

**RANCANG BANGUN PENGUAT AUDIO KELAS D YANG
DIPADUKAN DENGAN EQUALIZER SALLEN-KEY**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik



Oleh:
ADITYA NUR FAUZI GUSTIANTORO
NIM. I0715002

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SEBELAS MARET
SURAKARTA
2020**

HALAMAN PENGESAHAN TIM PEMBIMBING DAN TIM PENGUJI

**RANCANG BANGUN PENGUAT AUDIO KELAS D YANG DIPADUKAN
DENGAN EQUALIZER SALLEN-KEY**

Disusun oleh
ADITYA NUR FAUZI GUSTIANTORO
NIM. I0715002

Dosen Pembimbing I

Dr. Ir. Augustinus Sujono, S.T., M.T.
NIP. 1951100120161001

Dosen Pembimbing II

Feri Adriyanto, Ph.D
NIP. 196801151999031001

Telah dipertahankan di hadapan Tim Dosen Penguji pada hari Kamis tanggal 23 Juli 2020

1. **Dr. Ir. Augustinus Sujono, S.T., M.T.**
NIP. 1951100120161001

.....

2. **Feri Adriyanto, Ph.D**
NIP. 196801151999031001

.....

3. **Muhammad Hamka Ibrahim, S.T., M.Eng.**
NIP. 1988122920161001

.....

4. **Hari Maghfiroh, M.Eng.**
NIP. 199104132018031001

.....

Kepala Prodi Teknik Elektro

Mengetahui,
Koordinator Tugas Akhir

Feri Adriyanto, Ph.D.
NIP. 196801161999031001

Muhammad Hamka Ibrahim, S.T., M.Eng.
NIP. 1988122920161001



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS SEBELAS MARET
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
Jalan. Ir. Sutami nomor 36 A Kentingan Surakarta 57126
Telepon: 0271 647069 psw 438, faksimili: 0271 662118

SURAT TUGAS

Nomor : 049/TA/TE/2019

Kepala Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret memberikan tugas kepada :

Nama	:	Aditya Nur Fauzi Gustiantoro
NIM	:	I0715002
Bidang peminatan	:	Sistem Mekatronika (SM)
Pembimbing Utama	:	Dr. Ir. Augustinus Sujono, M.T. NIP. 195110011985031001
Pembimbing Pendamping	:	Feri Adriyanto, Ph.D NIP. 196801161999031001
Mata kuliah pendukung	:	1. Teknik Proteksi 2. Manajemen Energi 3. Kualitas Daya

untuk mengerjakan dan menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul :

**Rancang Bangun Penguat Audio Kelas D yang Dipadukan dengan
Sallen-Key**

Surat tugas ini dibuat untuk dilaksanakan dengan sebaik-baiknya.

Surakarta, 10 Juli 2019
Kepala Program Studi

Feri Adriyanto, S.Si., M.Si., Ph.D.
NIP. 197004041996031002

Tembusan:

1. Mahasiswa ybs.
2. Dosen Pembimbing TA
3. Koordinator TA
4. Arsip

SURAT PERNYATAAN
ORISINALITAS KARYA ILMIAH

Saya mahasiswa Program Studi Sarjana Teknik Elektro Universitas Sebelas Maret yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Aditya Nur Fauzi Gustiantoro
NIM : I0715002
Judul tugas akhir : Rancang Bangun Penguat Audio Kelas D yang Dipadukan dengan Equalizer Sallen-Key

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir yang saya susun tidak mencontoh atau melakukan plagiat dari karya tulis orang lain. Jika terbukti tugas akhir yang saya susun tersebut merupakan hasil plagiat dari karya orang lain maka tugas akhir yang saya susun tersebut dinyatakan batal dan gelar sarjana yang saya peroleh dengan sendirinya dibatalkan atau dicabut.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya dan apabila dikemudian hari terbukti melakukan kebohongan maka saya sanggup menanggung segala konsekuensinya.

Surakarta, Juli 2020

Aditya Nur Fauzi Gustiantoro
NIM. I0715002

RANCANG BANGUN PENGUAT AUDIO KELAS D YANG DIPADUKAN DENGAN EQUALIZER SALLEN-KEY

Aditya Nur Fauzi Gustiantoro

I0715002

Abstrak

Penguat audio banyak digunakan pada berbagai peralatan diantaranya Handphone, radio, telepon, musik panggung dan sebagainya, Namun masih perlu dikembangkan untuk mendapatkan peralatan yang efisien dan berdaya besar. Telah dilakukan perancangan dan pengujian penguat kelas D yang dilengkapi dengan equalizer, guna meningkatkan kualitas output. Hal ini karena penguat kelas D mempunyai efisiensi yang tinggi, kualitas yang baik dan mampu memberikan daya besar. Daya yang besar dan efisiensi tinggi disebabkan oleh penggunaan teknologi *switching* diskrit, yaitu dengan mengubah sinyal sinus input menjadi sinyal PWM berdaya kecil oleh IC IRS2092, untuk men-triger MOSFET IRFB4227 yang menjadikan sinyal output PWM berdaya besar, kemudian dijadikan sinyal sinus kembali dengan *low pass filter*. Equalizer berupa *Sallen-Key* filter telah dipasang pada sisi input guna meningkatkan kualitas output, menggunakan chip NE5532. Perancangan dan pengujian dilakukan dengan membuat simulasi *software* dan dilanjutkan dengan membuat hardwarenya. Hasil pengujian memberikan output sebesar 161,95 Watt pada beban 4Ω dengan efisiensi mencapai 96,52% pada sinyal masukkan sebesar 1 Volt. Gain yang dihasilkan sebesar 36 kali dan SNR (*sinyal to noise ratio*) sebesar 92,55dB. Batas maksimal tegangan input sampai clipping sebesar 1,97 Volt. THD pada frekuensi 1kHz, 10kHz, dan 20kHz adalah 0,287%, 0,575%, dan 1,211% Equalizer memberikan gain 1,928 pada frekuensi cutoff 225 Hz (LPF), gain 1,535 pada frekuensi cutoff 1500 Hz (BPF), gain 1,607 pada frekuensi cutoff 7200 Hz (HPF).

Kata kunci : Penguat Audio, Kelas D, IRS2092, *Sallen-Key*

DESIGN CLASS D AUDIO AMPLIFIER COMBINED WITH SALLEN-KEY EQUALIZER

Aditya Nur Fauzi Gustiantoro
I0715002

Abstract

An audio amplifier is widely used in a variety of equipment including cellphones, radios, telephones, stage music, and so on, but it still needs to be developed to get equipment that is efficient and powerful. Design and testing of class D amplifiers equipped with equalizers have been carried out to improve the quality of the output. This is because the D class amplifier has high efficiency, good quality, and can provide great power. The high power and high efficiency are caused by the use of discrete switching technology, namely by converting the sine input signal into a small power PWM signal by IC IRS2092, to triple the MOSFET IRFB4227 which makes the PWM output signal large, then it becomes a sine signal again with a low pass filter. An equalizer in the form of a Sallen-Key filter has been installed on the input side to improve output quality, using the NE5532 chip. The design and testing are done by making a software simulation and continued by making the hardware. The test results give an output of 161.95 watts at a load of 4Ω with an efficiency reaching 96.52% on the input signal of 1 Volt. The resulting gain is 36 times and the SNR (signal to noise ratio) of 92.55dB. The maximum input voltage limit until clipping is 1.97 Volts. THD at frequencies of 1kHz, 10kHz, and 20kHz are 0.287%, 0.575%, and 1.211%. The equalizer gives a gain of 1,928 at a cutoff frequency of 225 Hz (LPF), a gain of 1,535 at a cutoff frequency of 1500 Hz (BPF), a gain of 1,607 at a cutoff frequency of 7200 Hz (HPF).

Keyword : Audio Amplifier, Class D, IRS2092, Sallen-Key

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, taufik, hidayah, serta karunia-Nya sehingga skripsi dengan judul “Rancang Bangun Penguat Audio Kelas D yang Dipadukan dengan Equalizer Sallen-Key” berhasil diselesaikan.

Laporan skripsi dapat terselesaikan dengan menerapkan ilmu studi di perkuliahan program studi teknik elektro serta arahan, bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak sebagai syarat kelulusan mata kuliah Skripsi/Tugas Akhir pada Program Studi Teknik Elektro Universitas Sebelas Maret Surakarta.

Penulis menyadari bahwa banyak pihak telah memberi bantuan dan dukungan dalam penyusunan laporan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat, taufik dan hidayah-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi ini.
2. Bapak Basiron, Ibu Maryati, dan adik Zanuar, serta keluarga yang telah memberikan doa, dukungan dan kasih sayang kepada penulis.
3. Bapak Dr. Ir. Augustinus Sujono M.T. selaku dosen pembimbing atas bimbingan, bantuan, dan waktu yang telah diberikan.
4. Bapak Feri Adriyanto, Ph.D. selaku Kepala Program Studi Teknik Elektro UNS dan dosen pembimbing serta akademis atas bimbingan, bantuan dan waktu yang telah diberikan.
5. Bapak Muhammad Hamka Ibrahim, S.T., M.Eng. dan Bapak Jaka Sulistya Budi, S.T. selaku koordinator tugas akhir.
6. Segenap dosen dan karyawan Program Studi Teknik Elektro UNS.
7. Arthur dan Dwiki selaku teman sesama bimbingan dengan Bapak Augustinus Sujono.
8. Seluruh teman-teman Teknik Elektro Universitas Sebelas Maret Surakarta dan teman-teman lainnya yang telah memberikan bantuan dan forum diskusi.

Penulis menyadari bahwa selama proses penelitian dan penyusunan laporan skripsi ini mengalami banyak kesulitan, kendala dan masalah. Penulis memohon maaf apabila terdapat kesalahan dalam penulisan skripsi ini. Penulis juga menyadari bahwa skripsi ini masih belum sempurna, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Semoga skripsi ini dapat menghasilkan laporan yang bermanfaat bagi banyak pihak.

Surakarta, Juli 2020

Aditya Nur Fauzi Gustiantoro

NIM. I0715002

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN SURAT PENUGASAN	iii
HALAMAN ORISINALITAS	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	3
1.5. Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1. Penelitian Terdahulu	4
2.2. Pengaruh Audio	5
2.2.1. Kelas A.....	6
2.2.2. Kelas B	7
2.2.3. Kelas AB	7
2.2.4. Kelas C	8
2.2.5. Kelas D	8

2.3.	Cara Kerja Penguat Audio Kelas D.....	9
2.4.	Topologi Penguat Audio Kelas D	11
2.5.	IC IRS2092.....	14
2.6.	<i>Pulse Width Modulation (PWM)</i>	16
2.7.	Mosfet.....	16
2.8.	<i>Low Pass Filter (LPF)</i>	17
2.9.	Efisiensi	18
2.10.	Filter	18
2.11.	Equalizer.....	18
2.11.1.	Berdasarkan Sifat Penguatannya.....	19
2.11.2.	Berdasarkan Daerah Frekuensi yang Dilewatkan	19
2.12.	Equalizer Sallen-Key.....	21
2.12.1.	Lowpass filter.....	21
2.12.2.	Highpass Filter	22
2.12.3.	Bandpass Filter.....	23
2.13.	IC NE5532.....	24
2.14.	FFT dan Sampling Rate.....	25
2.15.	MATLAB	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27	
3.1.	Metode Penelitian.....	27
3.1.1.	Studi Literatur	27
3.1.2.	Desain Alat.....	28
3.1.3.	Perakitan.....	28
3.1.4.	Uji Coba	28
3.1.5.	Evaluasi	28
3.1.6.	Pengambilan Data dan Analisis Data	28

3.1.7. Penulisan Skripsi	28
3.2. Waktu dan Tempat Penelitian	29
3.3. Alat dan Bahan	29
3.2.1. Instrumentasi	29
3.2.2. Komponen Amplifier	29
3.2.3. Komponen Equalizer.....	29
3.2.4. Perangkat kerja.....	29
3.2.5. Bahan.....	29
3.4. Pembuatan Penguin Audio Kelas D	30
3.4.1. Perancangan Awal Penguin Audio Kelas D	31
3.4.2. Pembuatan Hardware Penguin Audio Kelas D	34
3.4.3. Pengujian Penguin Audio Kelas D IRS2092	34
3.4.4. Pengambilan Data Penguin Audio Kelas D.....	35
3.4.5. Analisa dan Penutup.....	35
3.5. Pembuatan <i>Equalizer Sallen-Key</i>	36
3.5.1. Perancangan Awal <i>Equalizer Sallen-Key</i>	37
3.5.2. Pembuatan Hardware Equalizer Sallen-Key	40
3.5.3. Pengujian Equalizer Sallen-Key.....	41
3.5.4. Pengambilan Data <i>Equalizer Sallen-Key</i>	41
3.5.5. Analisis dan Penutup <i>Equalizer Sallen-Key</i>	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	42
4.1. Rancangan Penguin Audio Kelas D	42
4.2. Hasil Eksperimen Penguin Audio Kelas D	43
4.2.1. Sinyal input	43
4.2.2. Sinyal segitiga	44
4.2.3. Sinyal Output HO dan LO IRS2092	45

4.2.4.	Sinyal Output Mosfet	46
4.2.5.	Sinyal Output Penguat Audio Kelas D IRS2092	47
4.2.6.	Penguatan Penguat Audio Kelas D IRS2092	47
4.2.7.	Efisiensi daya Penguat Audio Kelas D IRS2092	48
4.2.8.	Respon Frekuensi Penguat Audio Kelas D IRS2092	49
4.2.9.	SNR (Signal to Noise Rasio).....	50
4.2.10.	Batas Maksimal	51
4.2.11.	THD (Total Harmonic Distortion)	52
4.3.	Rancangan Equalizer Sallen-Key	55
4.3.1.	LPF	55
4.3.2.	BPF	57
4.3.3.	HPF.....	60
4.4.	Hasil Eksperimen Equalizer Sallen-Key	62
4.4.1.	Sinyal input	62
4.4.2.	Sinyal Output LPF.....	63
4.4.3.	Sinyal Output BPF	64
4.4.4.	Sinyal Output HPF	65
4.4.5.	Paduan Dengan Penguat Audio Kelas D.....	66
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	69	
5.1.	Kesimpulan.....	69
5.2.	Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	71	
LAMPIRAN.....	73	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Penguat Audio Kelas A	6
Gambar 2.2 Penguat Audio Kelas B	7
Gambar 2.3 Penguat Audio Kelas AB	7
Gambar 2.4 Penguat Audio Kelas C	8
Gambar 2.5 Penguat Audio Kelas D	9
Gambar 2.6 Diagram Penguat Audio Kelas D	10
Gambar 2.7 Penguat Gelombang Tingkat Akhir	11
Gambar 2.8 <i>Half-Bridge</i> Penguat Audio Kelas D.....	12
Gambar 2.9 Siklus <i>Half-Bridge</i>	12
Gambar 2.10 <i>Full-Bridge</i> Penguat Audio Kelas D	13
Gambar 2.11 Siklus <i>Full-Bridge</i>	14
Gambar 2.12 IC IRS2092.....	15
Gambar 2.13 Pin IC IRS2092	16
Gambar 2.14 Mosfet IRFB4227.....	17
Gambar 2.15 Rangkaian LPF	17
Gambar 2.16 LPF (Low pass filter)	20
Gambar 2.17 HPF (High pass filter)	20
Gambar 2.18 BPF (Band pass filter)	21
Gambar 2.19 BSF (Band stop filter)	21
Gambar 2.20 Sallen-Key Lowpass Filter	21
Gambar 2.21 Sallen-Key Highpass Filter	22
Gambar 2.22 Sallen-Key Bandpass Filter	23
Gambar 2.23 IC NE5532	24
Gambar 2.24 Konfigurasi Pin NE5532	24
Gambar 2.25 Tampilan Software Matlab.....	26
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	27
Gambar 3.2 Diagram Alir Rancang Bangun Penguat Audio Kelas D	30
Gambar 3.3 Diagram Blok Penguat Audio Kelas D IRS2092	31
Gambar 3.4 Rangkaian Penguat Audio Kelas D IRS2092.....	32
Gambar 3.5 Diagram Blok Simpel Penguat Audio Kelas D	33

