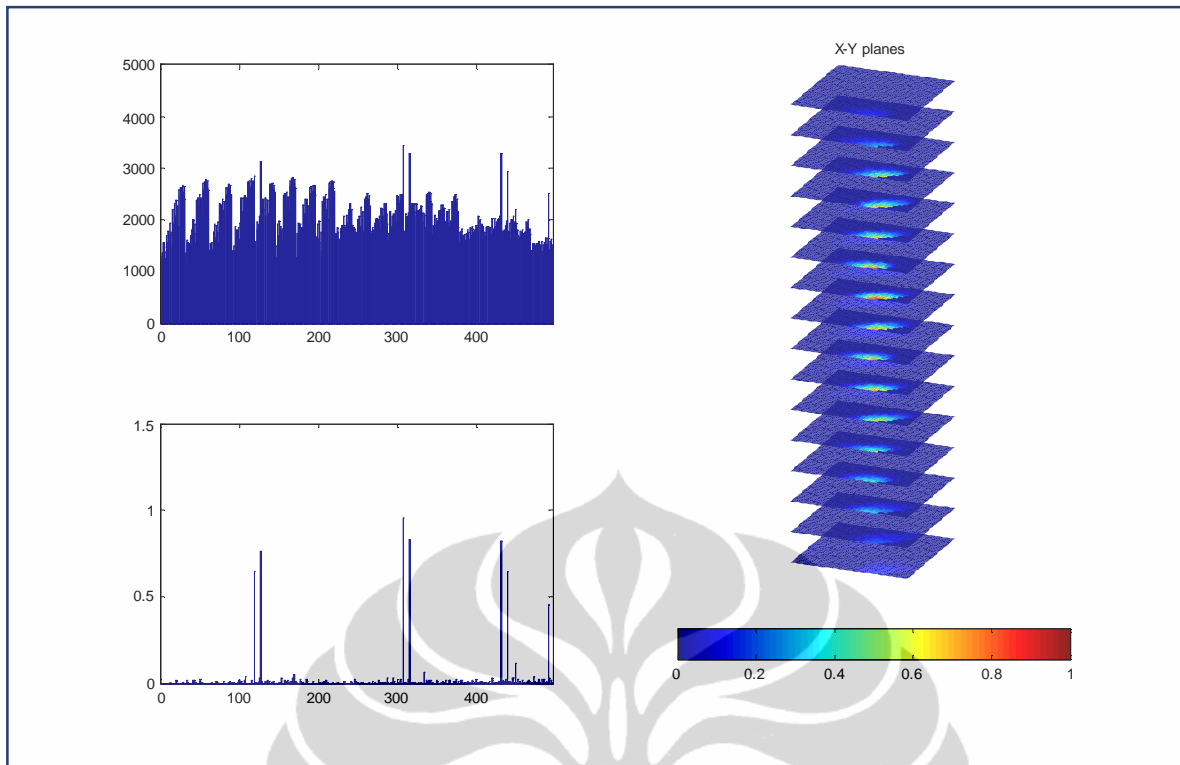
Dari Gambar 4.14 terlihat bahwa rekonstruksi citra menggunakan air dengan diisi penuh akan berwarna merah. Grafik batang di sebelah kiri atas menunjukkan data amplitudo tegangan dari masing-masing pasangan elektroda dengan jumlah data sebanyak 496 buah. Tegangan yang dihasilkan rata-rata sebesar 3500 mV. Sedangkan di sebelah kiri bawah menunjukkan data hasil normalisasi. Data hasil normalisasi ini yang digunakan untuk proses rekonstruksi citra seperti tampak pada Gambar di sebelah kanan.



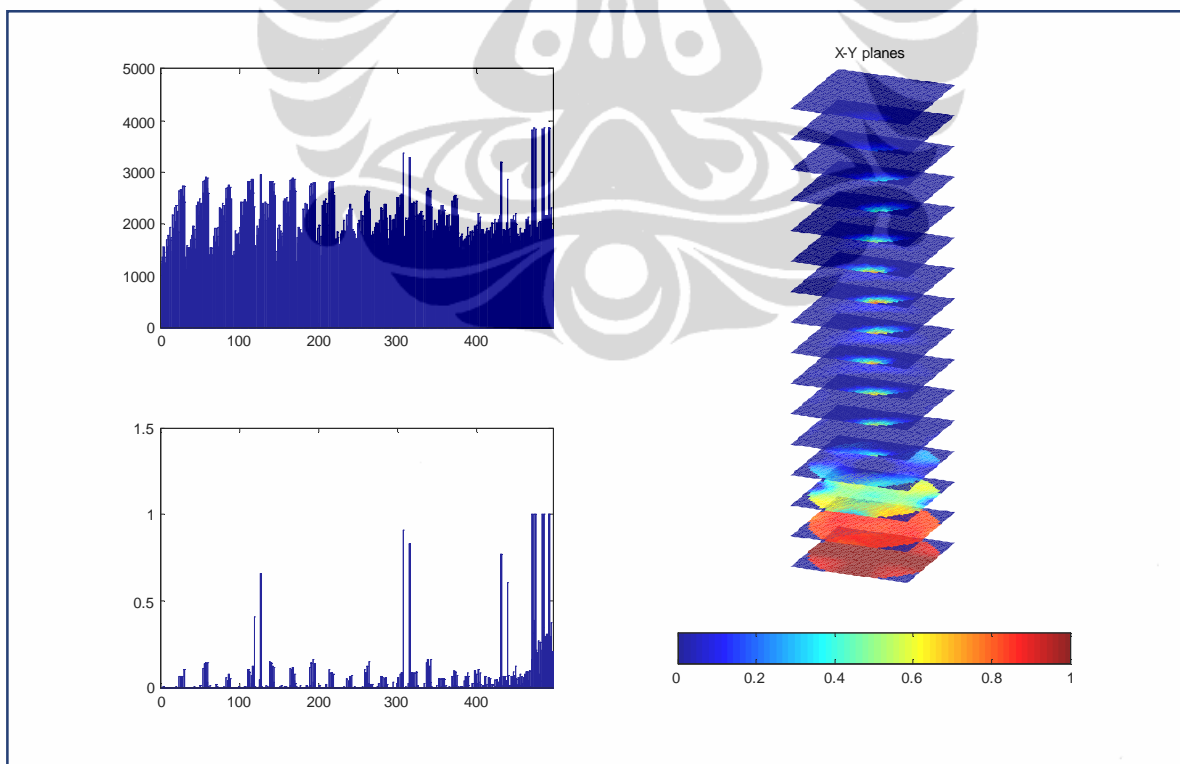
Gambar 4.15. Hasil Rekonstruksi Citra Menggunakan Udara

