



UNIVERSITAS INDONESIA

PENGUKUR KAPASITANSI

SKRIPSI

David Sitompul
0606039751

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Program Studi Fisika
Depok
Juli 2010



UNIVERSITAS INDONESIA

PENGUKUR KAPASITANSI

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains

David Sitompul
0606039751

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Program Studi Ekstensi Fisika
Instrumentasi Elektronika
Depok
2010

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : David Sitompul

NPM : 0606039751

Tanda Tangan :

Tanggal : 1 Juli 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : David Sitompul
NPM : 0606039751
Program Studi : Ekstensi Fisika
Judul Skripsi : Pengukur Kapasitansi

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Prawito (.....)
Penguji I : Dr. Sastra Kusumawijaya (.....)
Penguji II : Dr. Supriyanto (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 1 Juli 2010

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Sains Jurusan Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Prawito, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Dr. Sastra Kusumawijaya dan Dr. Supriyanto sebagai penguji dan segala diskusi berharga yang memperkaya karya ilmiah ini;
- (3) pihak Administrasi Akademik Ekstensi Fisika FMIPA-UI dan Sub Bagian Akademik FMIPA-UI;
- (4) orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- (5) sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini, khususnya Sahang Simatupang dan Donny Simanjuntak.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yesus Kristus berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, Juli 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : David Sitompul

NPM : 0606039751

Program Studi : Ekstensi Fisika

Departemen : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Jenis karya : Skripsi

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

Pengukur Kapasitansi

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada tanggal: 1 Juli 2010

Yang menyatakan

(David Sitompul)

ABSTRAK

Nama : David Sitompul
Program Studi : Ekstensi Fisika
Judul : Pengukur Kapasitansi

Telah dibuat Capacitance Meter yang merupakan alat ukur untuk kapasitor non-polar. Karakteristiknya antara lain, tingkat kesalahan 1% pada skala maksimum 40 pF (piko farad), jangkauannya 3 dekade, derau dan arus drift rendah. Secara praktis (implementatif), mudah dibuat, menggunakan rangkaian op amp yang umum, rangkaian dapat di-pra implementasi-kan pada protoboard dalam waktu singkat (hitungan menit), memecahkan solusi kecepatan bagi kapasitor berharga kecil.

Kata kunci:
Capacitance Meter, Kapasitor non-polar

ABSTRACT

Name : David Sitompul
Study Program : Physics
Title : Capacitance Meter

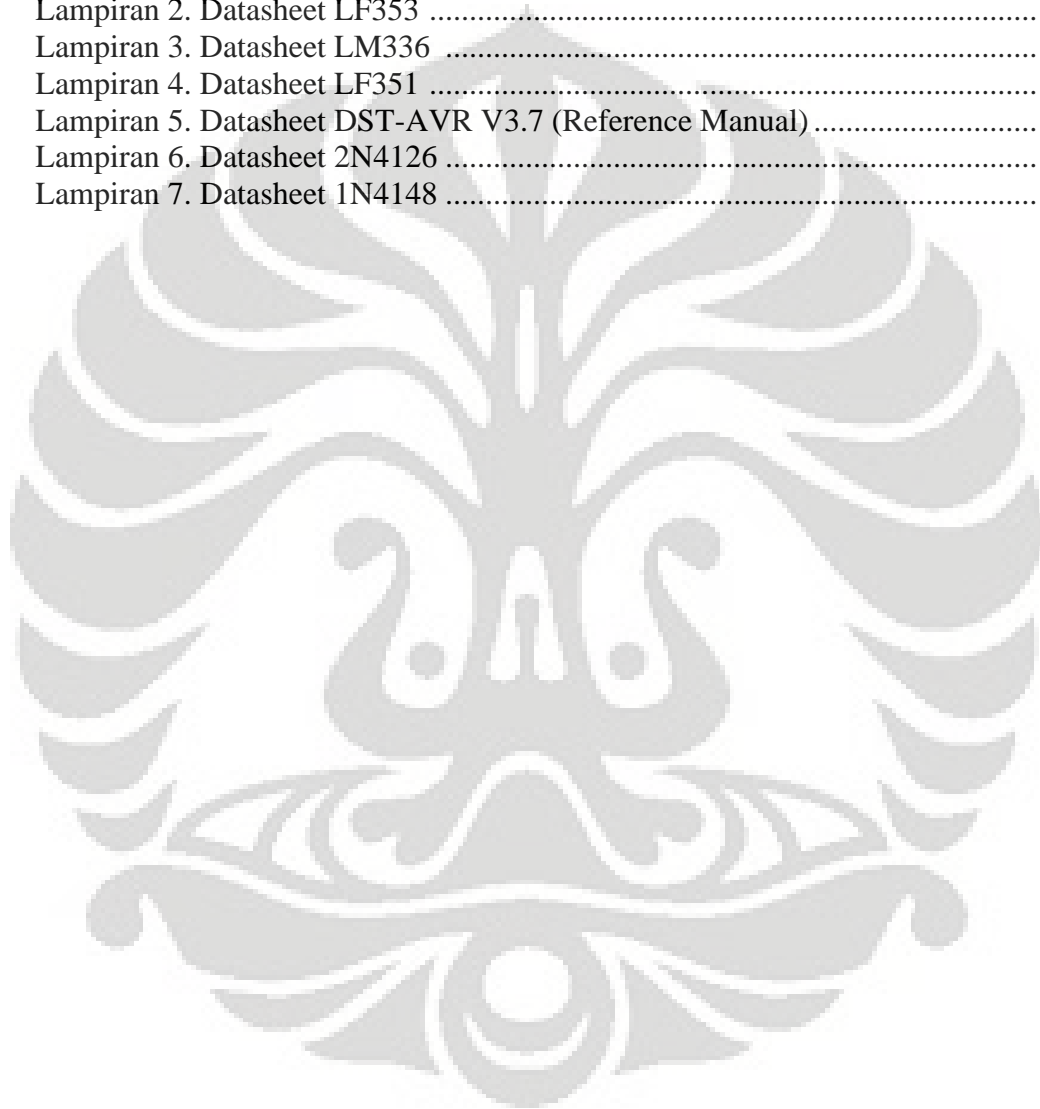
It had been made a Capacitance Meter which is the measurement instrument for non-polar capacitors. It has characteristics: 1% error on maximum scale 40 pF (picofarad), 3 decades of range, low noise and drift. Practically, it is easy to construct, using common op amp circuitry, can breadboard it in minutes. It solves the speed problem for small capacitors.

Key words:
Capacitance Meter, non-polar Capacitors

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR DAN TABEL	viii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	2
1.5 Batasan Penelitian	2
2. TEORI UMUM	3
2.1 Metode pengukuran kapasitansi	3
2.2 Op-Amp sebagai pembanding (<i>comparator</i>)	5
2.3 Pembangkit gelombang segitiga	5
2.4 Mikrokontroler AVR ATMEGA 8535	6
2.5 Penampil LCD 16x2 M1632	9
3. METODE DAN PEMBUATAN ALAT	11
3.1 Diagram sistem	11
3.2 Implementasi alat	11
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	16
4.1 Hasil pengukuran	17
A.1 Pada jangkauan 0 – 40 pF; Untuk nilai kapasitor C = 10 pF	17
A.2 Pada jangkauan 0 – 40 pF; Untuk nilai kapasitor C = 22 pF	18
A.3 Pada jangkauan 0 – 40 pF; Untuk nilai kapasitor C = 27 pF	17
A.4 Pada jangkauan 0 – 40 pF; Untuk nilai kapasitor C = 33 pF	18
A.5 Pada jangkauan 0 – 40 pF; Untuk nilai kapasitor C = 39 pF	18
B.1 Pada jangkauan 0 – 400 pF; Untuk nilai kapasitor C = 100 pF	17
B.2 Pada jangkauan 0 – 400 pF; Untuk nilai kapasitor C = 220 pF	18
B.3 Pada jangkauan 0 – 400 pF; Untuk nilai kapasitor C = 330 pF	17
B.4 Pada jangkauan 0 – 400 pF; Untuk nilai kapasitor C = 370 pF	18
B.5 Pada jangkauan 0 – 400 pF; Untuk nilai kapasitor C = 390 pF	18
C.1 Pada jangkauan 0 – 4 nF; Untuk nilai kapasitor C = 1 nF	17
C.2 Pada jangkauan 0 – 4 nF; Untuk nilai kapasitor C = 2,2 nF	18
C.3 Pada jangkauan 0 – 4 nF; Untuk nilai kapasitor C = 2,7 nF	17
C.4 Pada jangkauan 0 – 4 nF; Untuk nilai kapasitor C = 3,3 nF	18
C.5 Pada jangkauan 0 – 4 nF; Untuk nilai kapasitor C = 3,9 nF	18

5. KESIMPULAN DAN SARAN	25
5.1 Kesimpulan	25
5.2 Saran pengembangan	25
DAFTAR ACUAN	26
DAFTAR LAMPIRAN	27
Lampiran 1. Datasheet LM311	
Lampiran 2. Datasheet LF353	
Lampiran 3. Datasheet LM336	
Lampiran 4. Datasheet LF351	
Lampiran 5. Datasheet DST-AVR V3.7 (Reference Manual).....	
Lampiran 6. Datasheet 2N4126	
Lampiran 7. Datasheet 1N4148	



DAFTAR GAMBAR DAN TABEL

Gambar 2.1. Skematik rangkaian secara menyeluruh.

Gambar 2.2. Rangkaian kapasitor acuan.

Gambar 2.3. Arsitektur ATMEGA8535

Gambar 2.4. IC ATMEGA 8535 dan pin-pinnya.

Gambar 2.5. Skematik antarmuka LCD 16x2 M1632.

Gambar 3.1. Diagram skematik sistem ukur Capacitance Meter.

Gambar 4.1. Grafik hasil pengukuran untuk $C = 3,3 \text{ nF}$.

Gambar 4.2. Grafik hasil pengukuran untuk $C = 1 \text{ nF}$.

Gambar 4.3. Grafik hasil pengukuran untuk $C = 220 \text{ pF}$.

Gambar 4.4. Grafik hasil pengukuran untuk $C = 82 \text{ pF}$.

Gambar 4.5. Grafik hasil pengukuran untuk $C = 30 \text{ pF}$.

Gambar 4.6. Grafik hasil pengukuran untuk $C = 3 \text{ pF}$.

Tabel 4.1. Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 3,3 \text{ nF}$.

Tabel 4.2. Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 1 \text{ nF}$.

Tabel 4.3. Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 220 \text{ pF}$.

Tabel 4.4. Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 82 \text{ pF}$.

Tabel 4.5. Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 30 \text{ pF}$.

Tabel 4.6. Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 3 \text{ pF}$.

ABSTRAK

Nama : David Sitompul
Program Studi : Ekstensi Fisika
Judul : Pengukur Kapasitansi

Telah dibuat Capacitance Meter yang merupakan alat ukur untuk kapasitor non-polar. Karakteristiknya antara lain, tingkat kesalahan 1% pada skala maksimum 40 pF (piko farad), jangkauannya 3 dekade, derau dan arus drift rendah. Secara praktis (implementatif), mudah dibuat, menggunakan rangkaian op amp yang umum, rangkaian dapat di-pra implementasi-kan pada protoboard dalam waktu singkat (hitungan menit), memecahkan solusi kecepatan bagi kapasitor berharga kecil.

Kata kunci:
Capacitance Meter, Kapasitor non-polar

ABSTRACT

Name : David Sitompul
Study Program : Physics
Title : Capacitance Meter

It had been made a Capacitance Meter which is the measurement instrument for non-polar capacitors. It has characteristics: 1% error on maximum scale 40 pF (picofarad), 3 decades of range, low noise and drift. Practically, it is easy to construct, using common op amp circuitry, can breadboard it in minutes. It solves the speed problem for small capacitors.

Key words:
Capacitance Meter, non-polar Capacitors

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemajuan ilmu pengetahuan, sedikit-banyak telah mempengaruhi kehidupan, bahkan perilaku manusia dalam taraf tertentu. Teknologi elektronika pun berkembang seiring dengan tuntutan berbagai kebutuhan, khususnya dalam bidang pengukuran dan instrumentasi elektronika. Banyak hal mengenai pengembangannya, sangat ditentukan oleh pengukuran besaran-besaran elektronika yang terkait. Oleh karena itu, diperlukan alat ukur elektronika yang memiliki kemampuan pengukuran besaran sesuai kebutuhan. Pada saat sekarang terdapat banyak alat ukur terutama alat ukur komponen. Dalam proyek elektronika komponen yang mutlak harus diketahui nilainya adalah komponen dasar seperti: resistor, kapasitor, induktor. Ada alat ukur dalam suatu instrumen terdapat beberapa kemampuan pengukuran seperti *Voltmeter*, *Ohmmeter*, *Kapasitansmeter* yang dijadikan satu instrumen yang disebut *Multimeter*. Alat ini disamping harganya relatif mahal, juga dalam hal-hal tertentu dalam pemakaiannya mempunyai kekurangan dalam hal faktor ketelitian dan *range* pengukuran.

Kapasitor memiliki peranan penting dibidang elektronika, antara lain diaplikasikan dalam rangkaian elektronika yaitu untuk memilih frekuensi pada radio penerima, meratakan fluktuasi tegangan dan sebagainya. Banyak nilai kapasitor yang nilainya sulit diterjemahkan yaitu ketika kapasitor bernilai kecil dan memiliki warna cetak yang kurang jelas. Dari permasalahan tersebut maka dirancang alat ukur kapasitansi meter agar memperoleh nilai kapasitansi yang lebih spesifik, dimana ketelitian dan *range* pengukuran dapat direncanakan.

Berkaitan dengan masalah tersebut perlu dikembangkan suatu alat yang dapat mengetahui nilai kapasitor dengan teliti. Komponen-komponen elektronika yang berhubungan dengan alat ukur kapasitansi diantaranya ada IC, transistor, kapasitor, dioda, resistor dan komponen-komponen lain yang berhubungan dengan alat ini.

1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang coba diselesaikan melalui karya ilmiah ini adalah membuat suatu sistem alat ukur kapasitansi dengan penampil (*display*) LCD.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dan pembuatan alat ukur kapasitansi ini adalah :

1. Membuat rangkaian Capacitance Meter untuk mengetahui suatu nilai kapasitor.
2. Dapat merancang dan mengkonstruksikan sebuah alat ukur elektronik untuk mengukur besar kapasitansi suatu kapasitor, dimana hasil pengukuran ditunjukkan oleh penampil (*display*) LCD setelah mengalami pengolahan sinyal terintegrasi oleh mikrokontroler.
3. Sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains, kemudian dapat pula sebagai langkah awal mencoba merambah ke penelitian nilai kapasitansi sampai taraf rendah dan presisi lebih tinggi.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian yang dilakukan bermanfaat untuk:

1. Sebagai alat pembantu untuk mengetahui nilai kapasitansi dari suatu kapasitor.
2. Dapat membantu dan bermanfaat bagi penelitian di laboratorium maupun untuk teknisi pada berbagai proyek elektronika khususnya dalam menentukan nilai kapasitansi.

1.5 Batasan Penelitian

Alat ukur kapasitansi yang dibuat dalam karya tulis ilmiah ini dibatasi hanya pada pengukuran kapasitor non-polar.

BAB 2 TEORI UMUM

2.1 Metode Pengukuran Kapasitansi

Secara umum, teori untuk menganalisis kapasitansi bermula dengan rumus sebagai berikut [1],[2]:

$$C = \frac{I}{dV / dt} \quad (1)$$

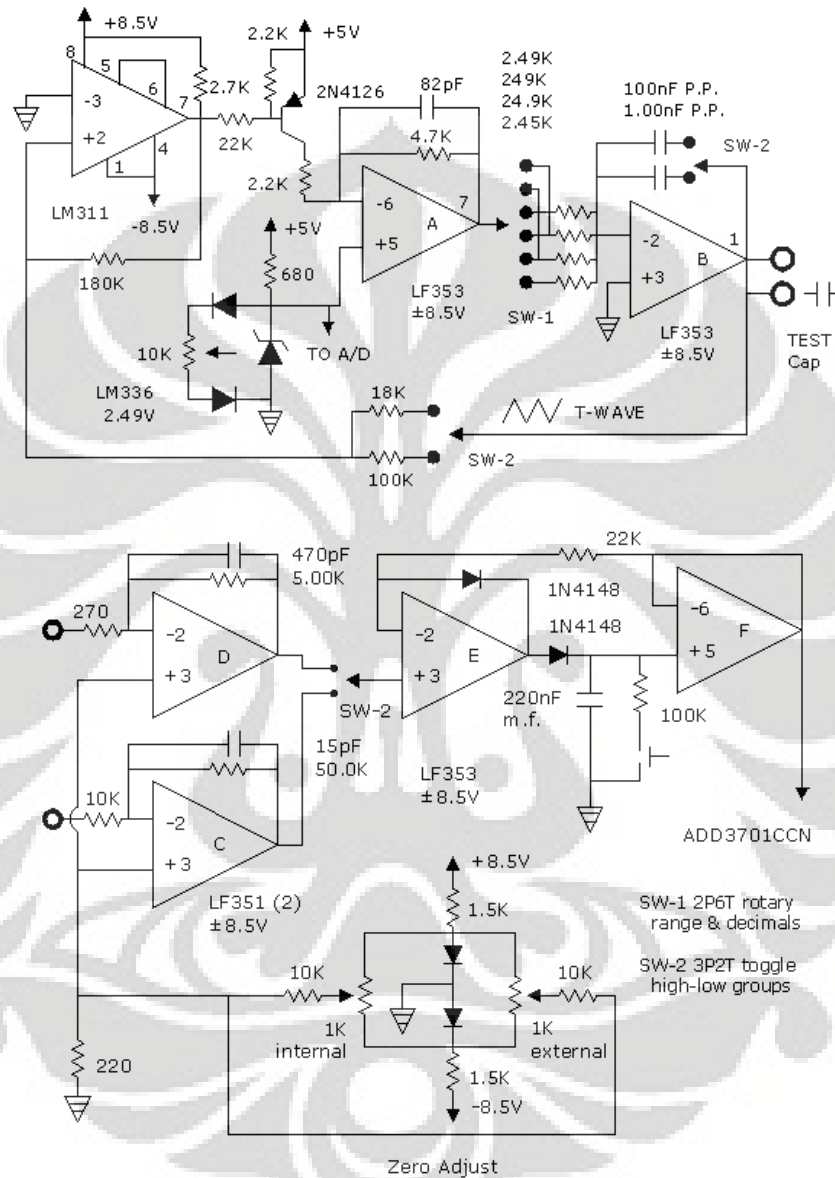
Dikatakan, kapasitansi sama dengan arus dibagi tegangan per detik. Artinya, bila salah satu sisi kapasitor di-bumi-kan (*grounded*) dan sebuah arus konstan dialirkan pada sisi yang lain, tegangannya akan naik pada suatu laju konstan. Mengukur laju meningkatnya tegangan merupakan metode yang biasa dalam menentukan kapasitansi. Namun, hal itu tak dapat bekerja dengan baik untuk kapasitor bernilai kecil karena sulitnya penentuan waktu antara dua tegangan acuan dalam waktu yang singkat. Bagaimanapun, prosedur tersebut cukup presisi pada kecepatan rendah. Hal ini dapat digunakan untuk mengukur kapasitor-kapasitor acuan, sebagaimana akan ditunjukkan nanti.

Apa yang dilakukan Capacitance Meter ialah menahan tegangan per detik konstan sewaktu mengukur arus. Arus dapat diukur pada kecepatan tinggi lebih mudah daripada tegangan per detik.

Salah satu keuntungannya ialah keseluruhan rangkaiannya analog. Sehingga, resolusinya hanya dibatasi oleh derau (*noise*). Beruntung sekali, rangkaiannya sangat kebal terhadap derau karena tiga kapasitor yang berfungsi sebagai penyaring (*filter*) derau – sebuah kapasitor acuan, kapasitor yang diukur dan sebuah kapasitor pendeteksi puncak (*peak detector*).

Tegangan per detik yang konstan diproduksi oleh sebuah pembangkit gelombang segitiga yang presisi. Penerapan pembangkit gelombang segitiga pada salah satu sisi kapasitor yang diukur menghasilkan sebuah arus konstan pada sisi yang lainnya. Arusnya dideteksi menggunakan sebuah pengubah arus-ke-tegangan yang memiliki sebuah gelombang kotak pada keluarannya. Sebuah pendeteksi puncak mengukur amplitudo gelombang kotak. Hasilnya, tegangan diletakkan

pada sebuah penampil digital melalui sebuah ADC yaitu sebuah voltmeter pada sebuah chip. Sebuah voltmeter digital dapat digunakan untuk pembacaannya. Namun, dapat pula ditampilkan menggunakan LCD.



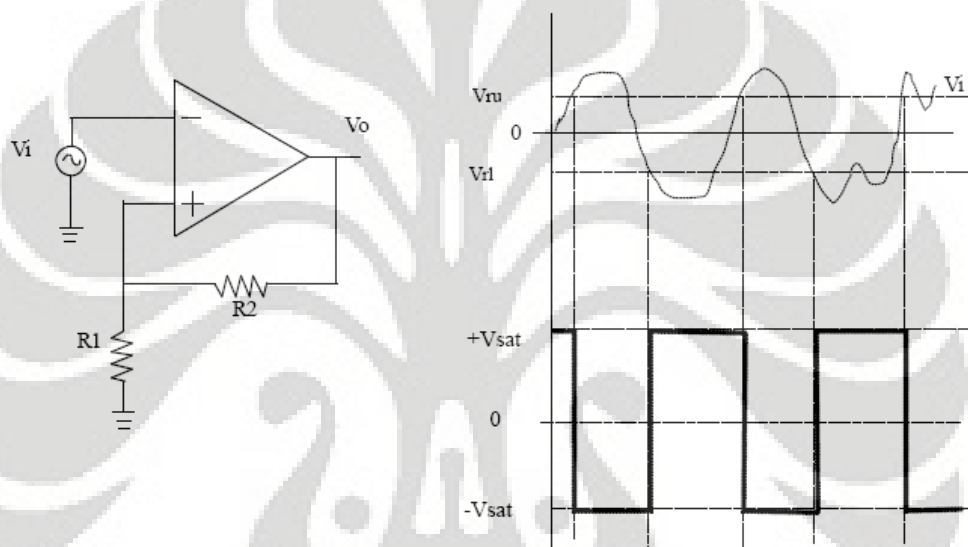
Gambar 2.1: Skematik rangkaian secara menyeluruh.

