



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**OPTIMISASI RANGKAIAN *CHARGE AMPLIFIER* DENGAN  
RESISTOR, KAPASITOR, DAN OP-AMP YANG  
DIVARIASIKAN SEBAGAI RANGKAIAN PEMBACA  
UNTUK SENSOR KELEMBABAN KAPASITIF**

**SKRIPSI**

**MUHAMMAD GHAZALI ANGGOROJATI  
040403061X**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**OPTIMISASI RANGKAIAN *CHARGE AMPLIFIER* DENGAN  
RESISTOR, KAPASITOR, DAN OP-AMP YANG  
DIVARIASIKAN SEBAGAI RANGKAIAN PEMBACA  
UNTUK SENSOR KELEMBABAN KAPASITIF**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**MUHAMMAD GHAZALI ANGGOROJATI  
040403061X**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2009**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Muhammad Ghazali Anggorojati**

**NPM : 040403061X**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 16 Juni 2009**

## HALAMAN PENGESAHAN

**Skripsi ini diajukan oleh :**  
**Nama :** Muhammad Ghazali Anggorojati  
**NPM :** 040403061X  
**Program Studi :** Teknik Elektro  
**Judul Skripsi :** Optimisasi Rangkaian *Charge Amplifier*  
Dengan Resistor, Kapasitor, Dan Op-Amp  
Yang Divariasikan Sebagai Rangkaian  
Pembaca Untuk Sensor Kelembaban Kapasitif

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Agus Santoso Tamsir, MT ( )

Penguji : Prof. Dr. Ir. Harry Sudibyo S., DEA ( )

Penguji : Dr. Ir. Purnomo Sidi Priambodo, MSEE ( )

Ditetapkan di : Kampus UI Depok

Tanggal : 26 Juni 2009

## KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT, karena atas berkat rahmat dan karunia-Nya maka skripsi ini dapat diselesaikan. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Ir. Agus Santoso Tamsir, MT, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan pengarahan dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Asisten Lab Elektronika, yang telah menyediakan peralatan yang digunakan dalam skripsi ini;
- (3) Orang tua dan keluarga atas segala dukungannya, baik moral maupun material;
- (4) Teman-teman seperjuangan di Departemen Elektro angkatan 2004, yang merupakan rekan-rekan terbaik saya di saat senang maupun susah; dan
- (5) Teman-teman sesama bimbingan Bapak Agus Santoso Tamsir atas segala bantuan yang diberikan dalam penyusunan skripsi ini.

Semoga Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Akhir kata, saya menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu, mohon dibukakan pintu maaf yang sebesar-besarnya.

Depok, Juni 2009

Penulis

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

---

---

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

Nama : Muhammad Ghazali Anggorojati  
NPM : 040403061X  
Program Studi : Teknik Elektro  
Departemen : Elektro  
Fakultas : Teknik  
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:

**OPTIMISASI RANGKAIAN *CHARGE AMPLIFIER* DENGAN  
RESISTOR, KAPASITOR, DAN OP-AMP YANG DIVARIASIKAN  
SEBAGAI RANGKAIAN PEMBACA UNTUK  
SENSOR KELEMBABAN KAPASITIF**

berserta 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: 16 Juni 2009

Yang menyatakan

(Muh. Ghazali A.)

## ABSTRAK

Nama : Muhammad Ghazali Anggorojati  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Optimisasi Rangkaian *Charge Amplifier* Dengan Resistor,  
Kapasitor, Dan Op-Amp Yang Divariasikan Sebagai Rangkaian  
Pembaca Untuk Sensor Kelembaban Kapasitif

Skripsi ini membahas mengenai optimisasi rangkaian *charge amplifier* yang digunakan untuk membaca *output* dari sensor kelembaban kapasitif. Simulasi dilakukan untuk beberapa nilai dari tiap-tiap komponen yang terdapat pada rangkaian dengan menggunakan aplikasi Multisim. Data yang didapat dari simulasi kemudian dianalisis dan diujicobakan pada rangkaian fisik untuk mendapatkan perbandingan antara simulasi dengan rangkaian sebenarnya. Hasil yang didapat dari penelitian adalah sebuah rangkaian *charge amplifier* dengan sinyal *output* yang baik dan penguatan tegangan yang sesuai dengan spesifikasi sensor yang diinginkan.

Kata kunci:  
*Charge amplifier*, optimisasi, sensor kelembaban kapasitif

## ABSTRACT

Name : Muhammad Ghazali Anggorojati  
Study Program : Electrical Engineering  
Title : Optimization of Charge Amplifier Circuit with Variation of Resistor, Capacitor, and Op-Amp as Read-Out Circuit for Capacitive Moisture Sensor

Main focus of this study is how to optimize a charge amplifier circuit that used to read output from capacitive moisture sensor. Simulation is done with Multisim application for several values on each component contained in the circuit. The simulation data is analyzed afterwards and tested on the real circuit to compare both result. The outcome of this research is a charge amplifier circuit with good output signal and gain amplifier appropriate for desired specification.

Keywords:  
Charge amplifier, optimization, capacitive moisture sensor

## DAFTAR ISI

JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR SINGKATAN .....	xii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiii
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penulisan .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Sistematika Penulisan .....	2
<b>2. DASAR TEORI .....</b>	<b>3</b>
2.1 Rangkaian <i>Charge Amplifier</i> .....	3
2.2 Komponen-Komponen Rangkaian <i>Charge Amplifier</i> .....	3
2.2.1 <i>Operational Amplifier</i> (Op-Amp) .....	4
2.2.2 <i>Feedback Resistor</i> .....	6
2.2.3 <i>Feedback Capacitor</i> .....	7
2.3 Prinsip Umum Rangkaian <i>Charge Amplifier</i> .....	8
2.3.1 Penghitungan Penguatan Tegangan .....	8
2.3.2 Pengaruh <i>Time Constant</i> dan <i>Drift</i> .....	9
2.4 Aplikasi-Aplikasi Pendukung .....	10
<b>3. PERANCANGAN RANGKAIAN CHARGE AMPLIFIER .....</b>	<b>11</b>
3.1 Metode Simulasi .....	11
3.1.1 Pemodelan Rangkaian <i>Charge Amplifier</i> .....	11
3.1.2 Pengujian Parameter Komponen Pada Rangkaian .....	12
3.1.2.1 Sumber Tegangan $V_1$ .....	12
3.1.2.2 Kapasitor $C_x$ .....	12
3.1.2.3 <i>Feedback Resistor</i> $R_1$ .....	13
3.1.2.4 <i>Feedback Capacitor</i> $C_1$ .....	13
3.1.2.5 <i>Operational Amplifier</i> .....	13
3.1.3 Proses Simulasi Rangkaian .....	14
3.1.4 Pengolahan Data Hasil Simulasi .....	17
3.2 Perancangan Uji Rangkaian Fisik .....	19
<b>4. SIMULASI DAN UJI RANGKAIAN CHARGE AMPLIFIER .....</b>	<b>21</b>
4.1 Simulasi Rangkaian .....	21

4.1.1 Hasil Simulasi .....	21
4.1.1.1 Op-Amp Jenis TL071CD .....	21
4.1.1.2 Op-Amp Jenis AD743JN.....	22
4.1.1.3 Op-Amp Jenis OP27AJ .....	22
4.1.1.4 Op-Amp Jenis LF355AH .....	23
4.1.1.5 Op-Amp Jenis LM741CN .....	24
4.1.2 Analisis Hasil Simulasi.....	24
4.1.2.1 Analisis Perbandingan Bentuk Sinyal.....	24
4.1.2.2 Analisis Penguatan Tegangan Pada Rangkaian.....	26
4.1.2.3 Analisis Sensitivitas Rangkaian.....	33
4.1.2.4 Analisis Keseluruhan .....	35
4.2 Pengujian Rangkaian Fisik .....	36
<b>5. KESIMPULAN .....</b>	<b>39</b>
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>40</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>41</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>42</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Rangkaian <i>Charge Amplifier</i> .....	4
Gambar 2.2 Contoh Model <i>Operational Amplifier</i> .....	4
Gambar 3.1 Model Rangkaian <i>Charge Amplifier</i> Pada Aplikasi Multisim .....	11
Gambar 3.2 Diagram Alir Proses Simulasi Rangkaian <i>Charge Amplifier</i> .....	15
Gambar 3.3 Contoh Simulasi Dengan Aplikasi Multisim .....	16
Gambar 3.4 Contoh Perancangan <i>Layout</i> PCB Menggunakan Aplikasi Ultiboard .....	19
Gambar 4.1 Contoh Rangkaian Simulasi Dengan Op-Amp TL071CD.....	21
Gambar 4.2 Contoh Rangkaian Simulasi Dengan Op-Amp AD743JN.....	22
Gambar 4.3 Contoh Rangkaian Simulasi Dengan Op-Amp OP27AJ .....	22
Gambar 4.4 Contoh Rangkaian Simulasi Dengan Op-Amp LF355AH.....	23
Gambar 4.5 Contoh Rangkaian Simulasi Dengan Op-Amp LM741CN .....	24
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Penguatan Tegangan Untuk $R1 = 1\text{ M}\Omega$ Dan $R1 = 10\text{ M}\Omega$ Pada Op-Amp Jenis TL071CD .....	27
Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Penguatan Tegangan Untuk $R1 = 1\text{ M}\Omega$ Dan $R1 = 10\text{ M}\Omega$ Pada Op-Amp Jenis AD743JN.....	28
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Penguatan Tegangan Untuk $R1 = 1\text{ M}\Omega$ Dan $R1 = 10\text{ M}\Omega$ Pada Op-Amp Jenis OP27AJ .....	29
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Penguatan Tegangan Untuk $R1 = 1\text{ M}\Omega$ Dan $R1 = 10\text{ M}\Omega$ Pada Op-Amp Jenis LF355AH .....	30
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Penguatan Tegangan Untuk $R1 = 1\text{ M}\Omega$ Dan $R1 = 10\text{ M}\Omega$ Pada Op-Amp Jenis LM741CN .....	31
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Penguatan Tegangan Untuk $R1 = 10\text{ M}\Omega$ Dan $C1 = 50\text{ pF}$ Pada Tiap Jenis Op-Amp .....	32
Gambar 4.12 Rangkaian Fisik <i>Charge Amplifier</i> .....	36
Gambar 4.15 Contoh Sinyal Pada <i>Oscilloscope</i> Untuk Nilai $Cx = 10\text{ pF}$ .....	37

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Contoh Data Sinyal Tegangan pada Aplikasi Microsoft Excel .....	17
Tabel 3.2 Contoh Pengolahan Data Hasil Simulasi Pada Aplikasi Microsoft Excel .....	18
Tabel 4.1 Karakteristik Arus <i>Bias Input</i> Pada Tiap Op-Amp .....	25
Tabel 4.2 Contoh Perbandingan Nilai Sinyal <i>Output</i> Dan <i>Input</i> Yang Kurang Baik Pada Op-Amp Jenis LM741CN .....	26
Tabel 4.3 Perbandingan Tingkat Penguatan Tegangan Untuk Tiap Jenis Op-Amp .....	32
Tabel 4.4 Pengukuran Sensitivitas Pada Op-Amp Jenis TL071CD .....	33
Tabel 4.5 Pengukuran Sensitivitas Pada Op-Amp Jenis AD743JN .....	34
Tabel 4.6 Pengukuran Sensitivitas Pada Op-Amp Jenis OP27AJ .....	34
Tabel 4.7 Pengukuran Sensitivitas Pada Op-Amp Jenis LF355AH .....	35
Tabel 4.8 Penguatan Tegangan Pada Rangkaian Percobaan.....	38

## DAFTAR SINGKATAN

BiFET	: <i>Bipolar Field-Effect Transistor</i>
FET	: <i>Field-Effect Transistor</i>
JFET	: <i>Junction Gate Field-Effect Transistor</i>
Op-Amp	: <i>Operational Amplifier</i>

## DAFTAR LAMPIRAN

1. Data Simulasi Untuk Op-Amp Jenis TL071CD .....	42
2. Data Simulasi Untuk Op-Amp Jenis AD743JN .....	45
3. Data Simulasi Untuk Op-Amp Jenis OP27AJ.....	48
4. Data Simulasi Untuk Op-Amp Jenis LF355AH .....	52
5. Data Simulasi Untuk Op-Amp Jenis LM741CN.....	55
6. Bentuk Sinyal <i>Output</i> Pada Percobaan Rangkaian Fisik .....	59

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Untuk melakukan pengukuran suatu perubahan lingkungan fisik maupun kimia dibutuhkan alat yang disebut sensor. Sensor ini berfungsi mengukur perubahan-perubahan lingkungan yang terjadi untuk kemudian dikonversikan ke dalam bentuk sinyal. Sinyal inilah yang kemudian akan dapat dibaca oleh instrumen elektronika, sehingga pola-pola perubahan dari lingkungan tersebut dapat diteliti.

Sensor kelembaban merupakan salah satu jenis sensor yang digunakan untuk mengukur kelembaban dalam tanah. Sensor ini memiliki sinyal *output* berupa sinyal dengan impedansi kapasitif yang tinggi [9]. Untuk mendapatkan sinyal yang baik maka dibutuhkan alat untuk menghilangkan pengaruh impedansi kapasitif tersebut. Rangkaian yang digunakan adalah rangkaian *charge amplifier*.

Rangkaian *charge amplifier* ini merupakan sebuah rangkaian sederhana yang terdiri dari Op-Amp, resistor dan kapasitor. Rangkaian *charge amplifier* ini digunakan sebagai rangkaian pembaca untuk sensor kelembaban kapasitif. Pada skripsi ini akan dilakukan optimisasi untuk menentukan rangkaian *charge amplifier* yang paling optimal. Untuk itu dilakukan simulasi untuk beberapa jenis rangkaian *charge amplifier*, dengan nilai resistansi, kapasitansi maupun jenis Op-Amp yang berbeda-beda. Simulasi ini diharapkan dapat memberikan suatu model rangkaian *charge amplifier* yang optimal dan sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan oleh sensor kelembaban kapasitif. Hasil simulasi ini kemudian akan dibandingkan dengan rangkaian fisik yang diujicoba, sehingga dapat dilihat persentase tingkat kesalahan dari rangkaian.

## 1.2 Tujuan Penulisan

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk mendapatkan suatu rangkaian *charge amplifier* yang optimal sesuai dengan kebutuhan sensor, dalam hal ini sensor kelembaban kapasitif. Parameter yang dilihat antara lain penguatan tegangan, sensitivitas dan perbandingan bentuk sinyal.

## 1.3 Batasan Masalah

Pada skripsi ini, simulasi dan pengujian rangkaian *charge amplifier* dibatasi oleh beberapa kondisi. Rangkaian yang disimulasikan harus sesuai dengan spesifikasi dari sensor kelembaban kapasitif. Sensor memiliki nilai tegangan *output* sebesar 3.3 V dengan frekuensi terendah 30 kHz. Sinyal yang didapat harus sesuai dengan sinyal pada *input* dengan penguatan tegangan rangkaian *charge amplifier*  $\leq 1$ .

## 1.4 Sistematika Penulisan

Skripsi ini terdiri dari 5 bab. Bab 1 berupa pendahuluan, yang menjelaskan mengenai latar belakang, tujuan penulisan, batasan masalah dan sistematika penulisan. Bab 2 berisikan tentang dasar-dasar teori yang digunakan, antara lain mengenai teori dasar *charge amplifier*, komponen-komponennya, bentuk sinyal dan penguatan tegangan. Bab 3 menjelaskan tentang perancangan rangkaian *charge amplifier* dan metode-metodenya, baik dari segi simulasi maupun perancangan rangkaian fisik. Bab 4 membahas mengenai simulasi rangkaian yang dilakukan dan analisisnya, serta pengujian rangkaian fisik sebagai pembandingan dengan rangkaian simulasi. Bab yang terakhir yaitu Bab 5 menjelaskan kesimpulan yang didapat berdasarkan pembahasan-pembahasan pada bab-bab sebelumnya.

## BAB 2 DASAR TEORI

### 2.1 Rangkaian *Charge Amplifier*

Pada pengukuran sensor kelembaban kapasitif, sinyal *output* yang dihasilkan sensor adalah suatu nilai muatan yang memiliki nilai impedansi kapasitif. Impedansi kapasitif ini disebabkan oleh sifat kapasitif dari sensor. Oleh karena itu sinyal terlebih dahulu akan diubah oleh rangkaian *charge amplifier*.

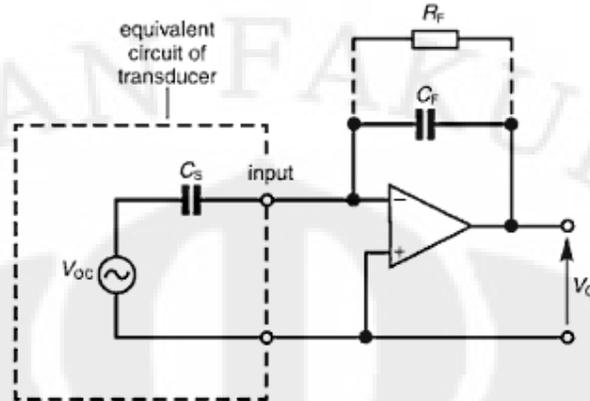
Rangkaian *charge amplifier* merupakan rangkaian *amplifier* yang berfungsi untuk mengubah sinyal *input* berupa muatan dengan impedansi kapasitif menjadi sinyal *output* berupa tegangan dengan impedansi yang rendah [1]. Setelah sinyal melewati rangkaian *charge amplifier* maka sinyal akan dapat lebih mudah diproses oleh instrumen-instrumen pengukur dibandingkan dengan sebelum dikonversi.

### 2.2 Komponen-Komponen Rangkaian *Charge Amplifier*

Rangkaian *charge amplifier* merupakan rangkaian elektronika sederhana yang terdiri dari tiga komponen utama [2], yaitu:

1. *Operational Amplifier*
2. *Feedback resistor*
3. *Feedback capacitor*

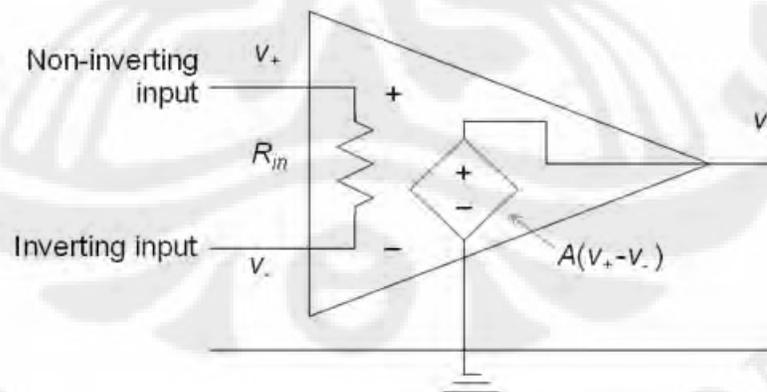
Rangkaian *charge amplifier* secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.1. Rangkaian *charge amplifier* disusun seperti rangkaian *integrator*, dengan diberi tambahan resistor yang disusun paralel dengan kapasitor (yaitu resistor  $R_f$  dan kapasitor  $C_f$ ) pada bagian *feedback* dari Op-Amp. Bagian *input* rangkaian dihubungkan dengan sensor. Rangkaian ekuivalen Thevenin dari sensor yang digunakan direpresentasikan oleh sumber tegangan  $V_{oc}$  dan kapasitor  $C_s$ . Kedua komponen ini melambangkan nilai *output* sensor kelembaban kapasitif berupa muatan dengan nilai impedansi kapasitif [2].