Gambar 3.6 Diagram Alir Perancangan Equalizer Sallen-key.....	36
Gambar 3.7 Diagram Blok Equalizer Sallen-Key	37
Gambar 3.8 Rangkaian LPF Sallen-Key	38
Gambar 3.9 Rangkaian HPF Sallen-Key	39
Gambar 3.10 Rangkaian BPF Sallen-Key.....	39
Gambar 3.11 Rangkaian Equalizer Sallen-Key	40
Gambar 4.1 Rangkaian PCB Penguat Audio Kelas D	42
Gambar 4.2 Rangkaian Penguat Audio Kelas D	42
Gambar 4.3 Rangkaian Jadi Penguat Audio Kelas D	43
Gambar 4.4 Sinyal Input	44
Gambar 4.5 Sinyal Gergaji.....	45
Gambar 4.6 Sinyal HO dan LO IRS2092.....	45
Gambar 4.7 Sinyal Output Mosfet	46
Gambar 4.8 Sinyal Output Penguat Audio Kelas D IRS2092	47
Gambar 4.9 (a) Sinyal Vin (b) Sinyal Vout	48
Gambar 4.10 Respon Frekuensi Penguat Audio Kelas D	50
Gambar 4.11 Sinyal Noise	51
Gambar 4.12 Batas Maksimal Clipping	52
Gambar 4.13 Data Sinyal 1 kHz	52
Gambar 4.14 Pengukuran THD 1 kHz.....	53
Gambar 4.15 Data Sinyal 10 kHz	53
Gambar 4.16 Pengukuran THD 10 kHz.....	54
Gambar 4.17 Data Sinyal 20 kHz	54
Gambar 4.18 Pengukuran THD 20kHz.....	55
Gambar 4.19 Rangkaian LPF	55
Gambar 4.20 Bode Diagram LPF Sallen-Key.....	57
Gambar 4.21 Rangkaian BPF	57
Gambar 4.22 Bode Diagram BPF Sallen-Key	60
Gambar 4.23 Rangkaian HPF	60
Gambar 4.24 Bode Diagram HPF Sallen-Key	62
Gambar 4.25 Posisi Pengukuran Potensiometer	62
Gambar 4.26 Sinyal Input Equalizer.....	63

Gambar 4.27 Grafik Sinyal Output LPF	64
Gambar 4.28 Grafik Sinyal Output BPF	65
Gambar 4.29 Grafik Sinyal Output HPF.....	66
Gambar 4.30 Sinyal Input dan Output Equalizer Sallen-Key	67
Gambar 4.31 Sinyal Gergaji, PWM, dan Output Penguat Audio Kelas D ..	68

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Deskripsi Pin IC IRS2092.....	15
Tabel 2.2 Fungsi Pin NE5532	24
Tabel 4.1 Data Penguatan	48
Tabel 4.2 Data Pengukuran Daya Masukkan.....	49
Tabel 4.3 Data Respon Frekuensi Satuan dB.....	50

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Penguat (*amplifier*) merupakan komponen elektronika yang secara umum digunakan untuk menguatkan daya atau tenaga. Dalam bidang audio, penguat audio akan menguatkan sinyal suara (dalam bentuk arus listrik) pada bagian input menjadi arus listrik yang lebih kuat pada bagian outputnya. Besarnya penguatan ini sering disebut dengan *gain*[1].

Power amplifier kegunaannya untuk keperluan sehari-hari seperti untuk pengeras berbagai keperluan diantaranya hajatan, upacara, kegiatan keagamaan dan lain sebagainya. Dalam beberapa tahun terakhir penguat daya memiliki beberapa jenis atau dikenal dengan sebutan kelas antara lain, penguat daya dari kelas A, kelas B, kelas AB (merupakan gabungan dari kelas A dan kelas B), dan kelas D.

Penguat audio kelas A, kelas B dan kelas AB merupakan kategori penguat audio yang menggunakan sistem analog atau linier yang sinyal masukan langsung dikuatkan dan dikeluarkan pada sinyal keluaran (speaker). Sedangkan penguat audio kelas D memakai sistem digital. Perbedaan metode penguatan dari penguat audio kelas A dan B dengan penguat audio kelas D dapat mempengaruhi efisiensinya.

Seperti yang diketahui efisiensi yang didapatkan pada penguat kelas AB yang umum digunakan memiliki efisiensi kurang lebih 50%. Sedangkan pada penguat kelas D didapatkan efisiensi yang tinggi kurang lebih mencapai 90%[2]. Efisiensi daya yang tinggi berarti konsumsi daya yang lebih kecil untuk daya keluaran yang diberikan, Hal tersebut merupakan salah satu faktor pengurangan disipasi daya dan kelebihan dari *amplifier* kelas D. Hasil efisiensi yang besar merupakan salah satu sebab yang menjadikan penelitian ini dibuat. Tidak hanya itu, rangkaian *amplifier* kelas D memiliki rangkaian yang lebih *kompleks* dibandingkan dengan rangkaian *amplifier* yang lainnya dikarenakan terdiri dari bagian input, pengolah sinyal pwm, penguat, *filter* dan output. Topologi yang digunakan dalam amplifier terdapat 2 jenis yaitu

Half-Bridge dan *Full-Bridge*. Jenis transistor MOSFET yang paling banyak digunakan.

Penelitian ini bertujuan untuk membuat penguat audio kelas D menggunakan *integrated circuit* (IC) yang didesain khusus untuk *amplifier* kelas D dan rangkaian yang simple menggunakan 1 catu daya. IC yang digunakan adalah IRS2092. Dalam IC tersebut telah tertanam komparator dan juga *driver mosfet*, sehingga tidak memerlukan IC komparator untuk berosilasi. Dalam penelitian ini menggunakan topologi *Half-Bridge* yang dilengkapi dengan *feedback loop prefilter*.

Untuk menyempurnakan kualitas suara yang dihasilkan oleh penguat audio kelas D, diperlukan rangkaian *equalizer*. *Equalizer* adalah kumpulan dari rangkaian elektronik yang dirancang agar meloloskan suatu sinyal dengan frekuensi tertentu dan menghilangkan atau meredam frekuensi yang berbeda. *Equalizer* merupakan suatu alat yang keberadaannya penting dalam bidang audio. Alat ini dapat mengubah karakteristik suara dan digunakan untuk mengontrol frekuensi respon dari *sound system*. Melalui *equalizer*, kita mampu melakukan perbaikan pada kualitas suara yang disebabkan oleh adanya keterbatasan dari peralatan audio.

Topologi rangkaian pada equalizer bermacam-macam salah satunya adalah salien-key. topologi ini digunakan karena sudah terdapat langkah-langkahnya dalam mendesain, menghitung, dan mengaplikasikannya dengan berbagai nilai komponen sesuai dengan yang diinginkan frekuensi cut-offnya dari jenis daerah frekuensi yang akan digunakan.

Penelitian ini juga bertujuan untuk memadukan hasil dari penelitian penguat audio kelas D dengan penelitian *equalizer* dengan topologi dari *Sallen-key* yang menggunakan 3 daerah frekuensi kerja.

1.2. Rumusan Masalah

Dari latar belakang masalah di atas, dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana perancangan desain dan pembuatan penguat audio kelas D menggunakan IC IRS2092 dengan topologi *half-bridge*?
2. Bagaimana perancangan desain dan pembuatan *equalizer Sallen-key*?

1.3. Tujuan Penelitian

Atas dasar masalah yang ditulis dalam perumusan masalah diatas, maka tujuan penelitian ini:

1. Merancang dan membuat penguat audio dengan metode kelas D menggunakan rangkaian IC IRS2092 dengan topologi *half-brigde*.
2. Merancang dan membuat *equalizer* menggunakan topologi *Sallen-key*.

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Hasil penelitian ini diharapkan dapat mendesain dan membuat penguat audio dengan metode kelas D dengan daya output yang besar serta efisiensi kurang lebih 90% dengan menggunakan IC IRS2092.
2. Hasil penelitian ini diharapkan dapat mendesain dan membuat *equalizer Sallen-key* sebagai rangkaian untuk meningkatkan kualitas suara dari penguat audio kelas D.

1.5. Sistematika Penulisan

Tugas akhir ini terdiri dari lima bab. Latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian dan manfaat penelitian telah dijelaskan pada bab ini. Pada BAB II yaitu tinjauan pustaka, akan dijelaskan mengenai teori dan komponen penelitian.

Dalam BAB III metodologi penelitian akan dibahas mengenai tahap-tahap penelitian yang digambarkan melalui diagram alir penelitian. Di dalam tahapan-tahapan ini akan dipaparkan mulai dari gambaran umum amplifier dengan metode kelas D, gambaran umum equalizer sallen-key, dan metode penelitian.

Selanjutnya pada BAB IV hasil dan pembahasan akan dibahas mengenai proses pembuatan penguat audio metode kelas D dan equalizer sallen-key dan hasil dari pengujian penguat audio metode kelas D dan equalizer sallen-key yang telah dibuat, serta memadukan keduanya.

Terakhir BAB V berisi kesimpulan akan dibahas mengenai kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan dan juga saran untuk penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini akan membahas mengenai penelitian sebelumnya terkait dengan *amplifier class D*. Selain itu bab ini juga akan dibahas penjelasan singkat mengenai penguat audio (*amplifier*), penguat audio kelas D, cara kerja penguat audio kelas D, PWM (*pulse width modulation*), *low pass filter*, *equalizer*, dan *sallen-key*.

2.1. Penelitian Terdahulu

Berikut merupakan hasil-hasil penelitian terdahulu sebagai perbandingan. Sebagai rujukan utama diambil tesis yang ditulis oleh Kartino Surodipo[7] pada tahun 2015 yang membuat penguat audio kelas D dengan cara *Self Oscillating*, dengan *loop feedback* yang akan membuat sinyal gigi gergaji dan di bandingkan dengan sinyal masukan, kemudian dicacah oleh Comparator menggunakan IC TL071 dan hasilnya akan dikuatkan oleh Level Shifter berupa transistor 2N5401 dan diteruskan melalui *invert logic* IC CD4049 yang membuat “high” dan “low” untuk IC *Driver Power Mosfet* menggunakan IC IR2110 sehingga *Power Mosfet* dapat bekerja secara bergantian “on” dan “off”, *output* dari *Power Mosfet* selanjutnya difilter oleh Induktor dan Kapasitor atau Filter L-C sehingga output yang dihasilkan dapat berupa sinyal sinusoidal sama dengan input dengan perbesaran sesuai dengan penguatannya.

Selanjutnya ada beberapa penelitian lain yang digunakan diantaranya yang pertama dilakukan oleh Suryo Santoso[8] pada tahun 2013 membuat penguat audio kelas D tanpa tapis LC dengan modulasi tiga aras. Beliau menggunakan cara *noise-shaping coding* dengan memberikan derau pada penguat yang besar sehingga SNR dari penguat tidak sesuai dengan spesifikasi. Hal tersebut juga berdampak pada THD karena derau yang semakin besar akan mempengaruhi harmonik pada frekuensi. Selain itu juga berdampak pada efisiensi penguat yang disebabkan oleh derau pada

penguat membuat proses pensaklaran yang berlebih menjadi tidak efisien dan terjadi disipasi daya yang besar pada *MOSFET*.

Selanjutnya dilakukan oleh Gunawan Dewantoro[9] pada tahun 2016 dengan membuat penguat audio kelas D dengan umpan balik tipe *butterworth*. Berdasarkan penelitiannya bahwa umpan balik pada penguat audio kelas D dapat mempengaruhi kualitas THD dan membuatnya menjadi baik, tetapi ada beberapa faktor yang menyebabkan THD menjadi besar seperti salah satunya penggunaan komponen yang kurang baik, dalam penelitiannya diperoleh THD sebesar 1,08%.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan, maka penelitian ini membuat penguat class D yang bekerja dengan sistem PWM, sistem *Self Oscillating*. Sinyal input yang dibandingkan dengan sinyal gigi gergaji yang berasal dari *feedback prefilter* lalu dicacah dengan komparator dan dikuatkan selanjutnya di masukan ke IC *Logic* yang akan membuat “*high*” dan “*low*” untuk dapat men-*drive* Mosfet dalam satu kesatuan yaitu pada IC IRS2092. Terakhir dengan filter L-C maka bisa dikembalikan menjadi sinyal audio seperti input atau sinyal Sinusoida dengan penguatan sesuai dengan rancangan bangun.

2.2. Penguat Audio

Penguat audio (*amplifier*) adalah sebuah alat yang berfungsi memperkuat sinyal audio dari sumber-sumber sinyal yang masih kecil sehingga dapat menggetarkan membran speaker dengan level tertentu sesuai kebutuhan. Penguat audio (*amplifier*) secara harfiah diartikan dengan memperbesar dan menguatkan sinyal input. Tetapi yang sebenarnya terjadi adalah, sinyal input di replika (*copied*) dan kemudian di reka kembali (*re-produced*) menjadi sinyal yang lebih besar dan lebih kuat. Dari sinilah muncul istilah fidelitas (*fidelity*) yang berarti seberapa mirip bentuk sinyal keluaran hasil replika terhadap sinyal masukan. Ada kalanya sinyal input dalam prosesnya kemudian terdistorsi karena berbagai sebab, sehingga bentuk sinyal keluarannya menjadi cacat.

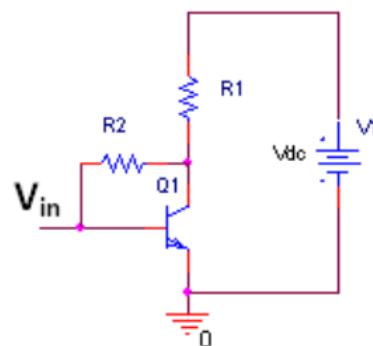
Sistem penguat dikatakan memiliki fidelitas yang tinggi (*high fidelity*), jika sistem tersebut mampu menghasilkan sinyal keluaran yang

bentuknya persis sama dengan sinyal input. Hanya level tegangan atau amplitudo saja yang telah diperbesar dan dikuatkan. Di sisi lain, efisiensi juga harus diperhatikan. Efisiensi yang dimaksud adalah efisiensi dari penguat itu yang dinyatakan dengan besaran persentasi dari power output dibandingkan dengan *power input*. Sistem penguat dikatakan memiliki tingkat efisiensi tinggi (100%) jika tidak ada rugi-rugi pada proses penguatannya yang terbuang menjadi panas.

Hasil sinyal keluaran dari penguat audio pada umumnya langsung dihubungkan ke speaker, namun beberapa kasus tertentu melalui transistor terlebih dahulu. Penguat audio biasanya menggunakan penguat akhir transistor yang dihubungkan dengan tegangan emitor kolektor yang tinggi. ada beberapa kelas dalam penguat audio yang umum dipakai sebelum diaplikasikan penguat audio kelas D, antara lain :

2.2.1. Kelas A

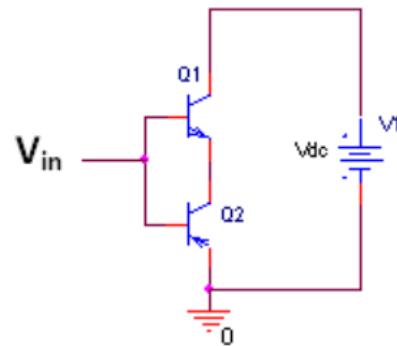
Merupakan penguat audio yang menguatkan seluruh siklus sinyal masukan. Penguatan yang dilakukan adalah dari sinyal masukan langsung dikuatkan tanpa mengubah bentuk sinyalnya. Sehingga dapat dikatakan tingkat akhir dari penguat audio kelas A selalu bekerja untuk menguatkan siklus sinyal masukan. Pada tingkat ini selalu ada arus bias yang mengalir ke perangkat output, penguat audio kelas A memiliki linieritas paling baik dan distorsi paling kecil akan tetapi efisiensinya paling rendah yaitu kurang lebih 20% [3].