Bagian rangkaian berupa pembangkit gelombang segitiga menggunakan prosedur standar, kecuali adanya penambahan sebuah tegangan acuan untuk memberikan presisi tinggi. Pada bagian komparatornya, (LM311), menghasilkan perubahan kondisi ketika amplitudo gelombang segitiga mencapai nilai yang

diinginkan. Amplitudo gelombang T tidaklah kritis; hanya kemiringannya saja. Amplitudo di-set pada $10V_{PP}$ ($\pm 5V$) untuk tiga jangkauan pertama (kapasitor bernilai kecil), dan $1.8V_{PP}$ untuk tiga jangkauan selanjutnya (yang berharga lebih besar). Amplitudo tereduksi hanya memberikan efek memperbesar frekuensi; sehingga, frekuensi terendah yang berada dalam enam jangkauan sekitar 32Hz.[3]

2.2 Op-Amp sebagai pembanding (*comparator*) dengan jendela

Rangkaian Op-Amp sebagai pembanding dengan jendela digambarkan pada Gambar 2.2.



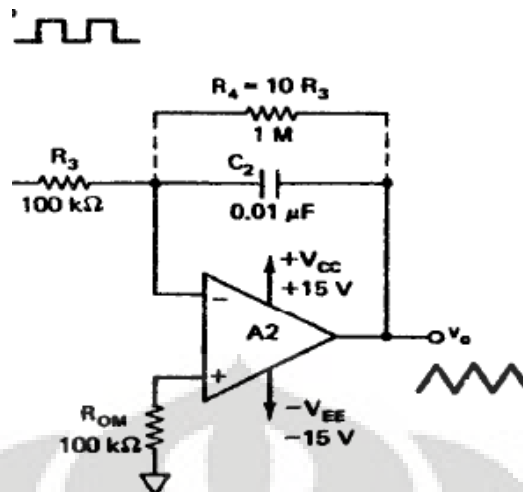
Gambar 2.2: Rangkaian komparator dengan jendela.

Perhitungan menentukan jendela Volt reference Up (V_{ru}) dan Volt reference low (V_{rl}) adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V_{ru} &= \frac{R1}{R1 + R2} (+V_{sat}) \\ V_{rl} &= \frac{R1}{R1 + R2} (-V_{sat}) \end{aligned} \quad (2)$$

2.3 Pembangkit gelombang segitiga

Op-Amp dapat juga digunakan sebagai pembangkit gelombang segitiga dari bentuk gelombang kotak sebagaimana digambarkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3: Osilator gelombang segitiga

2.4 Mikrokontroler AVR ATMEGA 8535

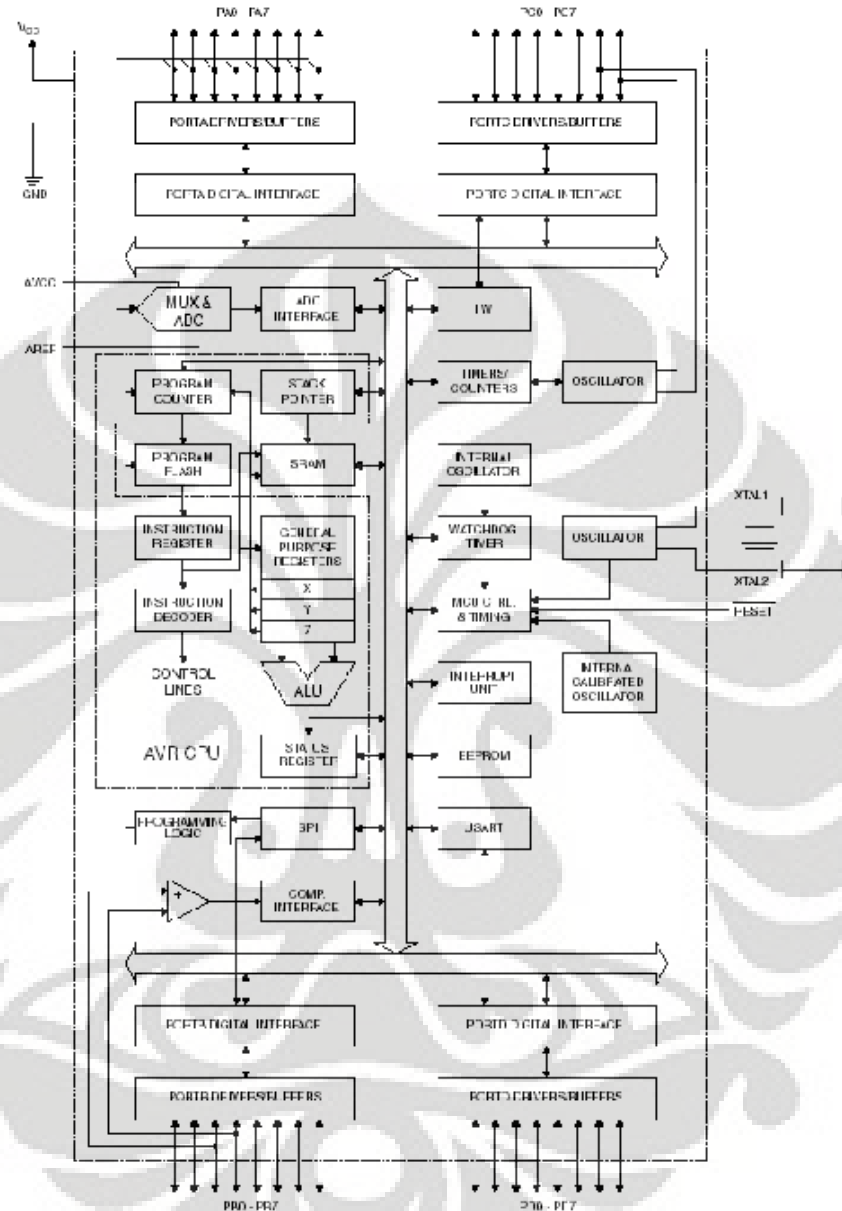
AVR termasuk kedalam jenis mikrokontroler **RISC** (*Reduced Instruction Set Computing*) 8 bit. Berbeda dengan mikrokontroler keluarga MCS-51 yang berteknologi **CISC** (*Complex Instruction Set Computing*). Pada mikrokontroler dengan teknologi RISC semua instruksi dikemas dalam kode 16 bit (16 bits words) dan sebagian besar instruksi dieksekusi dalam 1 clock, sedangkan pada teknologi CISC seperti yang diterapkan pada mikrokontroler MCS-51, untuk menjalankan sebuah instruksi dibutuhkan waktu sebanyak 12 siklus clock.

AVR atau sebuah kependekan dari *Alf and Vegard's Risc Processor* merupakan chip mikrokontroler yang diproduksi oleh Atmel, yang secara umum dapat dikelompokkan ke dalam 4 kelas :

- ATtiny
- ATMega
- AT90Sxx
- AT86RFxx

Perbedaan yang terdapat pada masing-masing kelas adalah kapasitas memori, peripheral, dan fungsinya. Dalam hal arsitektur maupun instruksinya, hampir tidak ada perbedaan sama sekali. Dalam hal ini ATMEGA8535 dapat beroperasi pada kecepatan maksimal 16MHz serta memiliki 6 pilihan mode sleep untuk menghemat penggunaan daya listrik.

Gambar berikut menunjukkan arsitektur ATMEGA8535 yang digunakan pada alat Capacitance Meter.



Gambar 2.3: Arsitektur ATMEGA8535.

Secara garis besar, arsitektur mikrokontroler ATMEGA8535 terdiri atas:

- 32 saluran I/O (Port A, Port B, Port C, dan Port D)
- 10 bit 8 Channel ADC (Analog to Digital Converter)
- 4 channel PWM

- 6 Sleep Modes : Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby and Extended Standby
- 3 buah timer/counter
- Analog comparator
- Watchdog timer dengan osilator internal
- 512 byte SRAM
- 512 byte EEPROM
- 8 kb Flash memory dengan kemampuan Read While Write
- Unit interupsi (internal & eksternal)
- Port antarmuka SPI8535 “memory map”
- Port USART untuk komunikasi serial dengan kecepatan maksimal 2,5Mbps
- 4.5 sampai 5.5V operation, 0 sampai 16MHz

Sedangkan konfigurasi pin ATMEGA 8535 sekilas dijabarkan berikut ini:



Gambar 2.4: IC ATMEGA 8535 dan pin-pinnya.

- VCC = pin masukan catu daya
- GND = pin ground
- Port A (PA0 – PA7) = pin I/O (bidirectional), pin ADC
- Port B (PB0 – PB7) = pin I/O (bidirectional), pin timer/counter, analog comparator, SPI
- Port C (PC0 – PC7) = pin I/O (bidirectional), TWI, analog comparator, Timer Oscilator

- Port D (PD0 – PD7) = pin I/O (bidirectional), analog comparator, interupsi eksternal, USART
- RESET = pin untuk me-reset mikrokontroler
- XTAL1 & XTAL2 = pin untuk clock eksternal
- AVCC = pin input tegangan ADC
- AREF = pin input tegangan referensi ADC

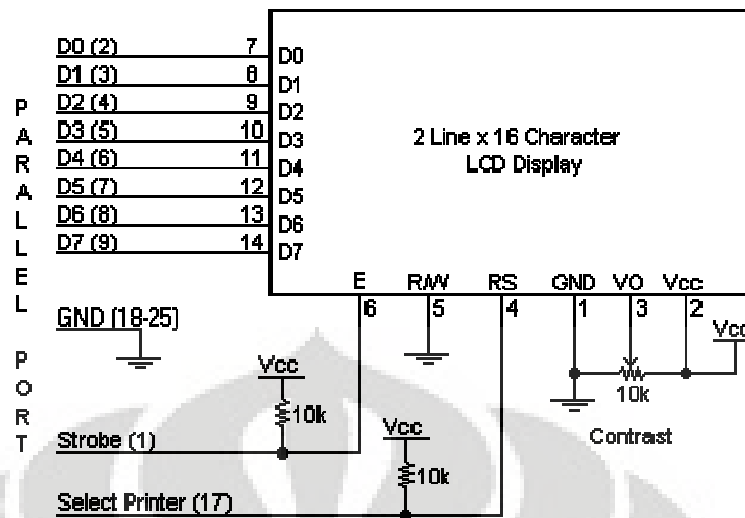
2.5 Penampil LCD 16x2 M1632

LCD yang digunakan M1632 produksi Seiko Instrument Inc. Yang memiliki beberapa fitur:

- 16 karakter, 2 Line, 5x7 dot matrik
- Duti rasio:1/16
- Konsumsi daya rendah
- Pilihan interface 4bit/8bit data
- Mempunyai beberapa fungsi tambahan: display clear, cursor on/off, blink karakter,cursor shift, display shift
- 5V DC Supply
- Reset otomatis pada saat power on
- Osilator tertanam didalam (*embedded*)

Ada 2 cara utk berkomunikasi dengan LCD, yaitu 8 bit dan 4 bit jalur data. Selain 8 atau 4 jalur yang terhubung dengan kontroler, dibutuhkan 3 jalur lagi untuk kontrol, yaitu RS, RW dan EN. Namun jika kita hanya ingin menuliskan data tanpa membaca data hubungkan saja RW ke Ground.

Sedangkan untuk pemrograman kita dapat memilih beberapa jenis, antara lain: AVR Studio, Win AVR, Bascom AVR, Codevision. Dengan catatan jika menggunakan Bascom AVR port Data LCD telah disesuaikan oleh Compiler. Jadi jika kita membutuhkan beberapa *interrupt* pada port tertentu pada chip, kita tidak begitu leluasa. Sementara ini, untuk keluesan dalam memprogram, dianjurkan menggunakan AVR Studio yang tersedia secara gratis.

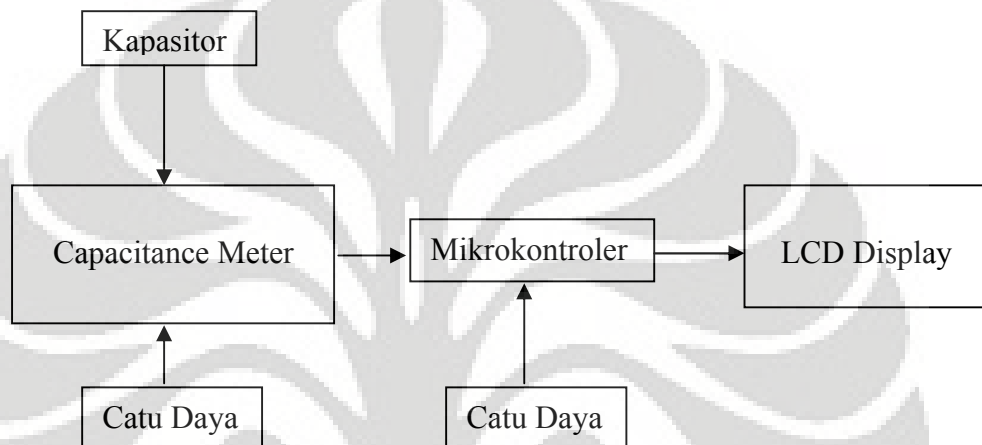


Gambar 2.5: Skematik antarmuka LCD 16x2 M1632.

BAB 3 METODE DAN PEMBUATAN ALAT

3.1 Diagram Sistem

Diagram sistem alat ukur Capacitance Meter yang telah dibuat adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1: Diagram skematik sistem ukur Capacitance Meter.

Apa yang dilakukan Capacitance Meter ialah menahan tegangan per detik konstan sewaktu mengukur arus. Arus dapat diukur pada kecepatan tinggi lebih mudah daripada tegangan per detik.

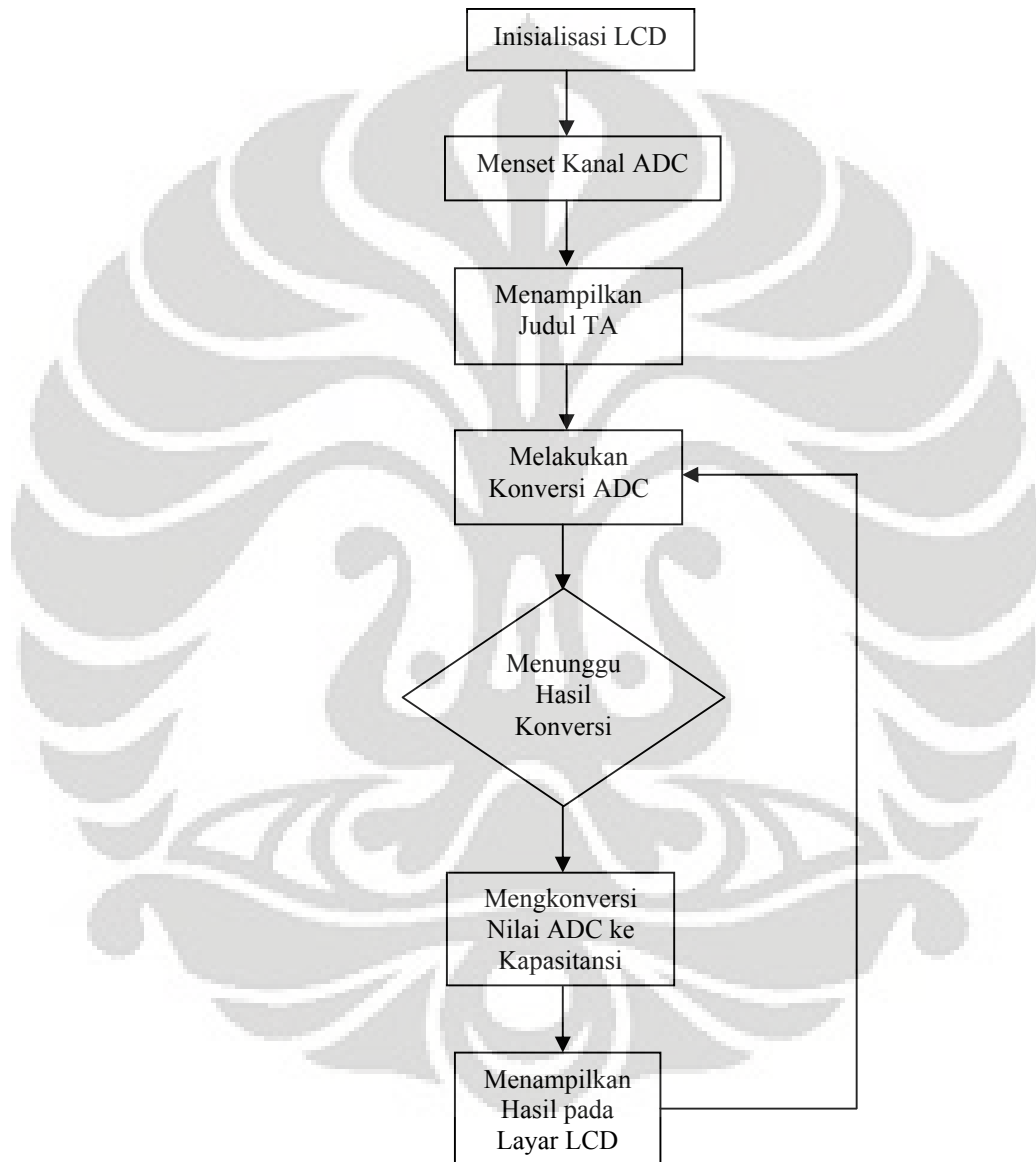
Salah satu keuntungannya ialah keseluruhan rangkaiannya analog. Sehingga, resolusinya hanya dibatasi oleh derau (*noise*). Beruntung sekali, rangkaiannya sangat kebal terhadap derau karena tiga kapasitor yang berfungsi sebagai penyaring (*filter*) derau – sebuah kapasitor acuan, kapasitor yang diukur dan sebuah kapasitor pendeteksi puncak (*peak detector*).

3.2 Implementasi alat

Tegangan per detik yang konstan diproduksi oleh sebuah pembangkit gelombang segitiga yang presisi [8]. Penerapan pembangkit gelombang segitiga pada salah satu sisi kapasitor yang diukur menghasilkan sebuah arus konstan pada sisi yang lainnya. Arusnya dideteksi menggunakan sebuah pengubah arus-ke-

tegangan yang memiliki sebuah gelombang kotak pada keluarannya. Sebuah pendeteksi puncak mengukur amplitudo gelombang kotak. Hasilnya, tegangan diletakkan pada sebuah penampil digital melalui sebuah ADC yaitu sebuah voltmeter pada sebuah chip. Sebuah voltmeter digital dapat digunakan untuk pembacaannya. Namun, dapat pula ditampilkan menggunakan LCD.

Adapun *flowchart* ADC alat pengukur kapasitansinya sebagai berikut:



Gambar 3.2: *Flowchart* untuk menampilkan nilai kapasitansi

Bagian rangkaian berupa pembangkit gelombang segitiga menggunakan prosedur standar, kecuali adanya penambahan sebuah tegangan acuan untuk

memberikan presisi tinggi. Pada bagian komparatornya, (LM311), menghasilkan perubahan kondisi ketika amplitudo gelombang segitiga mencapai nilai yang diinginkan. Amplitudo gelombang T tidaklah kritis; hanya kemiringannya saja. Amplitudo di-set pada $10V_{PP}$ ($\pm 5V$) untuk tiga jangkauan pertama (kapasitor bernilai kecil), dan $1.8V_{PP}$ untuk tiga jangkauan selanjutnya (yang berharga lebih besar). Amplitudo tereduksi hanya memberikan efek memperbesar frekuensi; sehingga, frekuensi terendah yang berada dalam enam jangkauan sekitar 32Hz.[3]

Pada bagian berikutnya, alat ini menggunakan Pengubah Arus-ke-Tegangan (CTV) berupa LF351. Pemisahan tes pin dilakukan untuk menyederhanakan rangkaian dan untuk mengurangi *noise pick up*.

Ukuran *Feedback resistors* sebagaimana yang diperlukan untuk korelasi tegangan output dengan kapasitansi.

Detektor puncak tidak memerlukan kapasitor penyimpan berbahan polypropylene, ketika nilai-nilai yang tertera digunakan. Namun, bila kapasitor penyimpan lebih besar, waktu rendam mulai menjadi relevan untuk mempercepat *pull-down* (disebut *set*); dan kemudian polypropylene mungkin diperlukan. Sebuah kapasitor film logam 220 nF memadai untuk suatu dioda *switching* biasa (1N4148 atau 1N914B). Arus bocor sebesar 5 sampai 10nA optimal bagi dioda. Pada 32Hz, arus mundur sebesar 10nA pada diode menghasilkan riak 0.71mV pada the kapasitor; dan koreksi tegangan terjadi di 45mV per detik. Untuk menarik sejumlah besar tegangan, resistor 100k digunakan dengan beralih sejenak.

Masukan noninverting dari CTV digunakan sebagai *zero adjust* untuk menghapus efek offset dari op-amp dan *cross capacitance*. (*Cross capacitance* ialah kapasitansi antara pin-pin pengukur.) Ada dua op-amp diserikan yang mempengaruhi offset keluaran: CTV dan op-amp yang pertama dari detektor puncak (op-amp E). Op-amp yang kedua dari puncak detektor (op-AMP F) tidak mempengaruhi net offset, karena tegangan outputnya ditentukan oleh yang pertama [9].

Op-amp B menghasilkan error yang tak lazim pada bagian masukan, sebut saja *Common Mode Error*. Hal ini nyata sebagai gelombang persegi pada input inverting. Ini hanya terjadi ketika output mengalami *slewing*, sebagaimana sebuah

gelombang segitiga, tetapi tidak terjadi ketika dengan gelombang persegi, dan itu bergantung pada *slew rate*. Hal ini mungkin disebabkan oleh internal kapasitor. Untuk LF351 atau LF353 dari National Semiconductor, nilainya $\pm 37\text{mV}$; untuk LF411 - $\pm 35\text{mV}$; untuk LF356 - $\pm 31\text{mV}$; untuk TL081 - $\pm 58\text{mV}$; masing-masing di dalam rentang 1. Dalam rentang 2, bernilai sepersepuluhnya, menjadi bergantung pada nilai *slew rate*. Harga tersebut dikurangi dari tegangan acuan dalam menentukan tegangan yang melalui resistor pengatur rentang.

Terdapat dua kapasitor acuan pada op amp B (100nF and 1.00nF). Gambar 2.2 menunjukkan sebuah rangkaian acuan untuk mengukur kapasitor dengan menggunakan *timer*, yang harus dimiliki oleh *frequency counter*. Resolusi yang diharapkan satu mikrodetik. Ketika sudah dikalibrasi, rangkaian menjadi sirkuit capacitance meter yang lengkap [10].