Gambar 4.15 memperlihatkan hasil rekonstruksi citra menggunakan udara. Hasil yang diperoleh menunjukkan gambar berwarna biru yang menandakan kosong (udara). Grafik batang disebelah kiri atas menunjukkan amplitudo tegangan dari masing-masing pasangan elektroda yang sedang aktif. Pada saat kosong (udara) tegangan yang dihasilkan bervariasi ada yang rendah dan ada yang tinggi. Berbeda dengan eksperimen menggunakan air (penuh) yang memiliki tegangan rata 3500 mV. Dalam proses rekonstruksi citra ini tidak menjadi masalah karena data yang direkonstruksi bukan data tegangan murni tetapi data hasil normalisasi seperti ditunjukkan dalam grafik batang sebelah kiri bawah. Pada saat kosong (berisi udara), grafik batang akan berada pada posisi mendekati nol.

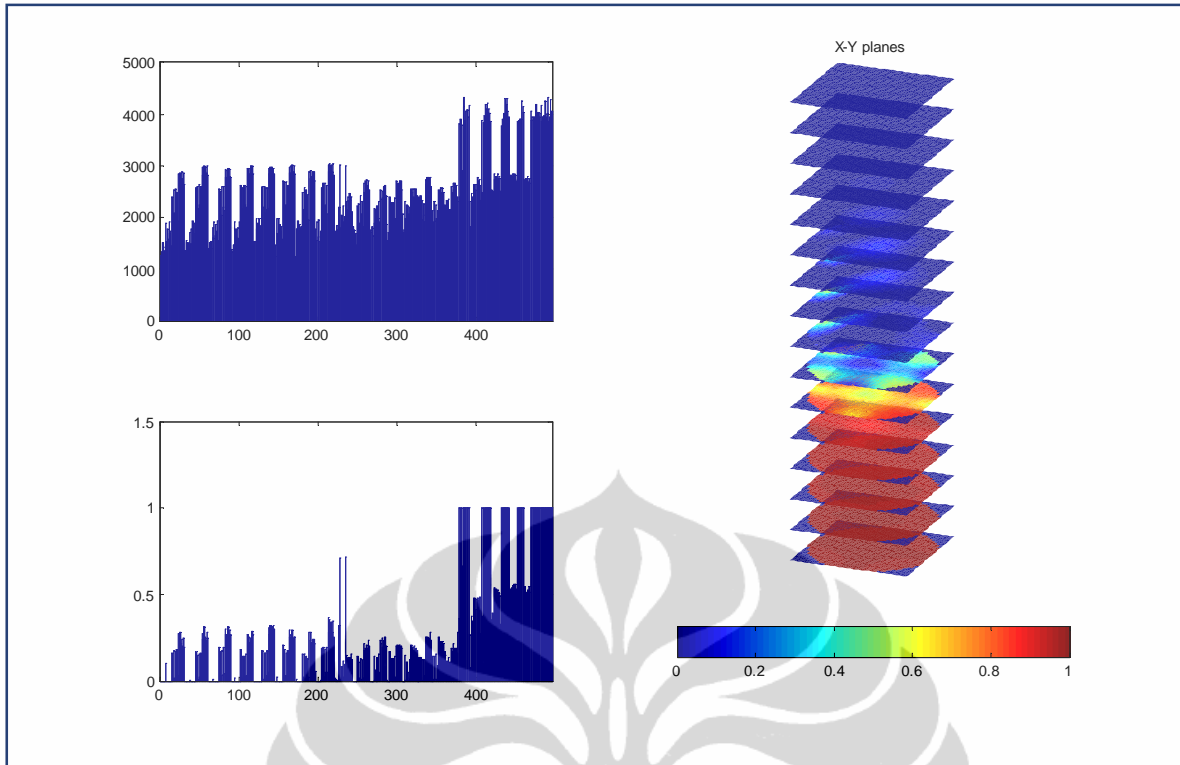
Selanjutnya dilakukan eksperimen tabung diisi dengan air sedikit, sedang, dan hampir penuh. Setelah penuh dengan air, tabung percobaan tadi diberi botol aqua 1 liter yang berisi udara kemudian dilihat hasil rekonstruksinya. Dan beberapa variasi percobaan yang lain akan diperlihatkan dalam Gambar 4.16 – Gambar 4.21.