Gambar 2.1 Penguat Audio Kelas A[4]

2.2.2. Kelas B

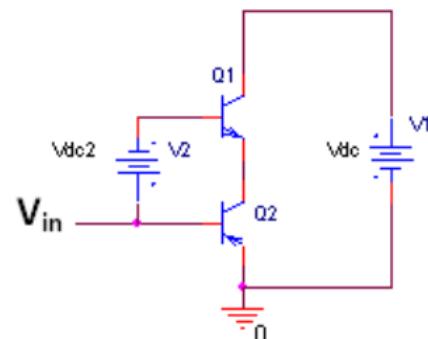
Merupakan penguat audio pada tingkat akhirnya hanya menguatkan setengah dari siklus sinusoida sinyal masukan (satu sisi menguatkan siklus positif dan sisi lainnya menguatkan siklus negatif). Jika tidak ada sinyal masukan maka di tingkat akhir tidak ada arus yang mengalir ke perangkat output. Efisiensi penguat audio kelas B lebih baik dari penguat audio kelas A, yaitu kurang lebih 50% akan tetapi kurang linier pada titik silang antara siklus positif dan negatif [3].



Gambar 2.2 Penguat Audio Kelas B[4]

2.2.3. Kelas AB

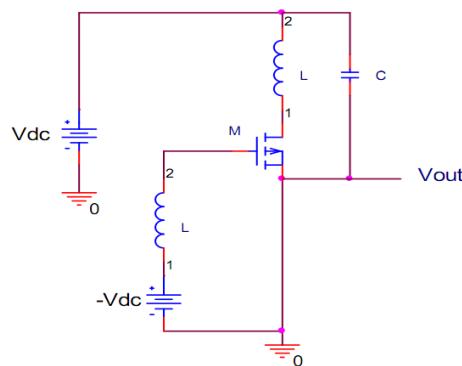
Merupakan kombinasi dari penguat audio kelas A dan penguat audio kelas B dan penguat yang banyak digunakan saat ini. Tingkat akhir penguat ini akan menguatkan sinyal lebih dari setengah siklus positif maupun negatif, namun lebih kecil dari seluruh siklus. Sehingga cacat silang pada penguat kelas B dapat dihilangkan. Penguat audio kelas AB lebih linier dari kelas B dengan efisiensi tidak berbeda kurang lebih 50% [3].



Gambar 2.3 Penguat Audio Kelas AB[4]

2.2.4. Kelas C

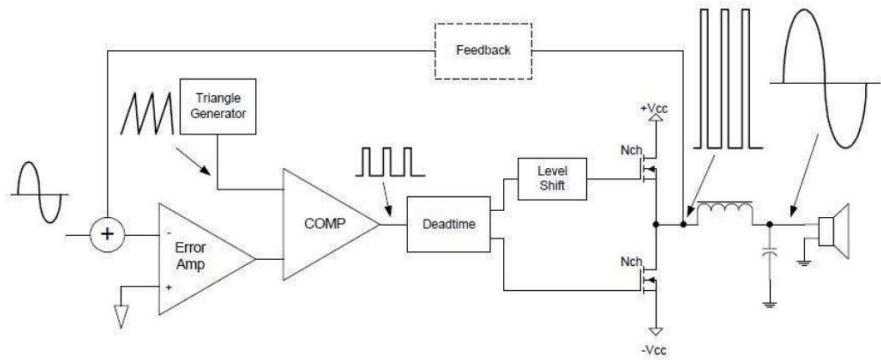
Merupakan penguat audio yang pada penguat akhirnya hanya menggunakan 1 transistor. Transistor tersebut hanya bekerja aktif pada phase positif saja, sisanya bisa direplika oleh rangkaian resonansi L dan C. Rangkaian Penguat audio kelas C tidak perlu dibuatkan bias karena transistor bekerja pada daerah saturasi. Penguat ini memiliki efisiensi tinggi namun fidelitas yang lebih rendah. Secara teori penguat ini mendapatkan efisiensi 100% pada output nol tetapi menjadi 78,5% pada output penuh[3].



Gambar 2.4 Penguat Audio Kelas C[4]

2.2.5. Kelas D

Merupakan penguat audio digital dengan menerapkan model switching yang dapat mengurangi rugi daya dipenguat akhir dan memungkinkan mendapatkan efisiensi kurang lebih 90% - 95%. Sinyal masukan digunakan untuk memodulasi sinyal pembawa PWM yang mendorong penguat akhir. Sebelum sinyal output dihubungkan ke speaker, dilewatkan terlebih dahulu pada LPF (low pass filter) untuk menghilangkan frekuensi tinggi pembawa PWM-nya [3].



Gambar 2.5 Blok Dasar Penguat Audio Kelas D[5]

Pada gambar 2.5 Merupakan skema blok dasar penguat audio kelas D. Dari sinyal masukan yang disandingkan dengan *feedback pre-filter* yang berasal dari keluaran untuk membantu kompensasi variasi tegangan akan dibandingkan oleh komparator dengan sinyal segitiga dan menghasilkan PWM dan dikuatkan oleh *power mosfet* selanjutnya difilter untuk menghasilkan sinyal output sinusoida dengan penguatan.

2.3. Cara Kerja Penguat Audio Kelas D

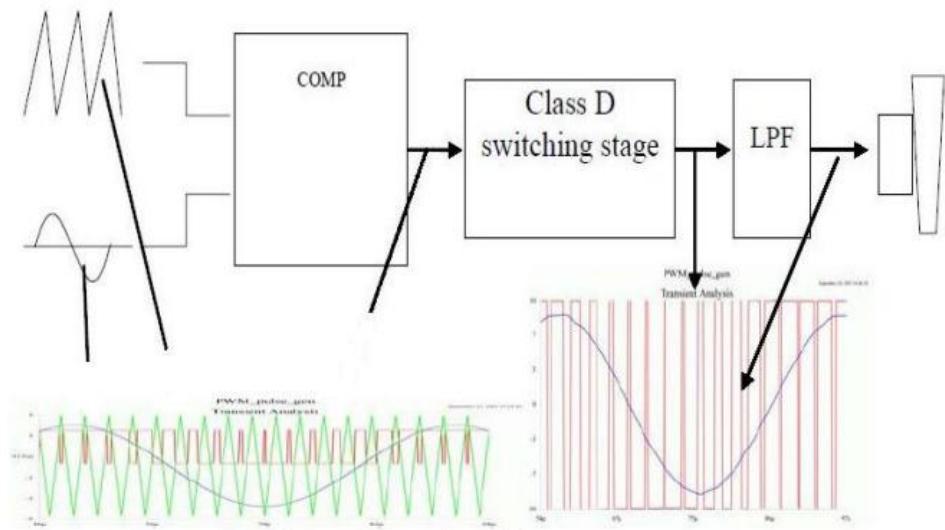
Sinyal masukan dari audio standar berbentuk sinusoida dengan rentang frekuensi antara 20 Hz – 20 KHz. Penguat audio kelas D pertama kali dikenalkan pada tahun 1958, menjadi semakin populer dalam beberapa tahun terakhir. Penguat audio kelas D pada dasarnya adalah *switching-amplifier* atau *Pulse Width Modulation-Amplifier* (PWM)[3]. Prinsip yang digunakan dalam penguat audio kelas D adalah *binary-switches*, dan lebih sempurna setelah penggunaan *power Mosfet* sehingga tidak ada waktu transisi dan daya yang terbuang saat penguat ini nol. Sinyal masukan berupa gelombang sinusoidal akan diproses menjadi sinyal digital yaitu sinyal PWM yang kemudian dikuatkan dan direka ulang menjadi gelombang sinus menggunakan LPF (*low pass filter*).

Efisiensi penguat audio kelas D jauh lebih baik dibandingkan dengan penguat audio lainnya seperti kelas A, kelas B, kelas C dan kelas AB. Efisiensi yang didapatkan pada penguat kelas AB yang umum digunakan memiliki efisiensi kurang lebih 50% sedangkan pada penguat kelas D didapatkan efisiensi yang tinggi kurang lebih mencapai 90%[2]. Efisiensi

daya yang tinggi dalam sebuah penguat audio merupakan hal yang diharapkan pada sebuah penguat.

Penguat audio kelas D memiliki keunggulan efisiensi daya output tinggi dibandingkan penguat audio kelas AB berarti konsumsi daya yang lebih kecil untuk daya keluaran yang diberikan, tapi yang lebih penting adalah mengurangi penggunaan heatsink. Keuntungan yang signifikan penguat audio kelas D dalam berbagai aplikasi karena memerlukan daya yang rendah sehingga menghasilkan sedikit panas.

Dari sinyal tersebut akan dibandingkan dengan frekuensi tinggi yang berbentuk segitiga dan menghasilkan sinyal PWM. Cara kerja dari penguat audio kelas D dapat dilihat seperti gambar berikut ini.



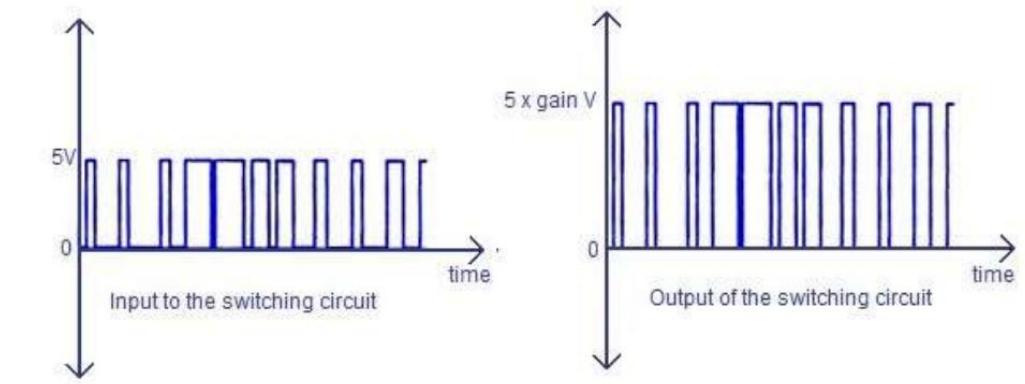
Gambar 2.6 Diagram Penguat Audio Kelas D[5]

Dari blok diagram diatas merupakan cara kerja dari penguat audio kelas D yaitu dari sinyal input yang dibandingkan oleh komparator dengan sinyal frekuensi tinggi berupa sinyal gergaji dan diubah menjadi sinyal digital berupa PWM.

Selanjutnya PWM akan diumpulkan ke *switching stage* dan dikuatkan oleh penguat akhir berupa mosfet, lalu di lewatkan pada rangkaian LPF untuk menghilangkan harmonik dari sinyal PWM. Setelah itu akan diumpulkan ke speaker dengan bentuk sinyal yang diharapkan adalah sinusoida.

Komparator berfungsi untuk mengubah sinyal masukan audio menjadi sinyal digital dengan cara membandingkan sinyal audio dengan sinyal gergaji. Hasilnya adalah sinyal digital yang merupakan salinan dari sinyal masukan audio analog. Meskipun keluaran dari pembanding merupakan representasi digital dari sinyal masukan audio, namun sinyal ini belum bisa untuk langsung diumpulkan ke speaker. Maka dari itu perlu dikuatkan terlebih dahulu tegangan dan arusnya supaya bisa dibebani oleh speaker.

Rangkaian switching akan menguatkan sinyal keluaran dari komparator agar tegangan dan arusnya menjadi level tertentu untuk dapat diumpulkan ke speaker. Rangkaian switching ini biasanya menggunakan Mosfet. Bentuk dari gelombang masukan dan keluaran dari rangkaian switching seperti gambar berikut.



Gambar 2.7 Penguatan Gelombang Tingkat Akhir[3]

Hasil penguatan dari rangkaian switching tidak dapat langsung dihubungkan ke speaker karena masih dalam bentuk PWM. Sehingga diperlukan LPF (*low pass filter*) untuk menyaring frekuensi rendah yang terpakai hasil keluaran rangkaian switching. LPF akan mengeluarkan sinyal berupa replika skala dari sinyal masukan dengan perbesaran yang telah diproses. Rangkaian feedback negatif akan selalu ada yang menghubungkan LPF dengan pembanding untuk menekan kesalahan.

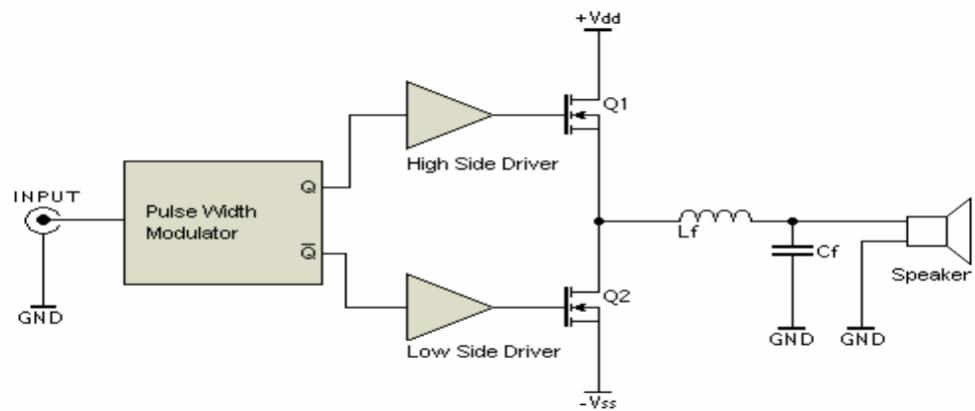
2.4. Topologi Penguat Audio Kelas D

Penguat audio kelas D memiliki 2 jenis topologi yaitu *Half-Bridge* dan *Full-Bridge*. Topologi *Half-Bridge* hanya memerlukan 2 *power electronic*

switch, sedangkan untuk topologi *Full-Bridge* menggunakan 4 *power electronic switch*.

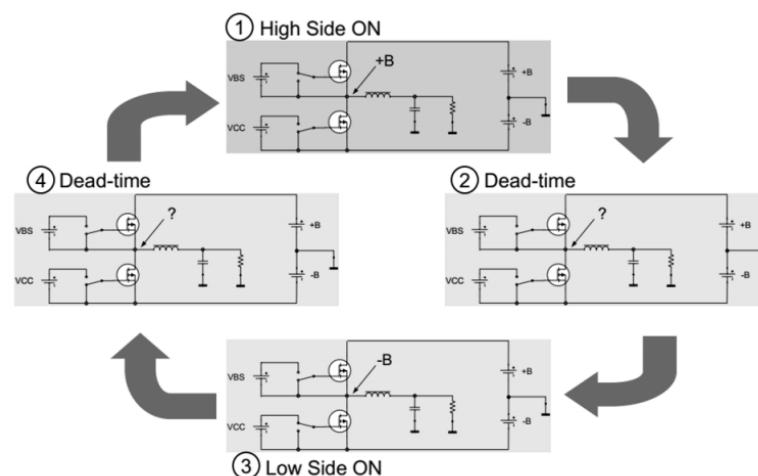
A. *Half-Bridge*

Topologi Penguat audio kelas D ini memerlukan 2 buah *power electronic switches* yang biasanya menggunakan Mosfet. Rangkaian penguat audio dengan topologi *Half-Bridge* dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.8 Half-Bridge Penguat Audio Kelas D[4]

Pada gambar diatas terdapat input yang diolah menjadi sinyal PWM. Dari sinyal *PWM* akan dibagi menjadi dua yaitu *high side* dan *low side* pada driver sehingga terdapat perpindahan switch antara mosfet Q1 dan mosfet Q2. Siklus perpindahan switch pada penguat audio kelas D dengan topologi *Half-Bridge* dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.9 Siklus *Half-Bridge*[6]

Pada siklus pertama menunjukkan bahwa mosfet 1 dalam kondisi hidup atau *high side on* sedangkan mosfet 2 mati atau *low side off* dan arus mengalir adalah B+ seperti pada gambar yang atas.