Gambar 2.1 Skema Rangkaian *Charge Amplifier*

### 2.2.1 Operational Amplifier (Op-Amp)

*Operational Amplifier*, atau disebut juga Op-Amp, adalah *amplifier* yang memiliki penguatan tegangan yang sangat tinggi dengan *input* yang berimpedansi tinggi (umumnya dalam  $M\Omega$ ) dan *output* yang berimpedansi rendah (lebih kecil dari 100 Ohm) [3]. Komponen ini merupakan bagian terpenting dari rangkaian *charge amplifier*, dimana fungsinya adalah untuk mengubah sinyal *input* yang berasal dari sensor. Contoh model dari sebuah Op-Amp dapat dilihat pada Gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2.2 Contoh Model *Operational Amplifier*

Op-Amp yang ideal memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. Penguatan tegangan =  $\infty$   
Penguatan tegangan tak terhingga merupakan kondisi ideal yang sulit untuk dicapai. Pada kenyataannya, Op-Amp memiliki nilai penguatan tegangan yang sangat besar, dengan nilai penguatan mencapai  $10^4$ .
2. Impedansi *input* =  $\infty$   
Impedansi *input* terletak di antara kedua kaki *input* Op-Amp dan idealnya bernilai tak terhingga. Pada kenyataannya, nilai impedansi *input* sangat besar dengan nilai  $> 10$  MOhm.
3. Impedansi *output* = 0  
Impedansi *output* terletak pada kaki *output* dari Op-Amp, dengan nilai ideal adalah nol. Kenyataannya nilai impedansi *output* sangat kecil, dimana nilainya  $< 500$  Ohm.
4. *Bandwidth* =  $\infty$   
*Bandwidth* dari Op-Amp idealnya bernilai tak terhingga. Pada kenyataannya, nilai *bandwidth* sangat besar, hingga mencapai 1 MHz.
5. Arus pada *input* = 0  
Dalam kondisi ideal, arus pada kedua *input* Op-Amp bernilai 0. Arus tidak mengalir karena terdapat hambatan yang sangat besar (tak terhingga) pada *input*. Pada kenyataannya, terdapat arus yang sangat kecil mengalir dengan nilai  $< 0.5$   $\mu$ A. Hal ini disebabkan karena adanya selisih nilai arus pada kedua *input*.
6. *Slew rate* =  $\infty$   
*Slew rate* adalah suatu nilai maksimum dimana *output* dari *amplifier* dapat berubah-ubah dalam satuan volt per mikrosekond ( $V/\mu s$ ) [3]. Nilai yang terdapat pada kenyataannya antara 0.2 hingga 20  $V/\mu s$ .
7. Tegangan *offset* pada *input* = 0  
Idealnya Op-Amp memiliki tegangan *offset output* sebesar 0 V apabila diberikan *input* sebesar 0 V juga. Namun pada kenyataannya, terdapat tegangan yang bernilai kecil pada *output*. Oleh karena itu, perlu diberikan tegangan kompensasi pada *input* untuk mengonversi tegangan *output* menjadi

0 V, yang disebut tegangan *offset input*. Nilai tegangan ini umumnya berkisar antara 1 hingga 15 mV [5].

#### 8. Karakteristik tidak tergantung suhu

Dalam kondisi ideal, karakteristik dari Op-Amp tidak tergantung kepada suhu. Akan tetapi pada kenyataannya, perubahan suhu akan mempengaruhi karakteristik dari Op-Amp, dimana suhu yang semakin tinggi akan mengubah karakteristik dari Op-Amp itu sendiri.

Op-Amp yang digunakan pada rangkaian *charge amplifier* umumnya adalah Op-Amp dengan *input FET*. Hal ini dimaksudkan untuk meminimalkan arus *offset* dan arus *bias* dari *input*. Arus *offset* dan arus *bias* pada *input* terjadi karena perbedaan arus yang mengalir pada kedua *input*, sehingga terdapat kenaikan arus. Kenaikan arus ini akan berakibat pada bertambahnya tingkat kesalahan dari *output* yang dihasilkan [4]. Selain itu, Op-Amp yang digunakan juga sebaiknya memiliki penguatan tegangan *open-loop* yang cukup tinggi, supaya proses *amplifying* tidak dipengaruhi oleh kapasitansi dari sensor [1].

#### 2.2.2 Feedback Resistor

Resistor adalah komponen elektronika yang berfungsi untuk mengatur arus listrik. Besarnya arus yang mengalir pada sebuah rangkaian bergantung pada besarnya resistor yang terpasang. Hal ini dapat dijelaskan oleh Hukum Ohm seperti pada Persamaan (2.1).

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.1)$$

keterangan:

I adalah arus yang mengalir (A)

V adalah tegangan sumber (V)

R adalah hambatan rangkaian ( $\Omega$ )

*Feedback resistor* merupakan bagian dari *feedback* Op-Amp yang dirangkai secara paralel dengan *feedback capacitor*. Resistor ini berfungsi memberikan jalur DC untuk arus *bias* dan membatasi respons frekuensi rendah dari rangkaian *charge amplifier* [7]. Jika pada rangkaian tidak terdapat *feedback resistor*, maka tidak ada jalur DC untuk arus *bias* sehingga arus akan mengalir

melewati *feedback capacitor*. Hal ini menyebabkan timbulnya *drift* satu arah pada bagian *output* dari Op-Amp.

Nilai dari *feedback resistor* ini harus cukup kecil untuk memastikan arus *bias* tidak menyebabkan tegangan *offset* yang sangat besar pada *output*, namun di sisi lain juga harus cukup besar untuk menghasilkan respons frekuensi rendah yang cukup [4].

### 2.2.3 *Feedback Capacitor*

Kapasitor adalah komponen elektronika yang berfungsi untuk menyimpan muatan listrik di dalam medan listrik, dengan cara mengumpulkan ketidakseimbangan *internal* dari muatan listrik. Sebuah kapasitor terbuat dari 2 buah plat metal yang dipisahkan oleh suatu bahan dielektrik. Nilai kapasitansi dari kapasitor dipengaruhi oleh besarnya muatan elektron dan tegangan pada kapasitor tersebut, seperti dituliskan pada Persamaan (2.2).

$$Q = CV \quad (2.2)$$

keterangan:

Q adalah muatan elektron (C)

C adalah kapasitansi kapasitor (F)

*Feedback capacitor* merupakan bagian dari *feedback* Op-Amp yang dirangkai secara paralel dengan *feedback resistor*. *Feedback capacitor* berfungsi untuk menentukan besarnya tegangan *output* yang dihasilkan oleh rangkaian *charge amplifier*. Muatan akan mengalir melewati *feedback capacitor* dan kemudian dikonversi menjadi sebuah nilai tegangan untuk *input* Op-Amp [7].

*Feedback capacitor* yang digunakan untuk rangkaian *charge amplifier* harus sangat stabil. Ketidakstabilan dari *feedback capacitor* akan mengakibatkan munculnya *gain drift*. *Feedback capacitor* harus bersifat *insulator* dengan resistansi yang tinggi untuk frekuensi rendah dan untuk aplikasi-aplikasi dengan *input* muatan yang berubah secara signifikan maka harus diperhatikan faktor absorpsi dielektrik bahan. Contoh jenis kapasitor yang dapat digunakan antara lain *polystyrene*, *polypropylene* dan PTFE. Nilai yang umum untuk *feedback capacitor* adalah antara 10 pF hingga 10 nF [4].

### 2.3 Prinsip Umum Rangkaian *Charge Amplifier*

Rangkaian *charge amplifier* bekerja berdasarkan prinsip rangkaian Op-Amp *integrator*. Berdasarkan Gambar 2.1, sensor menghasilkan sinyal muatan sebagai *input* dari rangkaian *charge amplifier*, dengan amplitudo tergantung pada energi yang diukur. Dengan timbulnya muatan ini, potensial pada *input* rangkaian *charge amplifier* meningkat dan pada saat bersamaan potensial dengan polaritas berlawanan akan dihasilkan pada bagian *output*. Karena penguatan tegangan *open-loop* dari *amplifier* cukup besar maka potensial pada *output* akan melewati *feedback loop*, yaitu melewati *feedback resistor*. Hal ini menyebabkan potensial *input* menjadi nol. Kemudian, pulsa sinyal muatan akan terintegrasi kepada *feedback capacitor* dan *output* [1].

#### 2.3.1 Penghitungan Penguatan Tegangan

Penguatan tegangan dari rangkaian *inverting amplifier* sederhana dapat dituliskan dalam Persamaan (2.3).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{Z_1}{Z_F} = -\frac{Y_1}{Y_F} \quad (2.3)$$

keterangan:

$Z_1$  adalah impedansi pada *input*,  $Z_1 = 1/j\omega C_s$  ( $\Omega$ )

$Z_F$  adalah impedansi pada bagian *feedback loop*,  $Z_F = 1/j\omega C_F$  ( $\Omega$ )

$Y_1$  adalah admitansi  $1/Z_1$ , sehingga  $Y_1 = j\omega C_s$  (S/Siemens)

$Y_F$  adalah admitansi  $1/Z_F$ , sehingga  $Y_F = j\omega C_F$  (S)

$\omega$  adalah frekuensi sudut (rad/s)

Rangkaian *charge amplifier* memiliki *feedback* berupa kapasitor dan resistor, sehingga impedansi *feedback*-nya menjadi hubungan paralel antara  $C_F$  dan  $R_F$ . Oleh karena itu, admitansi *feedback*-nya adalah:

$$Y_F = G_F + j\omega C_F \quad (2.4)$$

keterangan:

$G_F$  adalah konduktansi  $R_F$ , sehingga  $G_F = 1/R_F$  (S)

Maka, penguatan tegangan dari rangkaian *charge amplifier* dapat diketahui dengan melakukan substitusi nilai  $Y_F$  pada Persamaan (2.3) dengan nilai  $Y_F$  dari Persamaan (2.4), sehingga menjadi Persamaan (2.5).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{j\omega C_s}{G_F + j\omega R_F} = -\frac{C_s}{C_F + \frac{G_F}{j\omega}} = -\frac{j\omega C_s}{C_F \left\{ 1 - \left( \frac{j}{\omega C_F R_F} \right) \right\}} \quad (2.5)$$

Pada frekuensi tinggi, dimana  $\omega C_F R_F \gg 1$ , Persamaan (2.5) akan menjadi:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{C_s}{C_F} \quad (2.6)$$

Kondisi tersebut merupakan kondisi ideal dari rangkaian *charge amplifier* [2]. Nilai perbandingan yang didapat bernilai negatif, karena tegangan *output* yang dihasilkan merupakan negatif dari tegangan *input*. Hal ini disebabkan rangkaian *amplifier* yang berupa rangkaian *inverting amplifier*, dimana nilai *output* berlawanan dengan nilai *input*.

Pada frekuensi rendah, dimana  $\omega C_F R_F \ll 1$ , maka:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -j\omega C_s R_F \quad (2.7)$$

### 2.3.2 Pengaruh *Time Constant* dan *Drift*

Ada beberapa faktor penting lainnya yang harus diperhatikan dalam penggunaan rangkaian *charge amplifier*, yaitu *time constant* dan *drift*.

*Time constant* didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan untuk melakukan *charge* atau *discharge* dari sebuah rangkaian bolak-balik [6]. Pada periode waktu selama satu periode *time constant*, nilai dari tegangan akan berkurang hingga mencapai 37% dari nilai awalnya. Nilai ini didapat berdasarkan nilai *feedback resistor* dan *feedback capacitor*, dengan persamaan seperti pada Persamaan (2.6).

$$\tau = C_F \cdot R_F \quad (2.8)$$

keterangan:

$\tau$  adalah konstanta waktu (*time constant*)

Pada saat mempertimbangkan efek yang timbul karena *time constant* patut diperhatikan pula hubungannya dengan domain frekuensi atau domain waktu. Semakin panjang *time constant* yang dimiliki maka akan semakin baik pula respons frekuensi rendahnya dan semakin panjang pula waktu pengukuran yang

dapat dilakukan [6]. Hubungan antara tegangan *input* maupun *output* terhadap *time constant* dari rangkaian dapat dituliskan dengan Persamaan (2.7).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{2\pi f \tau}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau)^2}} \quad (2.9)$$

keterangan:

$\tau$  adalah konstanta waktu (*time constant*)

$f$  adalah frekuensi dari sinyal (Hz)

Untuk pengukuran dengan pulsa yang lebar disarankan panjang dari *time constant* setidaknya sepanjang 100 kali dari panjang waktu pengukuran. Hal ini untuk mengantisipasi penurunan nilai dari sinyal yang dihasilkan. Apabila nilai *time constant* terlalu kecil maka komponen DC dari sinyal *output* dapat mengalami penurunan mendekati nol sebelum pengukuran selesai dilakukan [6].

*Drift* didefinisikan sebagai perubahan dari sinyal *output* menurut fungsi waktu dan bukan merupakan fungsi dari variabel pengukuran. *Drift* merupakan suatu kondisi yang timbul disebabkan oleh resistansi *insulator* yang rendah pada bagian *input* rangkaian, ataupun karena arus bocor pada *input* FET dari Op-Amp.

*Time constant* dan *drift* secara bersamaan akan mempengaruhi *output* dari rangkaian *charge amplifier*. Salah satunya akan bersifat dominan terhadap yang lainnya, apakah *output* dari rangkaian *charge amplifier* akan mengalami *drift* ke arah saturasi (*power supply*) menurut *drift rate*, ataupun *output*-nya akan berkurang hingga nol menurut *time constant rate* [6].

## 2.4 Aplikasi-Aplikasi Pendukung

Ada 2 jenis aplikasi yang digunakan dalam melakukan simulasi dan perancangan, yaitu Multisim dan Ultiboard.

Multisim merupakan aplikasi yang dikembangkan oleh National Instruments dengan kemampuan melakukan perancangan dan simulasi rangkaian elektronika berbasis SPICE milik Berkeley.

Ultiboard merupakan aplikasi yang juga dikembangkan oleh National Instruments dengan kemampuan melakukan desain *layout* PCB dengan tingkat presisi yang tinggi dan memudahkan dalam melakukan fabrikasi.

## BAB 3

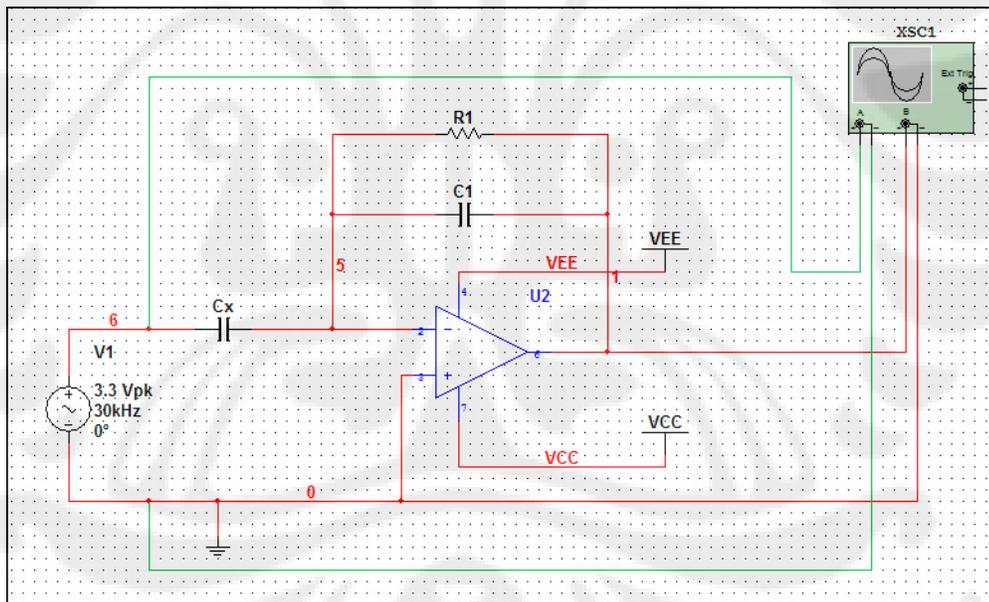
### PERANCANGAN RANGKAIAN *CHARGE AMPLIFIER*

#### 3.1 Metode Simulasi

Langkah-langkah yang dilakukan dalam perancangan rangkaian antara lain meliputi pemodelan rangkaian *charge amplifier* pada aplikasi Multisim, pengujian komponen rangkaian *charge amplifier*, pelaksanaan proses simulasi dan pengolahan data hasil simulasi.

##### 3.1.1 Pemodelan Rangkaian *Charge Amplifier*

Sebelum melakukan simulasi model rangkaian dibuat terlebih dahulu pada aplikasi Multisim. Model rangkaian *charge amplifier* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Model Rangkaian *Charge Amplifier* Pada Aplikasi Multisim

Model rangkaian dibuat berdasarkan skema rangkaian *charge amplifier* secara umum. Rangkaian terdiri dari tiga bagian, yaitu *input*, *amplifier* dan *output*. Bagian *input* terdiri dari sumber tegangan bolak-balik  $V_1$  dan kapasitor  $C_x$  yang dirangkai seri. Kedua komponen ini mewakili *output* dari sensor. Bagian *amplifier* terdiri dari *feedback capacitor*  $C_1$  dan *feedback resistor*  $R_1$  yang disusun paralel, serta sebuah Op-Amp. Bagian *output* terdiri dari sebuah *oscilloscope*, yang berfungsi untuk melihat sinyal *output* yang dihasilkan oleh rangkaian. *Oscilloscope* ini juga terhubung dengan sumber tegangan  $V_1$  pada *input* rangkaian. Hal ini bertujuan untuk membandingkan sinyal tegangan pada *input* dan *output* dari rangkaian.

### 3.1.2 Pengujian Parameter Komponen Pada Rangkaian

Setelah dibentuk rangkaian yang akan disimulasikan maka langkah selanjutnya adalah menguji komponen-komponen yang digunakan pada rangkaian. Parameter-parameter pengujian komponen ditentukan berdasarkan spesifikasi dari sensor yang digunakan dan *output* yang diinginkan.

#### 3.1.2.1 Sumber Tegangan $V_1$

Pada simulasi yang dilakukan tegangan sumber arus bolak-balik telah ditentukan nilainya dan bernilai sama untuk setiap percobaan simulasi, yaitu sebesar 3.3 V pada tegangan puncaknya ( $V_p$ ) dan memiliki frekuensi 30 kHz. Nilai ini merupakan nilai tegangan dan frekuensi yang dihasilkan oleh *output* sensor kelembaban kapasitif.

#### 3.1.2.2 Kapasitor $C_x$

Pada simulasi yang dilakukan nilai dari kapasitor  $C_x$  akan diubah-ubah untuk setiap percobaan simulasi. *Range* nilai yang diambil adalah antara 1 hingga 50 pF. Nilai ini merupakan nilai kapasitansi yang dihasilkan oleh *output* sensor, dimana nilainya akan berubah-ubah menurut kondisi tanah pada saat pengukuran. Untuk simulasi ini diambil nilai  $C_x$  sebanyak 8 sampel, yaitu sebesar 1 pF, 3 pF, 5 pF, 10 pF, 15 pF, 20 pF, 25 pF dan 50 pF. Pengambilan data ini dimaksudkan untuk mengujicoba kehandalan rangkaian dalam mengantisipasi nilai impedansi

yang berubah-ubah pada *input*. Sinyal *output* yang dihasilkan dapat terlihat bentuknya, apakah bentuknya masih sesuai dengan *input* atau telah berubah.