Bagian pertama sirkuit adalah generator gelombang segitiga yang sama presisinya yang digunakan oleh femto capacitance meter. Apa yang akan menjadi kapasitor acuan dalam hal ini adalah kapasitor yang akan diujinya. Resistor yang menentukan arus yang mengalir ke dalam kapasitor, R_a , disolder dari atas. Jadi, dapat diubah. Untuk harga 1M, maka akan menghasilkan sekitar $4.000 \mu\text{S}$ untuk kapasitor 1nF. Kapasitor 100nF menghasilkan 400mS; sehingga, R_a dapat lebih kecil.

Dua komparator digunakan untuk ambang bawah dan atas, dengan selisih sekitar 10V. Tegangan tersebut harus tepat diukur untuk menentukan volt per detiknya.

Ada *hysteresis* [11] sekitar 5mV pada setiap komparator untuk stabilitas di frekuensi rendah. Untuk menghitung itu, ada 5V di seluruh 270K umpan balik hambat sebelum perubahan kondisi/keadaan. Hasil saat ini melalui 270 ohm hambat memproduksi 5mV. Untuk lebih rendah komparator, ada 10V di seluruh penghambat umpan balik sebelum perubahan keadaan. Histerisis untuk comparator atas adalah pengurangan dari tegangan referensi, dan untuk menurunkan. Jadi efeknya saling membatalkan; dan nilainya dapat diabaikan.

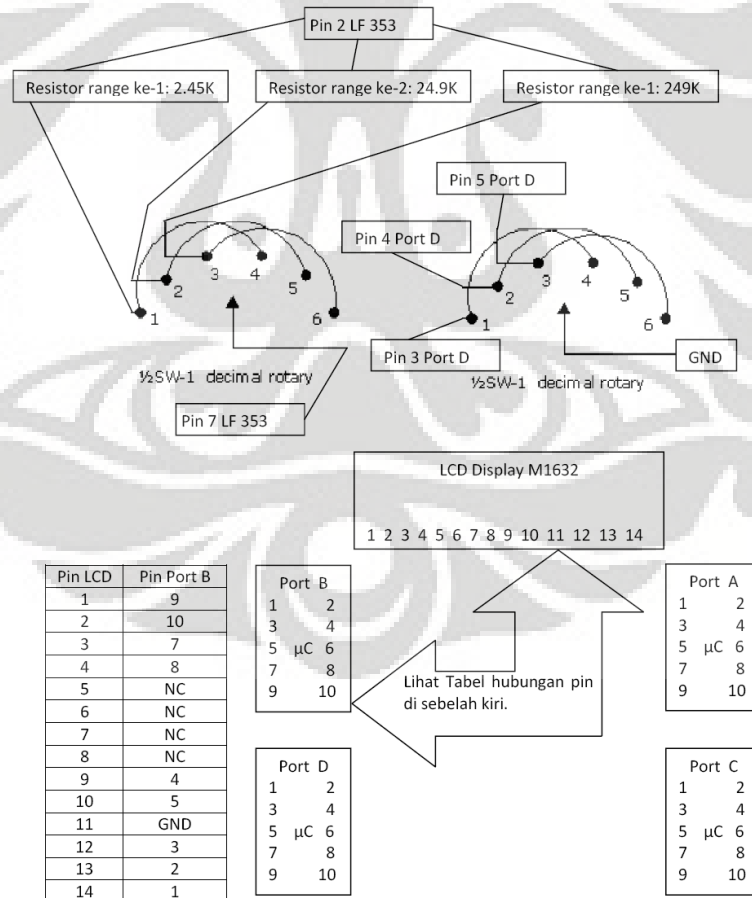
Gerbang AND di output memiliki tujuan mencegah terjadinya suatu yang tidak digunakan selama setengah dari siklus. Tegangan yang masuk dibatasi hingga 5V dengan arus dioda sebuah jaringan.

Sirkuit dapat dibentuk pada protoboard (*breadboard*), tetapi untuk presisi tinggi, harus menggunakan PCB (Printed Circuit Board).

Sirkuit mengangkat 60 siklus *hum* dengan mudah pada impedansi tinggi, maka mungkin harus dilindungi. Untuk melakukannya, gunakan sehelai timah atau aluminium dengan keempat sisinya ditebuk untuk membentuk sebuah kotak tanpa tutup. Tempatkan kertas di bawah untuk menyekat; *ground*-kan; dan tempatkan papan rangkaian tersebut. Bagian atas tidak harus dilindungi.

Kapasitor dapat disolder ke PCB, tetapi saya menggunakan pin penyisip dan menyoldernya ke PCB. Shielding antara mereka diperlukan, jika kapasitor kecil yang diukur. Tambahkan 3pF ke kapasitor berharga 1nF, karena lintas-kapasitansi dari op-AMP B kira-kira akan sebesar itu.

Setelah dari rangkaian analognya, nilai ADC diumpangkan ke mikrokontroler AT 8535. Ada pun, koneksi skematik ke masing-masing pin pada masing-masing port adalah sebagai berikut:



Gambar 3.3: Skematik ke AT8535.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengukuran

Pada Pengukur Kapasitansi yang telah dibuat, ada tiga jangkauan (*range*) pengukuran yang digunakan, yaitu masing-masing: skala maksimum 40 pF, skala maksimum 400 pF, dan skala maksimum 4 nF. Penulis mengambil data pada masing-masing jangkauan sebanyak lima nilai kapasitansi. Masing-masing nilai kapasitansi dilakukan 10 kali pengambilan sampel (pencuplikan). Untuk tiap nilai kapasitor, pada kolom “Nilai sebenarnya” merupakan nilai data pembanding yang diukur oleh alat ukur digital yang telah ada (Merk Excel, model DT). Beberapa data hasil pengukuran menggunakan Pengukur Kapasitansi yang telah dibuat diperoleh antara lain sebagai berikut:

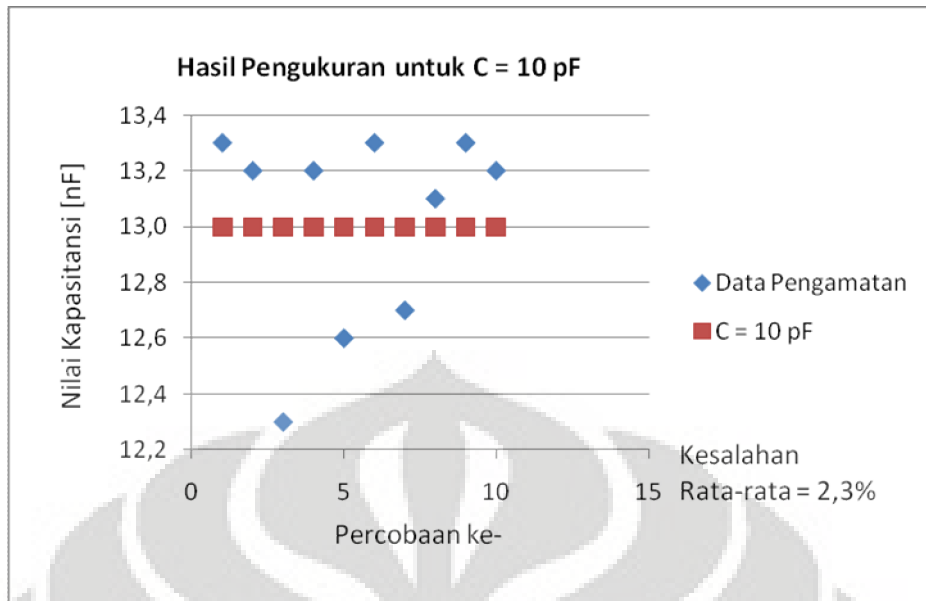
A.1 Pada jangkauan 0 – 40 pF; Untuk nilai kapasitor C = 10 pF.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor C = 10 pF dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut ini:

Tabel 4.1: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor C = 10 pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	13	13,3	2,3
2	13	13,2	1,5
3	13	12,3	5,4
4	13	13,2	1,5
5	13	12,6	3,1
6	13	13,3	2,3
7	13	12,7	2,3
8	13	13,1	0,8
9	13	13,3	2,3
10	13	13,2	1,5
	Rata-rata =	13,0	2,3

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut:



Gambar 4.1: Grafik hasil pengukuran untuk $C = 10$ pF.

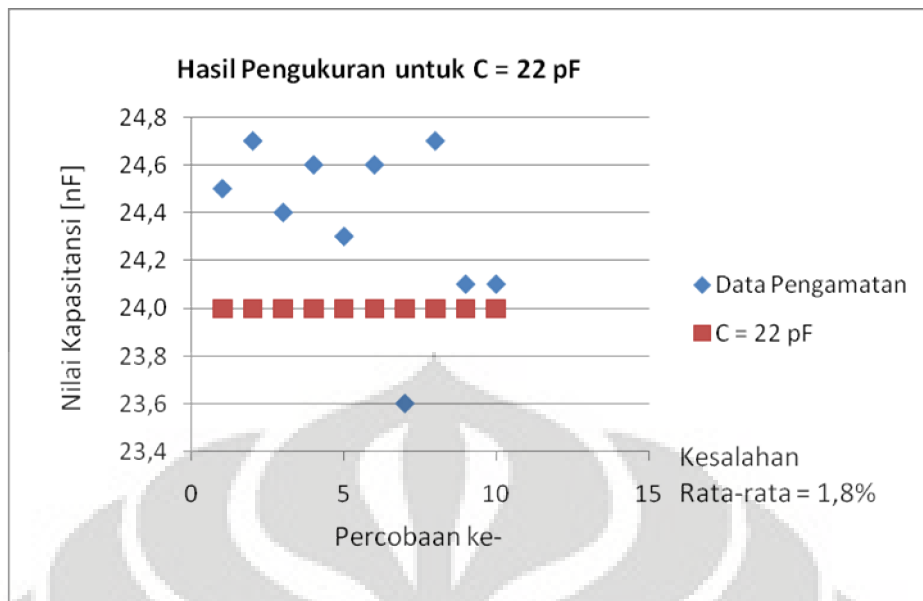
A.2 Pada jangkauan 0 – 40 pF; Untuk nilai kapasitor $C = 22$ pF.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor $C = 22$ pF dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut ini:

Tabel 4.2: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 22$ pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	24	24,5	2,1
2	24	24,7	2,9
3	24	24,4	1,7
4	24	24,6	2,5
5	24	24,3	1,3
6	24	24,6	2,5
7	24	23,6	1,7
8	24	24,7	2,9
9	24	24,1	0,4
10	24	24,1	0,4
	Rata-rata =	24,4	1,8

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut:



Gambar 4.2: Grafik hasil pengukuran untuk $C = 22$ pF.

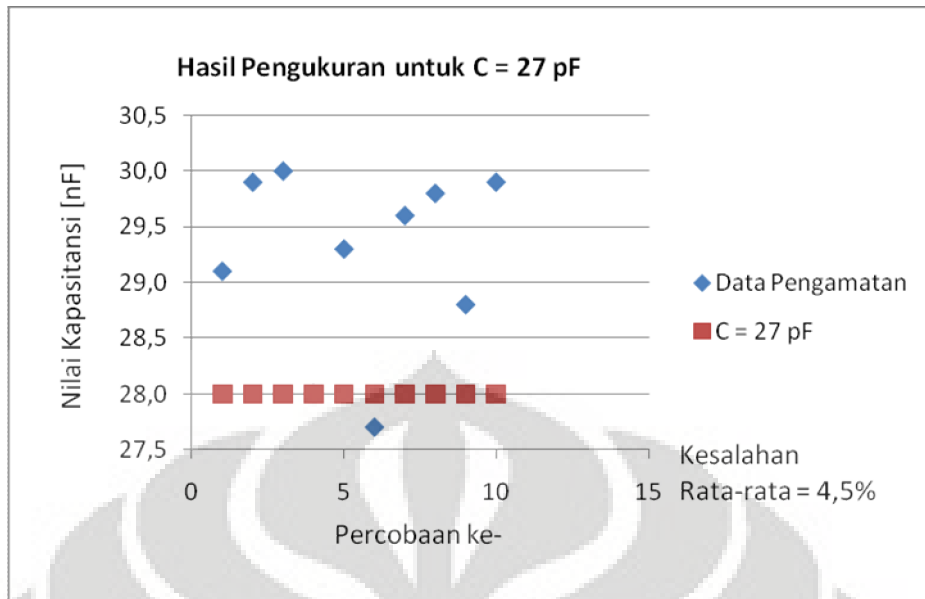
A.3 Pada jangkauan 0 – 40 pF; Untuk nilai kapasitor $C = 27$ pF.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor $C = 27$ pF dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut ini:

Tabel 4.3: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 27$ pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	28	29,1	3,9
2	28	29,9	6,8
3	28	30,0	7,1
4	28	28,0	0,0
5	28	29,3	4,6
6	28	27,7	1,1
7	28	29,6	5,7
8	28	29,8	6,4
9	28	28,8	2,9
10	28	29,9	6,8
	Rata-rata =	29,2	4,5

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut:



Gambar 4.3: Grafik hasil pengukuran untuk $C = 27$ pF.

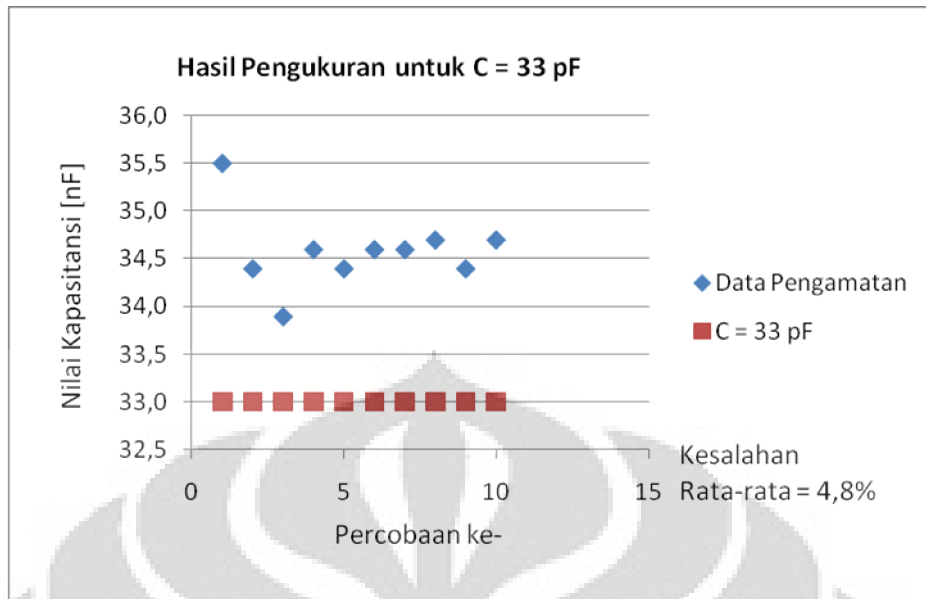
A.4 Pada jangkauan 0 – 40 pF; Untuk nilai kapasitor $C = 33$ pF

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor $C = 33$ pF dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut ini:

Tabel 4.4: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 33$ pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	33	35,5	7,6
2	33	34,4	4,2
3	33	33,9	2,7
4	33	34,6	4,8
5	33	34,4	4,2
6	33	34,6	4,8
7	33	34,6	4,8
8	33	34,7	5,2
9	33	34,4	4,2
10	33	34,7	5,2
	Rata-rata =	34,6	4,8

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut:



Gambar 4.4: Grafik hasil pengukuran untuk $C = 33 \text{ pF}$.

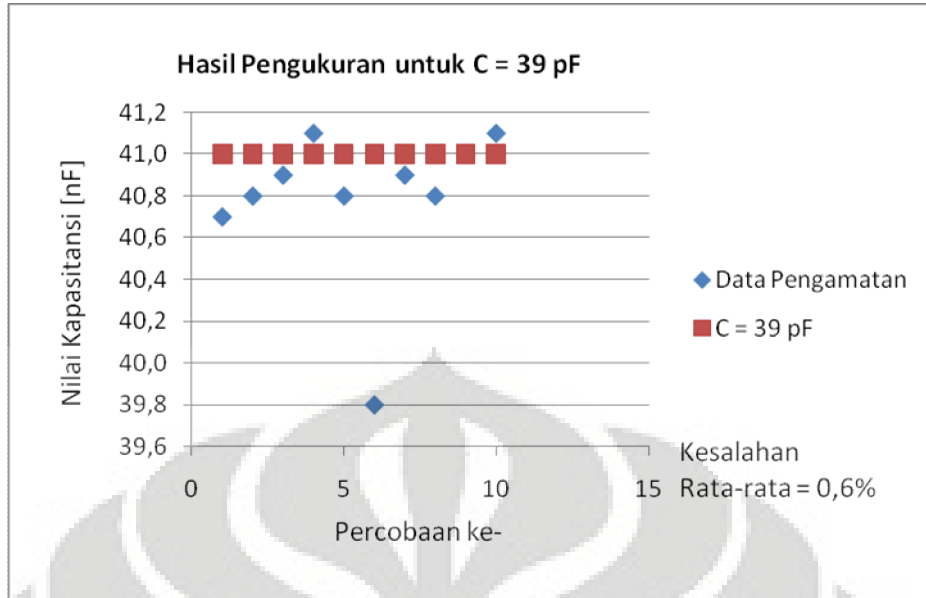
A.5 Pada jangkauan 0 – 40 pF; Untuk nilai kapasitor $C = 39 \text{ pF}$

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor $C = 39 \text{ pF}$ dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut ini:

Tabel 4.5: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 39 \text{ pF}$.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	41	40,7	0,7
2	41	40,8	0,5
3	41	40,9	0,2
4	41	41,1	0,2
5	41	40,8	0,5
6	41	39,8	2,9
7	41	40,9	0,2
8	41	40,8	0,5
9	41	41,0	0,0
10	41	41,1	0,2
	Rata-rata =	40,8	0,6

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut:



Gambar 4.5: Grafik hasil pengukuran untuk C = 39 pF.

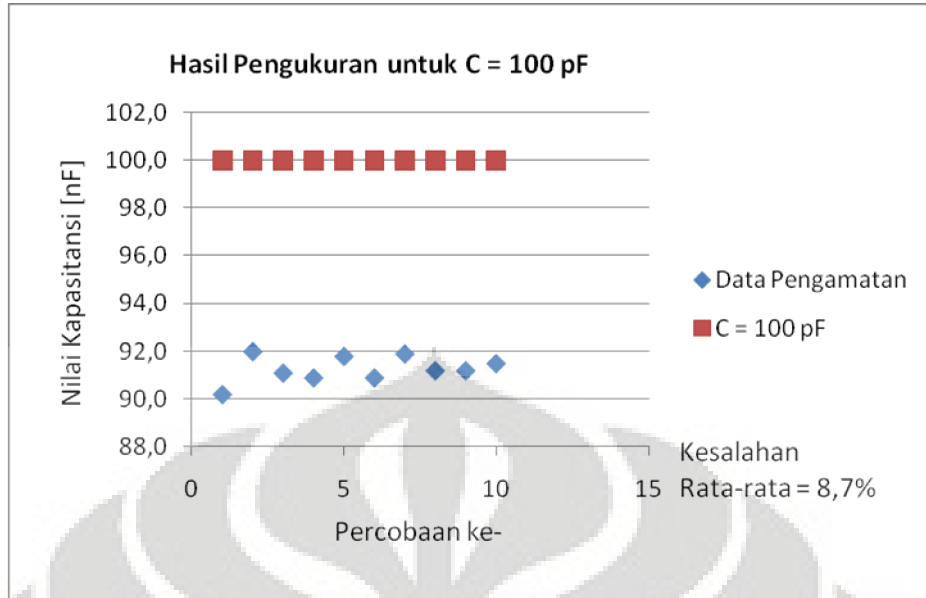
B.1 Pada jangkauan 0 – 400 pF; Untuk nilai kapasitor C = 100 pF.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor C = 100 pF dapat dilihat pada Tabel 4.6 berikut ini:

Tabel 4.6: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor C = 100 pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	100	90,2	9,8
2	100	92,0	8,0
3	100	91,1	8,9
4	100	90,9	9,1
5	100	91,8	8,2
6	100	90,9	9,1
7	100	91,9	8,1
8	100	91,2	8,8
9	100	91,2	8,8
10	100	91,5	8,5
	Rata-rata =	91,3	8,7

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.6 berikut:



Gambar 4.6: Grafik hasil pengukuran untuk C = 100 pF.

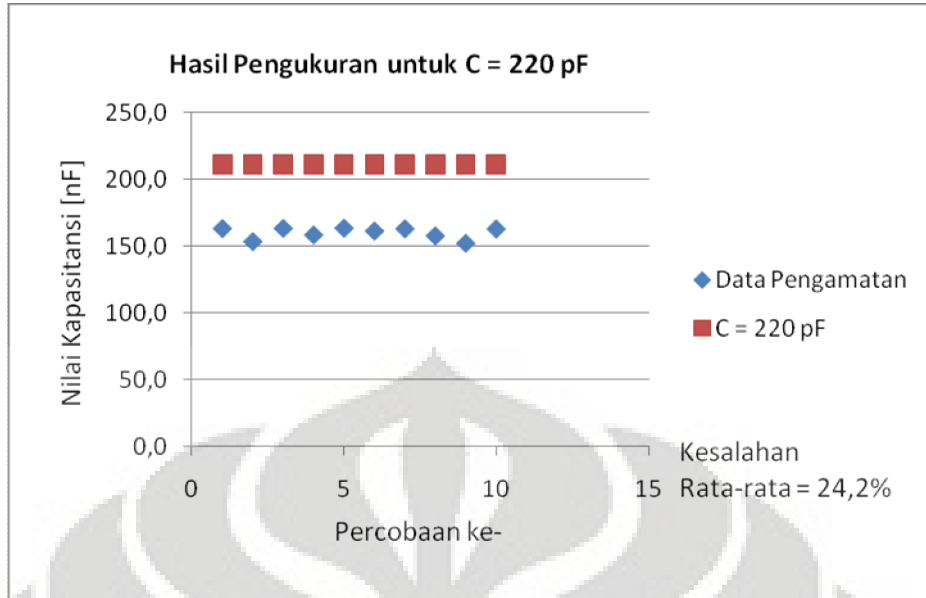
B.2 Pada jangkauan 0 – 400 pF; Untuk nilai kapasitor C = 220 pF.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor C = 220 pF dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut ini:

Tabel 4.7: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor C = 220 pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	211	163,3	22,6
2	211	153,3	27,3
3	211	163,4	22,6
4	211	158,4	24,9
5	211	163,6	22,5
6	211	161,4	23,5
7	211	163,1	22,7
8	211	157,7	25,3
9	211	152,0	28,0
10	211	163,0	22,7
	Rata-rata =	159,9	24,2

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.7 berikut:



Gambar 4.7: Grafik hasil pengukuran untuk C = 220 pF.