Pada siklus kedua menunjukkan bahwa kedua mosfet dalam kondisi mati atau kondisi *dead-time* seperti pada gambar sebelah kanan. Dalam siklus ini adalah perpindahan switch antara mosfet 1 dan mosfet 2 yang terjadi sangat cepat agar sinyal PWM yang diloloskan dapat membuat LPF berjalan dan penguat audio dapat berfungsi dengan semestinya.

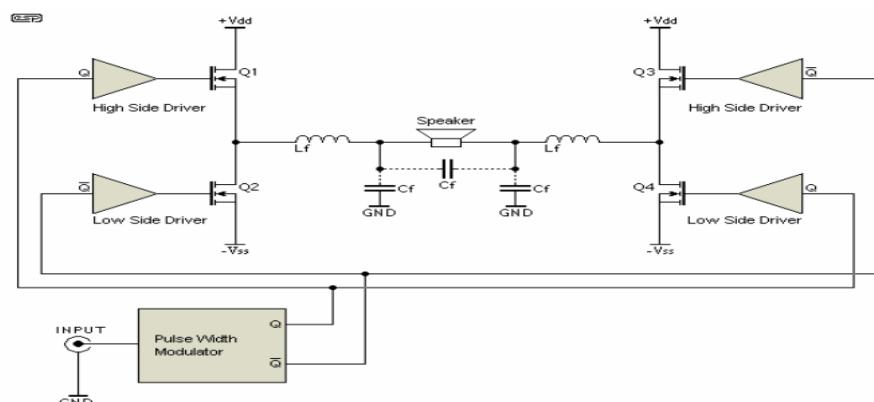
Pada siklus ketiga menunjukkan bahwa mosfet 2 dalam kondisi hidup atau *low side on* sedangkan mosfet 1 mati atau *high side off* dan arus mengalir adalah B- seperti pada gambar yang bawah.

Pada siklus keempat seperti pada siklus kedua yaitu kondisi transisi perpindahan switch dari mosfet 2 ke mosfet 1. Sehingga setelah dari siklus ini akan kembali ke siklus pertama.

Topologi *Half-Bridge* menjadi alternatif yang cukup mudah dan murah karena hanya menggunakan 2 switch. Walaupun hanya menggunakan 2 switch berupa mosfet, namun daya yang dihasilkan hampir sama dari daya input karena efisiensi yang tinggi.

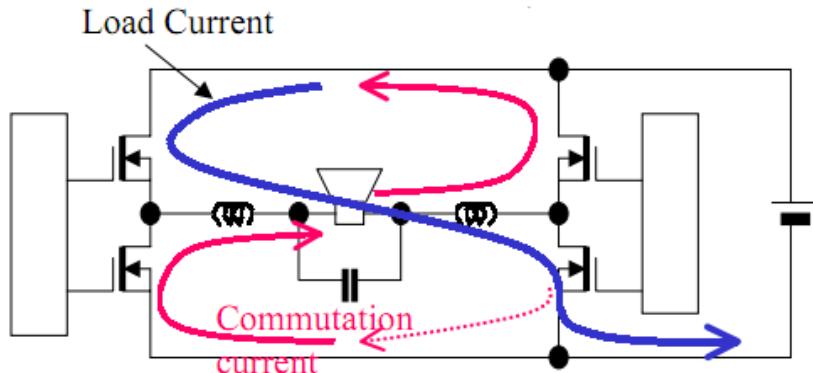
B. Full-Bridge

Topologi penguat audio *Full-Bridge* hampir sama dengan *Half-Bridge* akan tetapi memiliki 4 switch. Mosfet Q1 dan Q2 tidak dapat saling hidup begitu juga mosfet Q3 dan Q4 karena akan terjadi *short circuit* dan mosfet akan rusak atau terbakar.



Gambar 2.10 *Full-Bridge* Penguat Audio Kelas D[4]

Siklus pertama pada topologi *Full-Bridge* mosfet Q1 dan mosfet Q3 akan hidup secara bersamaan, sedangkan mosfet yang lain dalam keadaan mati. Arus akan mengalir sesuai dengan garis biru pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.11 Siklus *Full-Bridge*[5]

Siklus kedua pada topologi *Full-Bridge* mosfet Q2 dan mosfet Q4 akan hidup secara bersamaan, sedangkan mosfet lain dalam keadaan mati. Arus akan mengalir dan kebalikan dari gambar diatas.

Topologi *Full-Bridge* merupakan topologi yang menghasilkan daya output yang lebih stabil dan lebih besar dibandingkan *Half-Bridge* dikarenakan menggunakan 2 *gate drive* berupa mosfet sehingga akan lebih efisien. Akan tetapi akan mengeluarkan biaya lebih karena menggunakan 4 mosfet.

2.5. IC IRS2092

IRS2092 adalah driver penguat audio Kelas D bertegangan tinggi dan berkinerja tinggi dengan modulator dan perlindungan PWM. IC IRS2092 merupakan IC khusus untuk penguat audio kelas D sudah memiliki pengaman yang telah tertanam didalam sistem. IC ini memiliki 2 pengemasan yaitu dengan kode SOIC16N yang berupa IC SMD, dan PDIP16 dengan bentuk IC standar. Pengaplikasian IC seperti home theater, stereo mini komponen, power speaker, dan audio amplifier pada umumnya.

IRS2092 dapat menggunakan *power supply* sampai dengan 210 volt dengan konfigurasi simetris, tergantung dengan rangkaian yang akan dibuat dan komponen yang akan digunakan. Penggunaan komponen

pendukung untuk membuat *amplifier* sangat berpengaruh dari *input* dan *output* daya yang dihasilkan. *Output* daya dari IC ini dapat mencapai 500 W dengan tegangan *offset* mencapai 100 V. arus dari gate drive 1 A di sisi positif dan 1,2 A di sisi negatif. *Deadtime* dapat dipilih mulai dari 25/40/65/105 ns sesuai dengan kebutuhan rangkaian dan komponen yang digunakan. Untuk delay proteksi kelebihan arus sebesar 500 ns. DC *offset* kurang dari 20 mV dengan frekuensi PWM mencapai ~800 kHz.

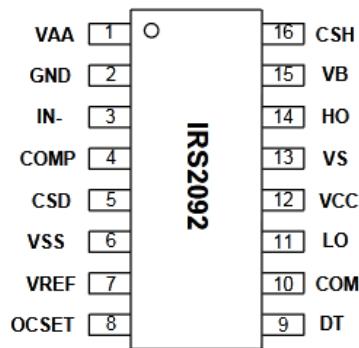


Gambar 2.12 IC IRS2092[12]

IRS2092 memiliki 16 pin kaki dengan fungsi yang berbeda-beda, diantaranya adalah :

Tabel 2.1 Deskripsi Pin IC IRS2092

PIN #	simbol	deskripsi
1	VAA	Sumber daya positif
2	GND	<i>Ground</i>
3	IN-	Masukan <i>analog inverting</i>
4	COMP	Masukan komparator
5	CSD	Waktu mati kapasitor
6	VSS	Sumber daya negatif
7	VREF	5V tegangan referensi untuk memprogram pin OCSET
8	OCSET	Pengaturan <i>low side over current</i>
9	DT	Program masukan <i>deadtime</i>
10	COM	<i>Ground low side</i>
11	LO	Keluaran <i>low side</i>
12	VCC	Daya <i>low side</i>
13	VS	<i>Ground high side</i>
14	HO	Keluaran <i>high side</i>
15	VB	Daya <i>high side</i>
16	CSH	Sensor masukan <i>high side over current</i>



Gambar 2.13 Pin IC IRS2092[12]

2.6. Pulse Width Modulation (PWM)

PWM (*pulse width modulation*) merupakan mekanisme perubahan sinyal dari sebuah gelombang dengan besar kecilnya lebar pulsa gelombang (*Duty Cycle*) dapat diatur akan tetapi nilai amplitudo dan nilai frekuensi tetap. *Duty Cycle* (D) merupakan prosentase (%) periode sinyal high (T_{on}) dalam satu periode (T) sinyal. Prosentase duty cycle akan bebanding lurus dengan tegangan rata-rata yang dihasilkan.

$$D = \frac{T_{on}}{T} \quad 2.1$$

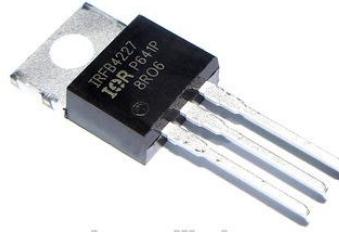
PWM dapat disebut sebagai teknik untuk memanipulasi pengolahan sinyal gelombang dengan menggunakan prinsip pensaklaran on dan off.

2.7. Mosfet

Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor atau Mosfet adalah salah satu jenis dari transistor yang berfungsi sebagai penguat dan juga pensaklaran. Dalam penguat audio kelas D disini menggunakan mosfet IRFB4227.

IRFB4227 merupakan mosfet kanal N arus tinggi yang memiliki kemampuan switching hingga 65A, tegangan maksimal mencapai 200V pada Drain-Source dan 30V pada Gate-Source. Keunggulan dari mosfet ini adalah memiliki total gate charge yang kecil yaitu 70nC sehingga responnya cepat yang di desain untuk dapat diaplikasikan pada penguat audio kelas D. kelebihan lainnya adalah memiliki tahanan *Drain-Source* yang kecil yaitu $0,026\Omega$. Mosfet ini juga memiliki kelebihan yaitu

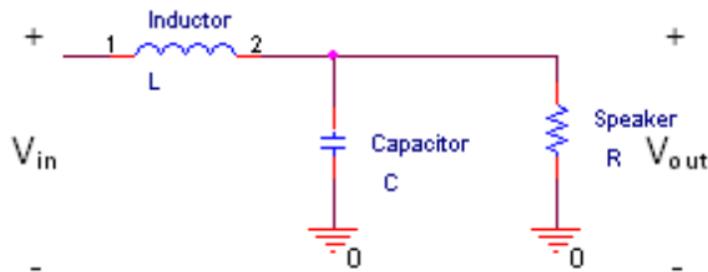
temperatur operasinya mencapai 175°C dengan maksimum disipasi daya mencapai 190W.



Gambar 2.14 Mosfet IRFB4227[13]

2.8. Low Pass Filter (LPF)

Low Pass Filter merupakan sebuah rangkaian yang digunakan untuk menyaring gelombang rendah. Dalam penguat audio kelas D, LPF digunakan untuk memulihkan sinyal input yang diperkuat oleh PWM. Gelombang segitiga dengan frekuensi tinggi harus disaring menggunakan LPF. Roll-off filter harus cepat, karena kalau roll-off lambat akan meninggalkan gelombang segitiga frekuensi tinggi. Apabila komponen DC ada dalam sinyal yang diperkuat, maka harus di hilangkan agar tidak merusak speaker.



Gambar 2.15 Rangkaian LPF[4]

Fungsi transfer dari rangkaian LPF diatas mengacu pada butterworth orde 2 yaitu[4]:

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1} \quad 2.2$$

$$H(s) = \frac{(\omega c)^2}{(s^2 + \omega c s \sqrt{2} + \omega c^2)} \quad 2.3$$

Dengan

$$\omega c^2 = \frac{1}{LC} \quad 2.4$$

$$C = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi f_c R} \quad 2.5$$

$$L = \frac{\sqrt{2}R}{2\pi f_c} \quad 2.6$$

Keterangan :

- f_c : frekuensi cutoff
- L : nilai induktor
- C : nilai kapasitor
- R : nilai beban (speaker)

2.9. Efisiensi

Efisiensi dari sebuah penguat audio kelas D dapat dikatakan sebagai hubungan antara daya input dan daya output yang biasanya diukur dengan persentase. Efisiensi yang baik berkisar diatas 80 atau 90%[2].

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad 2.7$$

Keterangan:

- η : Efisiensi (dalam persen)
- P_{out} : Daya output
- P_{in} : Daya input

2.10. Filter

Filter merupakan sebuah rangkaian yang dirancang agar dapat melewaskan sinyal dengan rentang frekuensi tertentu dan menghilangkan atau memperlemah sinyal dengan frekuensi diluar frekuensi tersebut[14].

Berdasarkan komponen yang digunakan, rangkaian filter dapat dikelompokkan menjadi filter pasif dan filter aktif. Apabila menggunakan komponen aktif (komponen yang membutuhkan arus dan tegangan sendiri seperti transistor, dioda) maka disebut dengan filter aktif. Sedangkan jika menggunakan komponen pasif (komponen yang tidak membutuhkan arus dan tegangan sendiri seperti induktor, resistor, kapasitor) maka disebut dengan filter pasif.

2.11. Equalizer

Equalizer adalah kumpulan dari rangkaian elektronik yang dirancang agar meloloskan suatu sinyal dengan frekuensi tertentu dan menghilangkan atau meredam frekuensi yang berbeda. *Equalizer* merupakan suatu alat yang keberadaannya penting dalam bidang audio.

equalizer dapat mengubah karakteristik suara dan digunakan untuk mengontrol frekuensi respon dari *sound system*. Melalui *equalizer*, kita mampu melakukan perbaikan pada kualitas suara yang disebabkan oleh adanya keterbatasan dari peralatan audio.

Dalam merancang *equalizer*, terdapat rangkaian filter yang bermacam-macam menurut dari sifat penguatannya dan daerah frekuensi yang dilewati antara lain:

2.11.1. Berdasarkan Sifat Penguatannya

A. Filter Aktif

Filter Aktif merupakan rangkaian filter yang menggunakan komponen-komponen elektronik aktif. Komponen penyusunnya terdiri dari *op-amp*, transistor, dan komponen lainnya. Oleh karenanya filter dapat dibuat dengan performansi bagus dengan komponen yang relatif sederhana. Komponen induktor tidak diperlukan karena unsur aktifnya, yaitu penguat operasi, dapat dipakai untuk mensimulasi reaktansi induktif dari induktor. Kelebihan dari filter ini adalah ukurannya yang kecil, ringan, lebih murah, dan lebih fleksibel dalam perancangannya. Sedangkan kerugian dari filter ini adalah pada komponen dihasilkan panas, terdapat pembatasan frekuensi dari komponen yang digunakan sehingga untuk pengaplikasian frekuensi tinggi terbatas[14].

B. Filter Pasif

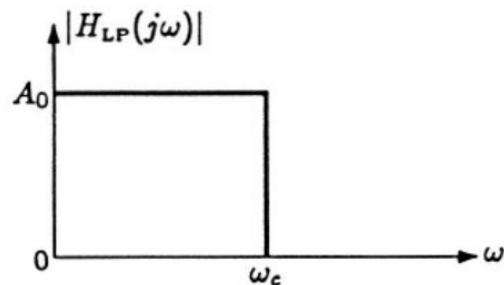
Filter pasif merupakan rangkaian filter yang menggunakan komponen-komponen elektronik pasif saja seperti induktor, kapasitor, dan resistor. Kelebihan dari rangkaian filter ini adalah dapat tidak begitu banyak derau karena tidak ada penguatan, dan dapat digunakan untuk frekuensi tinggi. Sedangkan kerugian dari filter ini adalah tidak dapat menguatkan sinyal, sulit untuk merancang filter yang kualitas responnya baik[14].

2.11.2. Berdasarkan Daerah Frekuensi yang Dilewatkan

Berdasarkan daerah frekuensi yang dilewatkan oleh filter analog dibagi menjadi beberapa antara lain :

A. LPF (*Low Pass Filter*)

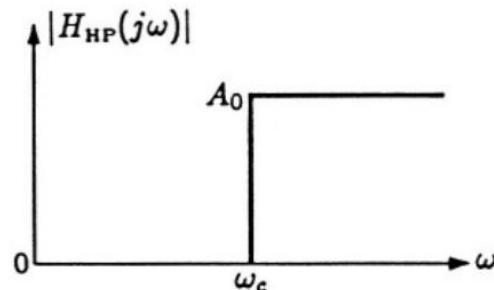
LPF (*low pass filter*) akan melewatkkan semua frekuensi sampai dengan frekuensi cut-off dan melakukan peredaman terhadap frekuensi-frekuensi tinggi[14].