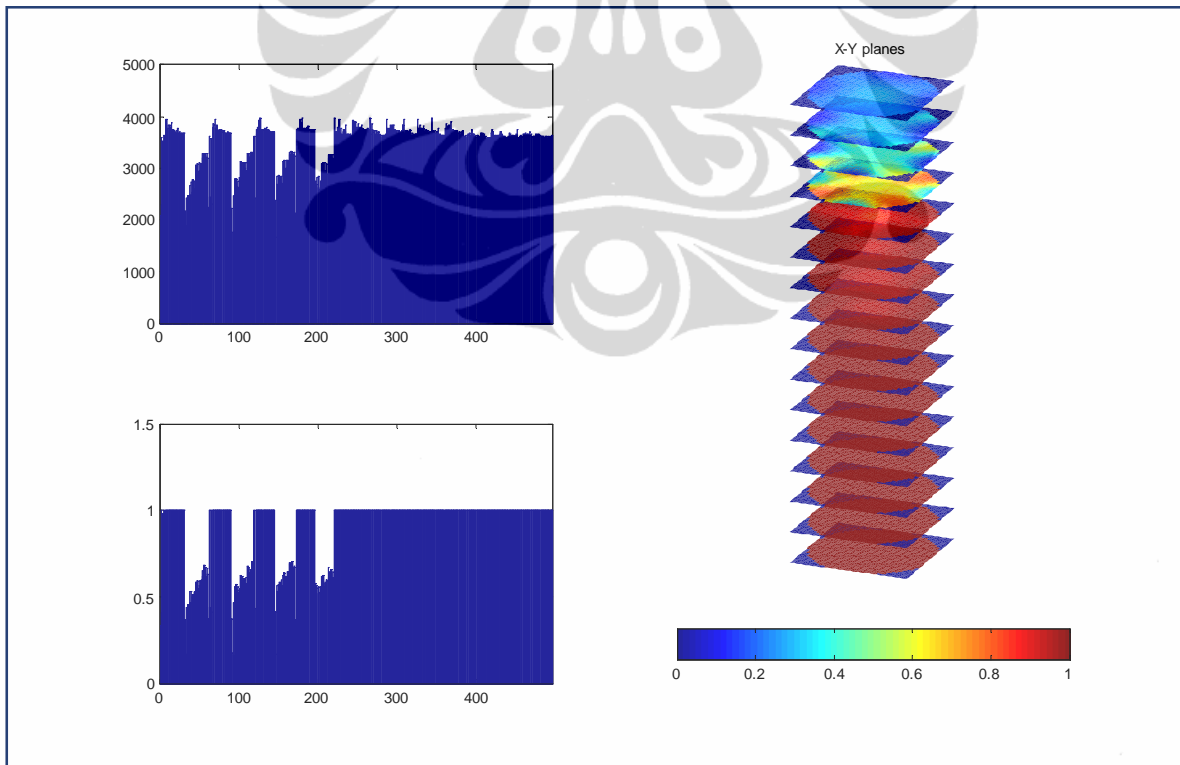
Gambar 4.16. Hasil Rekonstruksi Citra Aliran Air Pada Saat Pengisian Tabung



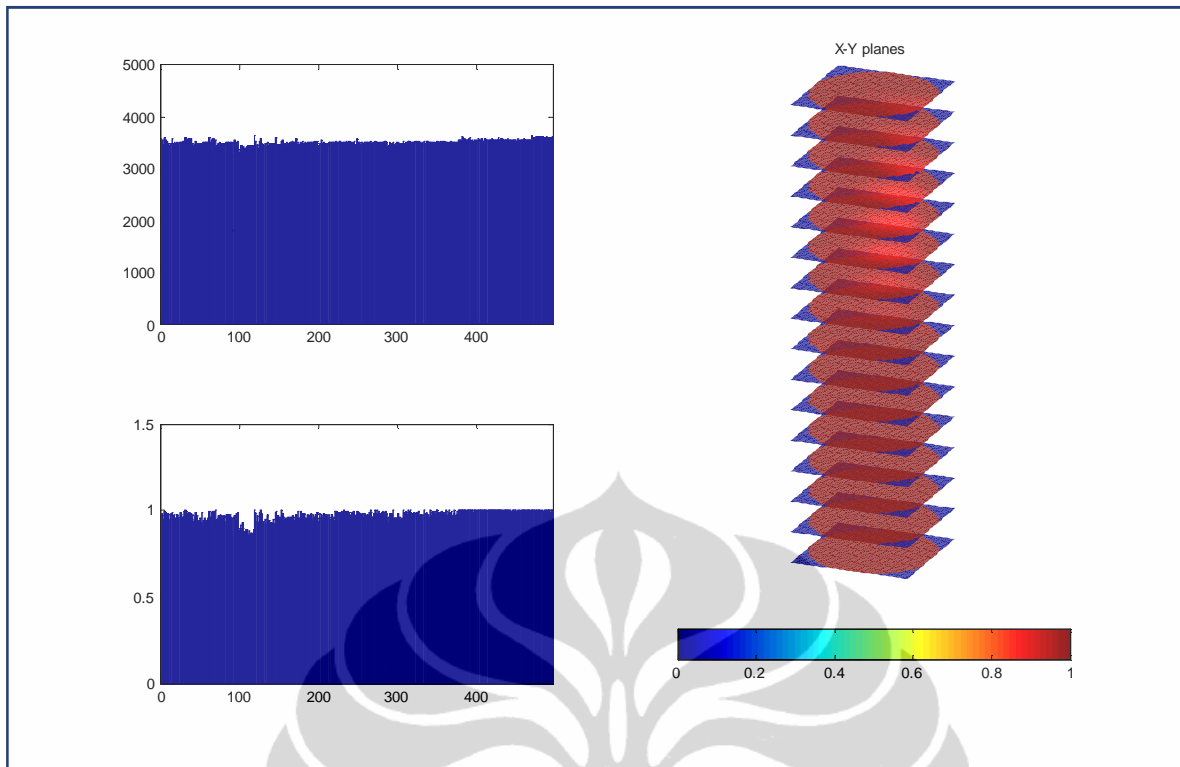
Gambar 4.17. Hasil Rekonstruksi Citra Tabung Berisi Air Sedikit