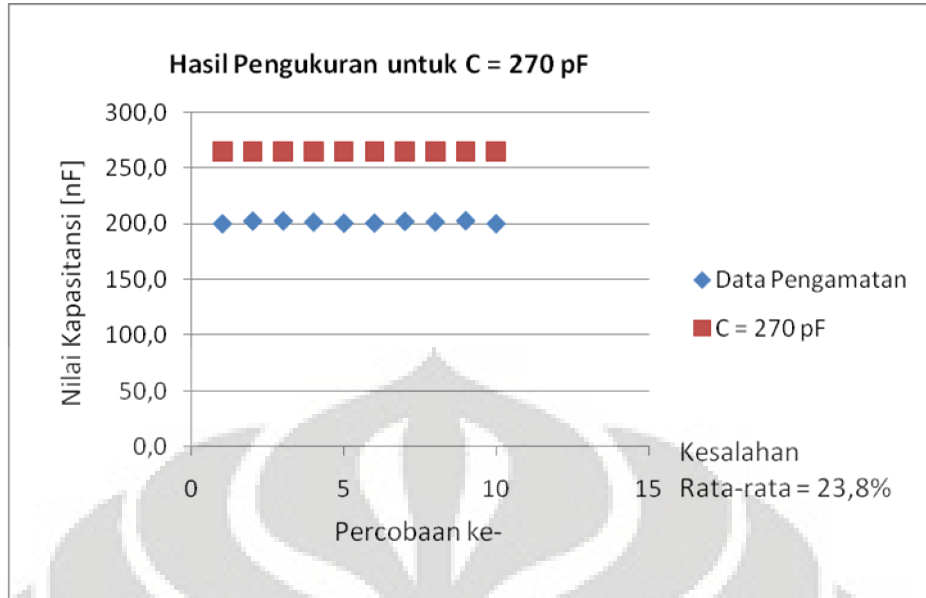
B.3 Pada jangkauan 0 – 400 pF; Untuk nilai kapasitor C = 270 pF.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor C = 270 pF dapat dilihat pada Tabel 4.8 berikut ini:

Tabel 4.8: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor C = 270 pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	265	200,4	24,4
2	265	202,8	23,5
3	265	202,9	23,4
4	265	201,9	23,8
5	265	200,9	24,2
6	265	201,0	24,2
7	265	202,5	23,6
8	265	202,0	23,8
9	265	203,1	23,4
10	265	200,5	24,3
	Rata-rata =	201,8	23,8

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.8 berikut:



Gambar 4.8: Grafik hasil pengukuran untuk C = 270 pF.

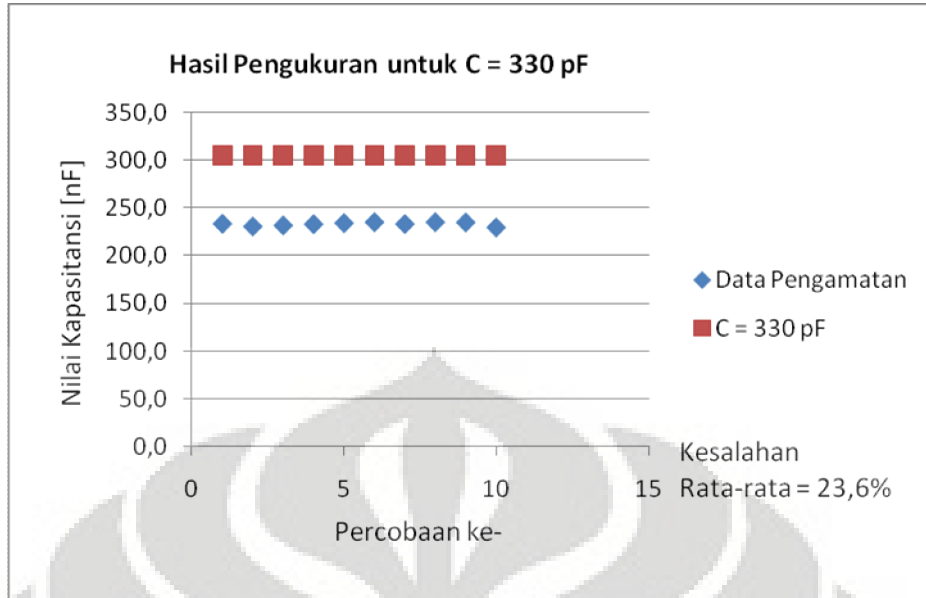
B.4 Pada jangkauan 0 – 400 pF; Untuk nilai kapasitor C = 330 pF

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor C = 330 pF dapat dilihat pada Tabel 4.9 berikut ini:

Tabel 4.9: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor C = 330 pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	305	233,3	23,5
2	305	230,5	24,4
3	305	231,6	24,1
4	305	232,8	23,7
5	305	234,0	23,3
6	305	234,9	23,0
7	305	233,0	23,6
8	305	234,9	23,0
9	305	234,6	23,1
10	305	229,5	24,8
	Rata-rata =	232,9	23,6

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.9 berikut:



Gambar 4.9: Grafik hasil pengukuran untuk C = 330 pF.

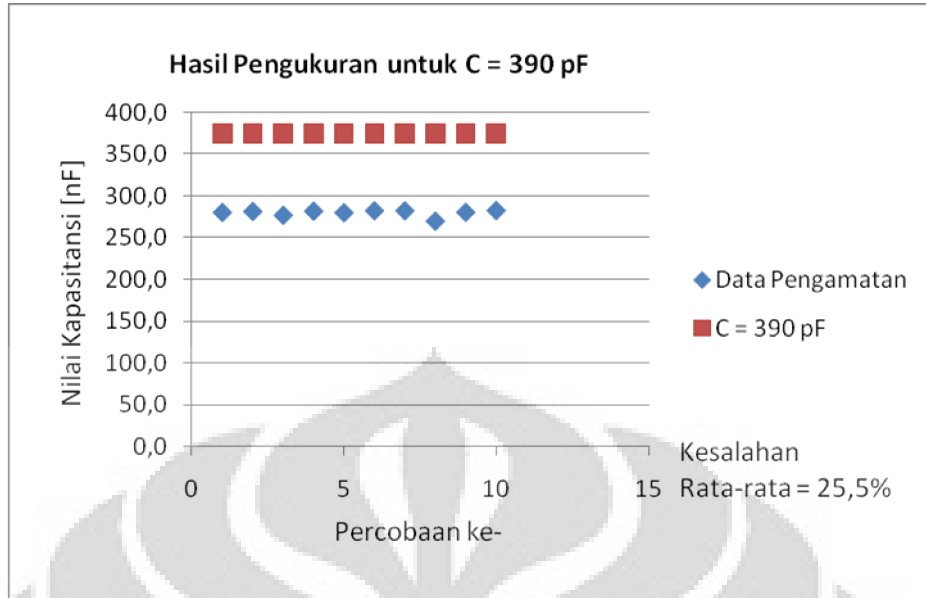
B.5 Pada jangkauan 0 – 400 pF; Untuk nilai kapasitor C = 390 pF

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor C = 390 pF dapat dilihat pada Tabel 4.10 berikut ini:

Tabel 4.10: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor C = 390 pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	375	280,0	25,3
2	375	281,1	25,0
3	375	276,5	26,3
4	375	281,4	25,0
5	375	279,6	25,4
6	375	282,0	24,8
7	375	282,0	24,8
8	375	269,5	28,1
9	375	280,1	25,3
10	375	282,3	24,7
	Rata-rata =	279,5	25,5

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.10 berikut:



Gambar 4.10: Grafik hasil pengukuran untuk $C = 390 \text{ pF}$.

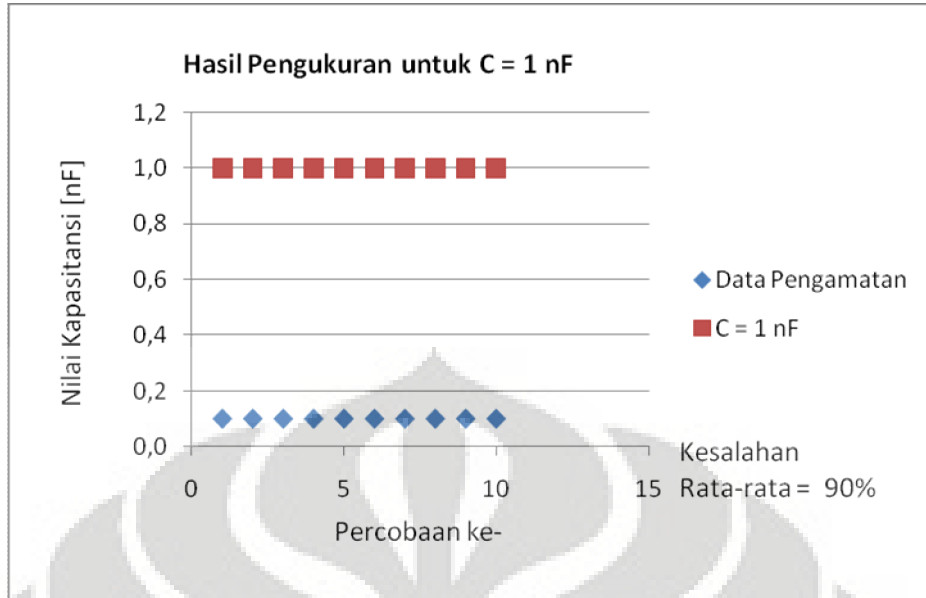
C.1 Pada jangkauan 0 – 4 nF; Untuk nilai kapasitor $C = 1 \text{ nF}$.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor $C = 1 \text{ nF}$ dapat dilihat pada Tabel 4.11 berikut ini:

Tabel 4.11: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 1 \text{ nF}$.

No.	Nilai Pembanding [nF]	Nilai Terukur [nF]	% Kesalahan
1	1,001	0,1	90,0
2	1,001	0,1	90,0
3	1,001	0,1	90,0
4	1,001	0,1	90,0
5	1,001	0,1	90,0
6	1,001	0,1	90,0
7	1,001	0,1	90,0
8	1,001	0,1	90,0
9	1,001	0,1	90,0
10	1,001	0,1	90,0
	Rata-rata =	0,1	90,0

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.11 berikut:



Gambar 4.11: Grafik hasil pengukuran untuk C = 1 nF.

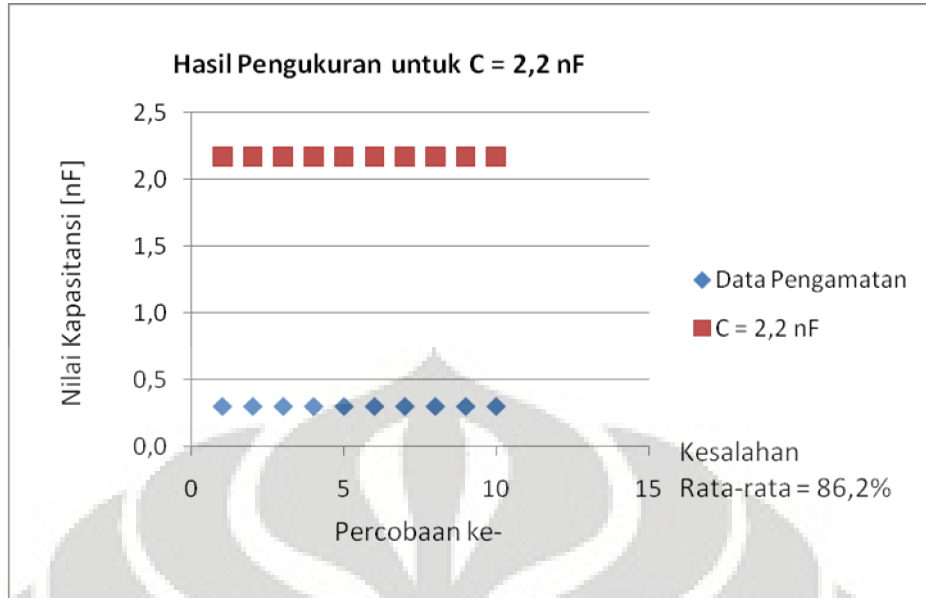
C.2 Pada jangkauan 0 – 4 nF; Untuk nilai kapasitor C = 2,2 nF.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor C = 2,2 nF dapat dilihat pada Tabel 4.12 berikut ini:

Tabel 4.12: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor C = 2,2 nF.

No.	Nilai Pembanding [nF]	Nilai Terukur [nF]	% Kesalahan
1	2,17	0,3	86,2
2	2,17	0,3	86,2
3	2,17	0,3	86,2
4	2,17	0,3	86,2
5	2,17	0,3	86,2
6	2,17	0,3	86,2
7	2,17	0,3	86,2
8	2,17	0,3	86,2
9	2,17	0,3	86,2
10	2,17	0,3	86,2
	Rata-rata =	0,3	86,2

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.12 berikut:



Gambar 4.12: Grafik hasil pengukuran untuk $C = 2,2 \text{ nF}$.

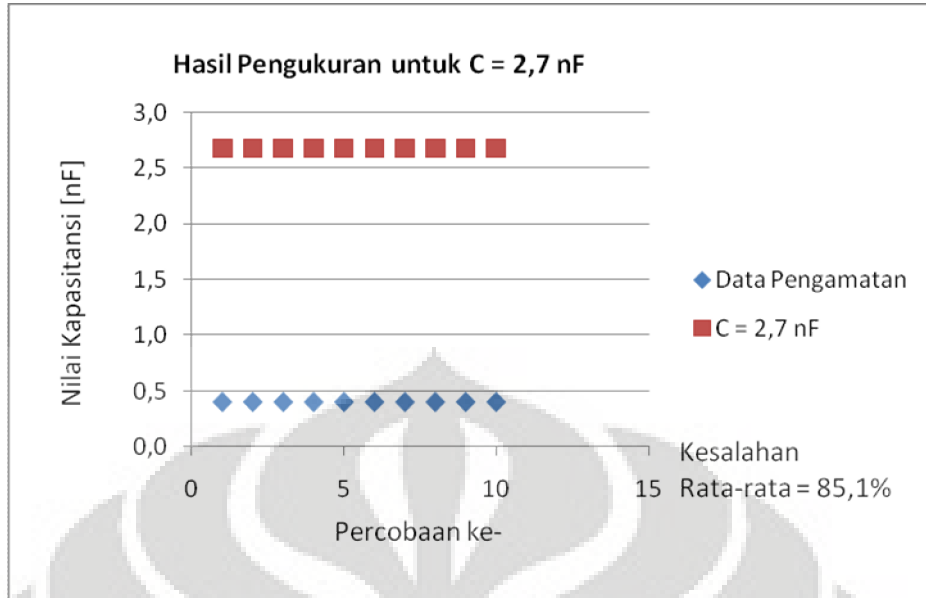
C.3 Pada jangkauan 0 – 4 nF; Untuk nilai kapasitor $C = 2,7 \text{ nF}$.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor $C = 2,7 \text{ pF}$ dapat dilihat pada Tabel 4.13 berikut ini:

Tabel 4.13: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 2,7 \text{ nF}$.

No.	Nilai Pembanding [nF]	Nilai Terukur [nF]	% Kesalahan
1	2,68	0,4	85,1
2	2,68	0,4	85,1
3	2,68	0,4	85,1
4	2,68	0,4	85,1
5	2,68	0,4	85,1
6	2,68	0,4	85,1
7	2,68	0,4	85,1
8	2,68	0,4	85,1
9	2,68	0,4	85,1
10	2,68	0,4	85,1
	Rata-rata =	0,4	85,1

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.13 berikut:



Gambar 4.13: Grafik hasil pengukuran untuk $C = 2,7 \text{ nF}$.

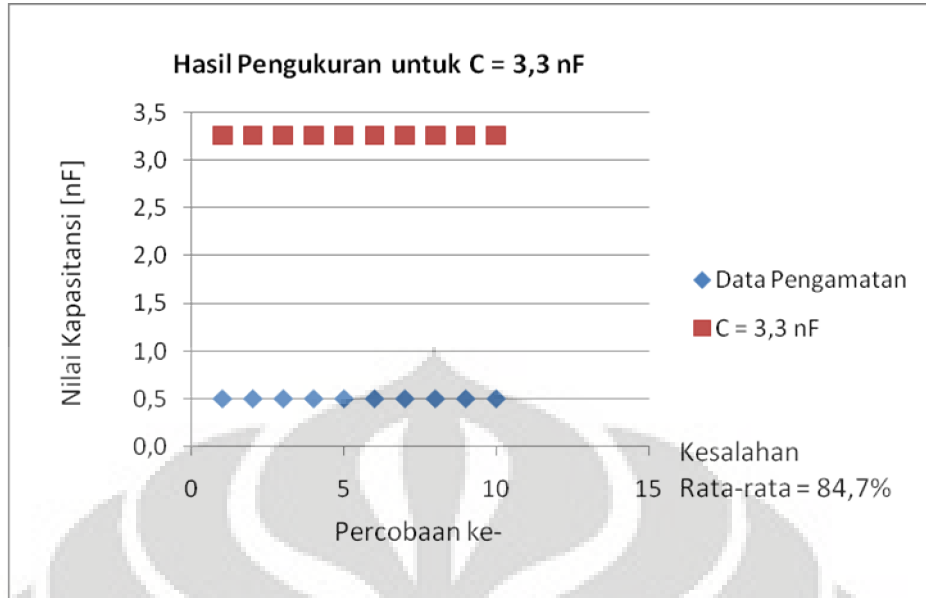
C.4 Pada jangkauan 0 – 4 nF; Untuk nilai kapasitor $C = 3,3 \text{ nF}$

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor $C = 3,3 \text{ nF}$ dapat dilihat pada Tabel 4.14 berikut ini:

Tabel 4.14: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 3,3 \text{ nF}$.

No.	Nilai Pembanding [nF]	Nilai Terukur [nF]	% Kesalahan
1	3,26	0,5	84,7
2	3,26	0,5	84,7
3	3,26	0,5	84,7
4	3,26	0,5	84,7
5	3,26	0,5	84,7
6	3,26	0,5	84,7
7	3,26	0,5	84,7
8	3,26	0,5	84,7
9	3,26	0,5	84,7
10	3,26	0,5	84,7
	Rata-rata =	0,5	84,7

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.14 berikut:



Gambar 4.14: Grafik hasil pengukuran untuk $C = 3,3 \text{ nF}$.

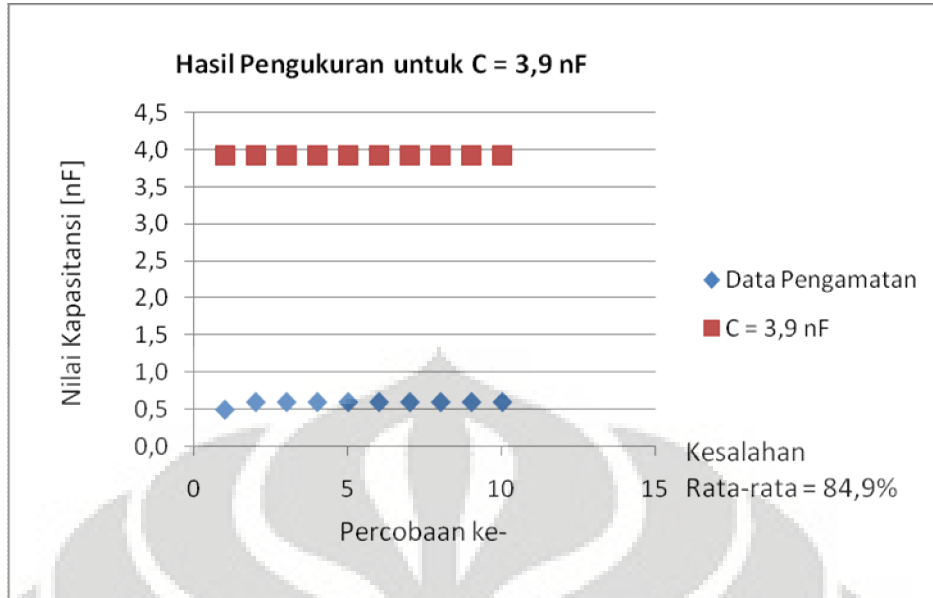
C.5 Pada jangkauan 0 – 4 nF; Untuk nilai kapasitor $C = 3,9 \text{ nF}$

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor $C = 3,9 \text{ nF}$ dapat dilihat pada Tabel 4.15 berikut ini:

Tabel 4.15: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 3,9 \text{ nF}$.

No.	Nilai Pembanding [nF]	Nilai Terukur [nF]	% Kesalahan
1	3,92	0,5	87,2
2	3,92	0,6	84,7
3	3,92	0,6	84,7
4	3,92	0,6	84,7
5	3,92	0,6	84,7
6	3,92	0,6	84,7
7	3,92	0,6	84,7
8	3,92	0,6	84,7
9	3,92	0,6	84,7
10	3,92	0,6	84,7
	Rata-rata =	0,6	84,9

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.15 berikut:



Gambar 4.15: Grafik hasil pengukuran untuk C = 3,9 nF.

4.2 Analisis dan Pembahasan

Tabel 4.16 merangkum hasil perhitungan kesalahan rata-rata masing-masing pengukuran.

Tabel 4.16: Rangkuman hasil pengukuran.

Jangkauan dan nilai Kapasitor	Nilai Pembanding	Kesalahan Rata-rata
40 pF; C = 10 pF	13 pF	2,3%
40 pF; C = 22 pF	24 pF	1,8%
40 pF; C = 27 pF	28 pF	4,5%
40 pF; C = 33 pF	33 pF	4,8%
40 pF; C = 39 pF	41 pF	0,6%
400 pF; C = 100 pF	100 pF	8,7%
400 pF; C = 220 pF	211 pF	24,2%
400 pF; C = 270 pF	265 pF	23,8%
400 pF; C = 330 pF	305 pF	23,6%
400 pF; C = 390 pF	375 pF	25,5%
4 nF; C = 1 nF	1,001 nF	90%
4 nF; C = 2,2 nF	2,17 nF	86,2%
4 nF; C = 2,7 nF	2,68 nF	85,1%
4 nF; C = 3,3 nF	3,26 nF	84,7%
4 nF; C = 3,9 nF	3,92 nF	84,9%

Hampir tidak mungkin adalah membuat agar kesalahan yang ada sekecil mungkin [12].