Gambar 2.16 LPF (low pass filter)[15]

B. HPF (*High Pass Filter*)

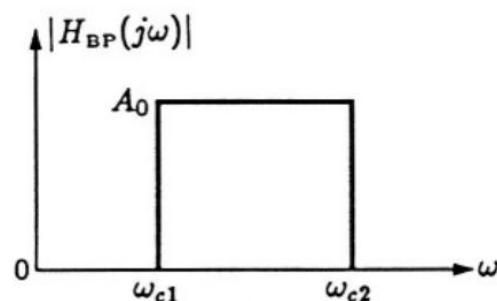
HPF (*high pass filter*) akan melewatkkan frekuensi-frekuensi tinggi dan akan melakukan peredaman terhadap frekuensi-frekuensi rendah[14].



Gambar 2.17 HPF (high pass filter)[15]

C. BPF (*Band Pass Filter*)

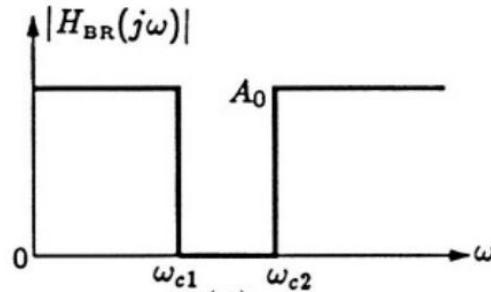
BPF (*band pass filter*) akan melewatkkan frekuensi yang ditalanya dan beberapa frekuensi yang berdekatan, akan tetapi akan meredam semua frekuensi yang lebih rendah dan lebih tinggi[14].



Gambar 2.18 BPF (band pass filter)[15]

D. BSF (*Band Stop Filter*)

BSF (*band stop filter*) digunakan untuk meredam satu frekuensi atau pita frekuensi yang kecil dan melewatkannya[14].

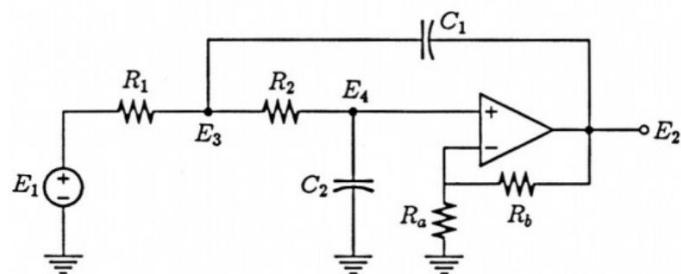


Gambar 2.19 BSF (band stop filter)[15]

2.12. Equalizer Sallen-Key

Equalizer Sallen-Key merupakan termasuk filter aktif yang dibangun dari sebuah *Operational Amplifier*, komponen pasif seperti resistor dan kapasitor. Tanggapan frekuensi filter yang dikehendaki dapat dicapai dengan mengubah-ubah nilai penguatan dari *amplifier* yang dipasang. Konfigurasi rangkaian dan persamaan fungsi transfer untuk menghitung frekuensi tanggapan sesuai dengan jenis filter sallen-key sebagai berikut[15]:

2.12.1. Lowpass filter



Gambar 2.20 Sallen-key Lowpass Filter[15]

Persamaan fungsi transfer standar dari sallen-key lowpass filter dapat dituliskan sebagai berikut :

$$H_{LP}(S) = \frac{G\omega_0^2}{S^2 + \left(\frac{\omega_0}{Q}\right)s + \omega_0^2} \quad 2.8$$

Dengan

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad 2.9$$

$$Q = \frac{\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}}{\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1-\mu}{R_2 C_2}} \quad 2.10$$

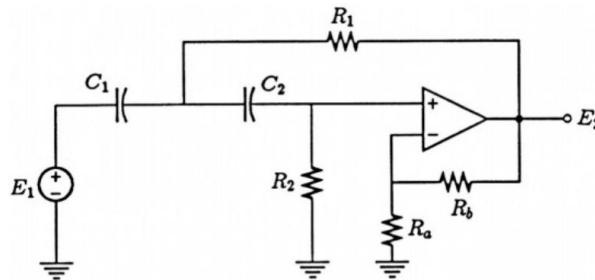
$$\mu = 1 + \frac{R_b}{R_a} \quad 2.11$$

$$G = \mu \quad 2.12$$

Dari persamaan transfer fungsi diatas, maka sesuai dengan gambar rangkaian 2.11 dapat ditulis fungsi transfernya sebagai berikut :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{\mu}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1-\mu}{R_2 C_2} \right) s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad 2.13$$

2.12.2. Highpass Filter



Gambar 2.21 Sallen-key Highpass Filter[15]

Persamaan fungsi transfer standar dari salien-key highpass filter dapat ditulis sebagai berikut :

$$H_{HP}(s) = \frac{Gs^2}{s^2 + \left(\frac{\omega_0}{Q} \right) s + \omega_0^2} \quad 2.14$$

Dengan

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad 2.15$$

$$Q = \frac{\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}}{\frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1-\mu}{R_1 C_1}} \quad 2.16$$

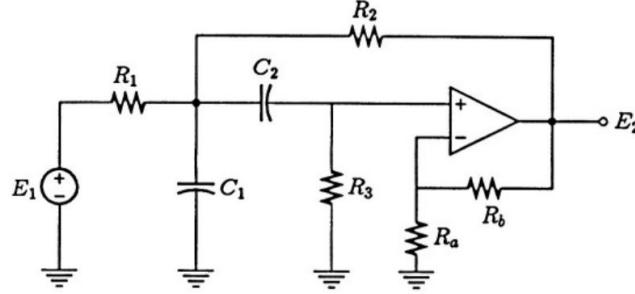
$$\mu = 1 + \frac{R_b}{R_a} \quad 2.17$$

$$G = \mu \quad 2.18$$

Dari persamaan transfer fungsi diatas, maka sesuai dengan gambar rangkaian 2.12 dapat ditulis fungsi transfernya sebagai berikut :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\mu s^2}{s^2 + \left(\frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1-\mu}{R_1 C_1} \right) s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad 2.19$$

2.12.3. Bandpass Filter



Gambar 2.22 Sallen-key Bandpass Filter[15]

Persamaan fungsi transfer standar dari salien-key bandpass filter dapat ditulis sebagai berikut :

$$H_{HP}(s) = \frac{G \left(\frac{\omega_0}{Q} \right) s}{s^2 + \left(\frac{\omega_0}{Q} \right) s + \omega_0^2} \quad 2.20$$

Dengan

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}} \quad 2.21$$

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}}}{\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_3 C_2} + \frac{1}{R_3 C_1} + \frac{1-\mu}{R_2 C_1}} \quad 2.22$$

$$\mu = 1 + \frac{R_b}{R_a} \quad 2.23$$

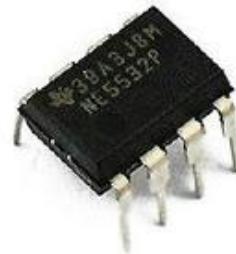
$$G = \frac{\frac{\mu}{R_1 C_1}}{\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_3 C_2} + \frac{1}{R_3 C_1} + \frac{1-\mu}{R_2 C_1}} \quad 2.24$$

Dari persamaan transfer fungsi diatas, maka sesuai dengan gambar rangkaian 2.13 dapat ditulis fungsi transfernya sebagai berikut :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{\mu}{R_1 C_1} s}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_3 C_2} + \frac{1}{R_3 C_1} + \frac{1-\mu}{R_2 C_1} \right) s + \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}} \quad 2.25$$

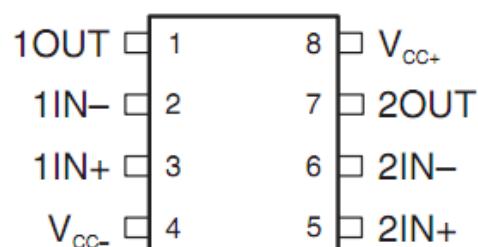
2.13. IC NE5532

NE5532 digunakan sebagai *op-amp* pada filter *sallen-key*. NE5532 berkinerja tinggi dalam penggabungan karakteristik DC dan AC yang sangat baik. IC ini memiliki fitur noise yang rendah, drive output tinggi, Unity-Gain Bandwidth mencapai 10MHz, distorsi rendah, laju perubahan tegangan tinggi, perlindungan input, dan perlindungan hubung singkat. IC ini dapat diaplikasikan dalam berbagai alat salah satunya adalah equalizer dengan berbagai konfigurasi seperti *sallen-key*.



Gambar 2.23 IC NE5532[16]

IC NE5532 merupakan IC dual op-amp yang memiliki 8 pin dengan fungsi membagi 2 bagian op-amp dan tidak saling berpengaruh satu dengan lainnya. Konfigurasi pin dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 2.24 Konfigurasi Pin NE5532[16]

Tabel 2.2 Fungsi Pin NE5532

Pin	Nama	Tipe	Fungsi
1	1OUT	O	<i>Output 1</i>
2	1IN-	I	<i>Inverting Input 1</i>
3	1IN+	I	<i>Noninverting Input 1</i>
4	VCC-	-	Daya Negatif
5	2IN+	I	<i>Noninverting Input 2</i>
6	2IN-	I	<i>Inverting Input 2</i>
7	2OUT	O	<i>Output 2</i>
8	VCC+	-	Daya Positif

2.14. FFT dan Sampling Rate

Fast Fourier Transform (FFT) merupakan metode pengukuran penting dalam audio dan akustik dengan mengubah sinyal menjadi komponen spektral individu dan memberikan informasi frekuensi. FFT digunakan untuk menganalisis kesalahan, kontrol kualitas, dan pemantauan[18].

FFT merupakan komputasi transformasi fourier diskrit (DFT) dari suatu sinyal diskrit. Spektrum magnitude terhadap frekuensi merupakan hasil dari FFT. Pada umumnya, suatu sinyal diskrit/kontinyu terbentuk dari campuran beberapa sinyal dengan frekuensi yang berbeda. Perhitungan FFT dapat dinyatakan pada persamaan berikut:

$$X(k) = \sum_{j=1}^{N} x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad 2.26$$

Keterangan :

$X(k)$ = hasil transformasi fourier diskrit dari $x(k)$

$x(k)$ = sinyal waktu diskrit dinyatakan $x(j)$

N = panjang sinyal

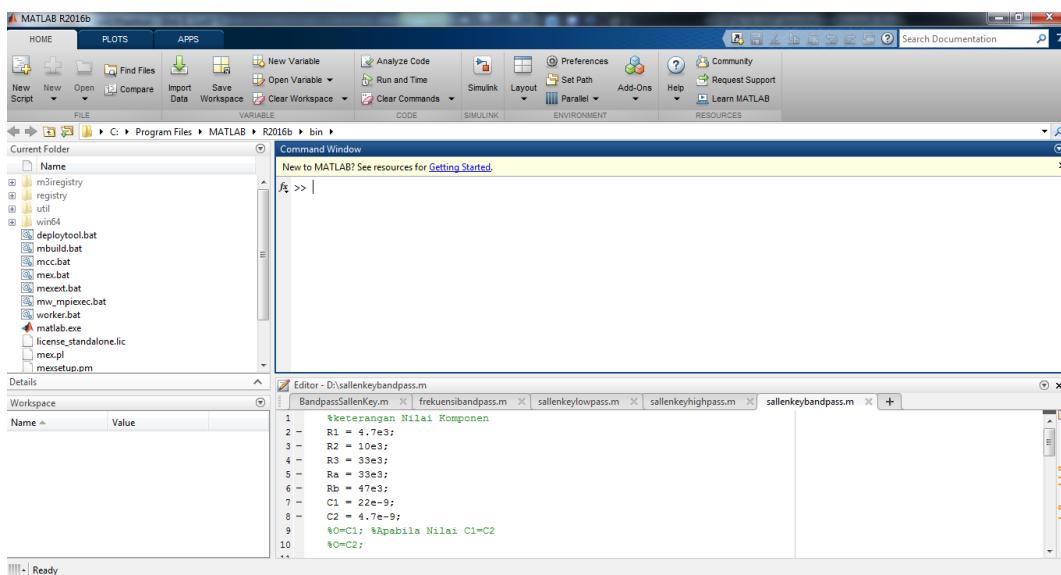
Kemudian untuk *sampling rate* diperlukan dalam perhitungan FFT. *Sampling rate* merupakan banyaknya poin data digital yang dikumpulkan atau diambil dari sebuah audio elektris yang mengalir. Dalam sampling rate terdapat dua istilah yaitu *sampling frequency* (frekuensi sampel) dan *bit depth* (kedalaman bit)[19].

Sampling frequency merupakan seberapa sering (rates) dari sinyal analog yang diambil dan direproduksi diukur dengan satuan *Hertz* dalam 1 detik. 1 Hz sama dengan 1 sampel per detik, apabila 1000 Hz maka ada 1000 sampel dalam satu detik. *Sampling frequency* pada standar audio sebesar 44100 Hz. *Bit depth* merupakan jumlah bit digital yang digunakan untuk menerjemahkan data dari sinyal audio dengan ditunjukkan angka 8, 16, 24, dan seterusnya. Apabila bit semakin tinggi maka data digital akan semakin akurat mendekati sinyal analognya.

2.15. MATLAB

MATLAB (Matrix Laboratory) merupakan salah satu bahasa pemrograman yang dikembangkan oleh MathWorks. Matlab merupakan sebuah bahasa pemrograman dengan unjuk kerja tinggi (high-performance) dengan berbagai keperluan seperti komputasi teknis, yang mengintegrasikan komputasi, visualisasi, dan pemrograman di dalam lingkungan yang mudah penggunaannya dalam memecahkan persoalan dengan solusinya yang dinyatakan dengan notasi matematik.

Salah satu yang faktor yang membuat Matlab menarik adalah kemudahan dan kejelasannya dalam memahami contoh dan demo serta help yang ada pada Matlab. Matlab dapat berlaku seperti bahasa pemrograman C ataupun pascal yang mempunyai struktur kontrol program. Dalam pemrograman m-file memerlukan lebih dari satu baris dan dimungkinkan untuk didokumentasikan.

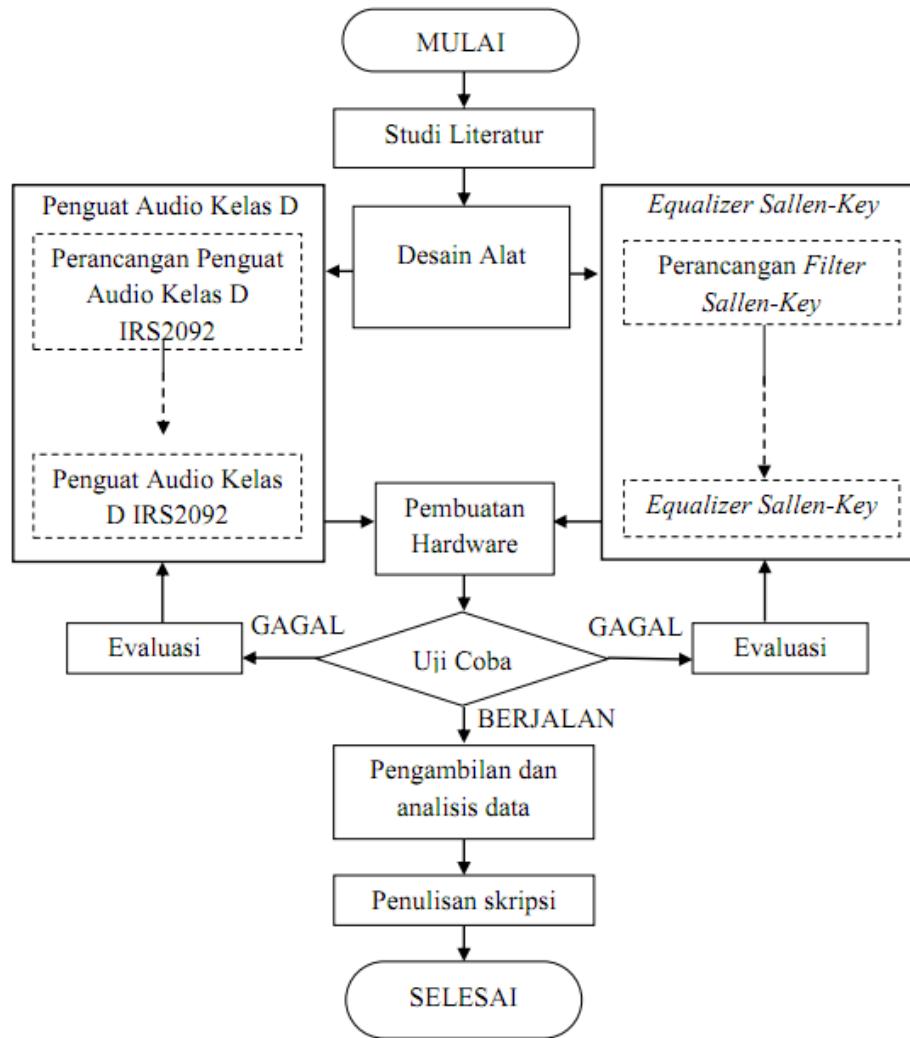


Gambar 2.25 Tampilan software Matlab

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Metode Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan bersama dengan pelaksanaan penyediaan alat dan bahan yang akan digunakan. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan kemampuan teori analisis dan implementasi dalam rangkaian. Tidak hanya itu, dapat juga memastikan pengadaan alat dan bahan dapat dilakukan dengan cepat. Penguasaan konsep juga diperlukan untuk meminimalisir kesalahan metode, *error* dalam

pembuatan alat, serta keaslian penelitian dibandingkan penelitian-penelitian terdahulu.