### 3.1.2.3 Feedback Resistor $R_1$

Nilai dari *feedback resistor*  $R_1$  akan diubah-ubah pada simulasi yang dilakukan. Nilai resistansi yang diambil sebagai sampel sebanyak 5 sampel, dengan nilai 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$ , 1 M $\Omega$  dan 10 M $\Omega$ . Pengambilan data ini dimaksudkan untuk menentukan parameter nilai resistansi *feedback resistor* yang sesuai untuk rangkaian *charge amplifier*.

### 3.1.2.4 Feedback Capacitor $C_1$

Seperti pada *feedback resistor*  $R_1$ , nilai dari *feedback capacitor*  $C_1$  juga akan diubah-ubah pada simulasi yang dilakukan. Nilai kapasitansi yang digunakan sebagai sampel berjumlah 6 sampel, dengan nilai 5 pF, 10 pF, 15 pF, 20 pF, 25 pF dan 50 pF. Pengambilan data ini dimaksudkan untuk menentukan parameter nilai kapasitansi *feedback capacitor* yang sesuai untuk rangkaian *charge amplifier*.

### 3.1.2.5 Operational Amplifier

Simulasi yang dilakukan menggunakan 5 buah jenis Op-Amp yang berbeda-beda. Pemilihan jenis Op-Amp dilakukan berdasarkan jenis-jenis Op-Amp yang banyak dijual di pasaran, dengan pertimbangan lebih mudah dalam mencari produk yang dimaksud. Selain itu dipertimbangkan juga jenis Op-Amp yang banyak digunakan untuk rangkaian *charge amplifier* dengan berdasarkan literatur-literatur yang telah ada [7].

Jenis-jenis Op-Amp yang digunakan antara lain:

1) Op-Amp jenis TL071CD

Merupakan Op-Amp dengan *input* JFET, memiliki spesifikasi *input bias* dan arus *offset* yang rendah serta *slew rate* yang tinggi. Ideal untuk aplikasi *audio preamplifier* dan aplikasi dengan tingkat ketepatan tinggi karena distorsi harmonik dan *noise* yang rendah.

2) Op-Amp jenis AD743JN

Merupakan Op-Amp yang presisi dengan *input* BiFET dan *noise* yang sangat rendah. Memberikan kombinasi *noise* tegangan yang sangat rendah dengan *input bipolar* dan arus *input* yang sangat rendah dari *input* FET. Ideal untuk aplikasi yang sensitif terhadap muatan.

3) Op-Amp jenis OP27AJ

Merupakan Op-Amp yang presisi dan mengombinasikan *offset* dan *drift* yang rendah dengan kecepatan tinggi dan *noise* yang rendah. Ideal untuk aplikasi instrumentasi yang membutuhkan tingkat presisi yang tinggi dan pilihan yang baik untuk aplikasi *audio professional*.

4) Op-Amp jenis LF355AH

Merupakan Op-Amp dengan *input* JFET, memiliki *input bias* dan arus *offset* yang rendah, serta *bandwidth* yang lebar dan *slew rate* tinggi. Banyak digunakan pada aplikasi *analog-to-digital converter* maupun *digital-to-analog converter* dan cocok untuk *buffer* berimpedansi tinggi.

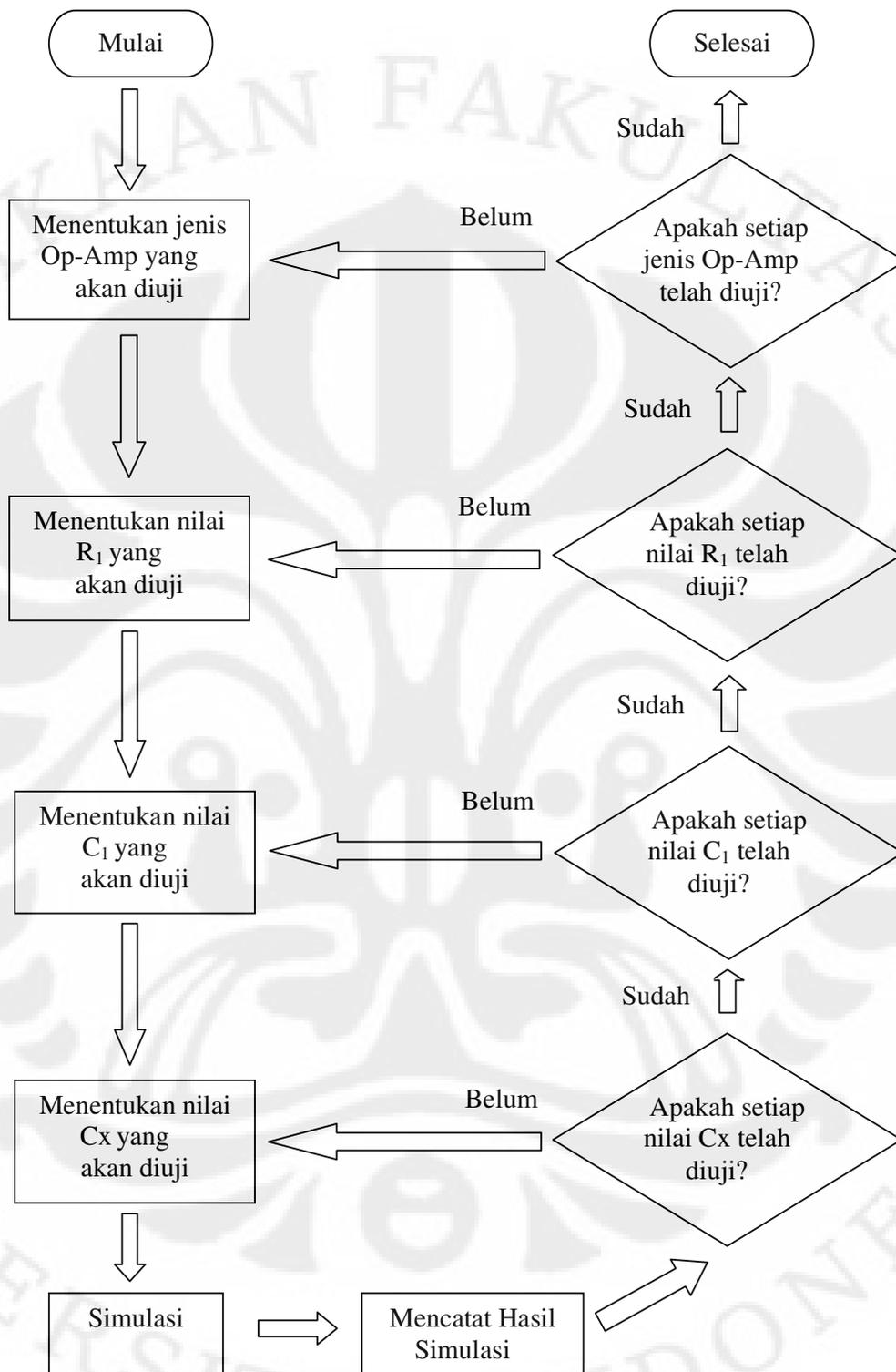
5) Op-Amp jenis LM741CN

Merupakan Op-Amp yang banyak digunakan untuk keperluan umum, memiliki proteksi pada *input* dan *output*-nya jika terjadi kelebihan beban serta bebas dari terjadinya osilasi, membuat aplikasi terlindung dari kesalahan yang dapat terjadi.

Dari kelima jenis Op-Amp tersebut akan dipilih jenis Op-Amp yang memiliki kemampuan sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan untuk rangkaian *charge amplifier*.

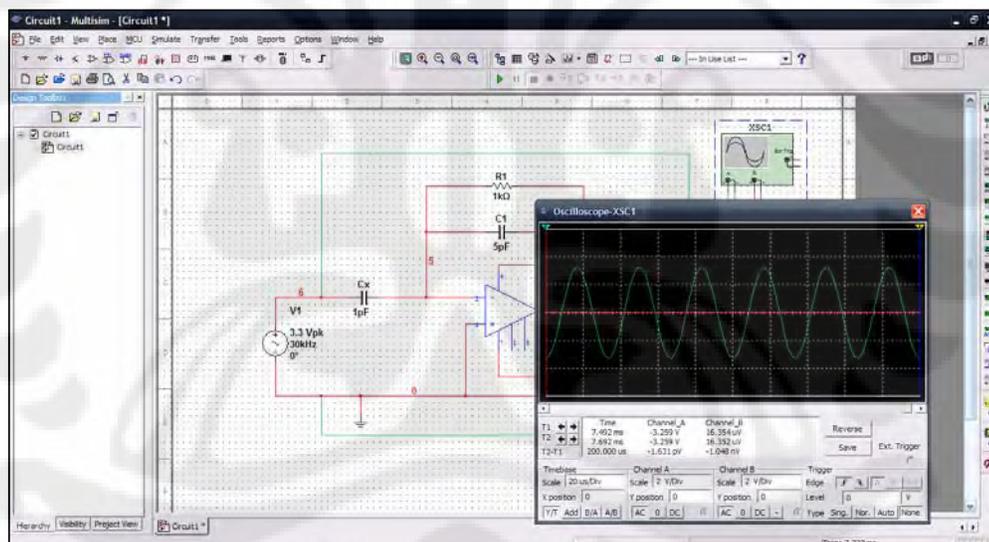
### 3.1.3 Proses Simulasi Rangkaian

Langkah selanjutnya yang dilakukan adalah melakukan simulasi rangkaian pada aplikasi Multisim dan mengolah data yang didapatkan dari simulasi. Tahapan-tahapan yang dilaksanakan dalam proses simulasi dapat dilihat melalui diagram alir pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Alir Proses Simulasi Rangkaian *Charge Amplifier*

Simulasi diawali dengan pemilihan jenis Op-Amp yang akan diujikan. Satu jenis Op-Amp dipilih dari 5 jenis Op-Amp yang telah disebutkan sebelumnya. Langkah selanjutnya adalah menentukan nilai  $R_1$ . Nilai  $R_1$  dipilih dari 5 sampel yang akan diujikan. Untuk memudahkan, nilai  $R_1$  diambil mulai dari nilai yang terkecil, yaitu  $1\text{ k}\Omega$ . Kemudian, nilai yang ditentukan selanjutnya adalah nilai  $C_1$ . Nilai  $C_1$  dipilih dari 6 sampel yang telah ditentukan dan diambil mulai dari yang terkecil, yaitu  $5\text{ pF}$ . Setelah ketiga parameter tersebut, parameter berikut yang akan ditentukan adalah nilai  $C_x$ . Nilai  $C_x$  ini merupakan parameter dari *output* sensor, sehingga penentuan parameternya dilakukan setelah ketiga komponen utama dari rangkaian. Untuk memudahkan maka diambil mulai dari nilai terkecil seperti parameter yang lain, dalam hal ini dipilih nilai  $1\text{ pF}$ . Selanjutnya, rangkaian disimulasikan pada aplikasi Multisim dan dilihat sinyal *input* dan *output* yang dihasilkan pada *oscilloscope*. Contoh simulasi rangkaian pada aplikasi Multisim dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Contoh Simulasi Dengan Aplikasi Multisim

Setelah simulasi dilakukan, data sinyal yang didapat kemudian dicatat. Aplikasi Multisim memiliki fitur untuk mengekspor data sinyal yang terdapat pada *oscilloscope* kepada aplikasi lainnya, yaitu aplikasi Microsoft Excel. Data

yang dihasilkan berupa data diskrit dari sinyal tegangan yang diekspor. Contoh data yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Contoh Data Sinyal Tegangan Pada Aplikasi Microsoft Excel

X--Trace 1:: [Channel A]	Y--Trace 1:: [Channel A]	X--Trace 2:: [Channel B]	Y--Trace 2:: [Channel B]
0	0	0	0
2.08E-08	0.012959	2.08E-08	-8.1E-06
2.4E-08	0.014919	2.4E-08	-2.3E-05
3.03E-08	0.01884	3.03E-08	-6E-05
4.29E-08	0.02668	4.29E-08	-0.00015

Tabel tersebut menunjukkan sinyal diskrit dari tegangan *input* dan *output* yang dihasilkan untuk 5 data pertama. *Channel A* mewakili tegangan *input* dan *Channel B* mewakili tegangan *output*. *X--Trace* mewakili variabel nilai pada sumbu X, yaitu fungsi waktu dalam satuan s. *Y--Trace* mewakili variabel nilai pada sumbu Y, yaitu nilai tegangan dalam satuan V.

Setelah data hasil simulasi dicatat, langkah selanjutnya adalah melihat apakah pengujian telah dilakukan untuk setiap nilai  $C_x$ . Jika belum, maka simulasi dilanjutkan dengan nilai  $C_x$  yang berbeda hingga seluruh nilai  $C_x$  disimulasikan. Kemudian, parameter yang dilihat adalah secara berturut-turut  $C_1$ ,  $R_1$  dan Op-Amp, apakah telah dilakukan pengujian untuk seluruh sampel. Apabila seluruh sampel telah diuji maka proses pengambilan data simulasi telah selesai dilakukan.

### 3.1.4 Pengolahan Data Hasil Simulasi

Tahap selanjutnya yang dilakukan adalah mengolah data yang didapat dari hasil simulasi. Data yang diperoleh adalah berupa data sinyal diskrit pada aplikasi Microsoft Excel. Untuk mendapatkan perbandingan antara sinyal *output* dan sinyal *input* dapat digunakan rumus normalisasi seperti pada Persamaan (3.1) [9].

$$V_{\text{normalize}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \{t_i - t(i-1)\}}{(V_{\text{maks}})(T)} \quad (3.1)$$

keterangan:

$V_{normalize}$  adalah tegangan yang telah dinormalisasi

$V_{maks}$  adalah tegangan maksimum/tegangan puncak dari sinyal (V)

T adalah periode dari sinyal tegangan (s)

$V_i$  adalah nilai tegangan pada saat  $t_i$  (V)

Dari nilai yang dinormalisasi tersebut dapat diperoleh perbandingan sinyal *output* dengan sinyal *input* berdasarkan Persamaan (3.2). Nilai rasio yang baik adalah yang mendekati nilai 1 [9].

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_{out}}{V_{in}}_{normalize} \quad (3.2)$$

Untuk menentukan penguatan tegangan dari rangkaian *charge amplifier* dapat digunakan perbandingan antara tegangan puncak dari *output* dan *input*, seperti dituliskan dalam Persamaan (3.3).

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}_{maks} \quad (3.3)$$

keterangan:

$A_v$  adalah penguatan tegangan rangkaian

Setiap data yang diperoleh dicari nilai penguatan tegangan dan rasio perbandingan bentuk sinyal *output* dan *input*-nya. Nilai kedua parameter ini kemudian akan dilihat dan dibandingkan untuk menentukan rangkaian yang paling optimal dari seluruh data simulasi. Salah satu contoh perhitungan yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Contoh Pengolahan Data Hasil Simulasi Pada Aplikasi Microsoft Excel

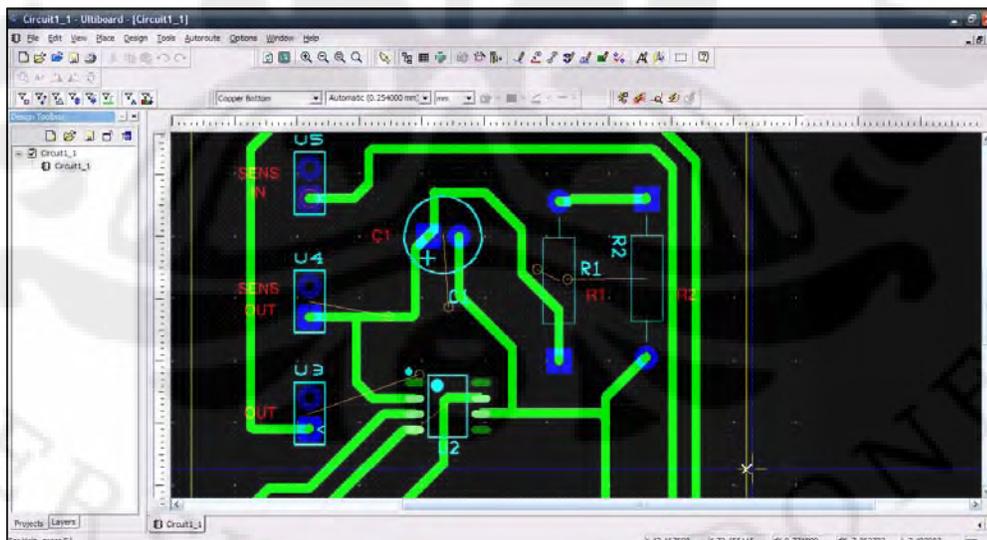
Cx	$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$	$C_1 = 5 \text{ pF}$
	$V_{out}/V_{in}$	$A_v$
1	1.0048756	0.0001911
3	1.0028865	0.0005724
5	0.9916670	0.0009547
10	0.9975619	0.0019085
15	1.0094168	0.0028623
20	0.9936834	0.0038327
25	0.9876976	0.0047964
50	1.0003354	0.0095360

Tabel 3.2 menunjukkan contoh data simulasi untuk Op-Amp jenis TL071CD dengan parameter  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  dan  $C_1 = 5 \text{ pF}$ . Nilai  $C_x$  diubah-ubah antara 1 hingga 50 pF. Nilai  $V_{out}/V_{in}$  merupakan nilai perbandingan sinyal *output* dengan sinyal *input*, sedangkan nilai  $A_v$  merupakan nilai penguatan tegangan dari rangkaian.

### 3.2 Perancangan Uji Rangkaian Fisik

Selain melakukan simulasi rangkaian dilakukan juga pengujian rangkaian fisik. Rangkaian fisik dibuat pada PCB dan kemudian diujicoba. Hasil yang didapat akan dibandingkan dengan hasil yang didapat dari proses simulasi, untuk dilihat tingkat keakuratan dari rangkaian fisik yang telah dibuat.

Dalam melakukan perancangan ini digunakan aplikasi Ultiboard untuk memudahkan pembuatan *layout* PCB. Model rangkaian yang telah dibuat pada aplikasi Multisim diekspor ke dalam aplikasi Ultiboard. *Layout* yang dihasilkan berupa rancangan kasar dan komponen-komponen rangkaiannya belum terhubung dengan benar. *Layout* pada Ultiboard tersebut kemudian diperbaiki agar antara komponen satu dan yang lainnya terhubung dengan benar. Contoh perancangan yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Contoh Perancangan *Layout* PCB Menggunakan Aplikasi Ultiboard

Setelah perancangan *layout* pada aplikasi Ultiboard selesai maka hasil rancangan dicetak ke dalam PCB, supaya jalur-jalur rangkaian dapat dibuat dan komponen-komponen rangkaian dapat disolder. Komponen-komponen yang dihubungkan ke PCB antara lain resistor dan kapasitor sebagai bagian *feedback*, serta Op-Amp sebagai komponen utama rangkaian. Op-Amp dihubungkan dengan suplai tegangan Vcc yang berasal dari catu daya eksternal. *Input* rangkaian dihubungkan dengan *RC generator* yang dirangkai seri dengan kapasitor, sebagai rangkaian pengganti sensor. *RC generator* merupakan alat penghasil sinyal tegangan bolak-balik dengan frekuensi yang dapat diubah-ubah. *Output* rangkaian dihubungkan dengan *oscilloscope* untuk melihat sinyal yang dihasilkan. *Oscilloscope* ini juga terhubung dengan *input*, seperti pada simulasi yang dilakukan. Apabila rangkaian dinyalakan maka akan terlihat bentuk sinyal *input* dan *output* pada tampilan *oscilloscope*.