Makin kecil kesalahan makin mahal biaya pembuatan alat ukur tersebut. Kesalahan dapat terjadi karena berbagai sebab dan umumnya dibagi dalam 3 jenis utama yaitu: a.) Kesalahan umum; Kebanyakan disebabkan oleh kesalahan manusia, diantaranya adalah kesalahan pembacaan alat ukur, penyetelan yang tidak tepat dan pemakaian instrumen yang tidak sesuai dan kesalahan praktikum. b.) Kesalahan sistematis; Disebabkan oleh kekurangan-kekurangan pada instrumen itu sendiri seperti kerusakan atau adanya bagian-bagian yang aus dan pengaruh lingkungan terhadap peralatan atau pengukuran. c.) Kesalahan yang tidak disengaja; Diakibatkan oleh penyebab-penyebab yang tidak dapat langsung diketahui sebab perubahan-perubahan parameter atau sistem pengukuran terjadi secara acak.

Dalam pengukuran ini harus memilih batas pengukuran dengan memutar saklar S1 dari jangkauan batas ukur ke-1, batas ukur ke-2, batas ukur ke-3. Dari hasil pengukuran dapat dilihat bahwa unjuk kerja alat ukur Pengukur Kapasitansi ini cukup baik dalam batas ukur 1. Sedangkan, untuk sampai batas ukur ke-2 dan ke-3 tidak cukup baik. Hal ini mungkin disebabkan desain kalibrasi yang tidak terpisah. Sehingga, ketika memberikan proses *adjusting* pada jangkauan (batas ukur) ke-1, maka hal tersebut mempengaruhi batas ukur yang lainnya.

Terlihat bahwa hasil kesalahan relatif berbeda-beda untuk tiap jangkauan (*range*) pengukuran. Hal ini disebabkan oleh perbedaan karakteristik pada masing-masing jangkauan.

Alat ini digunakan untuk mengukur nilai kapasitansi kapasitor untuk skala maksimum dari 40 pF sampai 4 nF. Untuk masing-masing skala batas ukur, kesalahan rata-ratanya berurutan, yaitu: 2,8% 21,2% 86,2%. Dengan keterbatasan tersebut, alat ini tidak dapat digunakan untuk mengukur kapasitor diatas atau dibawah standar yang ditentukan.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan ini, dapat ditarik kesimpulan, bahwa telah berhasil dibuat Pengukur Kapasitansi yang merupakan alat ukur kapasitor non-polar. Hasil yang cukup baik hanya pada jangkauan 400 pF (piko farad) dari keseluruhan jangkauan 3 dekade. Secara praktis (implementatif), mudah dibuat, menggunakan rangkaian op amp yang umum, rangkaian dapat di-pra implementasi-kan pada protoboard dalam waktu singkat (hitungan menit), memecahkan solusi kecepatan bagi kapasitor berharga kecil.

Prinsip kerja alat ukur kapasitansi ini menggunakan osilator sebagai penghasil frekuensi. Dari analisis data diperoleh bahwa linieritas alat cukup baik pada batas ukur kapasitansi yang telah ditentukan.

5.2. Saran Pengembangan

Alat ukur Capacitance Meter yang telah terealisasi masih banyak kekurangannya, oleh karena itu penulis memberikan saran agar dikemudian hari dapat dikembangkan:

1. Pengkalibrasian perlu dilakukan secara tepat dan teliti sehingga kepresisian alat pengukur ini cukup diandalkan dengan melihat kembali penggunaan komponen-komponen dengan toleransi kepresisian yang cukup tinggi.
2. Pembuatan alat pengukur ini diharapkan jauh lebih sempurna dan dapat dilakukan pengembangan lebih lanjut untuk penyempurnaan dalam hal keringkasan pengukuran yaitu dikembangkan dengan *auto-selector* pada pemrogramannya.

DAFTAR ACUAN

- [1] P. F. Dunn, *Measurement and Data Analysis for Engineering and Science*, (Mc Graw Hill, New York, 2005), hlm. 66.
- [2] Vadim V. Ivanov and Igor M. Filanovsky, *Operational Amplifier Speed and Accuracy Improvement*, (Kluwer Academic Publishers, New York, 2004), hlm. 65.
- [3] Kendall Su, *Analog Filters Second Edition*, (Kluwer Academic Publishers, New York, 2003), hlm. 190.
- [4] Achyanto.D, *Komunikasi Elektronika*. (Erlangga, Jakarta, 1991), hlm. 39.
- [5] Barmawi.M, *Prinsip-prinsip elektronika jilid 1*. (Erlangga, Jakarta, 1987), hlm. 90.
- [6] Daryanto, *Pengetahuan Teknik Elektronika*. (Bumi Aksara, Jakarta, 2002), hlm. 120.
- [7] Sumanto, *Elektronika Industri*. (Andi, Yogyakarta, 2002), hlm. 119.
- [8] Sutrisno, *Elektronika Teori dan Penerapannya jilid 2*. (ITB, Bandung, 1987), hlm. 19.
- [9] Tadius Uria, *Dasar-Dasar transistor*. (Depdikbud, Jakarta, 1988), hlm. 19.
- [10] Wasito.S, *Vademekum Elektronika*. (Elex Media Komputindo, Jakarta, 1985), hlm. 111.
- [11] Institution of Electrical Engineers, *Instrumentation and Analytical Science*, (Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1989), hlm. 213.
- [12] William Lichten, *Data and Error Analysis*, (Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA, 1999), hlm. 12.

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Datasheet LM311
- Lampiran 2. Datasheet LF353
- Lampiran 3. Datasheet LM336
- Lampiran 4. Datasheet LF351
- Lampiran 5. Datasheet ADD3701CCN
- Lampiran 6. Datasheet 2N4126
- Lampiran 7. Datasheet 1N4148



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemajuan ilmu pengetahuan, sedikit-banyak telah mempengaruhi kehidupan, bahkan perilaku manusia dalam taraf tertentu. Teknologi elektronika pun berkembang seiring dengan tuntutan berbagai kebutuhan, khususnya dalam bidang pengukuran dan instrumentasi elektronika. Banyak hal mengenai pengembangannya, sangat ditentukan oleh pengukuran besaran-besaran elektronika yang terkait. Oleh karena itu, diperlukan alat ukur elektronika yang memiliki kemampuan pengukuran besaran sesuai kebutuhan. Pada saat sekarang terdapat banyak alat ukur terutama alat ukur komponen. Dalam proyek elektronika komponen yang mutlak harus diketahui nilainya adalah komponen dasar seperti: resistor, kapasitor, induktor. Ada alat ukur dalam suatu instrumen terdapat beberapa kemampuan pengukuran seperti *Voltmeter*, *Ohmmeter*, *Kapasitansmeter* yang dijadikan satu instrumen yang disebut *Multimeter*. Alat ini disamping harganya relatif mahal, juga dalam hal-hal tertentu dalam pemakaiannya mempunyai kekurangan dalam hal faktor ketelitian dan *range* pengukuran.

Kapasitor memiliki peranan penting dibidang elektronika, antara lain diaplikasikan dalam rangkaian elektronika yaitu untuk memilih frekuensi pada radio penerima, meratakan fluktuasi tegangan dan sebagainya. Banyak nilai kapasitor yang nilainya sulit diterjemahkan yaitu ketika kapasitor bernilai kecil dan memiliki warna cetak yang kurang jelas. Dari permasalahan tersebut maka dirancang alat ukur kapasitansi meter agar memperoleh nilai kapasitansi yang lebih spesifik, dimana ketelitian dan *range* pengukuran dapat direncanakan.

Berkaitan dengan masalah tersebut perlu dikembangkan suatu alat yang dapat mengetahui nilai kapasitor dengan teliti. Komponen-komponen elektronika yang berhubungan dengan alat ukur kapasitansi diantaranya ada IC, transistor, kapasitor, dioda, resistor dan komponen-komponen lain yang berhubungan dengan alat ini.

1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang coba diselesaikan melalui karya ilmiah ini adalah membuat suatu sistem alat ukur kapasitansi dengan penampil (*display*) LCD.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dan pembuatan alat ukur kapasitansi ini adalah :

1. Membuat rangkaian Capacitance Meter untuk mengetahui suatu nilai kapasitor.
2. Dapat merancang dan mengkonstruksikan sebuah alat ukur elektronik untuk mengukur besar kapasitansi suatu kapasitor, dimana hasil pengukuran ditunjukkan oleh penampil (*display*) LCD setelah mengalami pengolahan sinyal terintegrasi oleh mikrokontroler.
3. Sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains, kemudian dapat pula sebagai langkah awal mencoba merambah ke penelitian nilai kapasitansi sampai taraf rendah dan presisi lebih tinggi.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian yang dilakukan bermanfaat untuk:

1. Sebagai alat pembantu untuk mengetahui nilai kapasitansi dari suatu kapasitor.
2. Dapat membantu dan bermanfaat bagi penelitian di laboratorium maupun untuk teknisi pada berbagai proyek elektronika khususnya dalam menentukan nilai kapasitansi.

1.5 Batasan Penelitian

Alat ukur kapasitansi yang dibuat dalam karya tulis ilmiah ini dibatasi hanya pada pengukuran kapasitor non-polar.

BAB 2 TEORI UMUM

2.1 Metode Pengukuran Kapasitansi

Secara umum, teori untuk menganalisis kapasitansi bermula dengan rumus sebagai berikut [1],[2]:

$$C = \frac{I}{dV / dt} \quad (1)$$

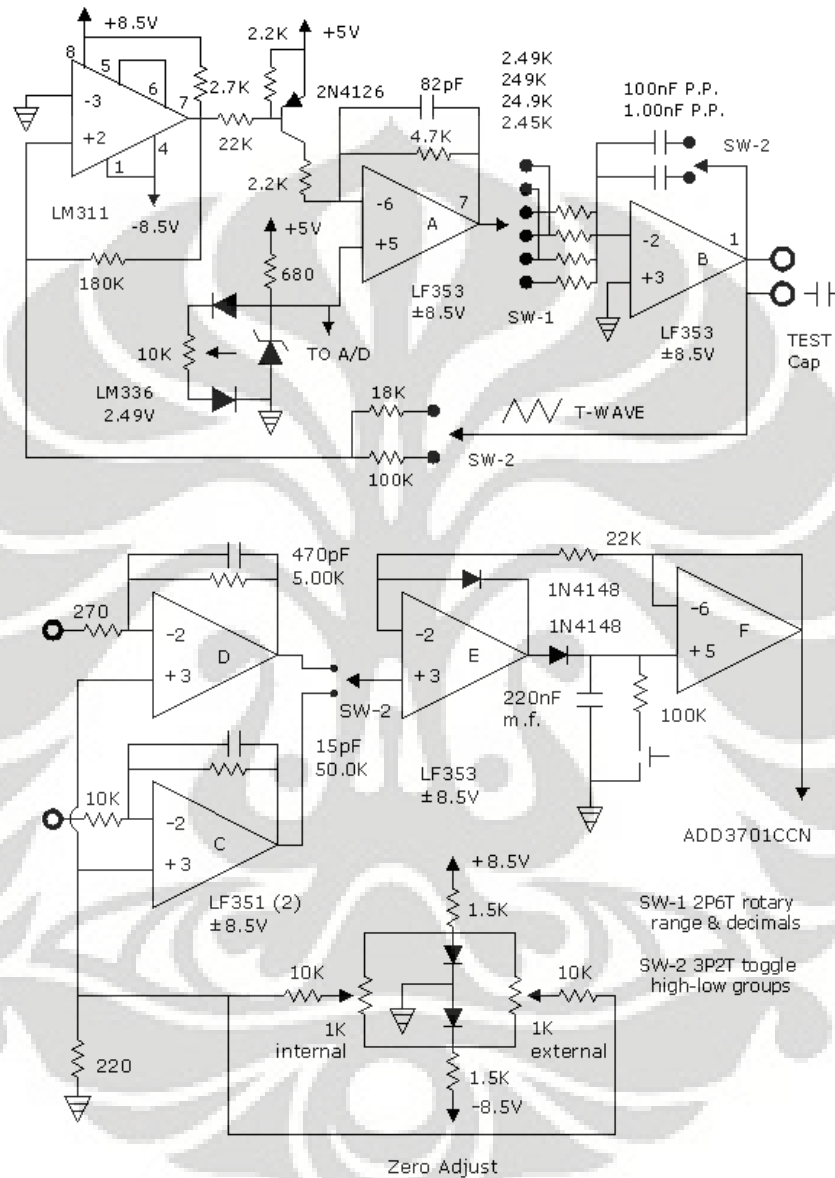
Dikatakan, kapasitansi sama dengan arus dibagi tegangan per detik. Artinya, bila salah satu sisi kapasitor di-bumi-kan (*grounded*) dan sebuah arus konstan dialirkan pada sisi yang lain, tegangannya akan naik pada suatu laju konstan. Mengukur laju meningkatnya tegangan merupakan metode yang biasa dalam menentukan kapasitansi. Namun, hal itu tak dapat bekerja dengan baik untuk kapasitor bernilai kecil karena sulitnya penentuan waktu antara dua tegangan acuan dalam waktu yang singkat. Bagaimanapun, prosedur tersebut cukup presisi pada kecepatan rendah. Hal ini dapat digunakan untuk mengukur kapasitor-kapasitor acuan, sebagaimana akan ditunjukkan nanti.

Apa yang dilakukan Capacitance Meter ialah menahan tegangan per detik konstan sewaktu mengukur arus. Arus dapat diukur pada kecepatan tinggi lebih mudah daripada tegangan per detik.

Salah satu keuntungannya ialah keseluruhan rangkaiannya analog. Sehingga, resolusinya hanya dibatasi oleh derau (*noise*). Beruntung sekali, rangkaiannya sangat kebal terhadap derau karena tiga kapasitor yang berfungsi sebagai penyaring (*filter*) derau – sebuah kapasitor acuan, kapasitor yang diukur dan sebuah kapasitor pendeteksi puncak (*peak detector*).

Tegangan per detik yang konstan diproduksi oleh sebuah pembangkit gelombang segitiga yang presisi. Penerapan pembangkit gelombang segitiga pada salah satu sisi kapasitor yang diukur menghasilkan sebuah arus konstan pada sisi yang lainnya. Arusnya dideteksi menggunakan sebuah pengubah arus-ke-tegangan yang memiliki sebuah gelombang kotak pada keluarannya. Sebuah pendeteksi puncak mengukur amplitudo gelombang kotak. Hasilnya, tegangan diletakkan

pada sebuah penampil digital melalui sebuah ADC yaitu sebuah voltmeter pada sebuah chip. Sebuah voltmeter digital dapat digunakan untuk pembacaannya. Namun, dapat pula ditampilkan menggunakan LCD.



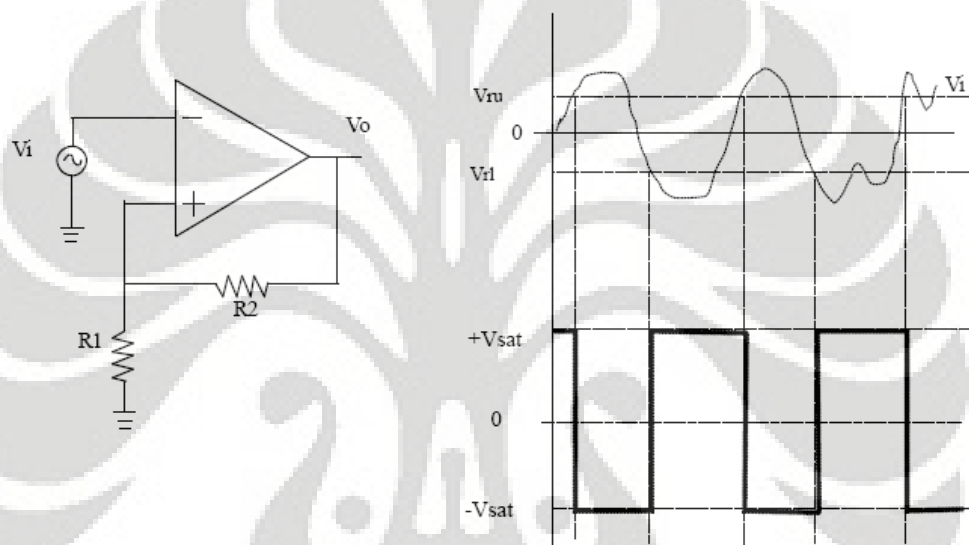
Gambar 2.1: Skematik rangkaian secara menyeluruh.

Bagian rangkaian berupa pembangkit gelombang segitiga menggunakan prosedur standar, kecuali adanya penambahan sebuah tegangan acuan untuk memberikan presisi tinggi. Pada bagian komparatornya, (LM311), menghasilkan perubahan kondisi ketika amplitudo gelombang segitiga mencapai nilai yang

diinginkan. Amplitudo gelombang T tidaklah kritis; hanya kemiringannya saja. Amplitudo di-set pada $10V_{PP}$ ($\pm 5V$) untuk tiga jangkauan pertama (kapasitor bernilai kecil), dan $1.8V_{PP}$ untuk tiga jangkauan selanjutnya (yang berharga lebih besar). Amplitudo tereduksi hanya memberikan efek memperbesar frekuensi; sehingga, frekuensi terendah yang berada dalam enam jangkauan sekitar 32Hz.[3]

2.2 Op-Amp sebagai pembanding (*comparator*) dengan jendela

Rangkaian Op-Amp sebagai pembanding dengan jendela digambarkan pada Gambar 2.2.



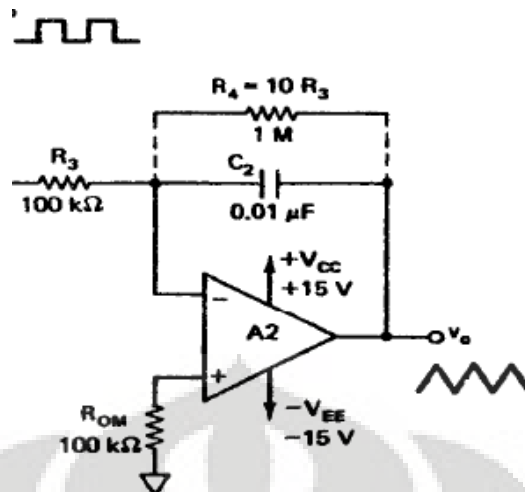
Gambar 2.2: Rangkaian komparator dengan jendela.

Perhitungan menentukan jendela Volt reference Up (V_{ru}) dan Volt reference low (V_{rl}) adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V_{ru} &= \frac{R1}{R1 + R2} (+V_{sat}) \\ V_{rl} &= \frac{R1}{R1 + R2} (-V_{sat}) \end{aligned} \quad (2)$$

2.3 Pembangkit gelombang segitiga

Op-Amp dapat juga digunakan sebagai pembangkit gelombang segitiga dari bentuk gelombang kotak sebagaimana digambarkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3: Osilator gelombang segitiga

2.4 Mikrokontroler AVR ATMEGA 8535

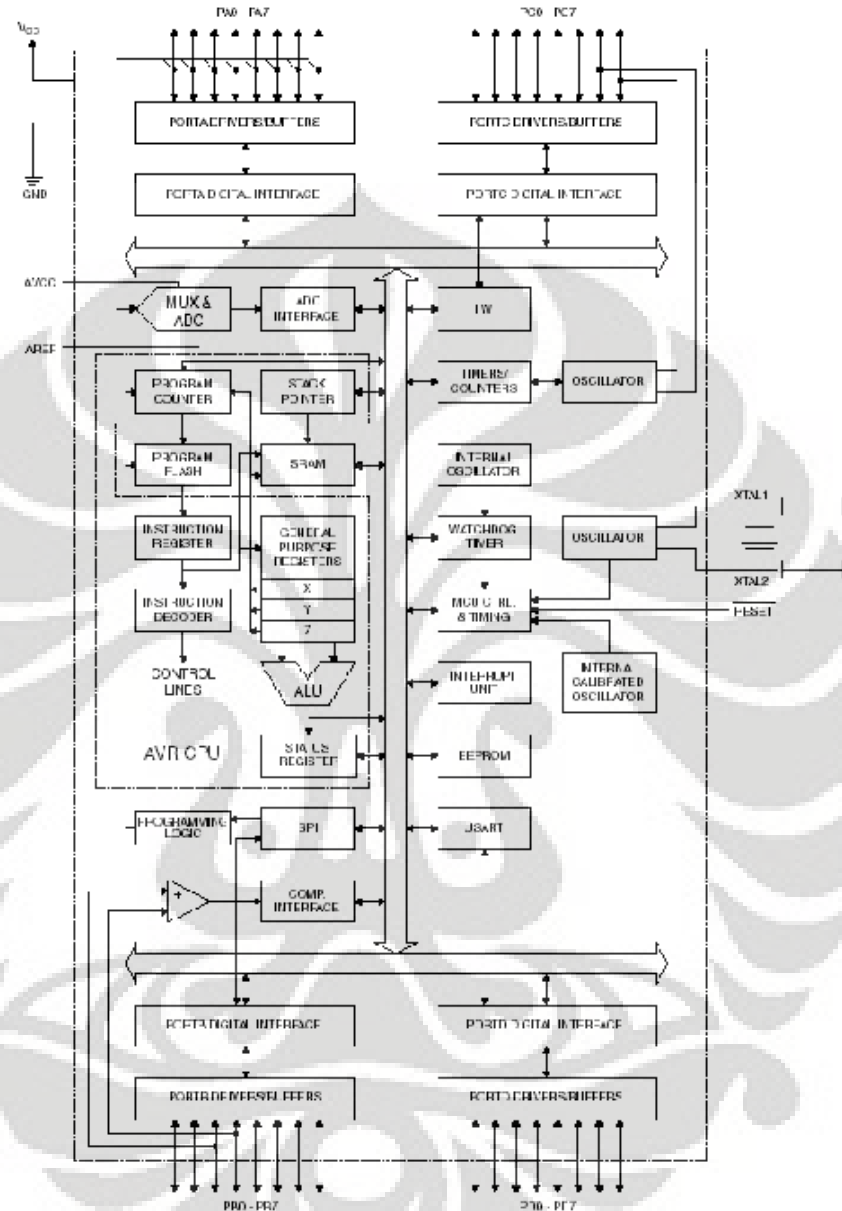
AVR termasuk kedalam jenis mikrokontroler **RISC** (*Reduced Instruction Set Computing*) 8 bit. Berbeda dengan mikrokontroler keluarga MCS-51 yang berteknologi **CISC** (*Complex Instruction Set Computing*). Pada mikrokontroler dengan teknologi RISC semua instruksi dikemas dalam kode 16 bit (16 bits words) dan sebagian besar instruksi dieksekusi dalam 1 clock, sedangkan pada teknologi CISC seperti yang diterapkan pada mikrokontroler MCS-51, untuk menjalankan sebuah instruksi dibutuhkan waktu sebanyak 12 siklus clock.