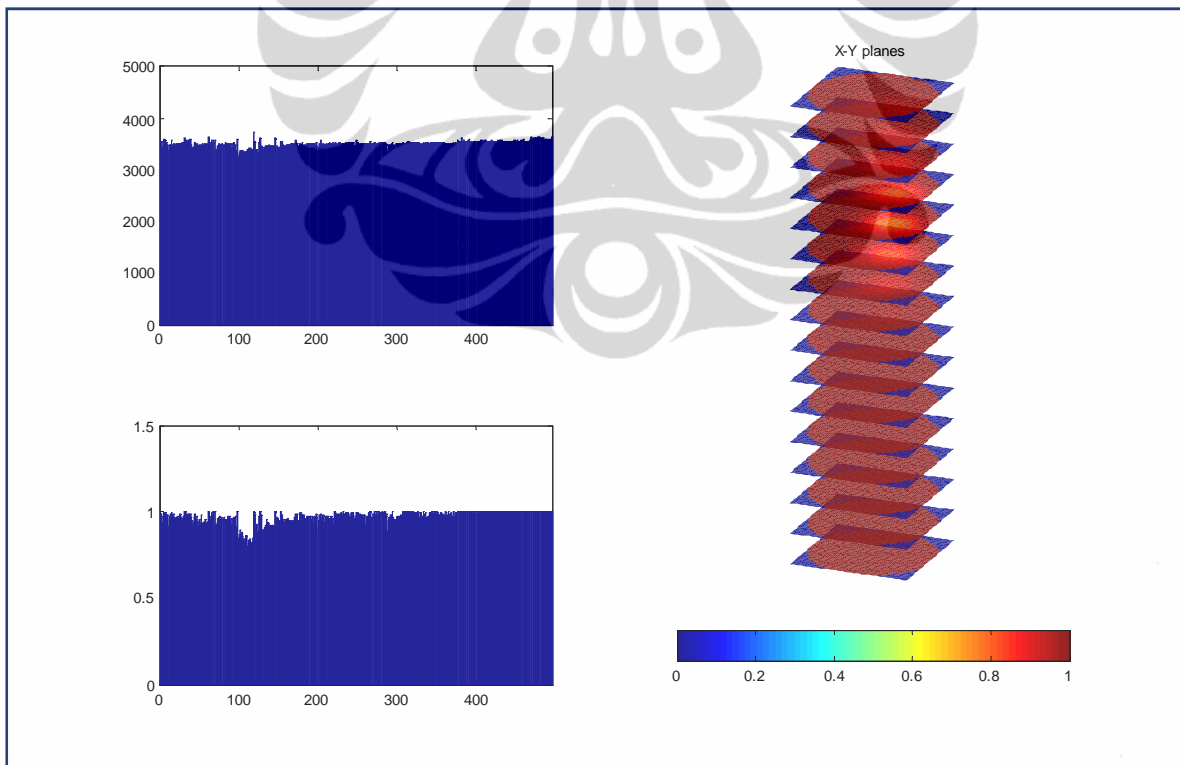
Gambar 4.18. Hasil Rekonstruksi Citra Tabung Berisi Air Agak Banyak



Gambar 4.19. Hasil Rekonstruksi Citra Tabung Berisi Air Hampir Penuh



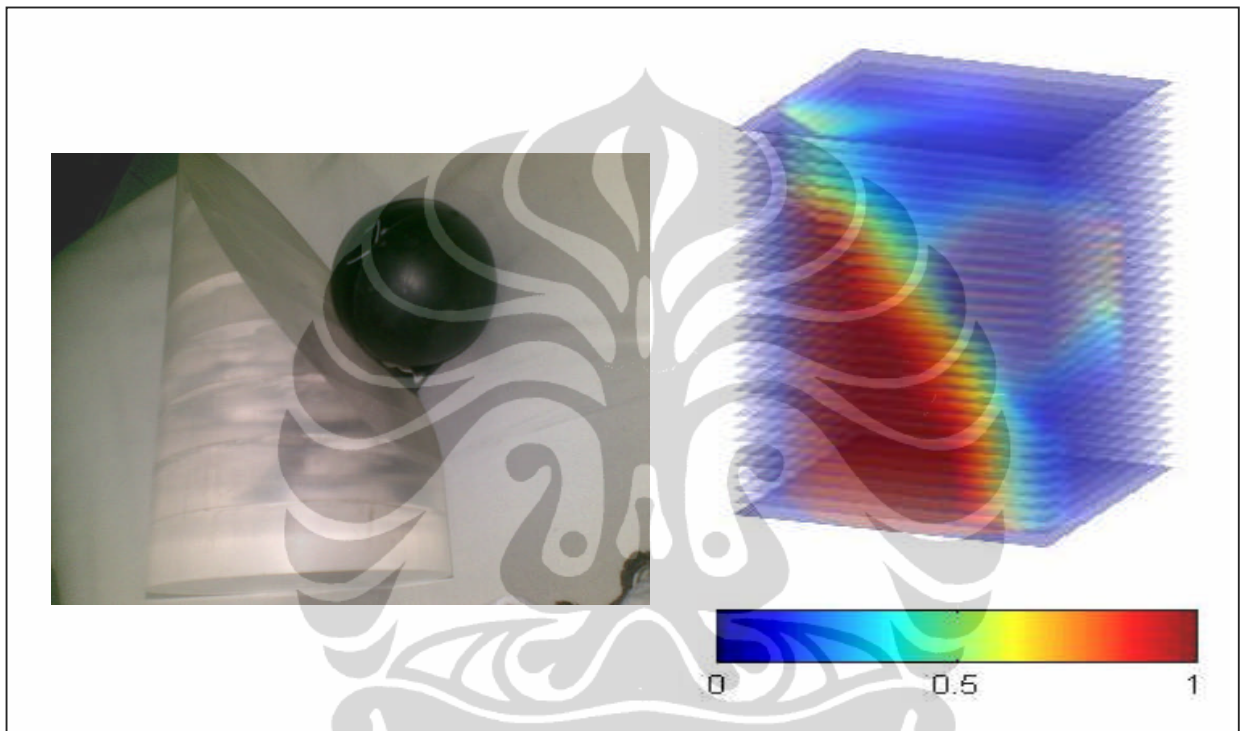
Gambar 4.20. Hasil Rekonstruksi Citra Tabung Berisi Air Penuh dan Diberi Tabung Aqua Yang Berisi Pasir



Gambar 4.21. Hasil Rekonstruksi Citra Tabung Berisi Air Penuh dan Diberi Tabung Aqua Yang Berisi Udara