## BAB 4

### SIMULASI DAN UJI RANGKAIAN *CHARGE AMPLIFIER*

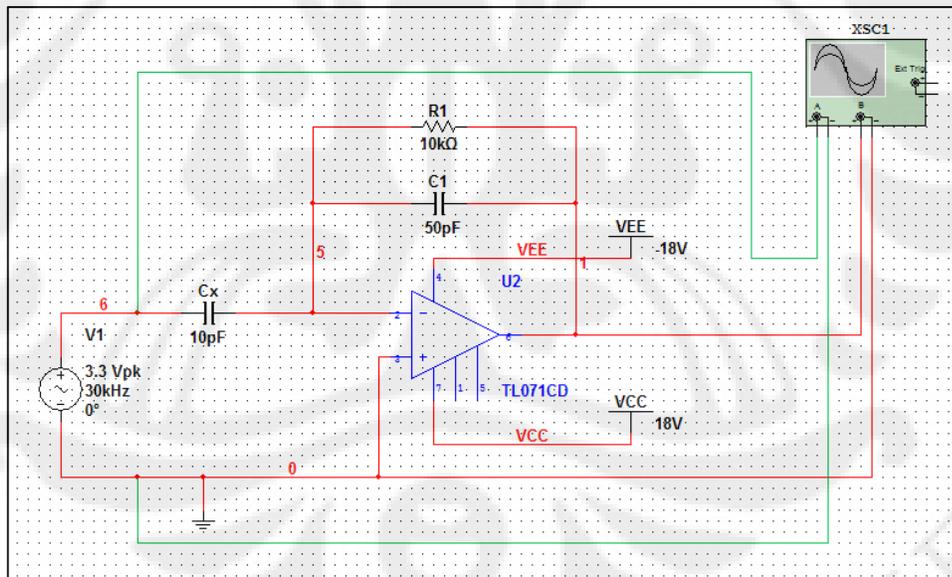
#### 4.1 Simulasi Rangkaian

Simulasi dilakukan sesuai dengan metode simulasi hingga didapatkan data-data untuk tiap percobaan. Data-data tersebut kemudian dianalisis secara keseluruhan dengan membandingkan karakteristik tiap data.

##### 4.1.1 Hasil Simulasi

Data-data yang diperoleh dari hasil simulasi berbentuk tabel yang menunjukkan hasil pengolahan data simulasi berupa perbandingan sinyal *output* dan *input* serta penguatan tegangan. Tabel-tabel yang berisi data-data percobaan tersebut dapat dilihat pada bagian lampiran.

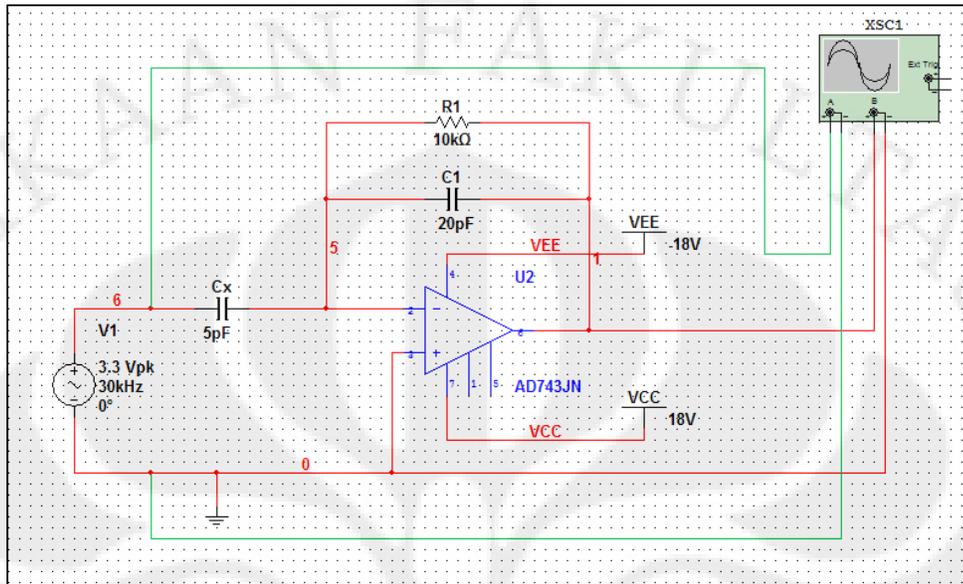
##### 4.1.1.1 Op-Amp Jenis TL071CD



Gambar 4.1 Contoh Rangkaian Simulasi Dengan Op-Amp TL071CD

Data-data yang diperoleh menunjukkan nilai perbandingan antara sinyal *output* dengan sinyal *input* berkisar antara 0.899 hingga 1.368. Sementara itu, nilai penguatan tegangannya memiliki *range* antara 0.00019 hingga 5.05 kali.

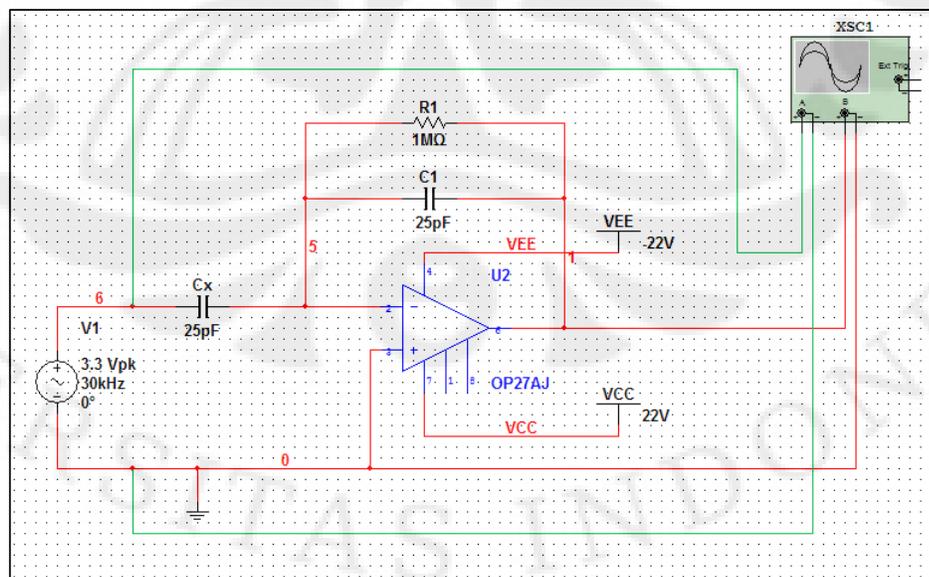
#### 4.1.1.2 Op-Amp Jenis AD743JN



Gambar 4.2 Contoh Rangkaian Simulasi Dengan Op-Amp AD743JN

Data-data yang diperoleh menunjukkan nilai perbandingan antara sinyal *output* dan sinyal *input* dengan range 0.708 hingga 1.029. Sementara untuk nilai penguatan tegangannya berkisar antara 0.00018 hingga 5.72 kali.

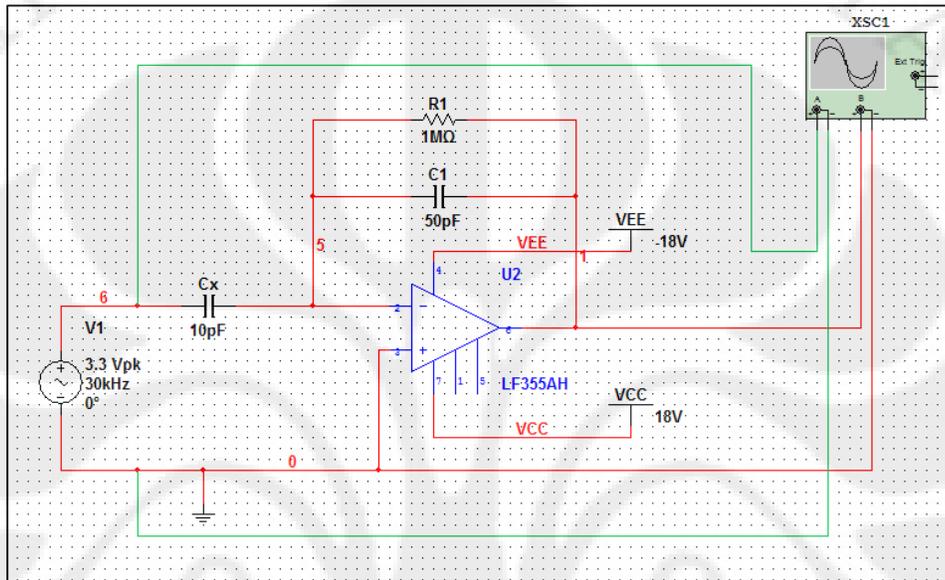
#### 4.1.1.3 Op-Amp Jenis OP27AJ



Gambar 4.3 Contoh Rangkaian Simulasi Dengan Op-Amp OP27AJ

Data-data yang diperoleh menunjukkan perbandingan sinyal *output* dan sinyal *input* dengan *range* nilai 0.678 hingga 1. Tingkat penguatan tegangan yang didapatkan berkisar antara 0.00019 hingga 5.17 kali.

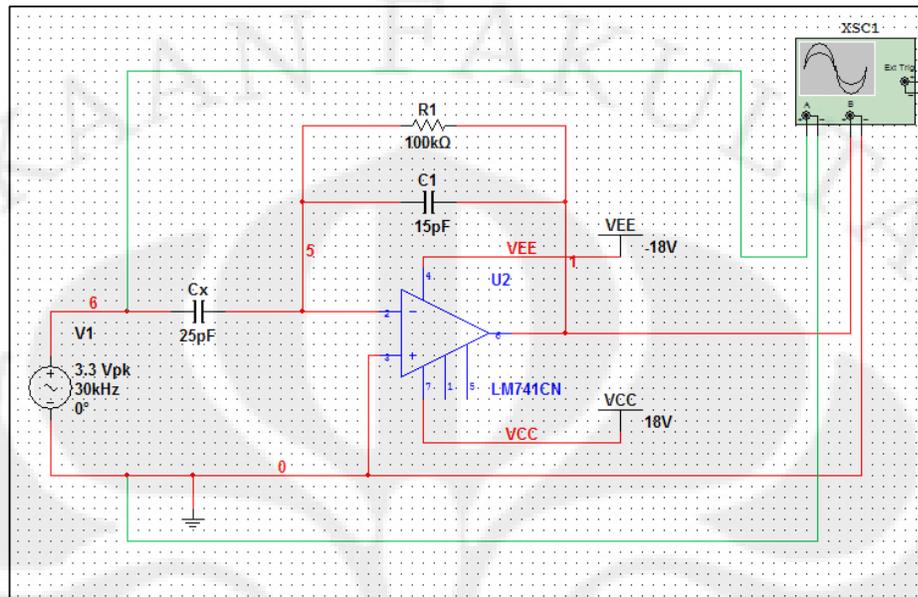
#### 4.1.1.4 Op-Amp Jenis LF355AH



Gambar 4.4 Contoh Rangkaian Simulasi Dengan Op-Amp LF355AH

Data-data yang diperoleh menunjukkan perbandingan sinyal *output* dan sinyal *input* dengan *range* nilai 0.898 hingga 1.024. Data yang didapat tidak berbeda jauh dengan data untuk simulasi Op-Amp TL071CD. Sementara itu, penguatan tegangan yang didapatkan berkisar antara 0.00019 hingga 5.68 kali. Nilai penguatan tegangan yang didapatkan mendekati nilai penguatan pada Op-Amp AD743JN.

#### 4.1.1.5 Op-Amp Jenis LM741CN



Gambar 4.5 Contoh Rangkaian Simulasi Dengan Op-Amp LM741CN

Data-data yang diperoleh menunjukkan perbandingan sinyal *output* dan sinyal *input* dengan *range* nilai 0.655 hingga 1.025. Tingkat penguatan tegangan yang didapatkan berkisar antara 0.00019 hingga 1.13 kali.

#### 4.1.2 Analisis Hasil Simulasi

Analisis terhadap hasil simulasi ini dilakukan untuk beberapa aspek, di antaranya perbandingan bentuk sinyal *output* terhadap *input*, penguatan tegangan dan sensitivitas rangkaian.

##### 4.1.2.1 Analisis Perbandingan Bentuk Sinyal

Bentuk sinyal *output* dari sebuah rangkaian *charge amplifier* dipengaruhi oleh jenis dari Op-Amp yang dipakai. Op-Amp yang umum digunakan pada rangkaian *charge amplifier* adalah Op-Amp dengan *input* FET. Rangkaian *charge amplifier* bekerja dengan mengintegrasikan arus *input* dengan kapasitor, sehingga arus *bias* pada *input* harus dibuat sekecil mungkin. Op-Amp dengan *input* FET memiliki arus *bias input* yang kecil, sehingga akan menghasilkan tingkat

kesalahan yang relatif kecil. Besarnya arus *bias input* pada tiap-tiap Op-Amp dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Karakteristik Arus *Bias Input* Pada Tiap Op-Amp

Jenis Op-Amp	Input FET	Arus Bias Input
TL071CD	JFET	nilai umum = 65 pA, nilai maks = 200 pA (T = 25 C°) nilai maks = 7 nA (T lainnya)
AD743JN	BiFET	nilai umum = 150 pA, nilai maks = 400 pA (T = 25 C°) nilai maks = 8.8 nA (T lainnya)
OP27AJ	-	nilai umum = 10 nA, nilai maks = 40 nA
LF355AH	JFET	nilai umum = 30 pA, nilai maks = 200 pA (T = 25 C°) nilai maks = 8 nA (T lainnya)
LM741CN	-	nilai umum = 80 nA, nilai maks = 500 nA (T = 25 C°) nilai maks = 0.8 $\mu$ A (T lainnya)

Data tersebut menunjukkan bahwa Op-Amp dengan *input* FET memiliki nilai arus *bias input* yang lebih kecil dibandingkan dengan Op-Amp dengan *input* bukan FET. Nilai terkecil dimiliki oleh Op-Amp jenis LF355AH, diikuti TL071CD, AD743JN, OP27AJ dan terakhir LM741CN. Hal ini berpengaruh terhadap bentuk sinyal *output* yang akan dihasilkan. Data simulasi yang didapat menunjukkan kecenderungan seperti penjelasan di atas. Nilai perbandingan sinyal *output* dan sinyal *input* yang baik secara keseluruhan dimiliki oleh Op-Amp dengan *input* FET. Untuk Op-Amp jenis OP27AJ ada beberapa nilai yang kurang baik, tetapi secara keseluruhan cukup baik sehingga masih dapat digunakan untuk rangkaian *charge amplifier*. Nilai perbandingan di bawah standar terdapat pada Op-Amp jenis LM741CN, dimana banyak data hasil simulasi yang kurang memenuhi syarat. Oleh karena itu, Op-Amp jenis ini kurang baik untuk digunakan dalam rangkaian *charge amplifier*. Contoh perbandingan sinyal *output* dan *input* yang kurang memenuhi syarat dari Op-Amp jenis LM741CN ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Contoh Perbandingan Nilai Sinyal *Output* Dan *Input* Yang Kurang Baik  
Pada Op-Amp Jenis LM741CN

Cx	R1 = 10 MΩ	C1 = 5 pF
	Vout/Vin	Av
1	0.9525189	0.1882340
3	0.9377909	0.5484677
5	0.8552714	0.7397880
10	0.6900980	0.9769228
15	0.6944117	1.0277931
20	0.6661190	1.1316739
25	0.7639566	0.9072952
50	0.8250400	0.9194538

Perbandingan  $V_{out}/V_{in}$  pada saat  $C_x = 5$  pF hingga  $C_x = 50$  pF bernilai lebih kecil dari 0.9, sehingga bentuk sinyal *output*-nya tidak sesuai dengan sinyal *input*-nya.

#### 4.1.2.2 Analisis Penguatan Tegangan Pada Rangkaian

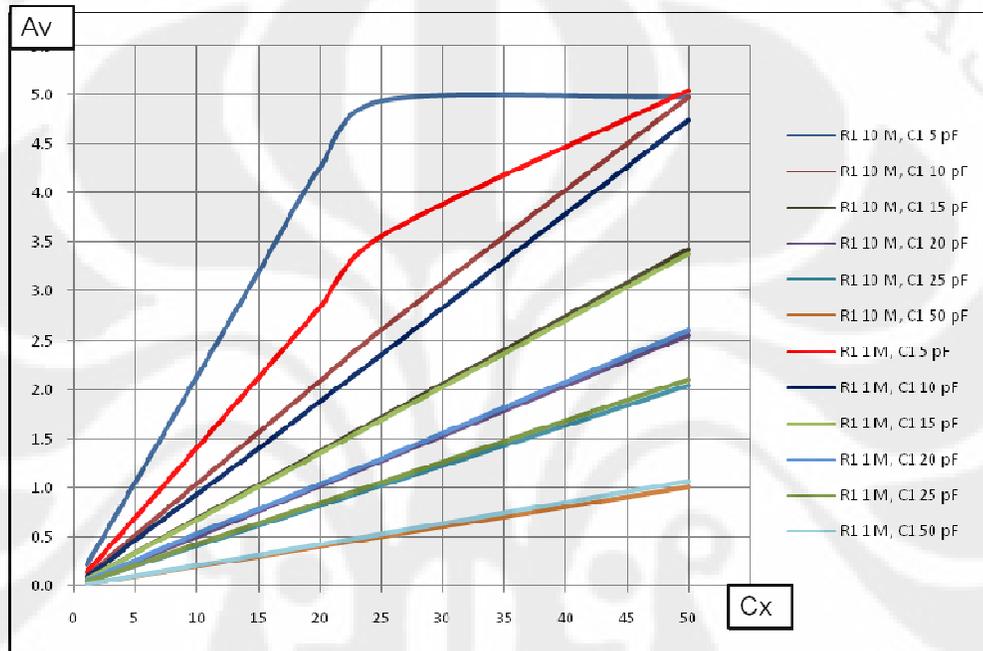
Penguatan tegangan yang diinginkan dari rangkaian *charge amplifier* yang dibuat adalah  $\leq 1$ . Dengan kata lain, tegangan *output* yang dihasilkan oleh rangkaian memiliki nilai maksimum sebesar tegangan *input*, dimana nilainya adalah 3.3 V. Analisis untuk tiap-tiap jenis Op-Amp yang diujikan dapat dilihat pada penjelasan berikut.

##### a) Op-Amp jenis TL071CD

Data-data yang diperoleh untuk Op-Amp jenis ini menunjukkan nilai penguatan tegangan yang tidak memenuhi syarat untuk  $R_1 = 1$  kΩ dan  $R_1 = 10$  kΩ. Nilai penguatan tegangan sangat kecil, dimana nilainya tidak mencapai 0.1 kali. Hal ini disebabkan karena nilai  $\omega C_F R_F \ll 1$ , sehingga nilai penguatan tegangan rangkaian akan sama dengan Persamaan (2.7). Penguatan tegangan yang ideal adalah ketika  $\omega C_F R_F \gg 1$ , sehingga persamaan penguatan tegangan sesuai Persamaan (2.6).