3.1.2. Desain Alat

Setelah dilakukan studi literatur, selanjutnya perancangan alat penguat audio kelas D dan *equalizer sallen-key* berdasarkan rangkaian referensi dari berbagai sumber. Desain perancangan alat meliputi penggunaan IC pada penguat audio kelas D dan rangkaian yang akan digunakan, perhitungan frekuensi *equalizer* dan rangkaian *sallen-key*.

3.1.3. Perakitan

Perakitan dilakukan apabila alat dan bahan untuk setiap rangkaian sudah ada. Untuk perakitan pertama adalah penguat audio kelas D beserta catu daya, dan selanjutnya adalah *equalizer sallen-key* beserta catu daya.

3.1.4. Uji Coba

Uji coba dilakukan untuk mengetahui proses dan cara kerja dari penguat audio kelas D dan output sinyal yang dihasilkan serta untuk mengetahui frekuensi *cutoff* dari rangkaian *equalizer sallen-key*. Pemaparan lebih rinci metode uji coba disampaikan dalam subbab 3.4 dan 3.5

3.1.5. Evaluasi

Evaluasi dilakukan sebagai pengecekan ulang dari kegagalan pada uji coba untuk mengetahui kesalahan atau kekurangan dari rangkaian penguat audio kelas D maupun *equalizer sallen-key*.

3.1.6. Pengambilan Data dan Analisis Data

Pengambilan data akhir dilakukan jika semua hasil pengujian penguat audio kelas D (daya masukkan, daya keluaran, penguatan, dll) dan *equalizer sallen-key* (pembagian frekuensi cutoff, daerah kerja, penguatan, dll) sudah didapatkan.

3.1.7. Penulisan Skripsi

Penulisan skripsi menggunakan Bahasa Indonesia sesuai dengan PUEBI (Pedoman Umum Ejaan Bahasa Indonesia) yang baik dan benar. Untuk Format tata letak, penomoran, teknis, dan sitasi menggunakan dasar dari Buku Panduan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro Fakultas teknik UNS 2018.

3.2. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan dalam waktu 9 bulan terhitung dari bulan Juni 2019 hingga April 2020 dan dilakukan di Laboratorium Otomasi Teknik Elektro Universitas Sebelas Maret.

3.3. Alat dan Bahan

3.2.1. Instrumentasi

- a) Multimeter
- b) Osiloskop

3.2.2. Komponen Amplifier

- a) IC IRS2092
- b) Resistor
- c) Kapasitor
- d) Mosfet IRFB4227
- e) Diode
- f) Core

3.2.3. Komponen Equalizer

- a) IC NE5532
- b) Resistor
- c) Kapasitor
- d) Pin

3.2.4. Perangkat kerja

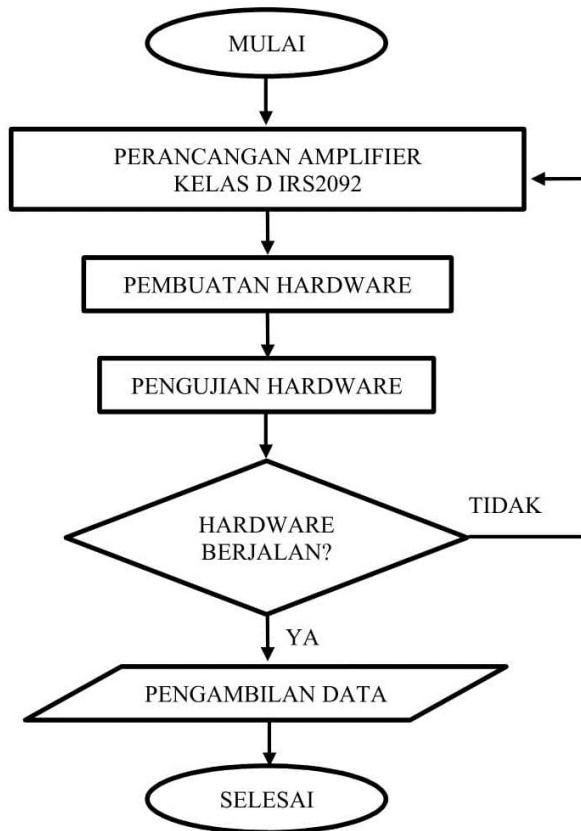
- a) Komputer/Laptop
- b) Perangkat Lunak Matlab
- c) Kabel
- d) Solder
- e) Tang Potong
- f) Tang Jepit

3.2.5. Bahan

- a) PCB
- b) PCB lubang
- c) Pelarut PCB (*Ferit Chloride*)
- d) Timah

3.4. Pembuatan Penguat Audio Kelas D

Pada bab berikut ini akan dijelaskan langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian setelah studi literatur yaitu perancangan awal penguat audio kelas D yang akan dibuat. Selanjutnya adalah melakukan pembuatan hardware serta perangkaian penguat audio kelas D, serta pengujian penguat audio kelas D. diagram alir tahapan penelitian dapat dilihat pada gambar 3.2.



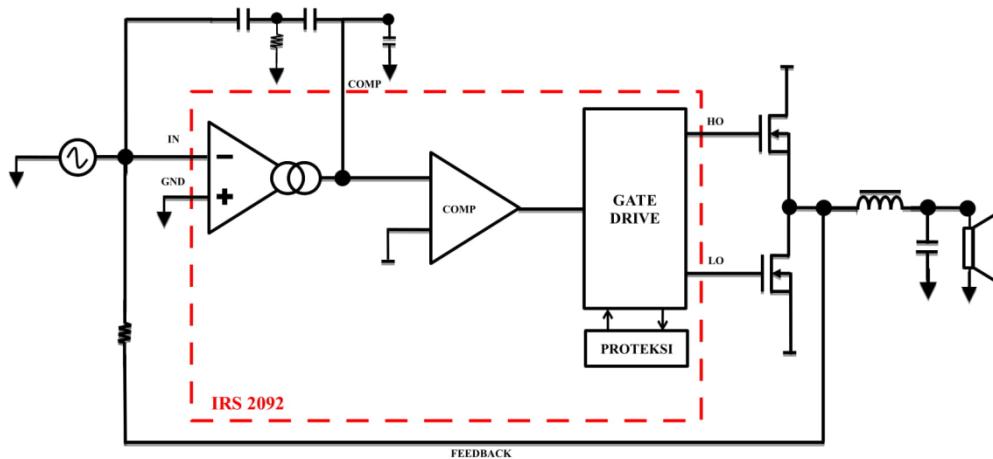
Gambar 3.2 Diagram Alir Rancang Bangun Penguat Audio Kelas D

Dari gambar 3.2 dapat diketahui bahwa jalannya penelitian untuk penguat audio kelas D dengan perancangan awal rangkaian penguat audio kelas D menggunakan IC IRS2092 dengan rangkaian referensi dari *International Rectifier* dan *datasheet* dari IC itu sendiri. Kemudian dibuat dalam bentuk *prototype hardware* dengan mencetak PCB dari rancangan yang telah dibuat. Selanjutnya adalah merangkainya dan menguji coba fungsi dari rangkaian. Apabila telah berfungsi maka akan dilakukan pengambilan data.

3.4.1. Perancangan Awal Penguat Audio Kelas D

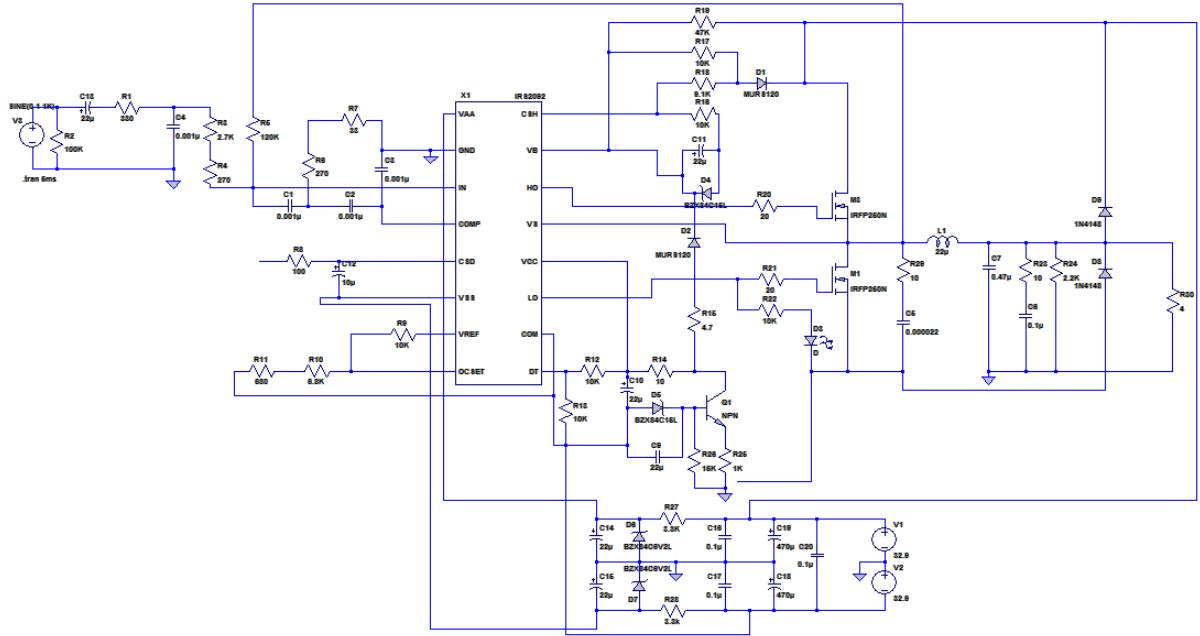
Perancangan awal penguat audio kelas D secara garis besar dapat dilihat pada gambar 3.1. perancangan menggunakan rangkaian yang diperuntukkan untuk IC IRS2092 dan dengan beban berupa speaker. IC IRS2092 merupakan inti dari rangkaian ini menggunakan sistem *Self-oscillating*, karena dari IC ini didalamnya terdapat komparator yang akan berfungsi membandingkan sinyal input dengan sinyal gergaji.

Kemudian hasilnya berupa sinyal PWM akan diatur oleh *gate drive* sehingga dapat berfungsi dan dikuatkan oleh *switch* berupa mosfet. Hasil dari penguatan mosfet akan difilter oleh rangkaian LC filter untuk menghilangkan harmonik dan dapat merepresentasikan sinyal masukan serta dapat dihubungkan dengan speaker.



Gambar 3.3 Diagram Blok Penguat Audio Kelas D IRS2092[10]

Pada rangkaian penguat audio kelas D IRS2092 yang akan dibuat pada penelitian ini menggunakan topologi *Half-Bridge*. Topologi *Half-Bridge* menggunakan 2 mosfet untuk keperluan pensaklaran. Mosfet yang digunakan adalah IRFB4227 serta untuk men-*drive* mosfet tersebut sudah dapat dilakukan oleh IRS2092 itu sendiri. Rangkaian Penguat audio kelas D IRS2092 dapat dilihat pada gambar berikut ini.



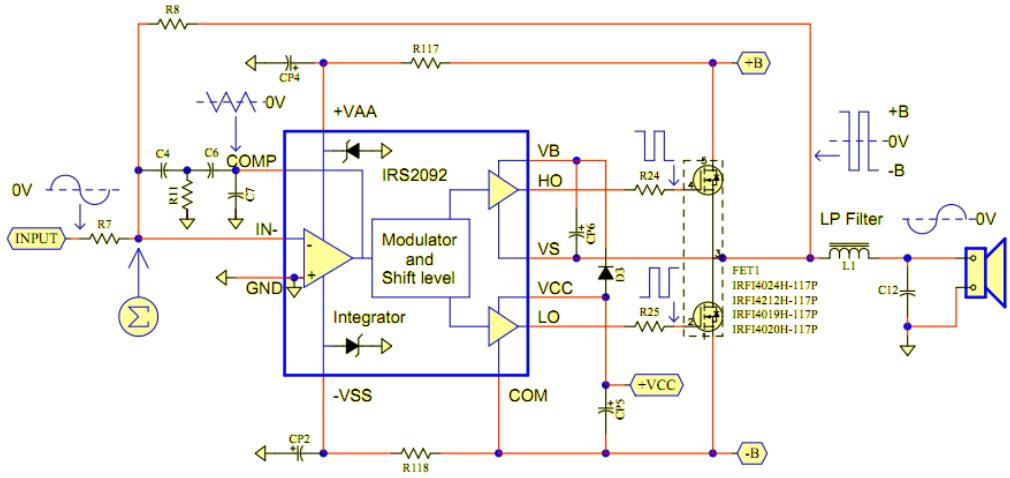
Gambar 3.4 Rangkaian Penguat Audio Kelas D IRS2092

Rangkaian yang akan dibuat pada penelitian ini memiliki fitur *self-oscillating* dengan modulator PWM yang menggunakan komponen lebih sedikit namun performa yang tinggi. Penguat audio kelas D memiliki *switching stage* yang berada didalam *loop* tertutup dengan orde dua modulasi *sigma-delta*. Keuntungan menggunakan modulasi tersebut dibandingkan dengan *carrier-signal* adalah semua kesalahan yang berada pada rentang frekuensi yang terdengar oleh manusia akan bergeser ke rentang frekuensi yang tidak terdengar, dan juga memungkinkan untuk menerapkan koreksi kesalahan.

Dengan menerapkan sistem *self-oscillating* yang terdiri dari beberapa bagian yang mengacu pada gambar 3.5 untuk lebih mudah dalam memahami diantaranya adalah[10]:

1. Integrator

Input *op-amp* IRS2092 akan membentuk *front-end* orde kedua dengan R7, C4, C6, dan R11. Integrator menerima umpan balik persegi panjang dari output PWM melalui R8 dan sinyal input audio melalui R7 menghasilkan *carrier* kuadratik pada pin COMP.



Gambar 3.5 Diagram Blok Simpel Penguin Audio Kelas D IRS2092[10]

2. PWM Komparator

Sinyal *carrier* pada pin COMP dikonversi menjadi sinyal PWM oleh komparator internal yang dimiliki pada titik tengah ambang batas antara VAA dan VSS. Komparator tidak memiliki histeresis pada ambang inputnya.

3. Level shifter

Level shifter dimiliki secara internal dari input mentransfer sinyal PWM ke *low side gate driver*. Bagian gate driver yang lainnya akan menggeser sinyal *high side* ke bagian *high side gate driver*.