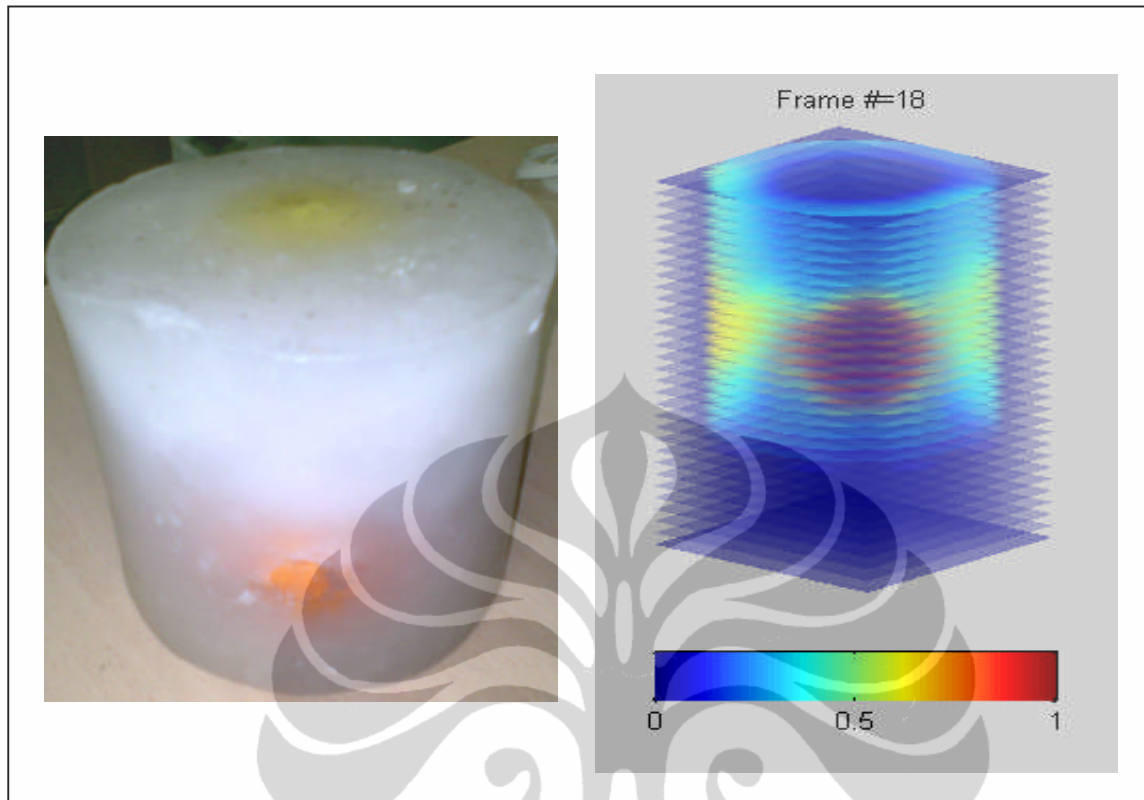
4.8.2. Percobaan Menggunakan Benda Lain

Selanjutnya dilakukan eksperimen dengan benda lain yang didesain menjadi bentuk tertentu, misal bulat, trapesium, kotak, dll. Kami tidak melakukan eksperimen tentang hasil rekonstruksi untuk benda-benda dengan bentuk tertentu. Hasil eksperimen diambil dari tim yang lain yang telah melakukannya. Gambar 4.22 – Gambar 4.24 Memperlihatkan hasil rekonstruksi untuk benda-benda dengan model tertentu.



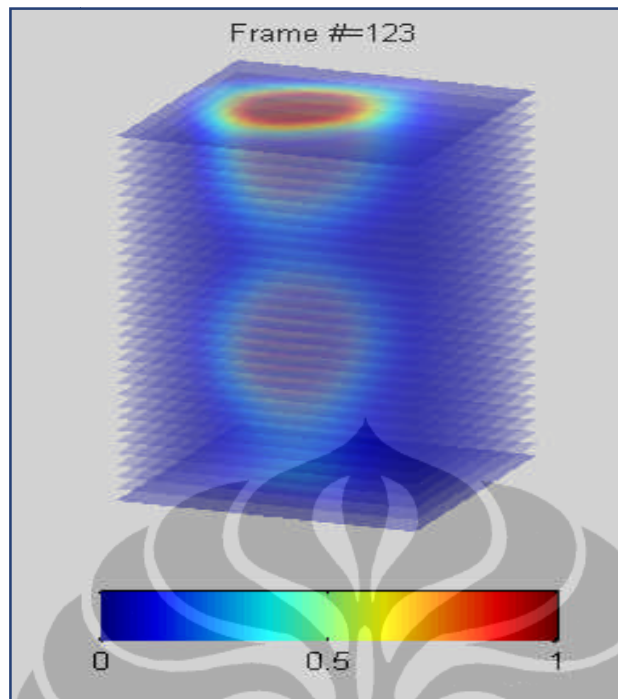
Gambar 4.22. Hasil Rekonstruksi Akrilic Dan Bola Karet Pejal

Gambar 4.22 memperlihatkan hasil rekonstruksi akrilic dengan permitifitas $\varepsilon=3$ dan bola karet pejal dengan permitifitas $\varepsilon=30$. Gambar sebelah kiri menunjukkan benda yang akan di rekonstruksi citranya, sedangkan gambar di sebelah kanan menunjukkan hasil rekonstruksi citra. Hasil rekonstruksi menunjukkan bahwa citra yang dihasilkan mirip dengan aslinya.