AVR atau sebuah kependekan dari *Alf and Vegard's Risc Processor* merupakan chip mikrokontroler yang diproduksi oleh Atmel, yang secara umum dapat dikelompokkan ke dalam 4 kelas :

- ATtiny
- ATmega
- AT90Sxx
- AT86RFxx

Perbedaan yang terdapat pada masing-masing kelas adalah kapasitas memori, peripheral, dan fungsinya. Dalam hal arsitektur maupun instruksinya, hampir tidak ada perbedaan sama sekali. Dalam hal ini ATMEGA8535 dapat beroperasi pada kecepatan maksimal 16MHz serta memiliki 6 pilihan mode sleep untuk menghemat penggunaan daya listrik.

Gambar berikut menunjukkan arsitektur ATMEGA8535 yang digunakan pada alat Capacitance Meter.



Gambar 2.3: Arsitektur ATMEGA8535.

Secara garis besar, arsitektur mikrokontroler ATMEGA8535 terdiri atas:

- 32 saluran I/O (Port A, Port B, Port C, dan Port D)
- 10 bit 8 Channel ADC (Analog to Digital Converter)
- 4 channel PWM

- 6 Sleep Modes : Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby and Extended Standby
- 3 buah timer/counter
- Analog comparator
- Watchdog timer dengan osilator internal
- 512 byte SRAM
- 512 byte EEPROM
- 8 kb Flash memory dengan kemampuan Read While Write
- Unit interupsi (internal & eksternal)
- Port antarmuka SPI8535 “memory map”
- Port USART untuk komunikasi serial dengan kecepatan maksimal 2,5Mbps
- 4.5 sampai 5.5V operation, 0 sampai 16MHz

Sedangkan konfigurasi pin ATMEGA 8535 sekilas dijabarkan berikut ini:



Gambar 2.4: IC ATMEGA 8535 dan pin-pinnya.

- VCC = pin masukan catu daya
- GND = pin ground
- Port A (PA0 – PA7) = pin I/O (bidirectional), pin ADC
- Port B (PB0 – PB7) = pin I/O (bidirectional), pin timer/counter, analog comparator, SPI
- Port C (PC0 – PC7) = pin I/O (bidirectional), TWI, analog comparator, Timer Oscilator

- Port D (PD0 – PD7) = pin I/O (bidirectional), analog comparator, interupsi eksternal, USART
- RESET = pin untuk me-reset mikrokontroler
- XTAL1 & XTAL2 = pin untuk clock eksternal
- AVCC = pin input tegangan ADC
- AREF = pin input tegangan referensi ADC

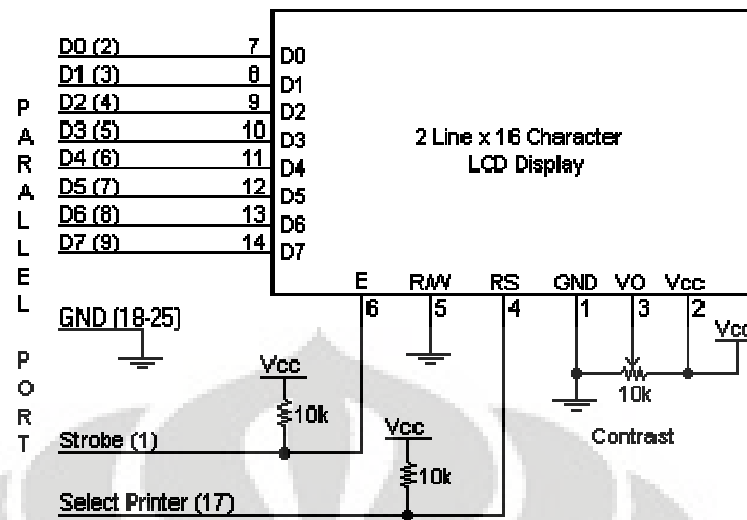
2.5 Penampil LCD 16x2 M1632

LCD yang digunakan M1632 produksi Seiko Instrument Inc. Yang memiliki beberapa fitur:

- 16 karakter, 2 Line, 5x7 dot matrik
- Duti rasio:1/16
- Konsumsi daya rendah
- Pilihan interface 4bit/8bit data
- Mempunyai beberapa fungsi tambahan: display clear, cursor on/off, blink karakter,cursor shift, display shift
- 5V DC Supply
- Reset otomatis pada saat power on
- Osilator tertanam didalam (*embedded*)

Ada 2 cara utk berkomunikasi dengan LCD, yaitu 8 bit dan 4 bit jalur data. Selain 8 atau 4 jalur yang terhubung dengan kontroler, dibutuhkan 3 jalur lagi untuk kontrol, yaitu RS, RW dan EN. Namun jika kita hanya ingin menuliskan data tanpa membaca data hubungkan saja RW ke Ground.

Sedangkan untuk pemrograman kita dapat memilih beberapa jenis, antara lain: AVR Studio, Win AVR, Bascom AVR, Codevision. Dengan catatan jika menggunakan Bascom AVR port Data LCD telah disesuaikan oleh Compiler. Jadi jika kita membutuhkan beberapa *interrupt* pada port tertentu pada chip, kita tidak begitu leluasa. Sementara ini, untuk keluesan dalam memprogram, dianjurkan menggunakan AVR Studio yang tersedia secara gratis.

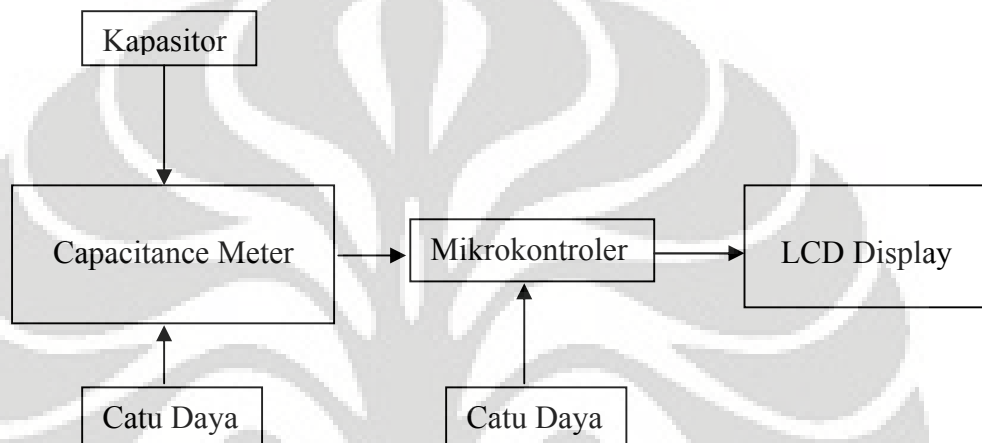


Gambar 2.5: Skematik antarmuka LCD 16x2 M1632.

BAB 3 METODE DAN PEMBUATAN ALAT

3.1 Diagram Sistem

Diagram sistem alat ukur Capacitance Meter yang telah dibuat adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1: Diagram skematik sistem ukur Capacitance Meter.

Apa yang dilakukan Capacitance Meter ialah menahan tegangan per detik konstan sewaktu mengukur arus. Arus dapat diukur pada kecepatan tinggi lebih mudah daripada tegangan per detik.

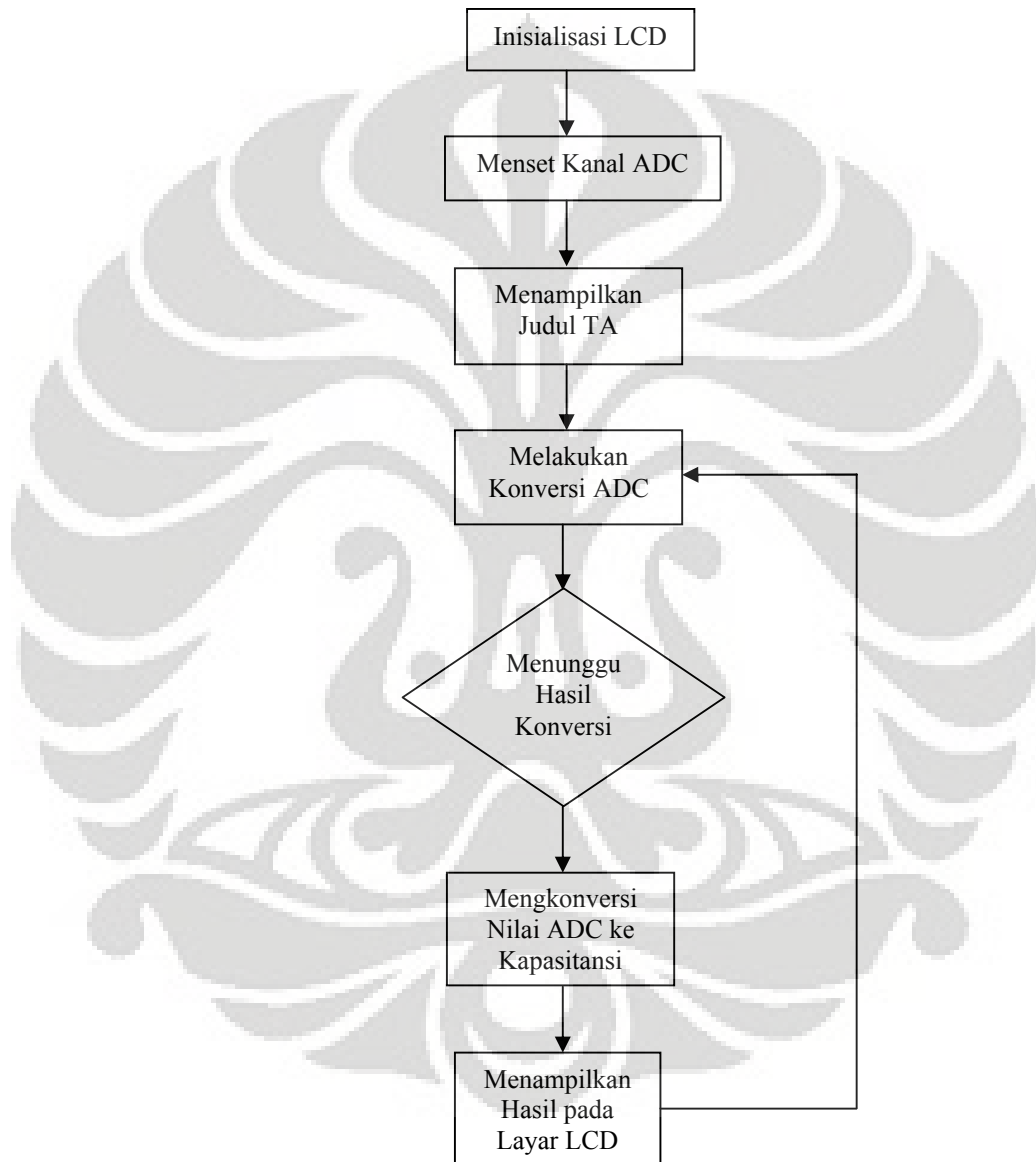
Salah satu keuntungannya ialah keseluruhan rangkaiannya analog. Sehingga, resolusinya hanya dibatasi oleh derau (*noise*). Beruntung sekali, rangkaiannya sangat kebal terhadap derau karena tiga kapasitor yang berfungsi sebagai penyaring (*filter*) derau – sebuah kapasitor acuan, kapasitor yang diukur dan sebuah kapasitor pendeteksi puncak (*peak detector*).

3.2 Implementasi alat

Tegangan per detik yang konstan diproduksi oleh sebuah pembangkit gelombang segitiga yang presisi [8]. Penerapan pembangkit gelombang segitiga pada salah satu sisi kapasitor yang diukur menghasilkan sebuah arus konstan pada sisi yang lainnya. Arusnya dideteksi menggunakan sebuah pengubah arus-ke-

tegangan yang memiliki sebuah gelombang kotak pada keluarannya. Sebuah pendeteksi puncak mengukur amplitudo gelombang kotak. Hasilnya, tegangan diletakkan pada sebuah penampil digital melalui sebuah ADC yaitu sebuah voltmeter pada sebuah chip. Sebuah voltmeter digital dapat digunakan untuk pembacaannya. Namun, dapat pula ditampilkan menggunakan LCD.

Adapun *flowchart* ADC alat pengukur kapasitansinya sebagai berikut:



Gambar 3.2: *Flowchart* untuk menampilkan nilai kapasitansi

Bagian rangkaian berupa pembangkit gelombang segitiga menggunakan prosedur standar, kecuali adanya penambahan sebuah tegangan acuan untuk

memberikan presisi tinggi. Pada bagian komparatornya, (LM311), menghasilkan perubahan kondisi ketika amplitudo gelombang segitiga mencapai nilai yang diinginkan. Amplitudo gelombang T tidaklah kritis; hanya kemiringannya saja. Amplitudo di-set pada $10V_{PP}$ ($\pm 5V$) untuk tiga jangkauan pertama (kapasitor bernilai kecil), dan $1.8V_{PP}$ untuk tiga jangkauan selanjutnya (yang berharga lebih besar). Amplitudo tereduksi hanya memberikan efek memperbesar frekuensi; sehingga, frekuensi terendah yang berada dalam enam jangkauan sekitar 32Hz.[3]

Pada bagian berikutnya, alat ini menggunakan Pengubah Arus-ke-Tegangan (CTV) berupa LF351. Pemisahan tes pin dilakukan untuk menyederhanakan rangkaian dan untuk mengurangi *noise pick up*.

Ukuran *Feedback resistors* sebagaimana yang diperlukan untuk korelasi tegangan output dengan kapasitansi.

Detektor puncak tidak memerlukan kapasitor penyimpan berbahan polypropylene, ketika nilai-nilai yang tertera digunakan. Namun, bila kapasitor penyimpan lebih besar, waktu rendam mulai menjadi relevan untuk mempercepat *pull-down* (disebut *set*); dan kemudian polypropylene mungkin diperlukan. Sebuah kapasitor film logam 220 nF memadai untuk suatu dioda *switching* biasa (1N4148 atau 1N914B). Arus bocor sebesar 5 sampai 10nA optimal bagi dioda. Pada 32Hz, arus mundur sebesar 10nA pada diode menghasilkan riak 0.71mV pada the kapasitor; dan koreksi tegangan terjadi di 45mV per detik. Untuk menarik sejumlah besar tegangan, resistor 100k digunakan dengan beralih sejenak.

Masukan noninverting dari CTV digunakan sebagai *zero adjust* untuk menghapus efek offset dari op-amp dan *cross capacitance*. (*Cross capacitance* ialah kapasitansi antara pin-pin pengukur.) Ada dua op-amp diserikan yang mempengaruhi offset keluaran: CTV dan op-amp yang pertama dari detektor puncak (op-amp E). Op-amp yang kedua dari puncak detektor (op-AMP F) tidak mempengaruhi net offset, karena tegangan outputnya ditentukan oleh yang pertama [9].

Op-amp B menghasilkan error yang tak lazim pada bagian masukan, sebut saja *Common Mode Error*. Hal ini nyata sebagai gelombang persegi pada input inverting. Ini hanya terjadi ketika output mengalami *slewing*, sebagaimana sebuah

gelombang segitiga, tetapi tidak terjadi ketika dengan gelombang persegi, dan itu bergantung pada *slew rate*. Hal ini mungkin disebabkan oleh internal kapasitor. Untuk LF351 atau LF353 dari National Semiconductor, nilainya $\pm 37\text{mV}$; untuk LF411 - $\pm 35\text{mV}$; untuk LF356 - $\pm 31\text{mV}$; untuk TL081 - $\pm 58\text{mV}$; masing-masing di dalam rentang 1. Dalam rentang 2, bernilai sepersepuluhnya, menjadi bergantung pada nilai *slew rate*. Harga tersebut dikurangi dari tegangan acuan dalam menentukan tegangan yang melalui resistor pengatur rentang.

Terdapat dua kapasitor acuan pada op amp B (100nF and 1.00nF). Gambar 2.2 menunjukkan sebuah rangkaian acuan untuk mengukur kapasitor dengan menggunakan *timer*, yang harus dimiliki oleh *frequency counter*. Resolusi yang diharapkan satu mikrodetik. Ketika sudah dikalibrasi, rangkaian menjadi sirkuit capacitance meter yang lengkap [10].

Bagian pertama sirkuit adalah generator gelombang segitiga yang sama presisinya yang digunakan oleh femto capacitance meter. Apa yang akan menjadi kapasitor acuan dalam hal ini adalah kapasitor yang akan diujinya. Resistor yang menentukan arus yang mengalir ke dalam kapasitor, R_a , disolder dari atas. Jadi, dapat diubah. Untuk harga 1M, maka akan menghasilkan sekitar $4.000 \mu\text{S}$ untuk kapasitor 1nF. Kapasitor 100nF menghasilkan 400mS; sehingga, R_a dapat lebih kecil.

Dua komparator digunakan untuk ambang bawah dan atas, dengan selisih sekitar 10V. Tegangan tersebut harus tepat diukur untuk menentukan volt per detiknya.

Ada *hysteresis* [11] sekitar 5mV pada setiap komparator untuk stabilitas di frekuensi rendah. Untuk menghitung itu, ada 5V di seluruh 270K umpan balik hambat sebelum perubahan kondisi/keadaan. Hasil saat ini melalui 270 ohm hambat memproduksi 5mV. Untuk lebih rendah komparator, ada 10V di seluruh penghambat umpan balik sebelum perubahan keadaan. Histerisis untuk comparator atas adalah pengurangan dari tegangan referensi, dan untuk menurunkan. Jadi efeknya saling membatalkan; dan nilainya dapat diabaikan.

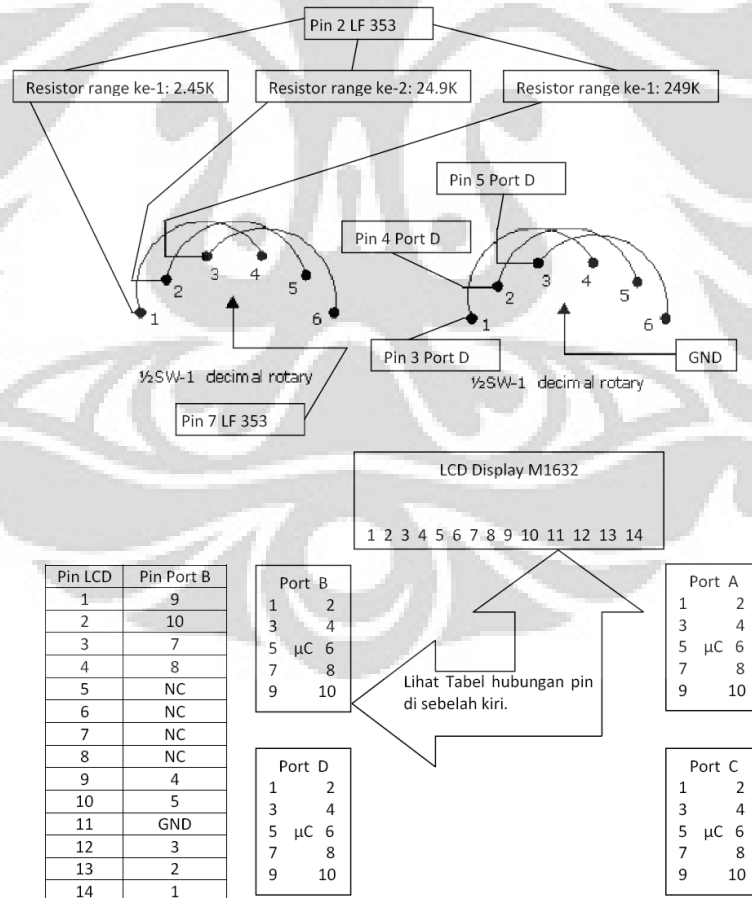
Gerbang AND di output memiliki tujuan mencegah terjadinya suatu yang tidak digunakan selama setengah dari siklus. Tegangan yang masuk dibatasi hingga 5V dengan arus dioda sebuah jaringan.

Sirkuit dapat dibentuk pada protoboard (*breadboard*), tetapi untuk presisi tinggi, harus menggunakan PCB (Printed Circuit Board).

Sirkuit mengangkat 60 siklus *hum* dengan mudah pada impedansi tinggi, maka mungkin harus dilindungi. Untuk melakukannya, gunakan sehelai timah atau aluminium dengan keempat sisinya ditebuk untuk membentuk sebuah kotak tanpa tutup. Tempatkan kertas di bawah untuk menyekat; *ground*-kan; dan tempatkan papan rangkaian tersebut. Bagian atas tidak harus dilindungi.

Kapasitor dapat disolder ke PCB, tetapi saya menggunakan pin penyisip dan menyoldernya ke PCB. Shielding antara mereka diperlukan, jika kapasitor kecil yang diukur. Tambahkan 3pF ke kapasitor berharga 1nF, karena lintas-kapasitansi dari op-AMP B kira-kira akan sebesar itu.