Nilai penguatan tegangan untuk tiap nilai  $C_x$  tidak berubah walaupun nilai  $C_1$  mengalami peningkatan hingga 50 pF dan  $R_1$  berubah menjadi 10 kΩ. Kondisi ini dikarenakan nilai perubahan yang sangat kecil sehingga nilai  $\omega C_F R_F$  belum

mencapai 1. Saat  $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ , nilai  $\omega C_F R_F$  juga belum mencapai 1 untuk range nilai  $C_x$  1 hingga 50 pF, sehingga data penguatan tegangan saat  $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$  dianggap kurang memenuhi syarat. Data yang cukup sesuai terdapat pada saat  $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$  dan  $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$ , dimana nilai  $\omega C_F R_F \geq 1$ . Grafik yang menunjukkan perbandingan penguatan tegangannya dapat dilihat pada Gambar 4.6.



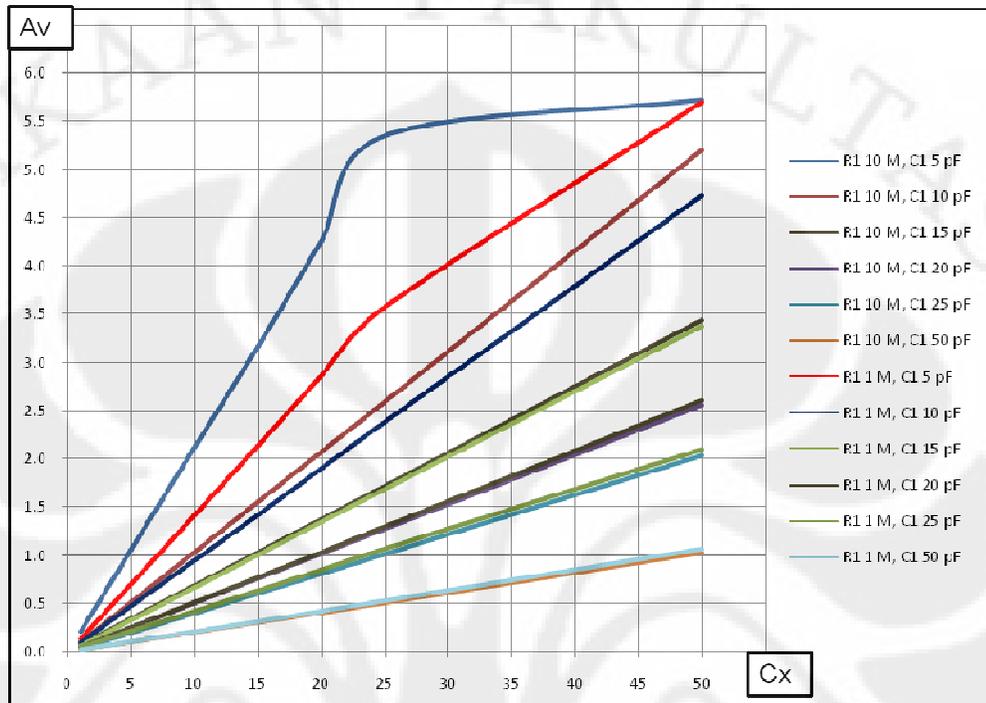
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Penguatan Tegangan Untuk  $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$  Dan  $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$  Pada Op-Amp Jenis TL071CD

Dari grafik tersebut, dapat dilihat bahwa semakin besar nilai  $C_1$  maka akan semakin kecil nilai penguatan tegangan. Hal ini sesuai dengan Persamaan (2.6), dimana nilai penguatan tegangan berbanding terbalik dengan nilai  $C_1$ . Nilai yang paling baik pada grafik yaitu pada saat  $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$  dan  $C_1 = 50 \text{ pF}$ . Pada saat itu grafik berada di bawah nilai 1, menandakan penguatan maksimalnya bernilai 1.

#### b) Op-Amp jenis AD743JN

Op-Amp memiliki karakteristik yang sama untuk  $R_1$  di bawah  $1 \text{ M}\Omega$ . Penguatan tegangan untuk  $R_1$  dengan nilai  $1 \text{ k}\Omega$ ,  $10 \text{ k}\Omega$  dan  $100 \text{ k}\Omega$  kurang memenuhi syarat yang telah ditentukan. Perbandingan penguatan tegangan

dilakukan untuk nilai  $R_1$  sebesar  $1\text{ M}\Omega$  dan  $10\text{ M}\Omega$ . Grafik perbandingan dapat dilihat pada Gambar 4.7.

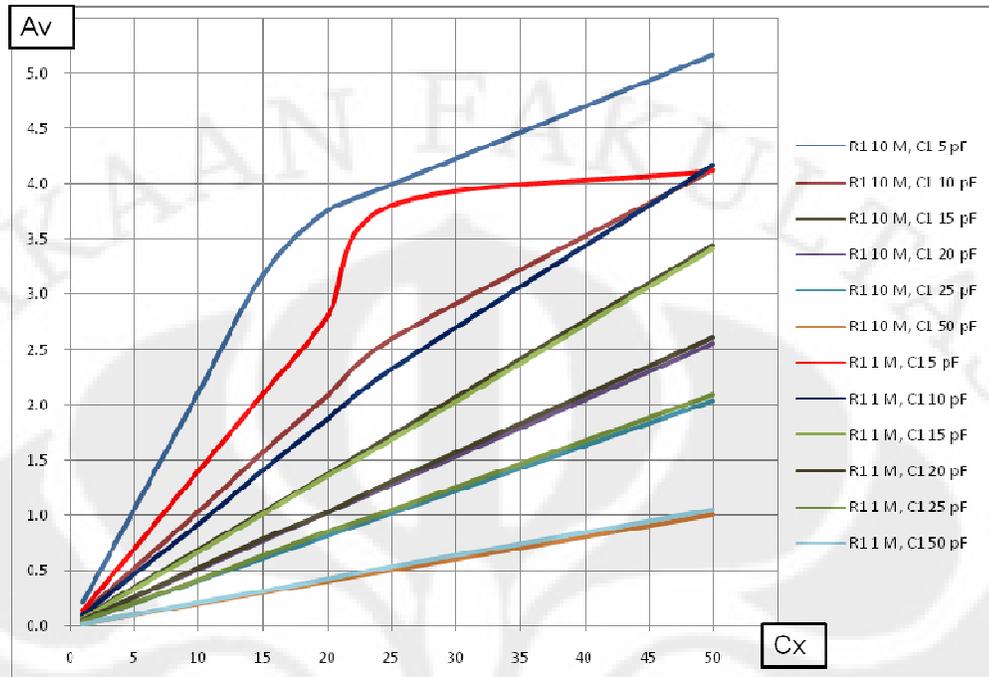


Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Penguatan Tegangan Untuk  $R_1 = 1\text{ M}\Omega$   
Dan  $R_1 = 10\text{ M}\Omega$  Pada Op-Amp Jenis AD743JN

Nilai yang paling baik berada pada saat  $R_1 = 10\text{ M}\Omega$  dan  $C_1 = 50\text{ pF}$ . Pada saat itu grafik berada di bawah nilai 1, sehingga penguatan maksimal bernilai 1.

#### c) Op-Amp jenis OP27AJ

Perbandingan penguatan tegangan yang memenuhi syarat terdapat pada nilai  $R_1$  sebesar  $1\text{ M}\Omega$  dan  $10\text{ M}\Omega$ , sama seperti pada Op-Amp sebelumnya. Grafik perbandingannya dapat dilihat pada Gambar 4.8.

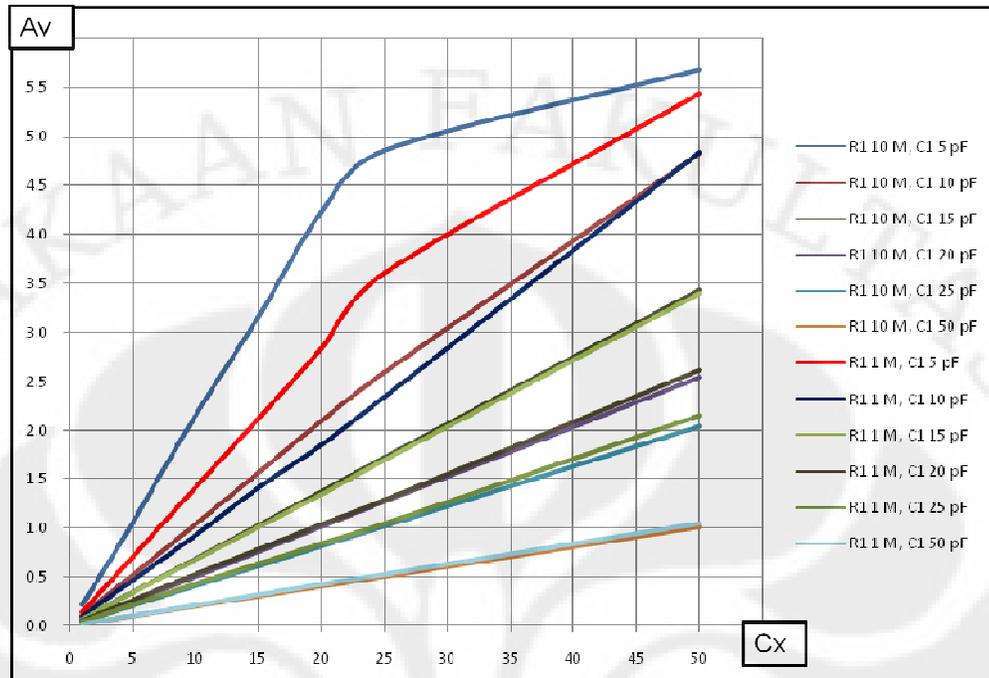


Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Penguatan Tegangan Untuk  $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$   
Dan  $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$  Pada Op-Amp Jenis OP27AJ

Seperti pada jenis-jenis Op-Amp sebelumnya, nilai yang paling baik berada saat  $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$  dan  $C_1 = 50 \text{ pF}$ . Pada saat itu grafik berada di bawah nilai 1, sehingga penguatan maksimal bernilai 1.

#### d) Op-Amp jenis LF355AH

Seperti pada jenis-jenis Op-Amp yang sebelumnya, perbandingan penguatan tegangan yang memenuhi syarat terdapat pada nilai  $R_1$  sebesar  $1 \text{ M}\Omega$  dan  $10 \text{ M}\Omega$ . Grafik perbandingannya dapat dilihat pada Gambar 4.9.

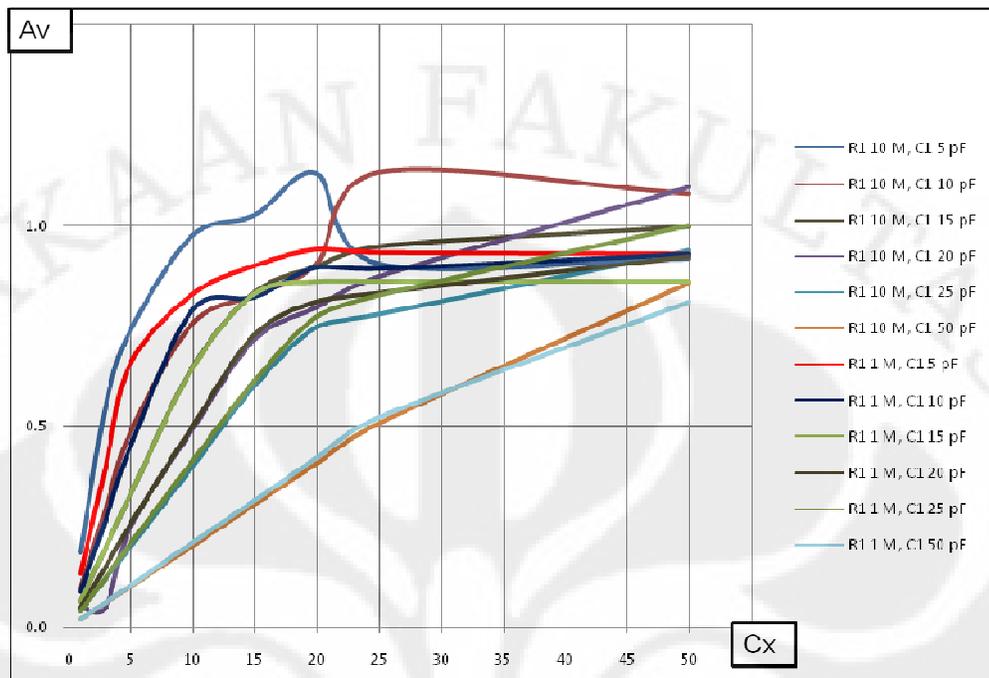


Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Penguatan Tegangan Untuk  $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$   
Dan  $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$  Pada Op-Amp Jenis LF355AH

Nilai yang paling baik berada saat  $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$  dan  $C_1 = 50 \text{ pF}$  seperti pada jenis-jenis Op-Amp sebelumnya. Pada saat itu grafik berada di bawah nilai 1, sehingga penguatan maksimal akan bernilai 1.

#### e) Op-Amp jenis LM741CN

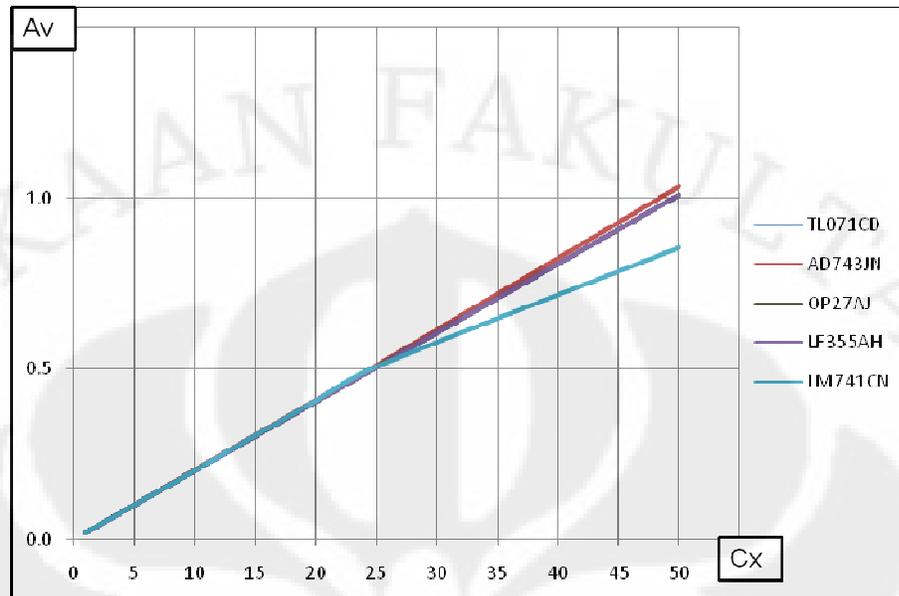
Op-Amp jenis ini memiliki nilai penguatan tegangan yang tidak memenuhi syarat yang diinginkan, dimana nilainya akan berkurang seiring dengan memburuknya sinyal tegangan *output* yang dihasilkan. Grafik perbandingan penguatan tegangan pada saat  $R_1$  sebesar  $1 \text{ M}\Omega$  dan  $10 \text{ M}\Omega$  ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Penguatan Tegangan Untuk  $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$   
Dan  $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$  Pada Op-Amp Jenis LM741CN

Grafik yang didapat menunjukkan nilai penguatan tegangan yang tidak stabil, dimana terjadi fluktuasi nilai untuk beberapa jenis data. Ada beberapa data dengan grafik berada di bawah nilai 1, akan tetapi grafik yang dihasilkan tidak bersifat linier. Keadaan ini menegaskan kekurangan dari jenis Op-Amp ini untuk digunakan pada rangkaian *charge amplifier*.

Berdasarkan keseluruhan analisis penguatan tegangan untuk tiap jenis Op-Amp, dapat dilihat bahwa seluruh Op-Amp memiliki tingkat penguatan tegangan yang baik pada saat nilai  $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$  dan  $C_1 = 50 \text{ pF}$ . Pengecualian dilakukan untuk Op-Amp jenis LM741CN yang kurang cocok untuk rangkaian *charge amplifier*. Perbandingan antara tiap-tiap jenis Op-Amp pada kondisi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Penguatan Tegangan Untuk  $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$   
Dan  $C_1 = 50 \text{ pF}$  Pada Tiap Jenis Op-Amp

Tingkat penguatan tegangan yang paling mendekati spesifikasi yang diinginkan yaitu pada Op-Amp jenis TL071CD, OP27AJ dan LF355AH, dimana tingkat kesalahan dari penguatan tegangannya cukup kecil. Tabel perbandingan dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Perbandingan Tingkat Penguatan Tegangan Untuk Tiap Jenis Op-Amp

$C_x$ (pF)	$C_1 = 50 \text{ pF}$	TL071CD		AD743JN		OP27AJ	
		Av sim	% error	Av sim	% error	Av sim	% error
1	0.02	0.0202	0.0197	0.0205	0.0528	0.0205	0.0523
3	0.06	0.0606	0.0580	0.0614	0.1429	0.0614	0.1414
5	0.10	0.1010	0.1042	0.1024	0.2420	0.1009	0.0931
10	0.20	0.2020	0.1960	0.2048	0.4808	0.2020	0.1958
15	0.30	0.3030	0.2993	0.3070	0.7033	0.3028	0.2817
20	0.40	0.4040	0.3973	0.4092	0.9157	0.4037	0.3665
25	0.50	0.5049	0.4936	0.5111	1.1080	0.5053	0.5267
50	1.00	1.0093	0.9270	1.0354	3.5379	1.0096	0.9563

Cx (pF)	C1 = 50 pF	LF355AH		LM741CN	
	Av hit	Av sim	% error	Av sim	% error
1	0.02	0.0202	0.0201	0.0204	0.0368
3	0.06	0.0606	0.0562	0.0611	0.1132
5	0.10	0.1010	0.1010	0.1018	0.1808
10	0.20	0.2021	0.2121	0.2026	0.2601
15	0.30	0.3030	0.3017	0.3061	0.6099
20	0.40	0.4039	0.3921	0.4079	0.7859
25	0.50	0.5050	0.4953	0.5074	0.7405
50	1.00	1.0101	1.0069	0.8569	14.3088

Dapat terlihat bahwa persentase kesalahan untuk ketiga jenis Op-Amp tersebut bernilai  $\leq 1\%$ . Sementara itu, Op-Amp jenis AD743JN memiliki tingkat kesalahan maksimum sebesar 3.5379 % dan Op-Amp jenis LM741CN memiliki tingkat kesalahan maksimum sebesar 14.309 %.