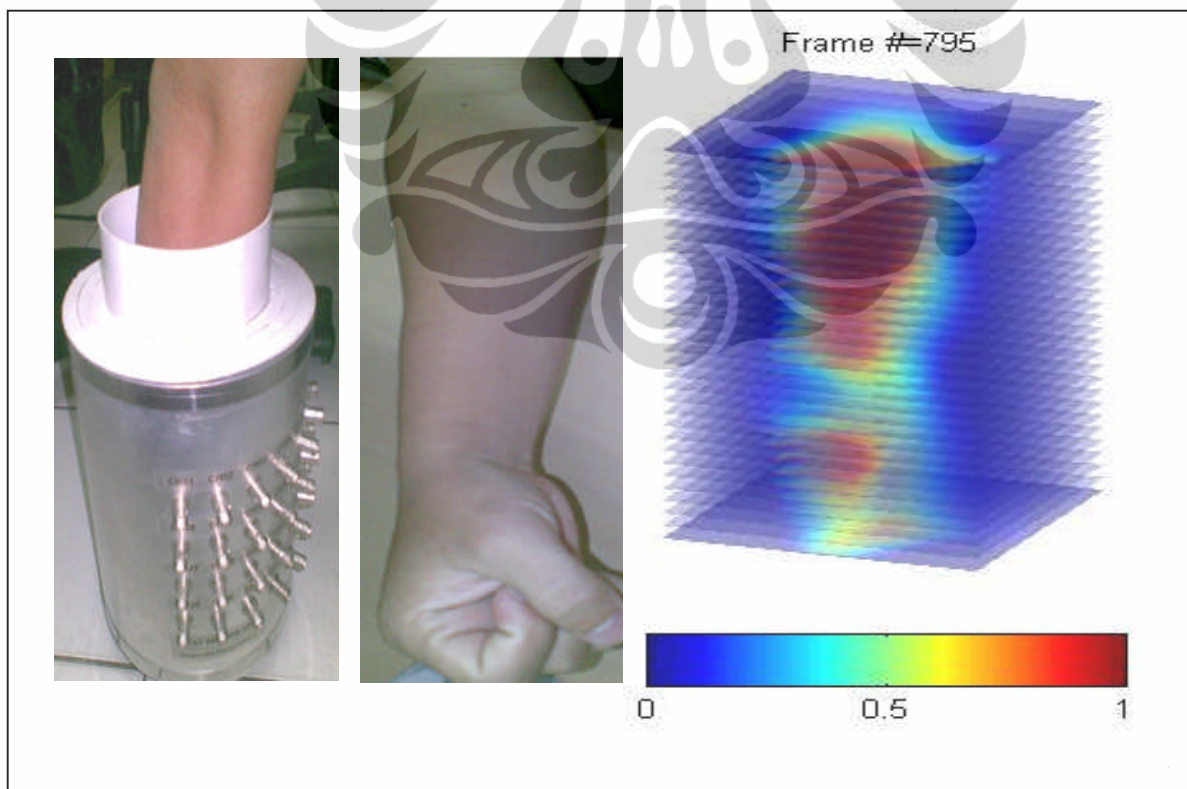


Gambar 4.23. Hasil Rekonstruksi Campuran Parafin, Air, Dan Udara

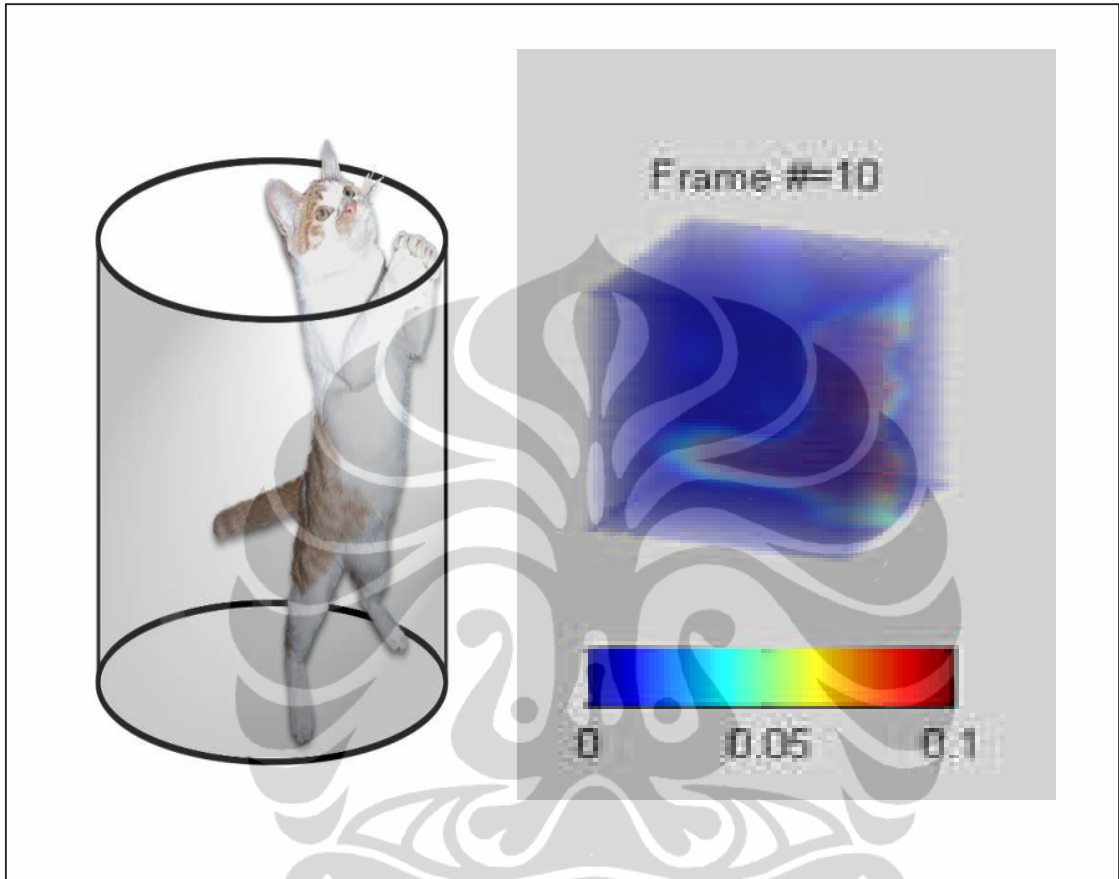
Gambar 4.23 memperlihatkan rekonstruksi citra dengan campuran bahan, yaitu parafin dengan permitifitas $\epsilon=2$, air dengan permitifitas $\epsilon=80$, dan udara dengan permitifitas $\epsilon=1$. Gambar sebelah kiri menunjukkan benda yang akan di rekonstruksi citranya, sedangkan gambar di sebelah kanan menunjukkan hasil rekonstruksi citra. Hasil rekonstruksi menunjukkan bahwa citra yang dihasilkan mirip dengan aslinya. Citra diambil pada saat benda sedang bergerak jatuh kebawah dengan pelan. Dari gambar terlihat bahwa pada bagian bawah terlihat berwarna biru yang menandakan tabung masih berisi udara. Gambar 4.25 dan Gambar 4.26 menunjukkan hasil rekonstruksi citra untuk jaringan hidup seperti tangan manusia dan seekor kucing.