4. Gate driver dan Mosfet

Sinyal PWM dari *level shifter* akan dilanjutkan ke blok *dead-time* yang mana ada penambahan program berupa jumlah waktu ke dalam sinyal PWM antara dua sinyal keluaran yaitu gerbang LO dan HO untuk mencegah potensi konduksi silang pada mosfet. IC IRS2092 menjadi *gate driver* dari dua buah mosfet yaitu pada sisi HO dan LO, untuk menyediakan sinyal PWM yang akan diperkuat oleh mosfet.

5. Output LPF

Output sinyal PWM yang telah diperkuat akan direkonstruksi kembali menjadi sinyal analog oleh output LPF berupa rangkaian LC. Demodulation LPF dibentuk oleh komponen L1 dan C12, dengan

menyaring sinyal carrier yang akan dilanjutkan ke output audio berupa beban speaker. Satu tahap filter output dapat digunakan dengan frekuensi switching mencapai 400kHz dan dapat lebih besar.

3.4.2. Pembuatan Hardware Penguat Audio Kelas D

Pada tahap pembuatan hardware, diawali dengan pembuatan pcb dari rangkaian penguat audio kelas D yang telah dirancang. Perancangan dan pembuatan jalur skematik pcb dibuat menggunakan aplikasi sprint layout untuk selanjutnya dicetak. Rangkaian di cetak pada kertas dengan lapisan glossy dengan printer laser agar dapat ditempelkan pada pcb polos, yang kemudian dilarutkan menggunakan cairan *ferrit chloride*. Selanjutnya komponen disusun pada pcb sesuai dengan jalur rangkaian dan penempatan komponen. Apabila sudah sesuai selanjutnya adalah disolder.

Setelah rangkaian penguat audio kelas D selesai dirangkai selanjutnya adalah penyambungan rangkaian dengan power supply. Power supply yang digunakan dengan tegangan $\pm 65,8V$ simetris dengan arus $\pm 2,55A$. kemudian dihubungkan dengan input dari function generator atau sinyal audio dari pemutar mp3 dan output dihubungkan dengan speaker yang memiliki beban 4Ω .

3.4.3. Pengujian Penguat Audio Kelas D IRS2092

Pada tahap ini dilakukan beberapa pengujian antara lain pengujian sinyal input, sinyal integrator, sinyal PWM pada sisi HO, sinyal PWM pada sisi LO, sinyal PWM hasil penguatan mosfet, dan output dari penguat audio kelas D. Pengujian sinyal input dengan mengkonfigurasi bentuk sinyal input yang akan digunakan dari function generator yaitu sinyal sinusoida dengan tegangan 1V.

Pengujian sinyal input dengan menghubungkan output function generator ke osiloskop. Kemudian pada sinyal integrator dilakukan pengujian untuk melihat bentuk sinyal yaitu berupa sinyal gergaji. Langkah pengujian yang dilakukan adalah menghubungkan pin COMP dengan osiloskop dan diperhatikan bentuk sinyalnya.

Pengujian sinyal PWM pada sisi HO dan LO dilakukan untuk melihat sinyal keluaran dari gate driver yang keluar secara bergantian. Langkah-langkahnya adalah menghubungkan pin HO dan LO dengan osiloskop dan membandingkan kedua sinyal PWM yang keluar.

Pengujian sinyal PWM hasil penguatan mosfet dilakukan untuk melihat bentuk penguatan sinyal PWM dengan mosfet serta frekuensi yang berjalan pada sinyal PWM. Dengan menghubungkan osiloskop dan rangkaian antara mosfet dan LPF.

Pengujian pada sinyal output dilakukan untuk melihat bentuk dari sinyal output yang diharapkan yaitu berupa sinusoida dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi sinyal input. Langkahnya adalah menghubungkan osiloskop dengan rangkaian antara LPF dengan beban.

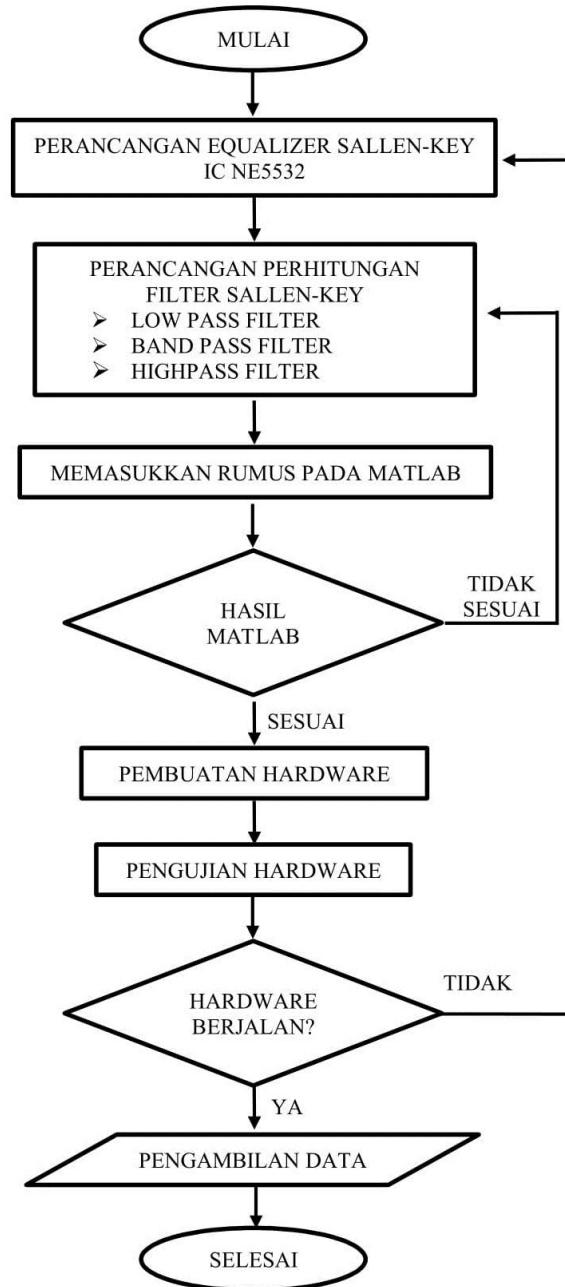
3.4.4. Pengambilan Data Penguat Audio Kelas D

Pengambilan data dilakukan dengan memasang sebuah beban pada penguat audio kelas D. Beban yang digunakan berupa speaker sebesar 4Ω . pengamatan yang dilakukan antara lain sinyal input, sinyal integrator, sinyal PWM, sinyal output, besar penguatan, frekuensi input dan output serta frekuensi sinyal PWM. pengamatan dilakukan 3 kali. Sinyal diamati menggunakan osiloskop.

3.4.5. Analisa dan Penutup

Setelah melakukan pengambilan data, kemudian dilakukan analisis. Analisis digunakan untuk mengetahui cara dan sistem kerja penguat audio kelas D IRS2092, menentukan efisiensi penguat audio kelas D dan kinerja penguat audio kelas D. dari analisis didapatkan apakah *hardware* yang telah dibuat dalam penelitian ini dapat berkerja dengan baik dan sesuai dengan teori yang ada.

3.5. Pembuatan Equalizer Sallen-Key



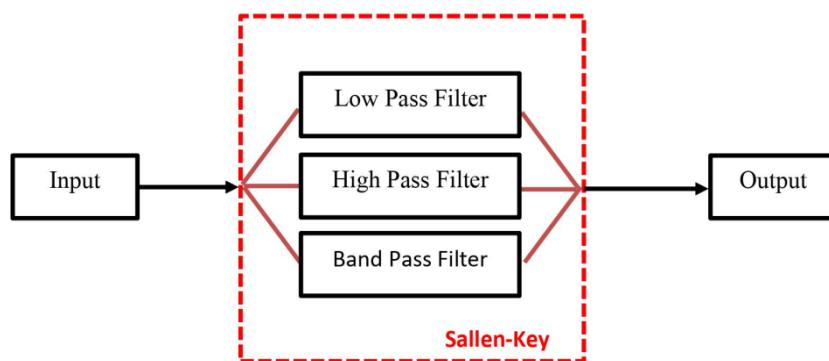
Gambar 3.6 Diagram Alir Perancangan Equalizer Sallen-Key

Pada gambar 3.6 merupakan langkah-langkah yang dilakukan dalam merancang *equalizer sallen-key*. dapat diketahui bahwa jalannya penelitian selain pembuatan penguat audio kelas D, juga membuat *equalizer* dengan topologi rangkaian yang digunakan adalah *sallen-key*, diawali dengan merancang dan menentukan rangkaian yang akan digunakan menggunakan

dasar dari buku analog filter edisi kedua yang ditulis oleh Kendall Su. Kemudian memasukkan rumus untuk dengan menentukan frekuensi *cutoff* yang diinginkan dan menentukan besar komponen resistor dan kapasitor yang digunakan. Setelah dilakukan perhitungan frekuensi *cutoff* dan mencari besar dari komponen yang digunakan, maka selanjutnya melihat grafik responnya untuk melihat daerah operasi frekuensi dan jenis filter yang dirancang yaitu *low pass filter*, *high pass filter* dan *band pass filter*. Hal tersebut perlu dilakukan agar sesuai dengan rancangan filter. Setelah perhitungan selesai dan besar komponen telah ditentukan, selanjutnya adalah merangkai rangkaian filter pada pcb berlubang sesuai dengan rancangan. Setelah rangkaian selesai dibuat, selanjutnya adalah pengecekan dan pengujian alat. Apabila berfungsi maka akan dilakukan pengambilan data. Pengambilan data yang dilakukan adalah satu persatu dari filter yang dibuat untuk diketahui grafik secara real dari rancangan *equalizer sallen-key*-nya.

3.5.1. Perancangan Awal *Equalizer Sallen-Key*

Perancangan awal dari *equalizer sallen-key* secara garis besar dapat dilihat pada gambar 3.7. Input sinyal audio akan diproses oleh 3 rangkaian *equalizer* yaitu *low pass filter*, *high pass filter*, dan *band pass filter*. Pembagian tersebut dilakukan untuk membagi frekuensi sesuai dengan respon dari masing-masing filter. Kemudian output akan berupa sinyal audio dengan beda frekuensi yang diloloskan dari rangkaian filter.

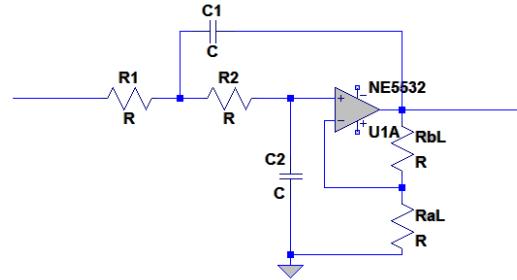


Gambar 3.7 Diagram Blok *Equalizer Sallen-Key*

Pada rangkaian *equalizer sallen-key* menggunakan komponen aktif berupa *op-amp* dan rangkaian *sallen-key* sendiri menggunakan resistor dan

kapasitor sebagai pengolah frekuensi respon. Rangkaian *sallen-key* yang akan dibuat terdiri dari 3 jenis yaitu *low pass filter*, *high pass filter*, dan *band pass filter*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

A. Low Pass Filter (LPF)



Gambar 3.8 Rangkaian LPF Sallen-Key

Rangkaian diatas merupakan *low pass filter* yang akan meloloskan frekuensi rendah. Untuk menghitung frekuensi *cutoff*, diperlukan transfer fungsi sebagai berikut.

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{\mu}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1-\mu}{R_2 C_2} \right) s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad 3.1$$

Dengan

$$\mu = 1 + \frac{R_b L}{R_a L} \quad 3.2$$

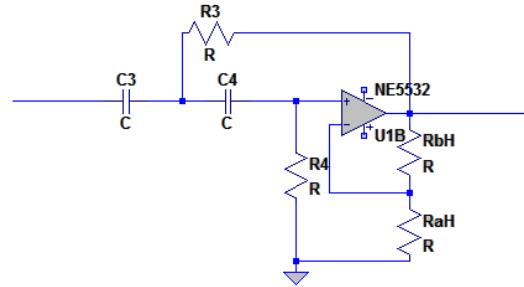
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad 3.3$$

$$Q = \frac{\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}}{\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1-\mu}{R_2 C_2}} \quad 3.4$$

$$G = \mu \quad 3.5$$

B. High Pass Filter (HPF)

Rangkaian dibawah merupakan *high pass filter* yang akan meloloskan frekuensi tinggi. Untuk menghitung frekuensi *cutoff*, diperlukan transfer fungsi sebagai berikut.



Gambar 3.9 Rangkaian HPF Sallen-Key

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\mu s^2}{s^2 + \left(\frac{1}{R_4 C_4} + \frac{1}{R_4 C_3} + \frac{1-\mu}{R_3 C_3} \right) s + \frac{1}{R_3 R_4 C_3 C_4}} \quad 3.6$$

Dengan

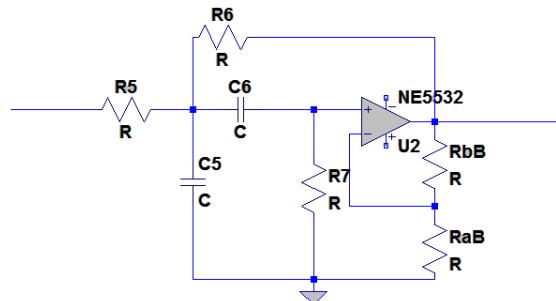
$$\mu = 1 + \frac{R_b H}{R_a H} \quad 3.7$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad 3.8$$

$$Q = \frac{\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}}{\frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1-\mu}{R_1 C_1}} \quad 3.9$$

$$G = \mu \quad 3.10$$

C. Band Pass Filter (BPF)



Gambar 3.10 Rangkaian BPF Sallen-Key

Rangkaian diatas merupakan *band pass filter* yang akan meloloskan frekuensi diantara rendah dan tinggi atau ditengah keduanya. Untuk menghitung frekuensi *cutoff*, diperlukan transfer fungsi sebagai berikut.

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{\mu}{R_5 C_5} s}{s^2 + \left(\frac{1}{R_5 C_5} + \frac{1}{R_7 C_6} + \frac{1}{R_7 C_5} + \frac{1-\mu}{R_6 C_5} \right) s + \frac{1}{R_5 R_6 R_7 C_5 C_6}} \quad 3.11$$

Dengan

$$\mu = 1 + \frac{R_b B}{R_a B} \quad 3.12$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}} \quad 3.13$$

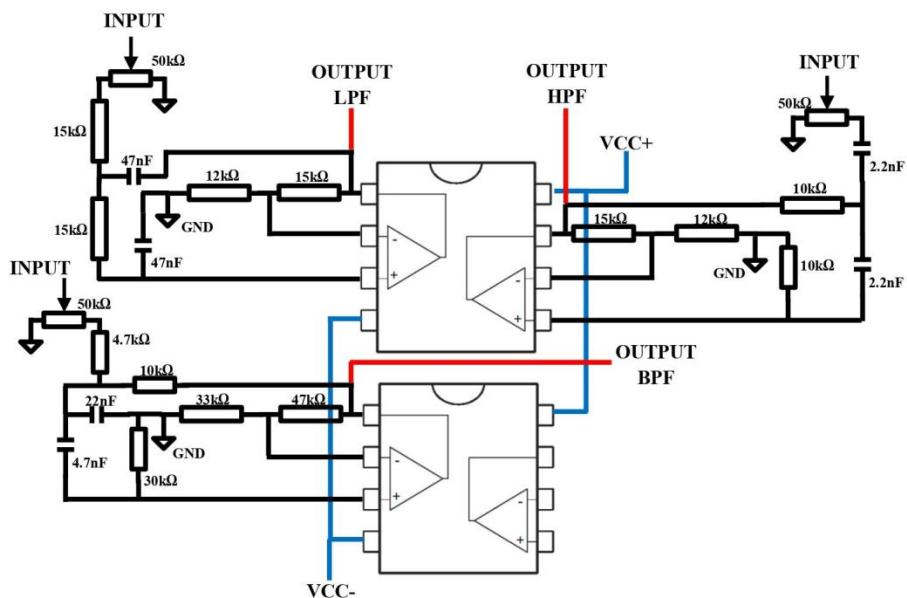
$$Q = \frac{\sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}}}{\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_3 C_2} + \frac{1}{R_3 C_1} + \frac{1-\mu}{R_2 C_1}} \quad 3.14$$

$$\mu = 1 + \frac{R_b}{R_a} \quad 3.15$$

$$G = \frac{\frac{\mu}{R_1 C_1}}{\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_3 C_2} + \frac{1}{R_3 C_1} + \frac{1-\mu}{R_2 C_1}} \quad 3.16$$

3.5.2. Pembuatan Hardware Equalizer Sallen-Key

Pada tahap pembuatan hardware, diawali dengan pembuatan pcb dari rangkaian *equalizer sallen-key* yang telah dirancang. Perancangan dan pembuatan jalur skematik pcb dibuat langsung pada pcb lubang sehingga tidak perlu untuk mendesain dan mencetak pcb. Selanjutnya komponen disusun pada pcb sesuai dengan jalur rangkaian dan penempatan komponen. Apabila sudah sesuai selanjutnya adalah disolder.