#### 4.1.2.3 Analisis Sensitivitas Rangkaian

Faktor penting lainnya dalam sebuah rangkaian *charge amplifier* adalah sensitivitas. Sensitivitas merupakan nilai input minimum dimana *output* yang dihasilkan akan dapat dideteksi. Sensitivitas diukur berdasarkan kondisi-kondisi optimal dari rangkaian *charge amplifier* yang didapatkan pada analisis sebelumnya, yaitu rangkaian dengan  $R_1 = 10\text{ M}\Omega$  dan  $C_1 = 50\text{ pF}$ .

a) Op-Amp jenis TL071CD

Tabel 4.4 Pengukuran Sensitivitas Pada Op-Amp Jenis TL071CD

Cx	Vout	$\Delta V$
10 pf	0.677933	0.0000000
10.001 pf	0.678001	0.0000680
10.01 pf	0.678617	0.0006840
10.1 pf	0.684838	0.0069050
20 pf	1.347091	0.0000000
20.001 pf	1.347157	0.0000660
20.01 pf	1.347748	0.0006570
20.1 pf	1.353654	0.0065630

keterangan:

$\Delta V$  adalah selisih nilai  $V_{out}$  terhadap nilai  $C_x$  referensi, yaitu 10 pF atau 20 pF.

b) Op-Amp jenis AD743JN

Tabel 4.5 Pengukuran Sensitivitas Pada Op-Amp Jenis AD743JN

$C_x$	$V_{out}$	$\Delta V$
10 pf	0.671488	0.0000000
10.001 pf	0.671555	0.0000670
10.01 pf	0.672156	0.0006680
10.1 pf	0.678167	0.0066790
20 pf	1.335346	0.0000000
20.001 pf	1.335412	0.0000660
20.01 pf	1.336005	0.0006590
20.1 pf	1.341938	0.0065920

c) Op-Amp jenis OP27AJ

Tabel 4.6 Pengukuran Sensitivitas Pada Op-Amp Jenis OP27AJ

$C_x$	$V_{out}$	$\Delta V$
10 pf	0.666246	0.0000000
10.001 pf	0.666313	0.0000670
10.01 pf	0.666918	0.0006720
10.1 pf	0.672959	0.0067130
20 pf	1.318442	0.0000000
20.001 pf	1.318504	0.0000620
20.01 pf	1.319069	0.0006270
20.1 pf	1.324711	0.0062690

## d) Op-Amp jenis LF355AH

Tabel 4.7 Pengukuran Sensitivitas Pada Op-Amp Jenis LF355AH

Cx	Vout	$\Delta V$
10 pf	0.655991	0.0000000
10.001 pf	0.656049	0.0000580
10.01 pf	0.656577	0.0005860
10.1 pf	0.661847	0.0058560
20 pf	1.309611	0.0000000
20.001 pf	1.309679	0.0000680
20.01 pf	1.310291	0.0006800
20.1 pf	1.31642	0.0068090

Pada pengukuran sensitivitas untuk setiap Op-Amp dapat dilihat bahwa nilai Vout mengalami perubahan ketika nilai Cx diubah dalam satuan femtofarad ( $fF = 0.001 \text{ pF}$ ). Hal ini menunjukkan nilai sensitivitas yang baik dari tiap-tiap Op-Amp. Perlu dicatat bahwa Op-Amp LM741CN tidak diikutsertakan dalam pengukuran karena Op-Amp tersebut kurang ideal untuk rangkaian *charge amplifier*.

#### 4.1.2.4 Analisis Keseluruhan

Dari analisis-analisis yang telah dilakukan, dapat dilihat jenis-jenis Op-Amp yang cukup ideal untuk rangkaian *charge amplifier* yang diinginkan. Dalam aspek perbandingan bentuk sinyal output dan input, Op-Amp jenis TL071CD, AD743JN dan LF355AH merupakan jenis Op-Amp yang memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Dalam aspek penguatan tegangan, jenis Op-Amp yang memenuhi spesifikasi adalah Op-Amp jenis TL071CD, OP27AJ dan LF355AH. Sementara dalam aspek sensitivitas, semua jenis Op-Amp memenuhi spesifikasi yang diinginkan.

Dapat dilihat bahwa Op-Amp jenis TL071CD dan LF355AH memenuhi spesifikasi-spesifikasi yang diinginkan, sehingga dapat disimpulkan kedua Op-Amp tersebut merupakan jenis Op-Amp yang cukup ideal untuk rangkaian *charge amplifier*. Komponen-komponen rangkaian yang cukup ideal dan dapat digunakan

untuk rangkaian *charge amplifier* adalah resistor bernilai  $10\text{ M}\Omega$  untuk  $R_1$  dan kapasitor bernilai  $50\text{ pF}$  untuk  $C_1$ .

#### 4.2 Pengujian Rangkaian Fisik

Pengujian rangkaian ini dilakukan dengan maksud membandingkan hasil rangkaian simulasi dengan rangkaian fisik. Rangkaian disusun berdasarkan contoh data simulasi yang telah dilakukan. Untuk ujicoba ini, parameter-parameter rangkaian yang digunakan adalah:

Jenis Op-Amp	= TL071CN (buatan STMicroelectronic)
Nilai $R_1$	= $10.1\text{ M}\Omega$ (kombinasi seri dari $6.8\Omega$ dan $3.3\Omega$ )
Nilai $C_1$	= $25\text{ pF}$

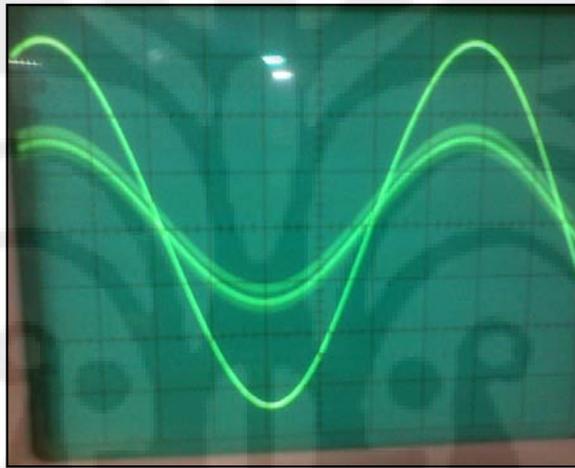
Op-Amp jenis TL071CN yang banyak dijual di pasaran digunakan untuk mengganti jenis TL071CD buatan Texas Instrument. Sementara itu, Nilai  $R_1$  sebesar  $10.1\text{ M}\Omega$  digunakan untuk mengganti nilai  $10\text{ M}\Omega$ . Bentuk rangkaian yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Rangkaian Fisik *Charge Amplifier*

Rangkaian percobaan dihubungkan dengan *RC generator* pada bagian *input*. *RC generator* dihubungkan seri dengan kapasitor sebagai pengganti sensor. *Input* yang berasal dari *RC generator* dan *output* rangkaian dihubungkan dengan *oscilloscope*, untuk melihat perbandingan sinyal tegangannya. Suplai daya  $V_{cc}$  yang diberikan untuk Op-Amp menggunakan rangkaian simetris yang terhubung dengan *transformator step-down*, sehingga dihasilkan  $V_{cc}$  sebesar  $\pm 5\text{ V}$ .

Hasil percobaan yang dilakukan menunjukkan sinyal seperti pada Gambar 4.13. Sinyal dilihat pada *oscilloscope* dengan skala nilai  $1\text{ V/div}$  untuk sinyal *input* dan  $0.1\text{ V/div}$  untuk sinyal *output*.



Gambar 4.13 Contoh Sinyal Pada *Oscilloscope* Untuk Nilai  $C_x = 10\text{ pF}$

Sinyal *input* rangkaian adalah sinyal yang berbentuk sinusoidal sempurna, sementara sinyal *output* adalah sinyal yang berbentuk sinusoidal dengan *noise*. Dapat dilihat bahwa bentuk sinyal *output* yang didapat memiliki bentuk yang sesuai dengan bentuk sinyal *input*. Namun, penguatan tegangan yang didapat tidak sesuai dengan nilai yang seharusnya. Selain itu, terdapat juga *noise* pada sinyal *output*. Nilai penguatan tegangan yang didapat dari percobaan ditunjukkan oleh Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Penguatan Tegangan Pada Rangkaian Percobaan

Cx	Vout	Av	Av simulasi	% error
1	0.1	0.0303030	0.0407	1.0433
3	0.12	0.0363636	0.1225	8.6126
5	0.13	0.0393939	0.2040	16.4647
10	0.16	0.0484848	0.4072	35.8680
15	0.18	0.0545455	0.6122	55.7674
20	0.2	0.0606061	0.8158	75.5182
25	0.22	0.0666667	1.0193	95.2617
50	0.32	0.0969697	2.0369	193.9979

Hasil yang didapat menunjukkan nilai penguatan tegangan yang bersifat linier. Akan tetapi, terjadi pelemahan tegangan pada rangkaian, dengan tingkat kesalahan maksimum sebesar 193.99 %. Pelemahan tegangan ini kemungkinan disebabkan karena prinsip *impedance matching*. *Impedance matching* terjadi pada sinyal bolak-balik dengan frekuensi rendah dan tidak terjadi pada sinyal searah. Pada prinsipnya dua buah saluran yang terhubung harus memiliki impedansi yang sama. Ada beberapa saluran yang terhubung pada rangkaian, antara lain konektor *RC generator* dan *jumper-jumper* pada jalur PCB. Nilai impedansi dari kedua saluran yang terhubung tersebut kemungkinan besar tidak sama (tidak *matching*) sehingga menimbulkan terjadinya *drop* tegangan.

Sementara itu, *noise* yang terdapat pada sinyal *output* kemungkinan disebabkan oleh prinsip *capacitive coupling*. *Capacitive coupling* adalah transfer energi yang terjadi karena adanya kapasitansi antara dua buah *node* rangkaian. *Capacitive coupling* dapat terjadi secara tidak disengaja, misalnya adanya kapasitansi antara dua buah kawat atau jalur PCB yang berdekatan. Hal ini yang menyebabkan adanya *noise* pada sinyal. Untuk mengurangi hal tersebut dapat dilakukan *grounding* di antara kedua jalur ataupun diperlebar jarak antara kedua jalur tersebut.

## KESIMPULAN

1. Optimisasi rangkaian *charge amplifier* untuk sensor kelembaban kapasitif yang dihasilkan terdiri dari Op-Amp dengan *input* FET, *feedback resistor* bernilai 10 M $\Omega$  dan *feedback capacitor* bernilai 50 pF. Kombinasi nilai resistor dan kapasitor didapatkan berdasarkan kombinasi terbaik yang memiliki penguatan tegangan  $\leq 1$ .
2. Jenis Op-Amp yang cukup ideal untuk digunakan pada rangkaian *charge amplifier* adalah jenis TL071CD atau jenis LF355AH. Keduanya memenuhi ketiga aspek yang diujikan, yaitu perbandingan bentuk sinyal output dan input, penguatan tegangan dan sensitivitas.
3. Rangkaian fisik yang dibuat menghasilkan bentuk sinyal *output* yang sesuai dengan hasil simulasi, akan tetapi penguatan tegangan yang didapat memiliki tingkat kesalahan hingga 193.99% dan terdapat *noise* pada sinyalnya. Kedua hal tersebut disebabkan karena kemungkinan adanya *impedance matching* dan *capacitive coupling*.

**DAFTAR REFERENSI**

- [1] Hamamatsu Photonics, K.K. (2001, October). *Characteristics and use of Charge amplifier*. May 11, 2009.  
[http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/charge\\_amp\\_kacc9001e01.pdf](http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/charge_amp_kacc9001e01.pdf)
- [2] Crecraft, D.I., & Gergely, S. (2002). *Analog Electronics: Circuits, Systems and Signal Processing*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [3] Boylestad, Robert L., & Nashelsky, Louis. (1999). *Electronic Devices and Circuit Theory (7<sup>th</sup> Ed.)*. New Jersey: Prentice Hall.
- [4] Peyton, A.J., & Walsh, V. (1993). *Analog Electronics with Op Amps: A Source Book of Practical Circuits*. Cambridge: Cambridge University
- [5] Tooley, Michael H. (2002). *Electronic circuits: fundamentals and applications*. Newnes.
- [6] Kistler Instrument Corporation. (n.d). *The Piezoelectric Effect, Theory, Design and Usage*. May 11, 2009.  
[http://www.designinfo.com/kistler/ref/tech\\_theory\\_text.htm](http://www.designinfo.com/kistler/ref/tech_theory_text.htm)
- [7] Jung, Walter G. (2004). *Op Amp Applications Handbook*. Newnes.
- [8] Sonde, B.S. (1992). *Introduction to System Design Using Integrated Circuits*. New Age Publishers.
- [9] Tamsir, Agus Santoso. (2009). Personal interview.

**DAFTAR PUSTAKA**

Wasito S. (2004). *Vedemekum Elektronika*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.

Johnson, David E., Johnson, Johnny R., Hilburn, John L., & Scott, Peter D. (1997). *Electric Circuit Analysis (3<sup>rd</sup> Ed.)*. New Jersey: Prentice Hall

Millman, Jacob, & Grabel, Alvin. (1987). *Microelectronics (2<sup>nd</sup> Ed.)*. New York: McGraw-Hill.

## LAMPIRAN

### 1. Data Simulasi Untuk Op-Amp Jenis TL071CD

Cx	R1 = 1 k $\Omega$					
	C1 = 5 pF		C1 = 10 pF		C1 = 15 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	1.0048756	0.0001911	1.0013220	0.0001919	1.0027007	0.0001913
3	1.0028865	0.0005724	1.0025277	0.0005729	0.9982963	0.0005761
5	0.9916670	0.0009547	0.9927213	0.0009557	1.0031079	0.0009534
10	0.9975619	0.0019085	0.9901677	0.0019116	0.9844414	0.0019145
15	1.0094168	0.0028623	1.0044514	0.0028675	1.0058292	0.0028628
20	0.9936834	0.0038327	1.0014167	0.0038255	1.0020846	0.0038320
25	0.9876976	0.0047964	0.9864972	0.0047954	1.0008943	0.0047729
50	1.0003354	0.0095360	0.9932936	0.0095438	1.0050588	0.0095524

Cx	R1 = 1 k $\Omega$					
	C1 = 20 pF		C1 = 25 pF		C1 = 50 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	1.0012510	0.0001918	1.0100062	0.0001904	0.9925029	0.0001908
3	1.0086497	0.0005728	1.0013987	0.0005753	0.9990457	0.0005719
5	1.0034299	0.0009547	0.9983888	0.0009561	1.0023834	0.0009583
10	0.9830317	0.0019203	0.9899450	0.0019107	0.9943046	0.0019164
15	1.0063316	0.0028624	0.9959760	0.0028680	0.9951201	0.0028724
20	1.0089821	0.0038162	1.0036637	0.0038258	1.0002419	0.0038326
25	1.0002088	0.0047826	1.0096418	0.0047742	1.0002709	0.0047884
50	1.0067422	0.0095537	1.0010705	0.0095596	1.0053997	0.0095619

Cx	R1 = 10 k $\Omega$					
	C1 = 5 pF		C1 = 10 pF		C1 = 15 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	1.0016657	0.0019051	1.0116495	0.0019009	0.9972975	0.0019170
3	0.9882850	0.0057457	0.9900343	0.0057553	1.0006678	0.0057136
5	1.0089909	0.0095411	0.9846312	0.0095988	1.0000014	0.0095320
10	0.9860818	0.0191227	1.0032963	0.0190069	0.9814640	0.0191827
15	1.0050983	0.0286925	1.0024244	0.0287832	0.9893607	0.0286434
20	0.9938725	0.0383066	1.0075584	0.0381243	1.0039533	0.0380372
25	0.9890779	0.0477817	0.9854065	0.0478101	0.9980039	0.0480702
50	1.0100169	0.0947164	1.0012990	0.0957475	0.9850853	0.0960908

Cx	R1 = 10 kΩ					
	C1 = 20 pF		C1 = 25 pF		C1 = 50 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	1.0124216	0.0018994	1.0106630	0.0019051	0.9975412	0.0018890
3	0.9991311	0.0057278	0.9920919	0.0057621	0.9688883	0.0057840
5	0.9862408	0.0096046	1.0100233	0.0094512	1.0102995	0.0093975
10	0.9871022	0.0191535	1.0030480	0.0189347	1.0168397	0.0187577
15	0.9978919	0.0284814	0.9965174	0.0285855	1.0046146	0.0284971
20	0.9977912	0.0380045	0.9997917	0.0378900	1.0073407	0.0379727
25	0.9791631	0.0480118	0.9998238	0.0472908	1.0115373	0.0474191
50	1.0032070	0.0955560	1.0068141	0.0950539	1.0232138	0.0942598

Cx	R1 = 100 kΩ					
	C1 = 5 pF		C1 = 10 pF		C1 = 15 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	0.9875584	0.0191550	1.0433535	0.0184048	0.9820912	0.0186079
3	0.9787015	0.0575873	1.0253239	0.0555947	1.0161404	0.0548987
5	0.9865884	0.0951971	1.0370141	0.0921646	1.0108985	0.0916574
10	0.9692529	0.1914238	0.9874042	0.1888324	1.0242185	0.1820786
15	1.0032898	0.2847841	0.9745351	0.2852295	1.0243438	0.2726395
20	1.0109878	0.3765371	0.9714184	0.3809927	1.0211610	0.3636675
25	1.0108759	0.4728817	1.0044992	0.4681843	1.0241210	0.4561424
50	1.0221196	0.9470168	0.9961425	0.9445004	0.9826518	0.9298153

Cx	R1 = 100 kΩ					
	C1 = 20 pF		C1 = 25 pF		C1 = 50 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	0.9936460	0.0178900	0.9980522	0.0172293	0.9837085	0.0139545
3	0.9980958	0.0537103	1.0128482	0.0514151	0.9796116	0.0417928
5	0.9982579	0.0895037	1.0127943	0.0856048	0.9787643	0.0695407
10	0.9989699	0.1787608	1.0048275	0.1725135	0.9822631	0.1392564
15	1.0062836	0.2679022	0.9933122	0.2607002	0.9768851	0.2100123
20	1.0062222	0.3574031	1.0121102	0.3422925	0.9769391	0.2801970
25	1.0060639	0.4467483	1.0126407	0.4281491	0.9770659	0.3505070
50	1.0059384	0.8980337	1.0130251	0.8586864	0.9775284	0.7035163

Cx	R1 = 1 M $\Omega$					
	C1 = 5 pF		C1 = 10 pF		C1 = 15 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	0.9824275	0.1400344	0.9347025	0.0934161	0.9381971	0.0670612
3	0.9826999	0.4214582	0.9677800	0.2756755	0.9417271	0.2019815
5	0.9836018	0.7026300	0.9322999	0.4725707	0.9203242	0.3382789
10	0.9844657	1.4108553	0.9367301	0.9370451	0.9392627	0.6713737
15	0.9854095	2.1241354	0.9535459	1.3991060	0.9404158	1.0084799
20	0.9863411	2.8424835	0.9378000	1.8805492	0.9427958	1.3487170
25	0.9875915	3.5649419	0.9383118	2.3548019	0.9428547	1.6864357
50	1.2270800	5.0515376	0.9415575	4.7428705	0.9431765	3.3732878

Cx	R1 = 1 M $\Omega$					
	C1 = 20 pF		C1 = 25 pF		C1 = 50 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	0.9166031	0.0524415	0.9421761	0.0419121	0.9556117	0.0210035
3	0.9476490	0.1549108	0.9563362	0.1247388	0.9545628	0.0626300
5	0.9310298	0.2605290	0.9449224	0.2093271	0.9283351	0.1066209
10	0.8997445	0.5308415	0.9118023	0.4260273	0.9418385	0.2110831
15	0.9346130	0.7779438	0.9141599	0.6377416	0.9340847	0.3178801
20	0.9403268	1.0338756	0.9251840	0.8454327	0.9302094	0.4243871
25	0.9490978	1.2904961	0.9315054	1.0535521	0.9267336	0.5313388
50	0.9394493	2.5948169	0.9384555	2.1032893	0.9214719	1.0702288