Gambar 4.24. Hasil Rekonstruksi Citra Untuk Bola Karet Pejal

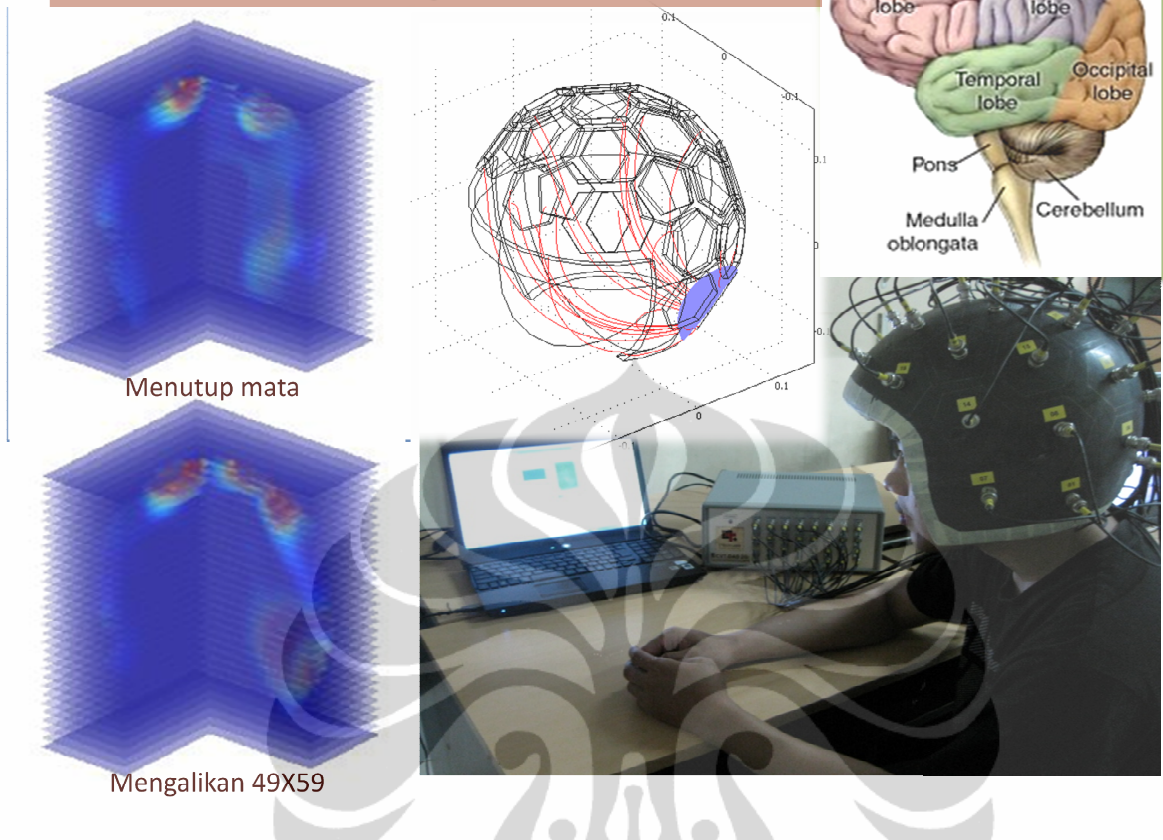


Gambar 4.25. Hasil Rekonstruksi Citra Tangan Manusia



Gambar 4.26. Hasil Rekonstruksi Citra Seekor Kucing

4D Brain Activity ECVT Scanner



Gambar 4.27. Hasil Rekonstruksi Citra Aktifitas Otak

BAB 5 PENUTUP

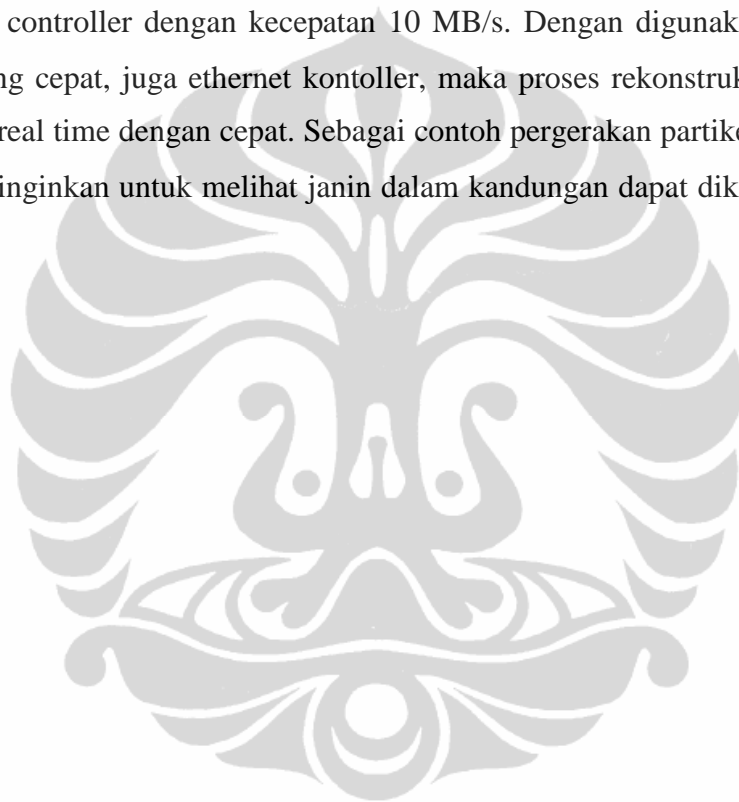
5.1. Kesimpulan

Telah dikembangkan sistem data akuisisi *electrical capacitance volume tomography* (DAS ECVT) yang telah mampu mengukur kapasitansi dalam orde femto farad. Beberapa kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