Setelah dari rangkaian analognya, nilai ADC diumpankan ke mikrokontroler AT 8535. Ada pun, koneksi skematik ke masing-masing pin pada masing-masing port adalah sebagai berikut:



Gambar 3.3: Skematik ke ATmega 8535.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengukuran

Pada Pengukur Kapasitansi yang telah dibuat, ada tiga jangkauan (*range*) pengukuran yang digunakan, yaitu masing-masing: skala maksimum 40 pF, skala maksimum 400 pF, dan skala maksimum 4 nF. Penulis mengambil data pada masing-masing jangkauan sebanyak lima nilai kapasitansi. Masing-masing nilai kapasitansi dilakukan 10 kali pengambilan sampel (pencuplikan). Untuk tiap nilai kapasitor, pada kolom “Nilai sebenarnya” merupakan nilai data pembanding yang diukur oleh alat ukur digital yang telah ada (Merk Excel, model DT). Beberapa data hasil pengukuran menggunakan Pengukur Kapasitansi yang telah dibuat diperoleh antara lain sebagai berikut:

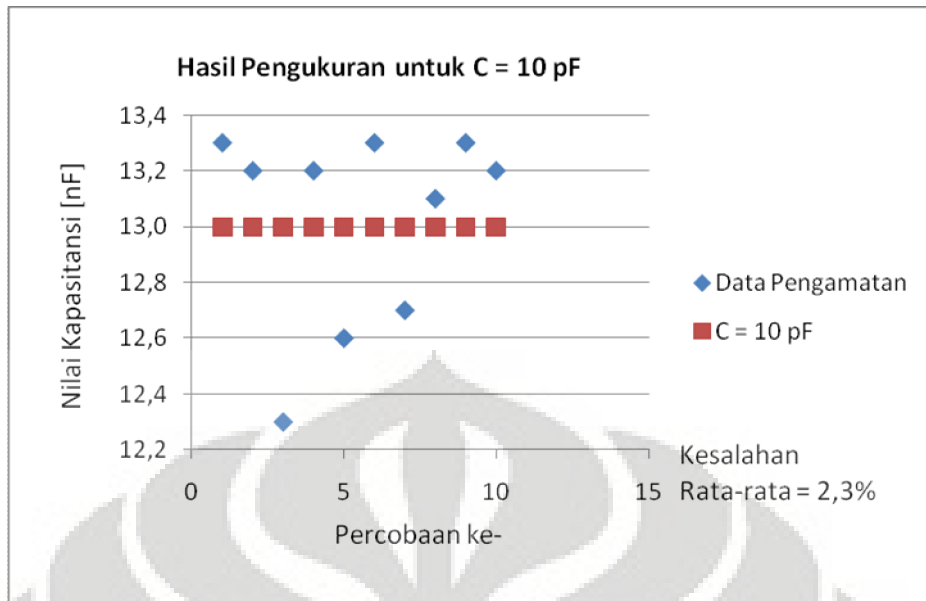
A.1 Pada jangkauan 0 – 40 pF; Untuk nilai kapasitor C = 10 pF.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor C = 10 pF dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut ini:

Tabel 4.1: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor C = 10 pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	13	13,3	2,3
2	13	13,2	1,5
3	13	12,3	5,4
4	13	13,2	1,5
5	13	12,6	3,1
6	13	13,3	2,3
7	13	12,7	2,3
8	13	13,1	0,8
9	13	13,3	2,3
10	13	13,2	1,5
	Rata-rata =	13,0	2,3

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut:



Gambar 4.1: Grafik hasil pengukuran untuk $C = 10$ pF.

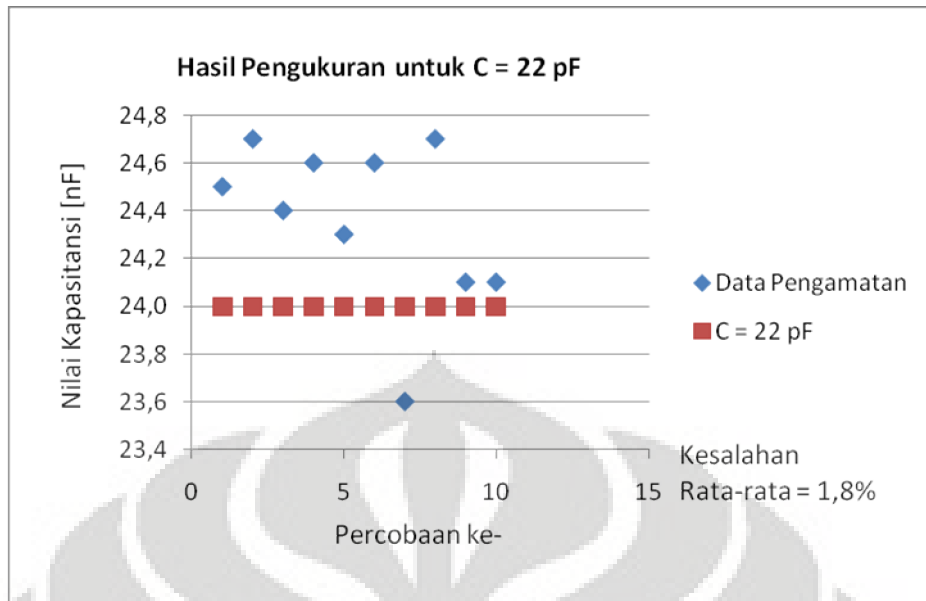
A.2 Pada jangkauan 0 – 40 pF; Untuk nilai kapasitor $C = 22$ pF.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor $C = 22$ pF dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut ini:

Tabel 4.2: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 22$ pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	24	24,5	2,1
2	24	24,7	2,9
3	24	24,4	1,7
4	24	24,6	2,5
5	24	24,3	1,3
6	24	24,6	2,5
7	24	23,6	1,7
8	24	24,7	2,9
9	24	24,1	0,4
10	24	24,1	0,4
	Rata-rata =	24,4	1,8

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut:



Gambar 4.2: Grafik hasil pengukuran untuk $C = 22$ pF.

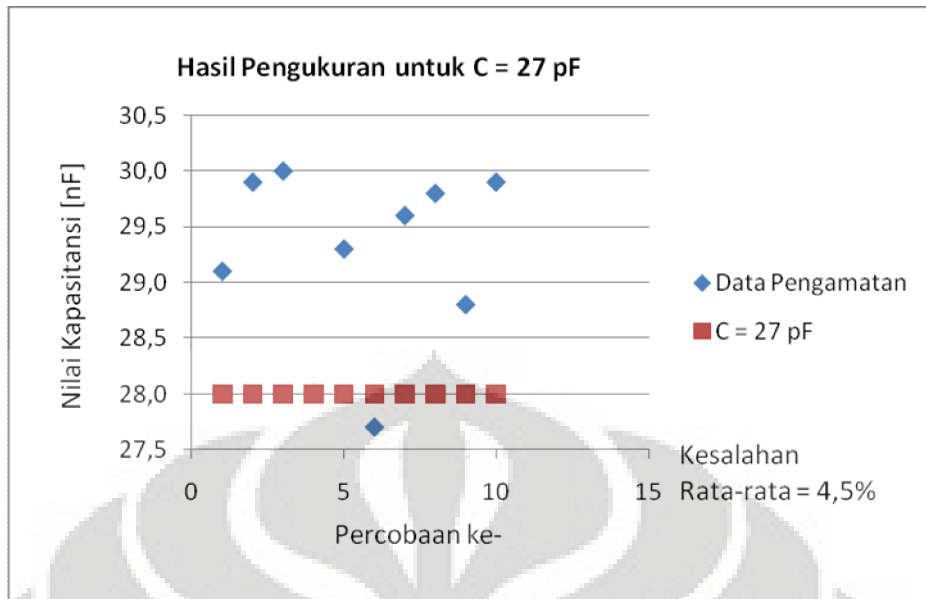
A.3 Pada jangkauan 0 – 40 pF; Untuk nilai kapasitor $C = 27$ pF.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor $C = 27$ pF dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut ini:

Tabel 4.3: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 27$ pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	28	29,1	3,9
2	28	29,9	6,8
3	28	30,0	7,1
4	28	28,0	0,0
5	28	29,3	4,6
6	28	27,7	1,1
7	28	29,6	5,7
8	28	29,8	6,4
9	28	28,8	2,9
10	28	29,9	6,8
	Rata-rata =	29,2	4,5

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut:



Gambar 4.3: Grafik hasil pengukuran untuk $C = 27$ pF.

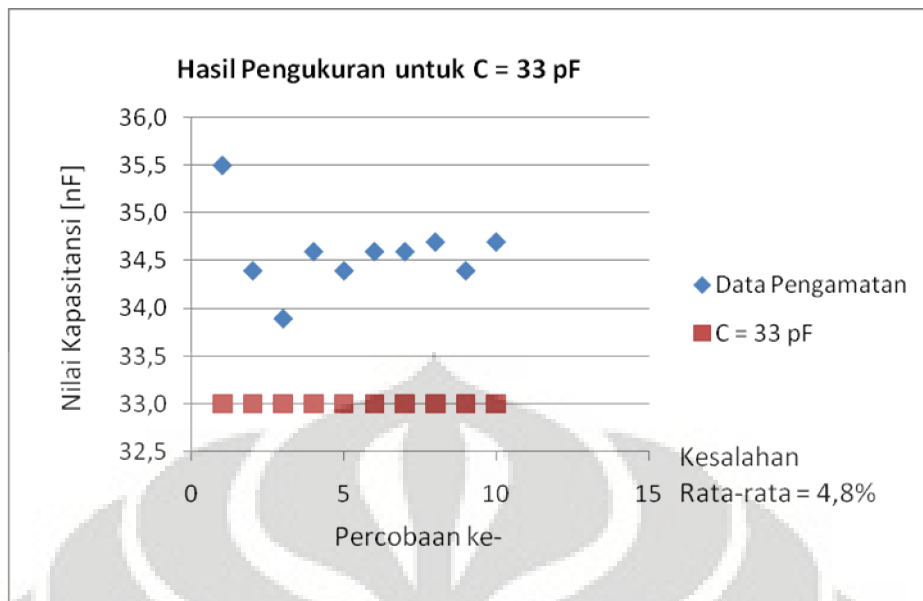
A.4 Pada jangkauan 0 – 40 pF; Untuk nilai kapasitor $C = 33$ pF

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor $C = 33$ pF dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut ini:

Tabel 4.4: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 33$ pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	33	35,5	7,6
2	33	34,4	4,2
3	33	33,9	2,7
4	33	34,6	4,8
5	33	34,4	4,2
6	33	34,6	4,8
7	33	34,6	4,8
8	33	34,7	5,2
9	33	34,4	4,2
10	33	34,7	5,2
	Rata-rata =	34,6	4,8

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut:



Gambar 4.4: Grafik hasil pengukuran untuk $C = 33$ pF.

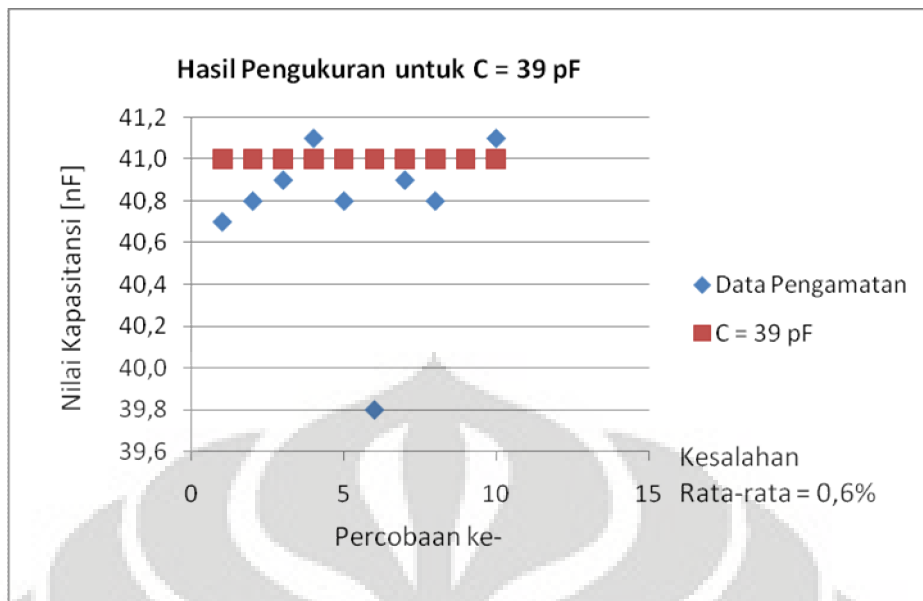
A.5 Pada jangkauan 0 – 40 pF; Untuk nilai kapasitor $C = 39$ pF

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor $C = 39$ pF dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut ini:

Tabel 4.5: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 39$ pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	41	40,7	0,7
2	41	40,8	0,5
3	41	40,9	0,2
4	41	41,1	0,2
5	41	40,8	0,5
6	41	39,8	2,9
7	41	40,9	0,2
8	41	40,8	0,5
9	41	41,0	0,0
10	41	41,1	0,2
	Rata-rata =	40,8	0,6

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut:



Gambar 4.5: Grafik hasil pengukuran untuk C = 39 pF.

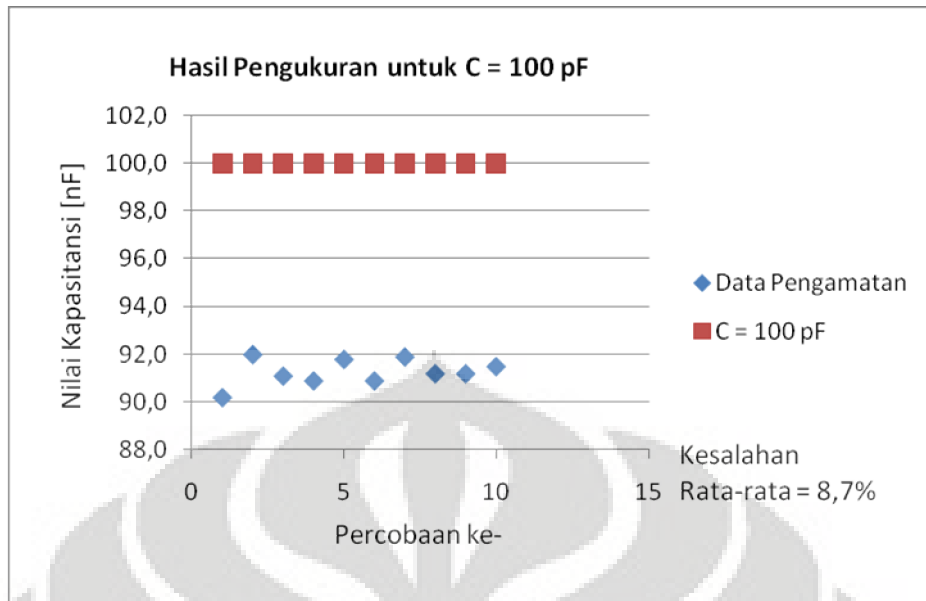
B.1 Pada jangkauan 0 – 400 pF; Untuk nilai kapasitor C = 100 pF.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor C = 100 pF dapat dilihat pada Tabel 4.6 berikut ini:

Tabel 4.6: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor C = 100 pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	100	90,2	9,8
2	100	92,0	8,0
3	100	91,1	8,9
4	100	90,9	9,1
5	100	91,8	8,2
6	100	90,9	9,1
7	100	91,9	8,1
8	100	91,2	8,8
9	100	91,2	8,8
10	100	91,5	8,5
	Rata-rata =	91,3	8,7

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.6 berikut:



Gambar 4.6: Grafik hasil pengukuran untuk C = 100 pF.

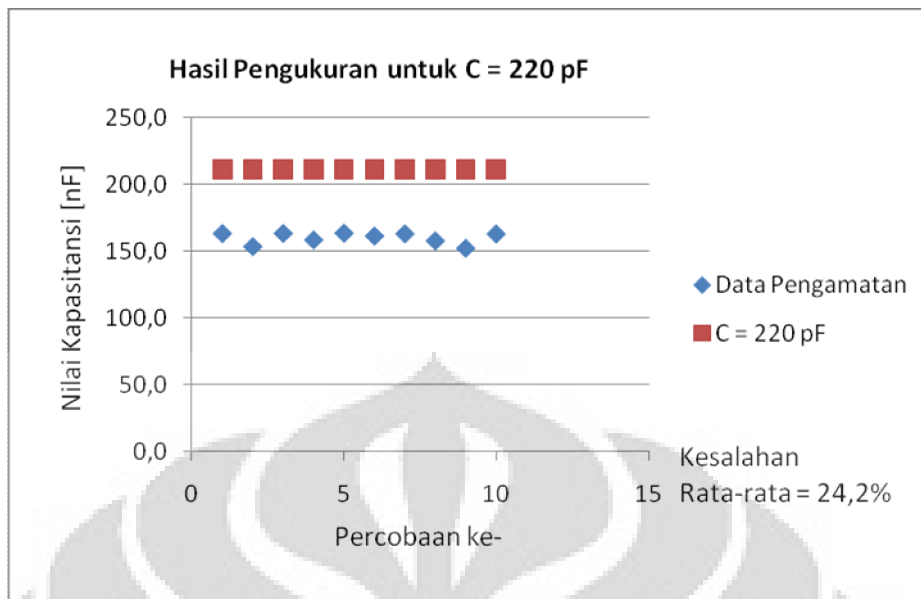
B.2 Pada jangkauan 0 – 400 pF; Untuk nilai kapasitor C = 220 pF.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor C = 220 pF dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut ini:

Tabel 4.7: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor C = 220 pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	211	163,3	22,6
2	211	153,3	27,3
3	211	163,4	22,6
4	211	158,4	24,9
5	211	163,6	22,5
6	211	161,4	23,5
7	211	163,1	22,7
8	211	157,7	25,3
9	211	152,0	28,0
10	211	163,0	22,7
	Rata-rata =	159,9	24,2

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.7 berikut:



Gambar 4.7: Grafik hasil pengukuran untuk C = 220 pF.

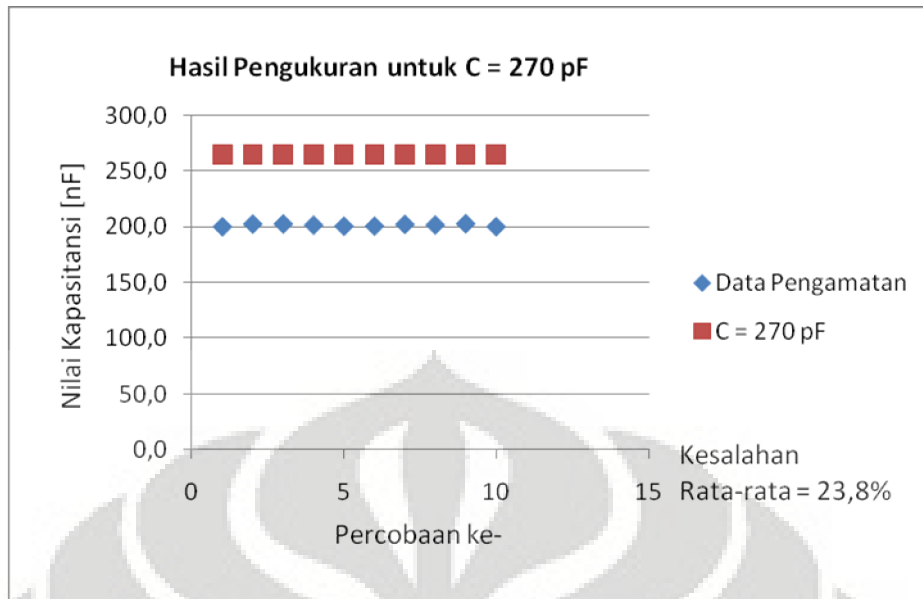
B.3 Pada jangkauan 0 – 400 pF; Untuk nilai kapasitor C = 270 pF.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor C = 270 pF dapat dilihat pada Tabel 4.8 berikut ini:

Tabel 4.8: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor C = 270 pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	265	200,4	24,4
2	265	202,8	23,5
3	265	202,9	23,4
4	265	201,9	23,8
5	265	200,9	24,2
6	265	201,0	24,2
7	265	202,5	23,6
8	265	202,0	23,8
9	265	203,1	23,4
10	265	200,5	24,3
	Rata-rata =	201,8	23,8

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.8 berikut:



Gambar 4.8: Grafik hasil pengukuran untuk C = 270 pF.

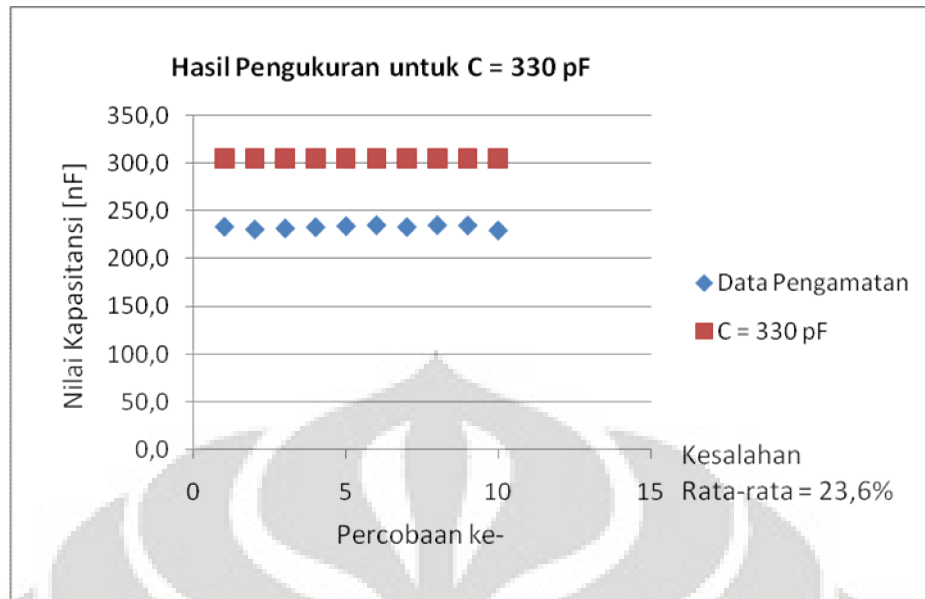
B.4 Pada jangkauan 0 – 400 pF; Untuk nilai kapasitor C = 330 pF

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor C = 330 pF dapat dilihat pada Tabel 4.9 berikut ini:

Tabel 4.9: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor C = 330 pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	305	233,3	23,5
2	305	230,5	24,4
3	305	231,6	24,1
4	305	232,8	23,7
5	305	234,0	23,3
6	305	234,9	23,0
7	305	233,0	23,6
8	305	234,9	23,0
9	305	234,6	23,1
10	305	229,5	24,8
	Rata-rata =	232,9	23,6

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.9 berikut:



Gambar 4.9: Grafik hasil pengukuran untuk C = 330 pF.