Cx	R1 = 10 M $\Omega$					
	C1 = 5 pF		C1 = 10 pF		C1 = 15 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	0.9207998	0.2138752	0.9522941	0.1041527	0.9655979	0.0688204
3	0.9210199	0.6439426	0.9577716	0.3120353	0.9656948	0.2065589
5	0.9229611	1.0663977	0.9585831	0.5205593	0.9752814	0.3427516
10	0.9236377	2.1374284	0.9530227	1.0434840	0.9663362	0.6885677
15	0.9254702	3.2002346	0.9538083	1.5641519	0.9670818	1.0310336
20	0.9269376	4.2651217	0.9543666	2.0876859	0.9676416	1.3738334
25	1.0080874	4.9438704	0.9551344	2.6081840	0.9680713	1.7178265
50	1.3677985	4.9830943	1.0030710	4.9751431	0.9705541	3.4315175

Cx	R1 = 10 MΩ					
	C1 = 20 pF		C1 = 25 pF		C1 = 50 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	0.9733002	0.0512990	0.9832764	0.0407364	0.9903616	0.0201967
3	0.9734976	0.1538797	0.9786115	0.1224901	0.9901918	0.0605802
5	0.9738687	0.2560819	0.9788134	0.2040412	0.9891846	0.1010423
10	0.9792750	0.5104927	0.9826177	0.4071647	0.9899648	0.2019600
15	0.9745037	0.7685626	0.9792859	0.6122192	0.9896203	0.3029932
20	0.9750181	1.0238395	0.9797064	0.8157885	0.9897506	0.4039731
25	0.9754246	1.2794273	0.9800896	1.0192841	0.9898776	0.5049359
50	0.9772395	2.5568988	0.9815870	2.0369486	0.9904957	1.0092697

## 2. Data Simulasi Untuk Op-Amp Jenis AD743JN

Cx	R1 = 1 kΩ					
	C1 = 5 pF		C1 = 10 pF		C1 = 15 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	1.0117092	0.0001892	0.9888968	0.0001912	1.0276307	0.0001867
3	0.9865772	0.0005738	0.9903261	0.0005737	0.9865294	0.0005736
5	0.9999344	0.0009543	0.9884434	0.0009518	0.9900692	0.0009556
10	1.0178113	0.0018898	1.0089732	0.0019115	1.0014510	0.0018941
15	0.9909200	0.0028653	1.0046039	0.0028671	1.0077626	0.0028633
20	1.0074884	0.0038180	0.9940595	0.0038132	0.9846819	0.0038154
25	1.0143713	0.0047745	1.0007104	0.0047532	1.0059121	0.0047791
50	0.9846173	0.0096106	0.9916371	0.0095623	1.0067398	0.0095527

Cx	R1 = 1 kΩ					
	C1 = 20 pF		C1 = 25 pF		C1 = 50 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	1.0049467	0.0001913	0.9969881	0.0001910	1.0026537	0.0001914
3	0.9964141	0.0005747	0.9898364	0.0005741	0.9892613	0.0005745
5	0.9979771	0.0009573	1.0024068	0.0009565	0.9919005	0.0009557
10	1.0046654	0.0018904	1.0094997	0.0019096	0.9987116	0.0019132
15	1.0024557	0.0028635	0.9889738	0.0028676	1.0125482	0.0028620
20	1.0109038	0.0038205	1.0068627	0.0037642	0.9901527	0.0038288
25	0.9983896	0.0047722	1.0084645	0.0047792	0.9879473	0.0047921
50	0.9945121	0.0095367	0.9834219	0.0095457	1.0248395	0.0092368

Cx	R1 = 10 kΩ					
	C1 = 5 pF		C1 = 10 pF		C1 = 15 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	1.0059468	0.0019072	1.0016212	0.0018996	1.0002925	0.0018911
3	1.0299479	0.0056440	1.0019446	0.0056832	0.9926020	0.0057295
5	1.0167448	0.0094922	1.0029946	0.0094891	0.9864417	0.0095585
10	1.0160573	0.0190568	0.9963963	0.0191024	0.9984722	0.0190522
15	1.0133937	0.0286318	1.0280716	0.0281503	0.9938346	0.0286311
20	1.0120198	0.0377084	1.0093184	0.0381933	1.0205546	0.0379439
25	0.9923382	0.0471496	0.9932087	0.0476023	1.0123024	0.0474788
50	0.7079859	0.1502631	1.0027230	0.0950117	1.0029033	0.0950049

Cx	R1 = 10 kΩ					
	C1 = 20 pF		C1 = 25 pF		C1 = 50 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	1.0177926	0.0019016	1.0019473	0.0018920	0.9989186	0.0019136
3	1.0172983	0.0057186	1.0020874	0.0056753	0.9885915	0.0057069
5	1.0182383	0.0094810	0.9902061	0.0096185	0.9856745	0.0095823
10	1.0205887	0.0188951	0.9941981	0.0191518	0.9839811	0.0192251
15	1.0034455	0.0285303	1.0112993	0.0284575	0.9911909	0.0284687
20	1.0118770	0.0381063	1.0024309	0.0381929	0.9704624	0.0385316
25	1.0200302	0.0472021	1.0064095	0.0472392	0.9769900	0.0480619
50	1.0120974	0.0954929	1.0121498	0.0944131	1.0058356	0.0936225

Cx	R1 = 100 kΩ					
	C1 = 5 pF		C1 = 10 pF		C1 = 15 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	0.9918733	0.0191331	1.0391204	0.0184563	0.9818163	0.0184866
3	0.9740881	0.0579160	1.0378186	0.0553996	0.9915947	0.0555622
5	1.0273888	0.0940608	0.9914255	0.0943905	1.0192900	0.0908491
10	1.0134579	0.1894045	0.9872907	0.1885935	0.9829520	0.1860393
15	1.0298307	0.2840092	1.0255382	0.2794961	0.9831819	0.2800459
20	1.0040815	0.3815963	0.9708461	0.3804080	1.0058747	0.3685688
25	0.9984712	0.4780991	1.0144049	0.4666028	1.0112496	0.4592276
50	1.0083963	0.9518245	0.9969049	0.9450609	0.9846745	0.9328857

Cx	R1 = 100 k $\Omega$					
	C1 = 20 pF		C1 = 25 pF		C1 = 50 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	0.9852639	0.0179280	0.9996923	0.0171986	0.9708441	0.0140009
3	0.9865229	0.0538538	1.0004941	0.0515189	0.9713718	0.0419782
5	0.9870534	0.0898153	0.9999255	0.0860089	0.9714342	0.0699715
10	0.9982196	0.1787390	0.9996532	0.1721846	0.9711381	0.1400033
15	0.9920110	0.2687405	1.0006794	0.2578066	0.9711239	0.2101235
20	0.9922899	0.3586360	1.0011942	0.3435565	0.9711826	0.2802811
25	0.9925498	0.4486375	1.0014244	0.4295016	0.9714736	0.3503105
50	1.0033806	0.8963793	0.9821634	0.8709326	0.9761865	0.7013284

Cx	R1 = 1 M $\Omega$					
	C1 = 5 pF		C1 = 10 pF		C1 = 15 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	0.9734707	0.1417470	0.9286010	0.0948928	0.9342138	0.0675905
3	0.9737156	0.4256666	0.9312484	0.2843438	0.9371988	0.2021811
5	0.9742143	0.7106670	0.9294120	0.4749114	0.9367463	0.3366942
10	0.9748194	1.4233158	0.9304542	0.9478464	0.9370177	0.6737125
15	0.9744396	2.1424159	0.9317803	1.4198105	0.9377201	1.0118945
20	0.9771415	2.8685793	0.9310372	1.9019499	0.9396613	1.3535098
25	0.9936140	3.5781646	0.9309802	2.3837388	0.9395308	1.6918824
50	0.9212407	5.6988803	0.9510602	4.7346779	0.9371414	3.3791679

Cx	R1 = 1 M $\Omega$					
	C1 = 20 pF		C1 = 25 pF		C1 = 50 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	0.9451982	0.0515318	0.8997221	0.0428884	0.9555862	0.0209584
3	0.9452067	0.1548132	0.9054159	0.1282295	0.9512771	0.0628711
5	0.9407664	0.2580960	0.9153610	0.2124882	0.9550205	0.1045006
10	0.9420340	0.5160202	0.9499871	0.4169835	0.9541812	0.2091540
15	0.9459051	0.7742378	0.9390437	0.6303945	0.9551642	0.3136534
20	0.9460363	1.0320699	0.9260188	0.8463945	0.9421434	0.4223045
25	0.9469242	1.2984507	0.9147988	1.0648664	0.9346726	0.5311145
50	0.9464961	2.6024573	0.9487433	2.0945653	0.9207859	1.0703450

Cx	R1 = 10 MΩ					
	C1 = 5 pF		C1 = 10 pF		C1 = 15 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	0.9239200	0.2140888	0.9547936	0.1042225	0.9744947	0.0686048
3	0.9257064	0.6404008	0.9577604	0.3125349	0.9742495	0.2056741
5	0.9271777	1.0667778	0.9542760	0.5213525	0.9740552	0.3427712
10	0.9440028	2.1255850	0.9601680	1.0417897	0.9736007	0.6856790
15	0.9470502	3.1698409	0.9643409	1.5620913	0.9732312	1.0293302
20	0.9370157	4.2646169	0.9635186	2.0806277	0.9727453	1.3725571
25	0.9174245	5.3535433	0.9626755	2.5994894	0.9721575	1.7157349
50	0.9326664	5.7244155	0.9409146	5.2089641	0.9703117	3.4391361

Cx	R1 = 10 MΩ					
	C1 = 20 pF		C1 = 25 pF		C1 = 50 pF	
	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av	Vout/Vin	Av
1	0.9743455	0.0511984	0.9789245	0.0408403	0.9743260	0.0205281
3	0.9779463	0.1535444	0.9790619	0.1224883	0.9767126	0.0614293
5	0.9793280	0.2558637	0.9792090	0.2040800	0.9763550	0.1024196
10	0.9789815	0.5116217	0.9825253	0.4077943	0.9764837	0.2048076
15	0.9786074	0.7673485	0.9821311	0.6115288	0.9770416	0.3070334
20	0.9782123	1.0231827	0.9818020	0.8154146	0.9775801	0.4091573
25	0.9778151	1.2792536	0.9814586	1.0194647	0.9783242	0.5110801
50	0.9761831	2.5627025	0.9813461	2.0398787	0.9660367	1.0353794

### 3. Data Simulasi Untuk Op-Amp Jenis OP27AJ

R1 = 1 kOhm

Cx	C1					
	5 pF		10 pF		15 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	1.0009537	0.0001910	1.0025387	0.0001915	1.0073279	0.0001911
3	1.0070575	0.0005734	0.9942445	0.0005716	0.9883810	0.0005730
5	1.0021395	0.0009577	0.9939109	0.0009562	1.0068303	0.0009430
10	0.9898197	0.0019102	1.0066001	0.0019125	0.9925828	0.0019094
15	1.0024152	0.0028749	0.9899728	0.0028681	1.0010637	0.0028756
20	1.0123360	0.0037948	1.0042450	0.0038221	0.9893096	0.0038238
25	0.9897974	0.0047804	0.9872521	0.0047876	1.0072246	0.0047769
50	1.0069158	0.0094884	1.0211286	0.0094706	0.9964246	0.0095812

Cx	C1					
	20 pF		25 pF		50 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	1.0077510	0.0001910	1.0070184	0.0001910	0.9894683	0.0001911
3	0.9899601	0.0005732	0.9909926	0.0005725	0.9977455	0.0005741
5	0.9927309	0.0009543	1.0117574	0.0009392	0.9985948	0.0009580
10	0.9906980	0.0019101	0.9847267	0.0019153	0.9927912	0.0019076
15	1.0063640	0.0028676	1.0125840	0.0028669	0.9924634	0.0028657
20	0.9941635	0.0038189	1.0008735	0.0038327	1.0025873	0.0037694
25	0.9831548	0.0047802	0.9966997	0.0047508	0.9962596	0.0047892
50	0.9997803	0.0095588	1.0030569	0.0095337	0.9864549	0.0095615

R1 = 10 kOhm

Cx	C1					
	5 pF		10 pF		15 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	1.0098584	0.0019095	0.9970638	0.0019086	1.0084608	0.0019084
3	0.9919960	0.0057160	0.9980135	0.0057174	1.0094883	0.0057129
5	1.0208242	0.0094620	0.9870210	0.0095589	0.9824545	0.0095706
10	0.9940465	0.0191121	0.9953711	0.0190391	1.0000025	0.0192118
15	0.9885601	0.0286902	0.9976673	0.0286752	0.9952389	0.0287762
20	0.9941220	0.0380269	1.0010672	0.0378324	0.9805101	0.0385902
25	0.9902095	0.0478574	0.9984253	0.0472781	0.9982217	0.0475238
50	1.0015912	0.0953928	0.9884231	0.0954668	0.9982081	0.0955890

Cx	C1					
	20 pF		25 pF		50 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.9843256	0.0019118	1.0003540	0.0018953	1.0040745	0.0018788
3	1.0036737	0.0057051	0.9812152	0.0057681	1.0098867	0.0056215
5	0.9910408	0.0095966	0.9902732	0.0095845	0.9826185	0.0095866
10	1.0154883	0.0190581	1.0102666	0.0190376	0.9811308	0.0192119
15	0.9946604	0.0286583	0.9772352	0.0288226	1.0170854	0.0281054
20	0.9965154	0.0384306	0.9933332	0.0382125	0.9818322	0.0381436
25	0.9893930	0.0479613	1.0150708	0.0476455	0.9733056	0.0480352
50	1.0109614	0.0952067	1.0235624	0.0938483	1.0167893	0.0939741

$R1 = 100 \text{ k}\Omega$

Cx	C1					
	5 pF		10 pF		15 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	1.0233551	0.0189090	0.9537013	0.0191146	1.0074880	0.0183081
3	1.0233551	0.0189090	1.0135426	0.0555720	0.9811232	0.0553202
5	0.9809770	0.0962380	0.9611383	0.0951912	0.9744611	0.0931433
10	0.9806113	0.1928947	0.9937501	0.1872179	1.0123055	0.1817908
15	1.0105919	0.2850025	1.0170593	0.2776484	1.0122150	0.2728473
20	1.0287831	0.3778018	1.0107251	0.3715219	1.0065308	0.3639652
25	1.0162856	0.4697543	0.9866423	0.4703558	0.9982163	0.4580362
50	0.9877168	0.9574904	0.9786810	0.9425465	0.9678913	0.9319556

Cx	C1					
	20 pF		25 pF		50 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	1.0014785	0.0177980	0.9845672	0.0173362	0.9795034	0.0139633
3	1.0009392	0.0534475	0.9882381	0.0517759	0.9789557	0.0418150
5	0.9887795	0.0894527	1.0011111	0.0854967	0.9784682	0.0697375
10	0.9887548	0.1790327	1.0033181	0.1713643	0.9731244	0.1401008
15	0.9904804	0.2680453	1.0050127	0.2584310	0.9841735	0.2093535
20	0.9931660	0.3574375	0.9837775	0.3462982	0.9860618	0.2784860
25	0.9967632	0.4468648	0.9837809	0.4330715	0.9763134	0.3514465
50	0.9909205	0.8958737	0.9944707	0.8669842	0.9882329	0.6991765

$R1 = 1 \text{ M}\Omega$

Cx	C1					
	5 pF		10 pF		15 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.9784750	0.1401512	0.9396973	0.0934579	0.9193218	0.0677963
3	0.9852906	0.4194792	0.9359567	0.2795259	0.9235144	0.2029321
5	0.9892880	0.6976963	0.9343252	0.4662415	0.9351730	0.3353347
10	0.9836345	1.4041481	0.9661866	0.9196688	0.9369645	0.6717254
15	0.9853176	2.1022219	0.9405009	1.4074933	0.9206167	1.0133019
20	0.9872874	2.8045092	0.9358391	1.8713458	0.9200459	1.3576798
25	0.9030700	3.8125186	0.9594753	2.3252117	0.9322968	1.6836444
50	0.8189480	4.1225306	0.8145953	4.1759458	0.9158279	3.4084625

Cx	C1					
	20 pF		25 pF		50 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.8987488	0.0527914	0.8953954	0.0428860	0.9565838	0.0209398
3	0.9063027	0.1574755	0.9183647	0.1270786	0.9551338	0.0626354
5	0.9125697	0.2618724	0.9455310	0.2089949	0.9557488	0.1046418
10	0.8996719	0.5269245	0.9536628	0.4158260	0.9272282	0.2122731
15	0.9094341	0.7895373	0.9090851	0.6388263	0.9563634	0.3144320
20	0.9455653	1.0295088	0.8988387	0.8566932	0.9383758	0.4231888
25	0.9186889	1.3086181	0.9323835	1.0507644	0.9189823	0.5367596
50	0.9249839	2.6157899	0.9405524	2.0954432	0.9477566	1.0508563

R1 = 10 MOhm

Cx	C1					
	5 pF		10 pF		15 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.9260654	0.2119670	0.9599277	0.1038051	0.9688339	0.0686591
3	0.9561854	0.6300854	0.9538347	0.3118587	0.9649027	0.2063947
5	0.9407091	1.0542894	0.9685460	0.5183024	0.9650806	0.3437480
10	0.9399498	2.1119581	0.9678830	1.0327099	0.9654483	0.6865183
15	0.9290435	3.1744665	0.9515722	1.5699350	0.9755999	1.0258560
20	0.8793074	3.7600713	0.9531576	2.0806003	0.9751084	1.3659823
25	0.8472532	3.9965464	0.9656541	2.5950948	0.9660510	1.7198766
50	0.6780988	5.1718400	0.8250550	4.1286947	0.9137107	3.4436078

Cx	C1					
	20 pF		25 pF		50 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.9807929	0.0509291	0.9836109	0.0406176	0.9744626	0.0205229
3	0.9774697	0.1532409	0.9840052	0.1219807	0.9765805	0.0614141
5	0.9807330	0.2548729	0.9839890	0.2034031	0.9910134	0.1009314
10	0.9804504	0.5096168	0.9839885	0.4072531	0.9888614	0.2019579
15	0.9731855	0.7689312	0.9835217	0.6098217	0.9908413	0.3028174
20	0.9736292	1.0228790	0.9782991	0.8164565	0.9906777	0.4036655
25	0.9799916	1.2757837	0.9786563	1.0191112	0.9890013	0.5052669
50	0.9787433	2.5538646	0.9795385	2.0375716	0.9901614	1.0095634

## 4. Data Simulasi Untuk Op-Amp Jenis LF355AH

R1 = 1 kOhm

Cx	C1					
	5 pF		10 pF		15 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.9904211	0.0001910	0.9894717	0.0001913	0.9960261	0.0001910
3	1.0033237	0.0005741	1.0039850	0.0005742	1.0019167	0.0005741
5	0.9853687	0.0009565	0.9894859	0.0009536	0.9893717	0.0009555
10	0.9931177	0.0019111	0.9931187	0.0019153	1.0032520	0.0019113
15	0.9909485	0.0028635	0.9897621	0.0028655	0.9905322	0.0028682
20	1.0008357	0.0038332	0.9909036	0.0038203	0.9873125	0.0038222
25	1.0052451	0.0047866	1.0012848	0.0047752	0.9987707	0.0047705
50	0.9985766	0.0095755	0.9871120	0.0095647	0.9938044	0.0095934