- Sistem DAS ECVT yang dikembangkan menggunakan satu sinyal kondisioning untuk 32 elektroda.
- Sistem scanning antara pasangan elektroda menggunakan multiplexer berupa switch analog.
- Switch multiplexer analog dibagi menjadi empat kelompok untuk memudahkan pengontrolan.
- Frekuensi yang digunakan dalam DAS ECVT sebesar 500 KHz berbentuk pulsa, amplitudo tegangan 10 volt dan kemiringan pulsa sebesar 240 ns.
- Digunakan mikrokontroler Atmel AT32UC321512A untuk memproses dan mengontrol scanning sensor.
- Setelah dilakukan eksperimen, sistem DAS ECVT mampu mendeteksi perubahan kapasitansi dengan resolusi 0.21 femto farad untuk elektroda yang dekat dengan transmitter dan 0.42 femto farad untuk elektroda yang jauh dengan transmitter. Sedangkan sensitifitas sistem ini adalah 0.2551 fF/mV (femto farad per milivolt).
- Skala perbedaan maksimal dalam keadaan kosong (yang berisi udara) dan dalam keadaan penuh (yang berisi air) adalah 7 femto farad.
- Besarnya noise yang dapat terukur sebesar 0.0822 mV untuk elektroda yang dekat dengan transmitter dan 0.1644 mV untuk elektroda yang jauh dari transmitter. Noise diukur pada tegangan output charge discharge.
- Setelah dilakukan eksperimen menggunakan beberapa benda uji dapat menghasilkan citra yang mirip dengan aslinya.
- Setelah dilakukan eksperimen menggunakan jaringan hidup seperti tangan dan binatang kecil seperti kucing, sistem DAS ECVT mampu menghasilkan citra yang bagus dan dengan bentuk yang mirip dengan aslinya.

5.2. Saran

Pengembangan sistem data akuisisi ECVT masih terus dilanjutkan. Dengan memperbaiki rangkaian charge/discharge dan switch diharapkan dapat mengurangi noise dan memperbesar sensitivitas dan resolusi dan diharapkan mampu menghasilkan citra yang lebih bagus. Untuk mempercepat proses scanning dan transfer data ke komputer bisa digunakan *field programmable gate array* (FPGA) dengan *analog to digital conversion* yang cepat dan juga *digital to analog conversion* (DAC) yang cepat juga misal menggunakan adc dan dac 2 GS/s. Untuk mempercepat transfer data ke komputer dapat digunakan ethernet controller dengan kecepatan 10 MB/s. Dengan digunakannya FPGA, ADC dan DAC yang cepat, juga ethernet kontoller, maka proses rekonstruksi citra dapat ditampilkan secara real time dengan cepat. Sebagai contoh pergerakan partikel debu, aliran minyak atau jika diinginkan untuk melihat janin dalam kandungan dapat diketahui dengan jelas dan cepat.



DAFTAR REFERENSI

- [1] Warsito, Qussai Marshdeh, Liang-Shih Fan, April 2007, "Electrical Capacitance Volume Tomography" IEEE Sensor Journal, Vol.7, No. 4, pp. 525 – 535.
- [2] Warsito and L-S Fan, *Development Of 3-Dimensional Electrical Capacitance Tomography Based On Neural Network Multi-Criterion Optimization Image Reconstruction*, Department of Chemical Engineering, The Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA.
- [3] Philip Williams and Trevor York, *Evaluation of Integrated Electrodes for Electrical Capacitance Tomography*, *Tomography*, Dept of Electrical Eng and Electronics, UMIST, PO Box 88, Manchester, M60 1QD.
- [4] Arba'i Yusuf, Wahyu Widada, Warsito, 12-13 Maret 2009, "Rancang Bangun Sistem Data Akuisisi Electrical Capacitance Tomography (ECT) 8 Channel", Prosiding Seminar Nasional Teknologi Informasi Dan Aplikasinya (SENTIA), Politeknik Negeri Malang, , pp H-48.
- [5] F T Kuhn, P A van Halderenz, 1997, "Design Of An Active-Differentiator-Based Capacitance Transducer For Electrical Capacitance Tomography", Department of Chemical Process Technology, Delft University of Technology, , pp. 947 – 950.
- [6] W Q Yang, *Hardware Design Of Electrical Capacitance Tomography Systems*, Department of Electrical Engineering and Electronics, Process Tomography Group, UMIST, PO Box 88, Manchester M60 1QD, UK. *International Conference Pattern Recognition*, Barcelona, Spain, Vol. 2, pp. 676-679.
- [7] W Q Yang, *Charge Injection Compensation For Charge/Discharge Capacitance Measuring Circuits Used In Tomography Systems*, Department of Electrical Engineering and Electronics, Process Tomography Group, UMIST, PO Box 88, Manchester M60 1QD, UK.
- [8] Stuart Haslam, May 2003, *Network Connectivity for Embedded Systems*, BSc Computer and Network Technology.
- [9] Arba'i Yusuf, Wahyu Widada, 20 Februari 2010, *Pengaruh Kemiringan Clock terhadap Sensitivitas Rangkaian ECVT 32 Channel*, Prosiding Seminar Nasional Basic Science 7 (BSS7), Universitas Brawijaya, Malang, Vol. 4, pp. IV-1 – IV-7.
- [10] R A William, M S Beck, 1995, *Process Tomography Principles Techniques and Applications*, Butterworth Heinemann, Linaere House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP.
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Relative_permittivity diakses tanggal 21 April 2010
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Rise_time diakses tanggal 24 April 2010