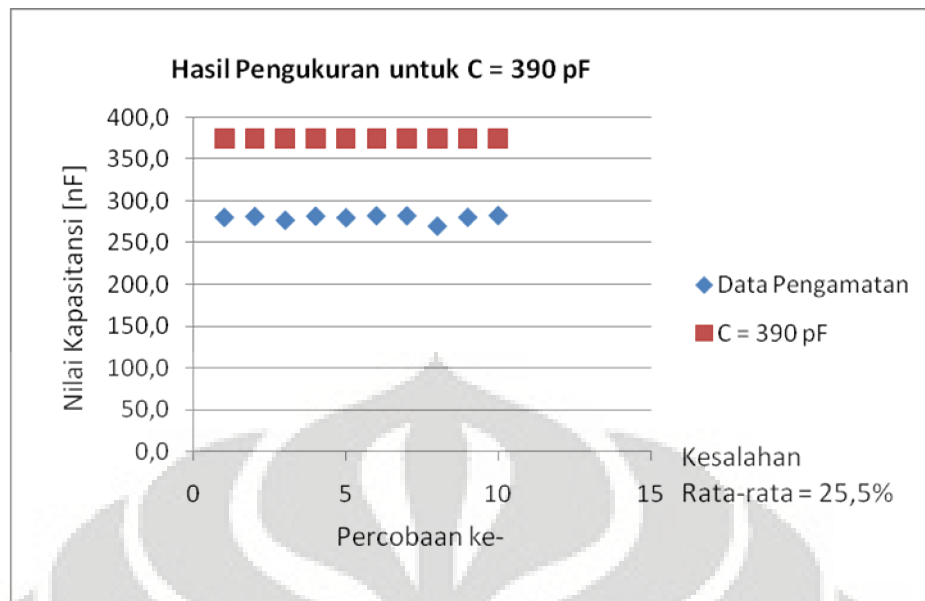
B.5 Pada jangkauan 0 – 400 pF; Untuk nilai kapasitor C = 390 pF

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor C = 390 pF dapat dilihat pada Tabel 4.10 berikut ini:

Tabel 4.10: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor C = 390 pF.

No.	Nilai Sebenarnya [pF]	Nilai Terukur [pF]	% Kesalahan
1	375	280,0	25,3
2	375	281,1	25,0
3	375	276,5	26,3
4	375	281,4	25,0
5	375	279,6	25,4
6	375	282,0	24,8
7	375	282,0	24,8
8	375	269,5	28,1
9	375	280,1	25,3
10	375	282,3	24,7
	Rata-rata =	279,5	25,5

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.10 berikut:



Gambar 4.10: Grafik hasil pengukuran untuk $C = 390 \text{ pF}$.

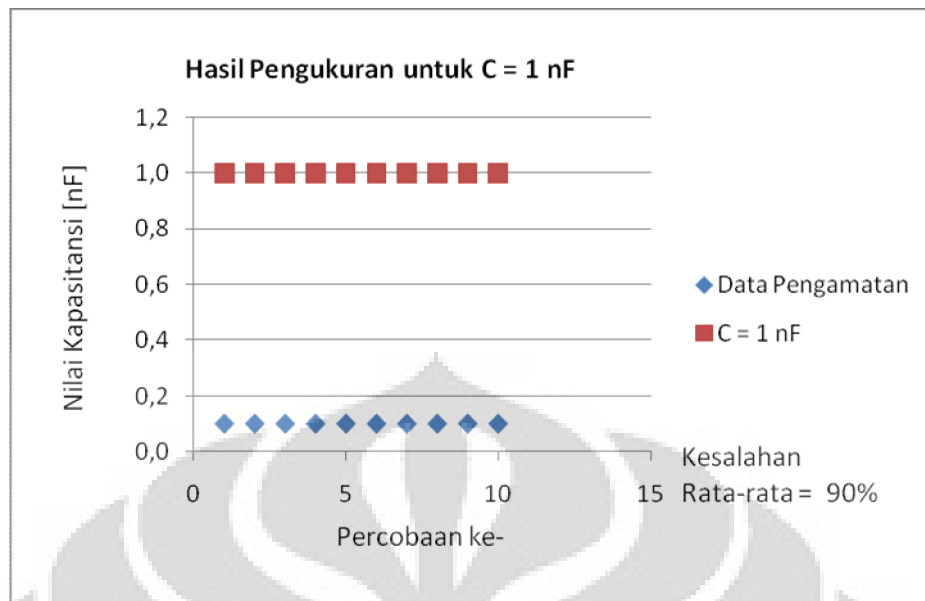
C.1 Pada jangkauan 0 – 4 nF; Untuk nilai kapasitor $C = 1 \text{ nF}$.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor $C = 1 \text{ nF}$ dapat dilihat pada Tabel 4.11 berikut ini:

Tabel 4.11: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 1 \text{ nF}$.

No.	Nilai Pembanding [nF]	Nilai Terukur [nF]	% Kesalahan
1	1,001	0,1	90,0
2	1,001	0,1	90,0
3	1,001	0,1	90,0
4	1,001	0,1	90,0
5	1,001	0,1	90,0
6	1,001	0,1	90,0
7	1,001	0,1	90,0
8	1,001	0,1	90,0
9	1,001	0,1	90,0
10	1,001	0,1	90,0
	Rata-rata =	0,1	90,0

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.11 berikut:



Gambar 4.11: Grafik hasil pengukuran untuk C = 1 nF.

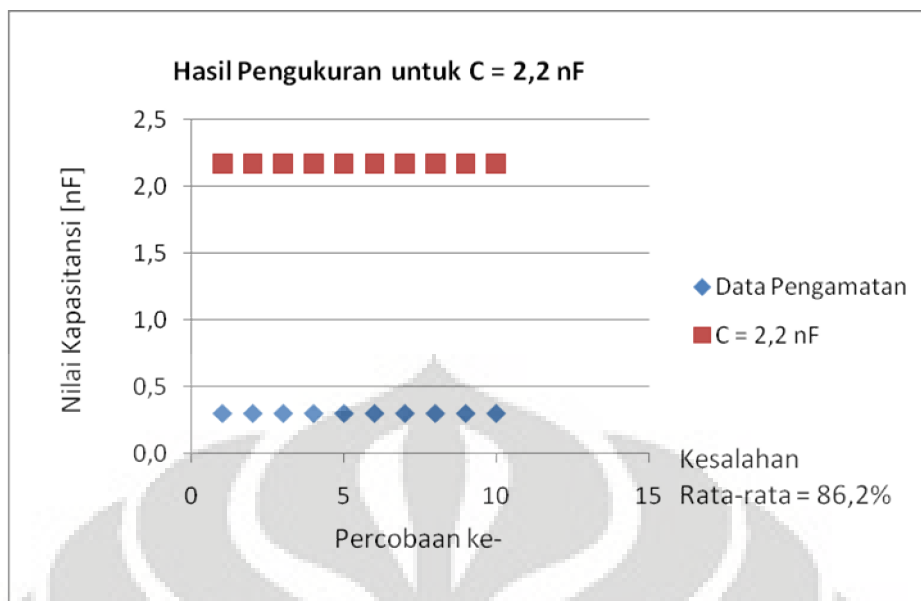
C.2 Pada jangkauan 0 – 4 nF; Untuk nilai kapasitor C = 2,2 nF.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor C = 2,2 nF dapat dilihat pada Tabel 4.12 berikut ini:

Tabel 4.12: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor C = 2,2 nF.

No.	Nilai Pembanding [nF]	Nilai Terukur [nF]	% Kesalahan
1	2,17	0,3	86,2
2	2,17	0,3	86,2
3	2,17	0,3	86,2
4	2,17	0,3	86,2
5	2,17	0,3	86,2
6	2,17	0,3	86,2
7	2,17	0,3	86,2
8	2,17	0,3	86,2
9	2,17	0,3	86,2
10	2,17	0,3	86,2
	Rata-rata =	0,3	86,2

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.12 berikut:



Gambar 4.12: Grafik hasil pengukuran untuk $C = 2,2 \text{ nF}$.

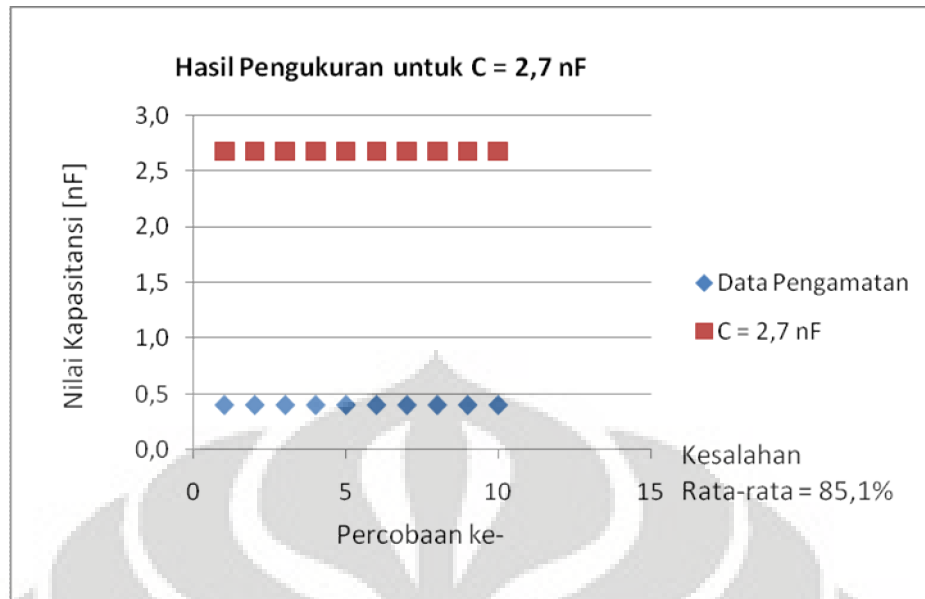
C.3 Pada jangkauan 0 – 4 nF; Untuk nilai kapasitor $C = 2,7 \text{ nF}$.

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor $C = 2,7 \text{ pF}$ dapat dilihat pada Tabel 4.13 berikut ini:

Tabel 4.13: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 2,7 \text{ nF}$.

No.	Nilai Pembanding [nF]	Nilai Terukur [nF]	% Kesalahan
1	2,68	0,4	85,1
2	2,68	0,4	85,1
3	2,68	0,4	85,1
4	2,68	0,4	85,1
5	2,68	0,4	85,1
6	2,68	0,4	85,1
7	2,68	0,4	85,1
8	2,68	0,4	85,1
9	2,68	0,4	85,1
10	2,68	0,4	85,1
	Rata-rata =	0,4	85,1

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.13 berikut:



Gambar 4.13: Grafik hasil pengukuran untuk $C = 2,7 \text{ nF}$.

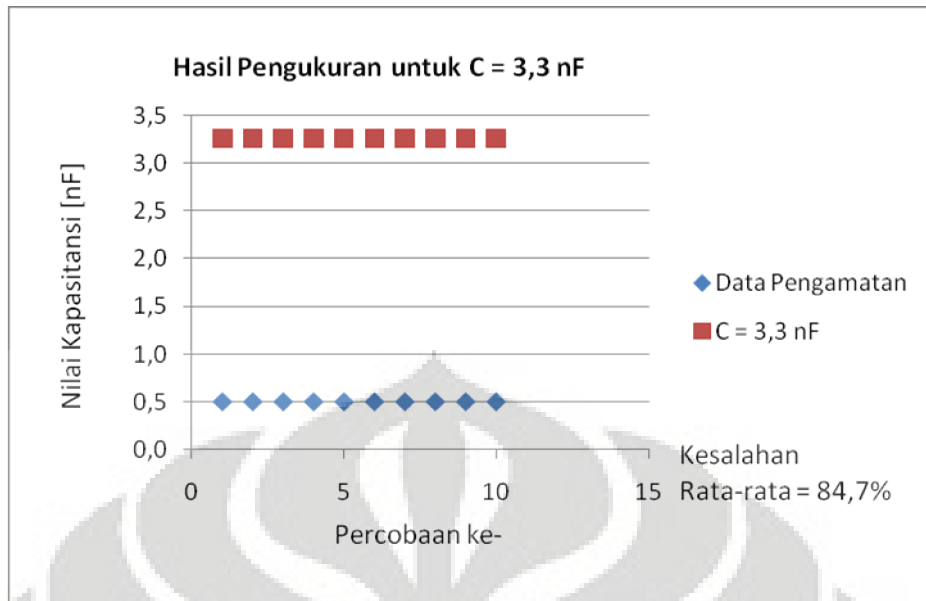
C.4 Pada jangkauan 0 – 4 nF; Untuk nilai kapasitor $C = 3,3 \text{ nF}$

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor $C = 3,3 \text{ nF}$ dapat dilihat pada Tabel 4.14 berikut ini:

Tabel 4.14: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 3,3 \text{ nF}$.

No.	Nilai Pembanding [nF]	Nilai Terukur [nF]	% Kesalahan
1	3,26	0,5	84,7
2	3,26	0,5	84,7
3	3,26	0,5	84,7
4	3,26	0,5	84,7
5	3,26	0,5	84,7
6	3,26	0,5	84,7
7	3,26	0,5	84,7
8	3,26	0,5	84,7
9	3,26	0,5	84,7
10	3,26	0,5	84,7
	Rata-rata =	0,5	84,7

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.14 berikut:



Gambar 4.14: Grafik hasil pengukuran untuk $C = 3,3 \text{ nF}$.

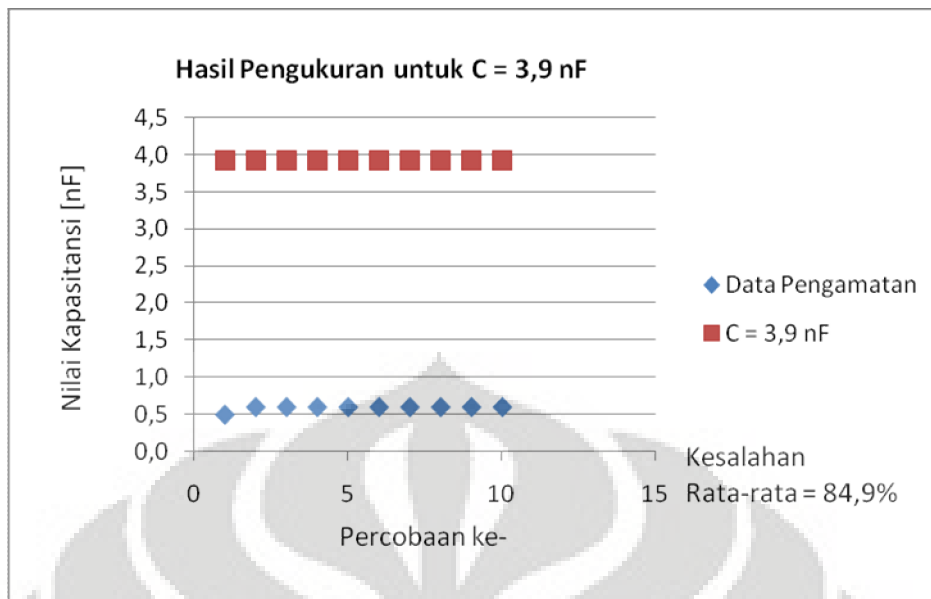
C.5 Pada jangkauan 0 – 4 nF; Untuk nilai kapasitor $C = 3,9 \text{ nF}$

Data yang diperoleh untuk nilai kapasitor $C = 3,9 \text{ nF}$ dapat dilihat pada Tabel 4.15 berikut ini:

Tabel 4.15: Hasil pengukuran untuk nilai kapasitor $C = 3,9 \text{ nF}$.

No.	Nilai Pembanding [nF]	Nilai Terukur [nF]	% Kesalahan
1	3,92	0,5	87,2
2	3,92	0,6	84,7
3	3,92	0,6	84,7
4	3,92	0,6	84,7
5	3,92	0,6	84,7
6	3,92	0,6	84,7
7	3,92	0,6	84,7
8	3,92	0,6	84,7
9	3,92	0,6	84,7
10	3,92	0,6	84,7
	Rata-rata =	0,6	84,9

Dalam representasi Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.15 berikut:



Gambar 4.15: Grafik hasil pengukuran untuk C = 3,9 nF.

4.2 Analisis dan Pembahasan

Tabel 4.16 merangkum hasil perhitungan kesalahan rata-rata masing-masing pengukuran.

Tabel 4.16: Rangkuman hasil pengukuran.

Jangkauan dan nilai Kapasitor	Nilai Pembanding	Kesalahan Rata-rata
40 pF; C = 10 pF	13 pF	2,3%
40 pF; C = 22 pF	24 pF	1,8%
40 pF; C = 27 pF	28 pF	4,5%
40 pF; C = 33 pF	33 pF	4,8%
40 pF; C = 39 pF	41 pF	0,6%
400 pF; C = 100 pF	100 pF	8,7%
400 pF; C = 220 pF	211 pF	24,2%
400 pF; C = 270 pF	265 pF	23,8%
400 pF; C = 330 pF	305 pF	23,6%
400 pF; C = 390 pF	375 pF	25,5%
4 nF; C = 1 nF	1,001 nF	90%
4 nF; C = 2,2 nF	2,17 nF	86,2%
4 nF; C = 2,7 nF	2,68 nF	85,1%
4 nF; C = 3,3 nF	3,26 nF	84,7%
4 nF; C = 3,9 nF	3,92 nF	84,9%

Hampir tidak mungkin adalah membuat agar kesalahan yang ada sekecil mungkin [12].

Makin kecil kesalahan makin mahal biaya pembuatan alat ukur tersebut. Kesalahan dapat terjadi karena berbagai sebab dan umumnya dibagi dalam 3 jenis utama yaitu: a.) Kesalahan umum; Kebanyakan disebabkan oleh kesalahan manusia, diantaranya adalah kesalahan pembacaan alat ukur, penyetelan yang tidak tepat dan pemakaian instrumen yang tidak sesuai dan kesalahan praktikum. b.) Kesalahan sistematis; Disebabkan oleh kekurangan-kekurangan pada instrumen itu sendiri seperti kerusakan atau adanya bagian-bagian yang aus dan pengaruh lingkungan terhadap peralatan atau pengukuran. c.) Kesalahan yang tidak disengaja; Diakibatkan oleh penyebab-penyebab yang tidak dapat langsung diketahui sebab perubahan-perubahan parameter atau sistem pengukuran terjadi secara acak.

Dalam pengukuran ini harus memilih batas pengukuran dengan memutar saklar S1 dari jangkauan batas ukur ke-1, batas ukur ke-2, batas ukur ke-3. Dari hasil pengukuran dapat dilihat bahwa unjuk kerja alat ukur Pengukur Kapasitansi ini cukup baik dalam batas ukur 1. Sedangkan, untuk sampai batas ukur ke-2 dan ke-3 tidak cukup baik. Hal ini mungkin disebabkan desain kalibrasi yang tidak terpisah. Sehingga, ketika memberikan proses *adjusting* pada jangkauan (batas ukur) ke-1, maka hal tersebut mempengaruhi batas ukur yang lainnya.

Terlihat bahwa hasil kesalahan relatif berbeda-beda untuk tiap jangkauan (*range*) pengukuran. Hal ini disebabkan oleh perbedaan karakteristik pada masing-masing jangkauan.

Alat ini digunakan untuk mengukur nilai kapasitansi kapasitor untuk skala maksimum dari 40 pF sampai 4 nF. Untuk masing-masing skala batas ukur, kesalahan rata-ratanya berurutan, yaitu: 2,8% 21,2% 86,2%. Dengan keterbatasan tersebut, alat ini tidak dapat digunakan untuk mengukur kapasitor diatas atau dibawah standar yang ditentukan.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan ini, dapat ditarik kesimpulan, bahwa telah berhasil dibuat Pengukur Kapasitansi yang merupakan alat ukur kapasitor non-polar. Hasil yang cukup baik hanya pada jangkauan 400 pF (piko farad) dari keseluruhan jangkauan 3 dekade. Secara praktis (implementatif), mudah dibuat, menggunakan rangkaian op amp yang umum, rangkaian dapat di-pra implementasi-kan pada protoboard dalam waktu singkat (hitungan menit), memecahkan solusi kecepatan bagi kapasitor berharga kecil.

Prinsip kerja alat ukur kapasitansi ini menggunakan osilator sebagai penghasil frekuensi. Dari analisis data diperoleh bahwa linieritas alat cukup baik pada batas ukur kapasitansi yang telah ditentukan.

5.2. Saran Pengembangan

Alat ukur Capacitance Meter yang telah terealisasi masih banyak kekurangannya, oleh karena itu penulis memberikan saran agar dikemudian hari dapat dikembangkan:

1. Pengkalibrasian perlu dilakukan secara tepat dan teliti sehingga kepresisian alat pengukur ini cukup diandalkan dengan melihat kembali penggunaan komponen-komponen dengan toleransi kepresisian yang cukup tinggi.
2. Pembuatan alat pengukur ini diharapkan jauh lebih sempurna dan dapat dilakukan pengembangan lebih lanjut untuk penyempurnaan dalam hal keringkasan pengukuran yaitu dikembangkan dengan *auto-selector* pada pemrogramannya.

DAFTAR ACUAN

- [1] P. F. Dunn, *Measurement and Data Analysis for Engineering and Science*, (Mc Graw Hill, New York, 2005), hlm. 66.
- [2] Vadim V. Ivanov and Igor M. Filanovsky, *Operational Amplifier Speed and Accuracy Improvement*, (Kluwer Academic Publishers, New York, 2004), hlm. 65.
- [3] Kendall Su, *Analog Filters Second Edition*, (Kluwer Academic Publishers, New York, 2003), hlm. 190.
- [4] Achyanto.D, *Komunikasi Elektronika*. (Erlangga, Jakarta, 1991), hlm. 39.
- [5] Barmawi.M, *Prinsip-prinsip elektronika jilid 1*. (Erlangga, Jakarta, 1987), hlm. 90.
- [6] Daryanto, *Pengetahuan Teknik Elektronika*. (Bumi Aksara, Jakarta, 2002), hlm. 120.
- [7] Sumanto, *Elektronika Industri*. (Andi, Yogyakarta, 2002), hlm. 119.
- [8] Sutrisno, *Elektronika Teori dan Penerapannya jilid 2*. (ITB, Bandung, 1987), hlm. 19.
- [9] Tadius Uria, *Dasar-Dasar transistor*. (Depdikbud, Jakarta, 1988), hlm. 19.
- [10] Wasito.S, *Vademekum Elektronika*. (Elex Media Komputindo, Jakarta, 1985), hlm. 111.
- [11] Institution of Electrical Engineers, *Instrumentation and Analytical Science*, (Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1989), hlm. 213.
- [12] William Lichten, *Data and Error Analysis*, (Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA, 1999), hlm. 12.

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Datasheet LM311
- Lampiran 2. Datasheet LF353
- Lampiran 3. Datasheet LM336
- Lampiran 4. Datasheet LF351
- Lampiran 5. Datasheet ADD3701CCN
- Lampiran 6. Datasheet 2N4126
- Lampiran 7. Datasheet 1N4148