Cx	C1					
	20 pF		25 pF		50 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.9940886	0.0001912	0.9886796	0.0001913	0.9922687	0.0001908
3	1.0016795	0.0005743	1.0056065	0.0005720	0.9990850	0.0005718
5	0.9886221	0.0009566	0.9941069	0.0009552	0.9973730	0.0009561
10	1.0071111	0.0019069	1.0025092	0.0019134	1.0008258	0.0019153
15	0.9930638	0.0028744	0.9991983	0.0028681	1.0083561	0.0028661
20	0.9895019	0.0038235	0.9936628	0.0038152	1.0085387	0.0038155
25	0.9898703	0.0047802	0.9893143	0.0047751	1.0037706	0.0047722
50	1.0010368	0.0095680	1.0078136	0.0095538	0.9902319	0.0095399

R1 = 10 kOhm

Cx	C1					
	5 pF		10 pF		15 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	1.0007871	0.0019159	1.0072672	0.0019070	0.9926450	0.0019158
3	0.9927237	0.0057497	1.0010190	0.0057565	0.9974874	0.0057573
5	0.9908525	0.0095355	0.9977518	0.0095854	1.0031601	0.0095493
10	1.0042971	0.0191636	0.9852922	0.0191942	1.0062743	0.0190124
15	0.9951329	0.0286224	0.9874601	0.0287207	0.9863573	0.0286680
20	0.9947135	0.0381220	1.0134276	0.0381263	0.9957518	0.0380086
25	1.0135912	0.0476533	1.0004661	0.0479855	0.9853501	0.0480191
50	1.0147084	0.0942371	1.0044337	0.0955504	0.9950778	0.0953198

Cx	C1					
	20 pF		25 pF		50 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	1.0057980	0.0018954	1.0049787	0.0019041	0.9759326	0.0019200
3	1.0115309	0.0057067	0.9881883	0.0057659	0.9723621	0.0057722
5	1.0152932	0.0095068	0.9935435	0.0096245	1.0034824	0.0094819
10	0.9955744	0.0191025	1.0020687	0.0191156	1.0093985	0.0189388
15	0.9876865	0.0288530	1.0106236	0.0284475	0.9867417	0.0289298
20	1.0010768	0.0380245	0.9876953	0.0381914	1.0261420	0.0377831
25	0.9872961	0.0478802	1.0026309	0.0473669	0.9838767	0.0481365
50	1.0005245	0.0955518	1.0009646	0.0950445	1.0130081	0.0944654

R1 = 100 kOhm

Cx	C1					
	5 pF		10 pF		15 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	1.0109038	0.0189171	0.9961334	0.0187012	0.9704493	0.0184409
3	1.0107609	0.0569170	0.9891386	0.0567358	1.0155180	0.0545882
5	1.0128546	0.0943092	0.9995330	0.0941257	1.0054077	0.0917300
10	0.9817258	0.1907317	0.9967224	0.1875703	0.9874012	0.1860931
15	1.0175024	0.2817797	0.9567951	0.2866598	0.9811678	0.2783536
20	1.0185642	0.3800569	1.0012994	0.3736260	1.0199033	0.3647594
25	1.0248181	0.4726668	0.9875786	0.4705301	0.9743106	0.4660079
50	1.0129648	0.9556152	1.0111363	0.9332456	0.9711830	0.9357398

Cx	C1					
	20 pF		25 pF		50 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.9906338	0.0177742	0.9979115	0.0171725	0.9738456	0.0140024
3	0.9849945	0.0536183	0.9750500	0.0519716	0.9786259	0.0417631
5	0.9913587	0.0892750	0.9811554	0.0867944	0.9710558	0.0700707
10	1.0059747	0.1783092	0.9864705	0.1738442	0.9874583	0.1391502
15	1.0069016	0.2674280	0.9874130	0.2594756	0.9802203	0.2106779
20	1.0013248	0.3575672	1.0121471	0.3428951	0.9879801	0.2790180
25	1.0057641	0.4469145	0.9895785	0.4342469	0.9906046	0.3482577
50	0.9953979	0.8945133	0.9840579	0.8698685	0.9848063	0.7004122

$R1 = 1 \text{ MOhm}$

Cx	C1					
	5 pF		10 pF		15 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.9874339	0.1391282	0.9296296	0.0936582	0.9175123	0.0675315
3	0.9904166	0.4186712	0.9327373	0.2824473	0.9212581	0.2033481
5	0.9845378	0.7006224	0.9526564	0.4646644	0.9221053	0.3395512
10	0.9819421	1.4129709	0.9668920	0.9269083	0.9208554	0.6762634
15	0.9860543	2.1159108	0.9354890	1.4131756	0.9382541	1.0124598
20	0.9978400	2.8352192	0.9652014	1.8491939	0.9403020	1.3458046
25	1.0097467	3.6030373	0.9456980	2.3399733	0.9262924	1.6974215
50	1.0360810	5.4383975	0.9484155	4.8398406	0.9331684	3.4033481

Cx	C1					
	20 pF		25 pF		50 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.8985954	0.0530016	0.9517611	0.0415958	0.9240705	0.0212563
3	0.9454530	0.1542548	0.9128519	0.1275826	0.9451244	0.0631238
5	0.9479440	0.2588255	0.9051553	0.2136447	0.9212659	0.1065652
10	0.9035694	0.5269142	0.8986033	0.4290749	0.9359922	0.2121542
15	0.9271212	0.7833640	0.9219482	0.6356706	0.9205170	0.3213580
20	0.9415785	1.0394135	0.9356257	0.8418383	0.9244268	0.4284119
25	0.9478876	1.2882763	0.9476932	1.0462726	0.9367428	0.5302635
50	0.9284546	2.6195150	0.9009637	2.1517772	0.9558181	1.0502528

$R1 = 10 \text{ MOhm}$

Cx	C1					
	5 pF		10 pF		15 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.9199250	0.2145979	0.9539343	0.1040785	0.9754229	0.0683379
3	0.9563599	0.6268689	0.9554278	0.3121783	0.9648832	0.2068584
5	0.9558184	1.0515306	0.9679168	0.5163458	0.9654119	0.3441603
10	0.9221607	2.1499387	0.9672794	1.0376582	0.9752833	0.6846230
15	0.9431649	3.1583592	0.9534275	1.5646484	0.9746550	1.0281546
20	0.9365235	4.2300183	0.9528380	2.0936474	0.9672017	1.3741297
25	0.9957670	4.8577240	0.9630449	2.5913459	0.9669015	1.7209557
50	0.9009941	5.6836943	1.0016806	4.8270799	0.9636568	3.4349713

Cx	C1					
	20 pF		25 pF		50 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.9726464	0.0512226	0.9833308	0.0407142	0.9888717	0.0202011
3	0.9804230	0.1532670	0.9778860	0.1225423	0.9903854	0.0605619
5	0.9803337	0.2551864	0.9780227	0.2042994	0.9890900	0.1010098
10	0.9799959	0.5102363	0.9831303	0.4067250	0.9891217	0.2021210
15	0.9797127	0.7663660	0.9829829	0.6106599	0.9893957	0.3030174
20	0.9791928	1.0223516	0.9826547	0.8145912	0.9900316	0.4039214
25	0.9750958	1.2791358	0.9822169	1.0185185	0.9899337	0.5049535
50	0.9780209	2.5469613	0.9798515	2.0392150	0.9890047	1.0100689

### 5. Data Simulasi Untuk Op-Amp Jenis LM741CN

R1 = 1 kOhm

Cx	C1					
	5 pF		10 pF		15 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.9965440	0.0001905	0.9967111	0.0001905	0.9970002	0.0001902
3	1.0117834	0.0005732	1.0083450	0.0005734	0.9984932	0.0005755
5	0.9985703	0.0009593	0.9987749	0.0009604	1.0009782	0.0009582
10	0.9898110	0.0019211	0.9884836	0.0019191	0.9927675	0.0019131
15	1.0159651	0.0028401	1.0014901	0.0028732	1.0211481	0.0028256
20	1.0127432	0.0038091	1.0124649	0.0038128	1.0122708	0.0038163
25	1.0014744	0.0047864	1.0049772	0.0047723	1.0070464	0.0047582
50	0.9873353	0.0095430	0.9917272	0.0095566	1.0001231	0.0094460

Cx	C1					
	20 pF		25 pF		50 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.9834615	0.0001920	0.9977133	0.0001897	0.9862188	0.0001910
3	1.0054135	0.0005731	0.9930626	0.0005749	0.9889992	0.0005784
5	1.0010306	0.0009593	1.0008478	0.0009611	1.0031384	0.0009573
10	1.0020162	0.0019008	1.0053941	0.0018903	0.9997787	0.0019080
15	1.0219509	0.0028234	0.9842450	0.0028830	0.9801106	0.0028896
20	1.0127008	0.0038142	1.0147306	0.0038067	0.9831666	0.0038503
25	1.0068758	0.0047739	1.0032251	0.0047828	0.9908571	0.0048133
50	0.9908485	0.0095490	0.9934258	0.0095431	1.0219078	0.0094930

$R1 = 10 \text{ k}\Omega$

Cx	C1					
	5 pF		10 pF		15 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	1.0103760	0.0019041	1.0167790	0.0018954	1.0090945	0.0018914
3	0.9858007	0.0057424	0.9997063	0.0057091	1.0014703	0.0057473
5	0.9979861	0.0095442	1.0009007	0.0094997	1.0119996	0.0095403
10	1.0134072	0.0190642	0.9995657	0.0191414	1.0030331	0.0189888
15	0.9862595	0.0288622	0.9989843	0.0287928	0.9902339	0.0286381
20	0.9993913	0.0381647	1.0250038	0.0378754	1.0017303	0.0381697
25	0.9845150	0.0478839	1.0018145	0.0478697	0.9844046	0.0477870
50	1.0151825	0.0945131	1.0008456	0.0955988	1.0267604	0.0942952

Cx	C1					
	20 pF		25 pF		50 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	1.0084197	0.0019037	0.9830196	0.0019116	0.9772271	0.0019165
3	1.0228399	0.0056361	1.0198777	0.0056685	1.0141493	0.0056151
5	1.0000997	0.0096050	1.0122913	0.0094865	1.0072881	0.0094041
10	1.0088334	0.0188153	1.0223556	0.0190279	1.0221125	0.0187525
15	0.9788304	0.0288666	1.0099748	0.0282268	0.9897490	0.0287318
20	0.9784539	0.0386340	1.0183288	0.0375954	0.9933831	0.0382146
25	0.9779180	0.0479440	1.0175291	0.0472368	0.9787478	0.0482894
50	1.0090606	0.0943095	0.9901456	0.0954281	0.9979286	0.0954214

$R1 = 100 \text{ k}\Omega$

Cx	C1					
	5 pF		10 pF		15 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	1.0232965	0.0187708	0.9751544	0.0188833	0.9965296	0.0183122
3	1.0234417	0.0562507	0.9802603	0.0564746	1.0124196	0.0546870
5	1.0140752	0.0945921	0.9935635	0.0935609	1.0120547	0.0913649
10	0.9826144	0.1936134	0.9637320	0.1914951	0.9997449	0.1835386
15	0.9823613	0.2884607	0.9824068	0.2840974	0.9784612	0.2797631
20	1.0194079	0.3796016	0.9813168	0.3789763	1.0025952	0.3677908
25	0.8840825	0.5594888	0.9876607	0.4803034	1.0109409	0.4617814
50	0.7928916	0.8152388	0.7337037	0.8805459	0.7644670	0.8487026

Cx	C1					
	20 pF		25 pF		50 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	1.0017466	0.0177577	1.0015026	0.0171610	0.9862848	0.0138988
3	0.9983418	0.0534174	1.0118460	0.0511007	0.9860912	0.0417172
5	0.9985328	0.0891427	1.0184521	0.0849180	0.9867992	0.0695614
10	0.9982046	0.1785827	1.0161336	0.1717490	0.9847052	0.1394564
15	0.9822108	0.2689308	0.9778988	0.2600000	0.9856630	0.2093616
20	0.9833929	0.3597440	1.0091905	0.3418579	0.9825588	0.2795936
25	1.0013043	0.4478479	0.9793773	0.4364307	0.9792399	0.3501114
50	0.8476105	0.7570841	0.7502308	0.8576989	0.8697845	0.7312763

R1 = 1 MOhm

Cx	C1					
	5 pF		10 pF		15 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.9843602	0.1330700	0.9371218	0.0898287	0.9376268	0.0648050
3	0.9853652	0.3967377	0.9547919	0.2661046	0.9121628	0.1972132
5	0.9224152	0.6561761	0.9376469	0.4490506	0.9106860	0.3302165
10	0.7758375	0.8295202	0.8112936	0.7890708	0.9028927	0.6452724
15	0.7331350	0.9006896	0.7865540	0.8219398	0.7728750	0.8320863
20	0.7062986	0.9418449	0.7445427	0.8958769	0.7636862	0.8623535
25	0.7307894	0.9342490	0.7673141	0.8925136	0.7666862	0.8628011
50	0.7540118	0.9303132	0.7579184	0.9286721	0.7918017	0.8627028

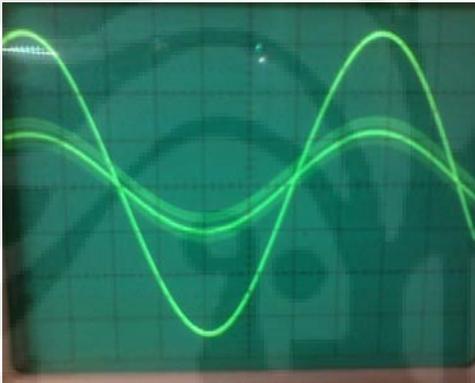
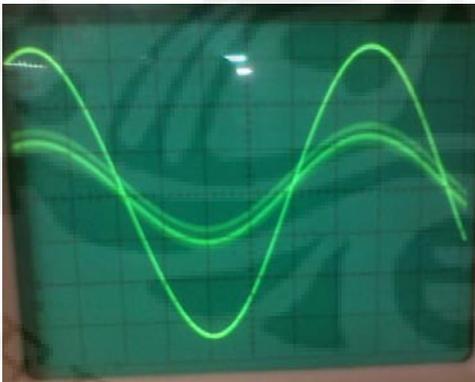
Cx	C1					
	20 pF		25 pF		50 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.9179299	0.0509925	0.9111559	0.0416013	0.9402751	0.0209174
3	0.9523986	0.1507243	0.9402176	0.1230950	0.9350826	0.0628276
5	0.9032781	0.2572340	0.9087077	0.2090646	0.9460144	0.1044806
10	0.9254794	0.5003652	0.9218430	0.4145366	0.9248419	0.2118492
15	0.8470972	0.7293378	0.9142265	0.6146567	0.9261560	0.3164236
20	0.7922985	0.8117924	0.8134108	0.7749060	0.9256204	0.4232120
25	0.7906892	0.8336437	0.7821006	0.8281261	0.9329587	0.5236776
50	0.7386175	0.9242152	0.6833259	1.0024356	0.8045871	0.8113919

$R1 = 10 \text{ MOhm}$

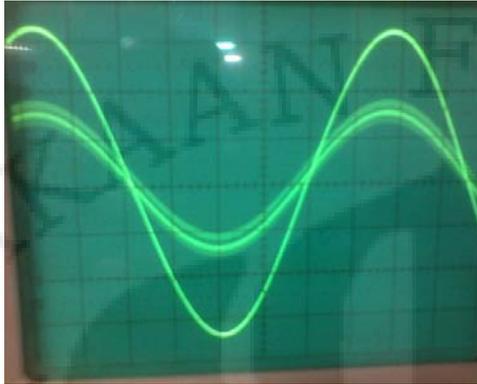
Cx	C1					
	5 pF		10 pF		15 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.9525189	0.1882340	0.9574585	0.0984175	0.9703725	0.0660922
3	0.9377909	0.5484677	0.9625590	0.2936303	0.9704488	0.1981264
5	0.8552714	0.7397880	0.9572445	0.4852599	0.9690364	0.3299919
10	0.6900980	0.9769228	0.8546927	0.7568153	0.9082868	0.6469651
15	0.6944117	1.0277931	0.7943974	0.8286435	0.7770491	0.8337684
20	0.6661190	1.1316739	0.7722478	0.9064060	0.7391998	0.8987157
25	0.7639566	0.9072952	0.6723447	1.1338204	0.7290758	0.9487867
50	0.8250400	0.9194538	0.7105891	1.0809549	0.7560217	0.9979957

Cx	C1					
	20 pF		25 pF		50 pF	
	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av	Vo/Vi	Av
1	0.9721072	0.0499798	0.9709766	0.0402720	0.9732728	0.0203685
3	0.9721072	0.0499798	0.9750977	0.1204444	0.9726187	0.0611315
5	0.9742338	0.2488425	0.9766041	0.1998007	0.9742693	0.1018079
10	0.9799280	0.4935945	0.9735845	0.3993180	0.9747910	0.2026011
15	0.8618798	0.7177569	0.9352854	0.6010579	0.9686310	0.3060993
20	0.8155906	0.7981370	0.8541007	0.7478441	0.9672161	0.4078594
25	0.7586415	0.8745109	0.8417084	0.7798216	0.9686234	0.5074054
50	0.6553709	1.0974790	0.7481785	0.9383497	0.7801933	0.8569119

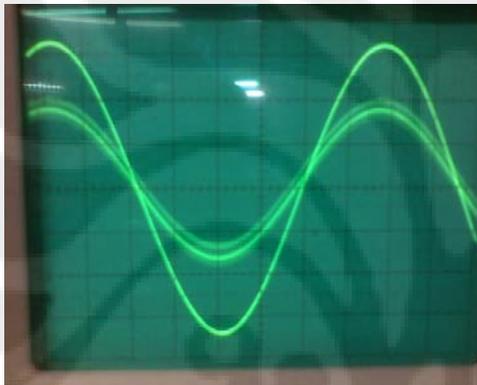
## 6. Bentuk Sinyal Output Pada Percobaan Rangkaian Fisik

 $C_x = 1 \text{ pF}$  $C_x = 3 \text{ pF}$  $C_x = 5 \text{ pF}$ 

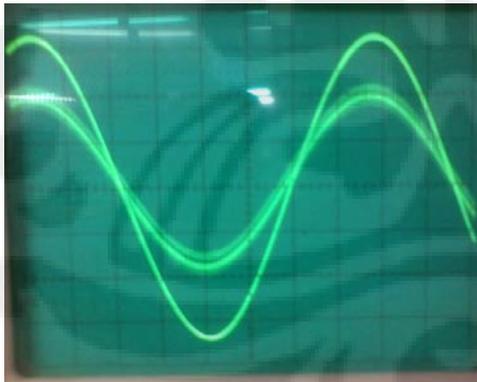
$C_x = 10 \text{ pF}$



$C_x = 15 \text{ pF}$



$C_x = 20 \text{ pF}$



$C_x = 25 \text{ pF}$



$C_x = 50 \text{ pF}$