Gambar 3.11 Rangkaian Equalizer Sallen-Key

Setelah rangkaian *equalizer sallen-key* selesai dirangkai selanjutnya adalah penyambungan rangkaian dengan *power supply*. *Power supply* yang digunakan dengan tegangan $\pm 30V$ simetris dengan arus $\pm 1A$. kemudian dihubungkan dengan input dari *function generator* atau sinyal audio dari pemutar mp3 dan output dihubungkan dengan osiloskop untuk pengujian sinyal output dari masing-masing filter.

3.5.3. Pengujian Equalizer Sallen-Key

Pada tahap ini dilakukan pengujian yaitu pengujian hardware dengan memasukkan input berupa sinyal sinusoidal dan sinyal output juga berupa sinusoida akan tetapi ada perbedaan frekuensi sesuai dengan yang diloloskan oleh filter tersebut. Rangkaian dihubungkan dengan power supply dan input dari *function generator*. Untuk output dihubungkan dengan osiloskop untuk diamati bentuk sinyalnya.

3.5.4. Pengambilan Data Equalizer Sallen-Key

Pengambilan data dilakukan dengan memasukkan sinyal input dari *function generator* dengan rentang frekuensi dari 20Hz – 20000Hz. Pengujian dibagi menjadi dengan 3 filter yaitu *low pass filter*, *high pass filter*, dan *band pass filter*. Dari setiap filter dilakukan 3 kondisi dengan mengacu pada pergeseran potensiometer yaitu dari paling atas, tengah, dan paling bawah. Pengamatan dilakukan untuk pembacaan frekuensi yang diredam dan dikuatkan oleh masing-masing *filter*. Pembacaan frekuensi dengan menghubungkan output *equalizer* dengan osiloskop dan mencatat sesuai dengan rencana data yang akan diambil.

3.5.5. Analisis dan Penutup Equalizer Sallen-Key

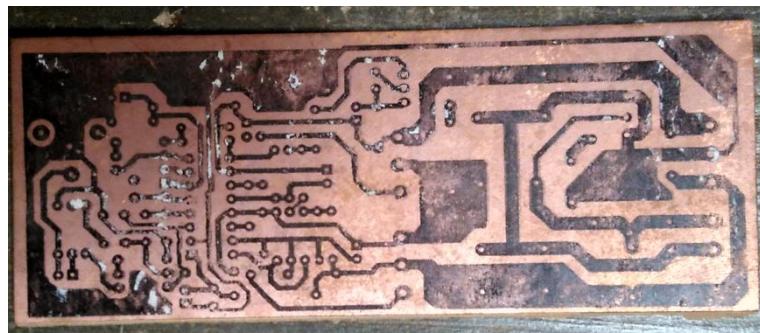
Setelah melakukan pengambilan data, kemudian dilakukan analisis. Analisis digunakan untuk mengetahui cara kerja dari *equalizer*, kecocokan data dari hasil perhitungan dengan *hardware* yang dibuat, dan dipadukan dengan penguat audio kelas D IRS2092. dari analisis didapatkan apakah hardware yang telah dibuat dalam penelitian ini dapat bekerja dengan baik dan sesuai dengan teori yang ada serta dapat dihubungkan dengan penguat audio kelas D IRS2092 yang telah dibuat juga.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

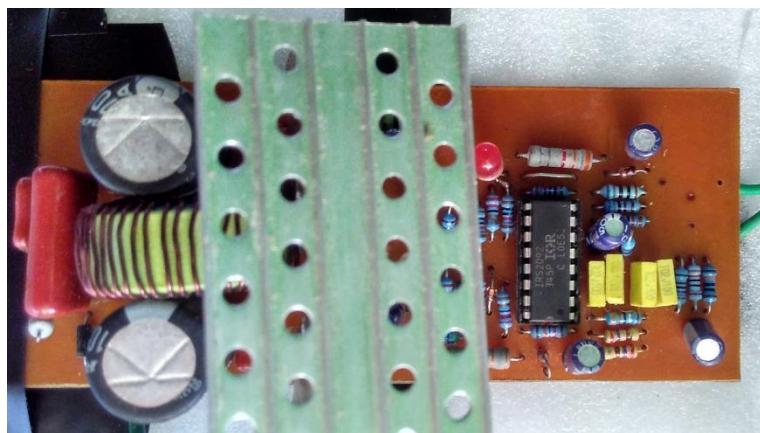
4.1. Rancangan Penguat Audio Kelas D

Rancangan *hardware* penguat audio kelas D diawali dengan perancangan pembuatan skema dari penguat audio kelas D yang akan dicetak pada pcb. Dibawah ini merupakan gambar skema dari penguat audio kelas D yang telah dicetak pada pcb.



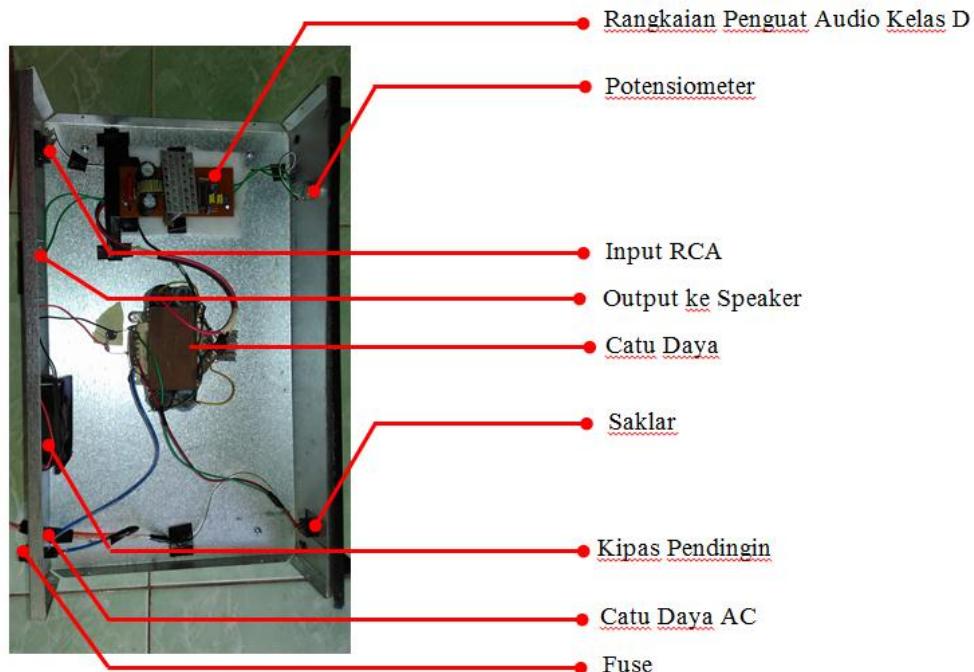
Gambar 4.1 Rangkaian PCB Penguat Audio Kelas D

Selesai dari merangkai komponen sesuai dengan rangkaian, selanjutnya adalah merangkai rangkaian dari penguat audio kelas D. Hasil dari rangkaian penguat audio kelas D dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.2 Rangkaian Penguat Audio Kelas D

Untuk Rangkaian Jadi dari Penguat Audio Kelas D yang dibuat dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4.3 Rangkaian Jadi Penguin Audio Kelas D

Pada gambar diatas merupakan tata letak rangkaian yang telah jadi dan dimasukkan kedalam wadah. Terlihat ada beberapa bagian yaitu catu daya, rangkaian penguat audio kelas D IRS2092, input RCA, saklar, fuse, potensiometer, dan kipas pendingin.

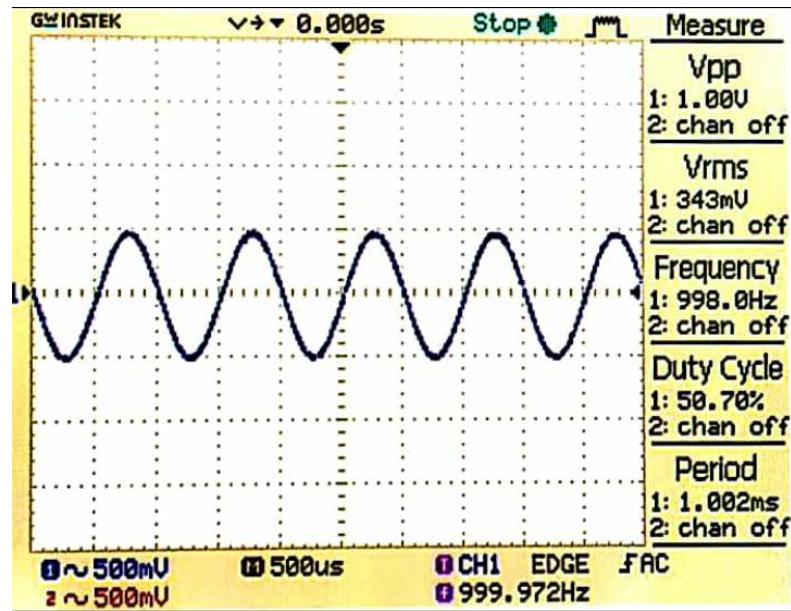
4.2. Hasil Eksperimen Penguin Audio Kelas D

Pada eksperimen penelitian ini dilakukan beberapa pengujian diantaranya adalah sinyal input, sinyal gergaji, sinyal output HO dan LO IRS2092, sinyal output Mosfet, dan sinyal output penguat audio kelas D. Penguin audio kelas D dihubungkan dengan beban speaker dengan besar impedansi 4Ω . Dari eksperimen tersebut didapatkan perhitungan yaitu penguatan, daya output, efisiensi, frekuensi respon, SNR (signal to noise ratio), Output Maksimal, dan THD.

4.2.1. Sinyal input

Pembacaan sinyal input dilakukan sebagai kalibrasi dengan besar tegangan 1V dan frekuensi yang bervariasi. Sinyal input berasal dari function generator keluaran dari GWINSTEK dengan tipe SFG-2010 yang diatur sinyal sinusoida. Dari function generator dihubungkan dengan osiloskop. Hasil dari kalibrasi sinyal input terlihat pada gambar dibawah

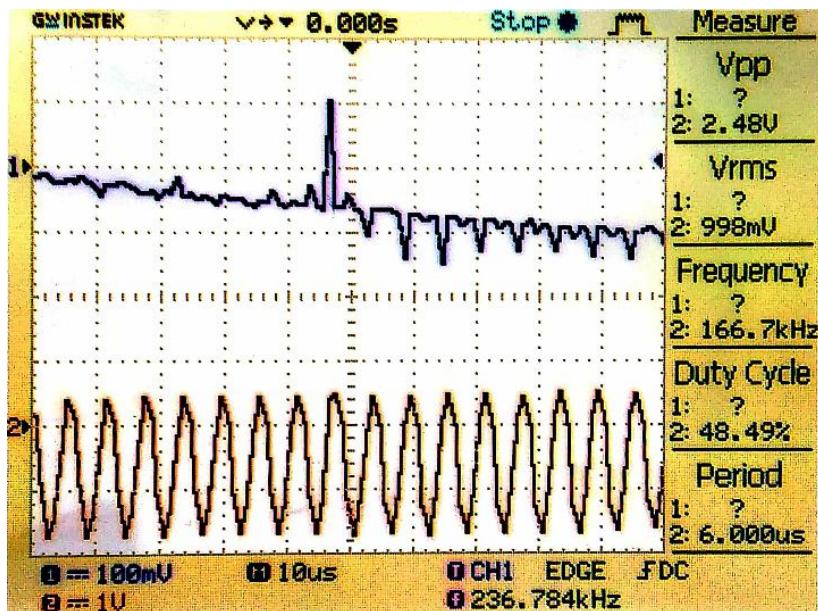
dengan besar V_{pp} 1V. Berdasarkan pengaturan osiloskop 500mV/div secara vertikal sinyal tersebut sebesar 2 kotak.



Gambar 4.4 Sinyal Input

4.2.2. Sinyal segitiga

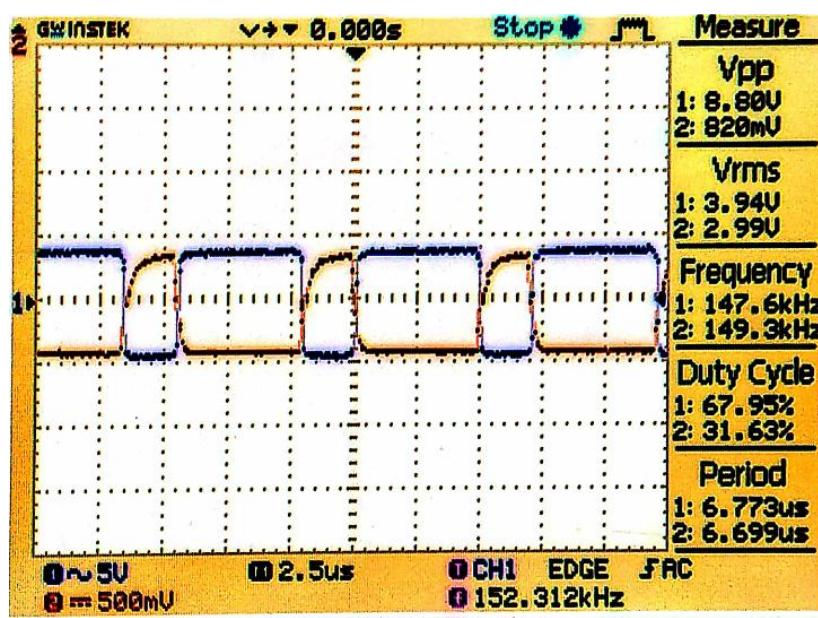
Pembacaan sinyal segitiga dilakukan untuk mengetahui bentuk sinyal yang akan dibandingkan dengan sinyal input oleh komparator. Sinyal tersebut berfungsi sebagai sinyal untuk memacu rangkaian penguat kelas D IRS2092 dapat berosilasi sendiri atau biasa disebut self-oscillating dengan rangkaian internal loop feedback. Rangkaian untuk pembacaan sinyal gergaji berada pada pin 4 yaitu COMP dari IC IRS2092. Dengan pengaturan osiloskop yaitu 1 volt/div dan 10us time/div menggunakan probe 10x. Hasil dari pengamatan sinyal gergaji dengan tegangan *peak to peak* akan dikalikan 10 dari 2,48V menjadi 24,8V dan frekuensi 166,7kHz seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.5 Sinyal Gergaji

4.2.3. Sinyal Output HO dan LO IRS2092

Sinyal pwm hasil pengolahan dari komparator IRS2092 akan diproses oleh gate driver sekaligus sebagai mosfet driver. Sinyal output dari IRS2092 diukur pada pin 14 untuk HO dan pin 11 untuk LO menggunakan osiloskop. Hasil pengamatan dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.6 Sinyal HO dan LO IRS2092

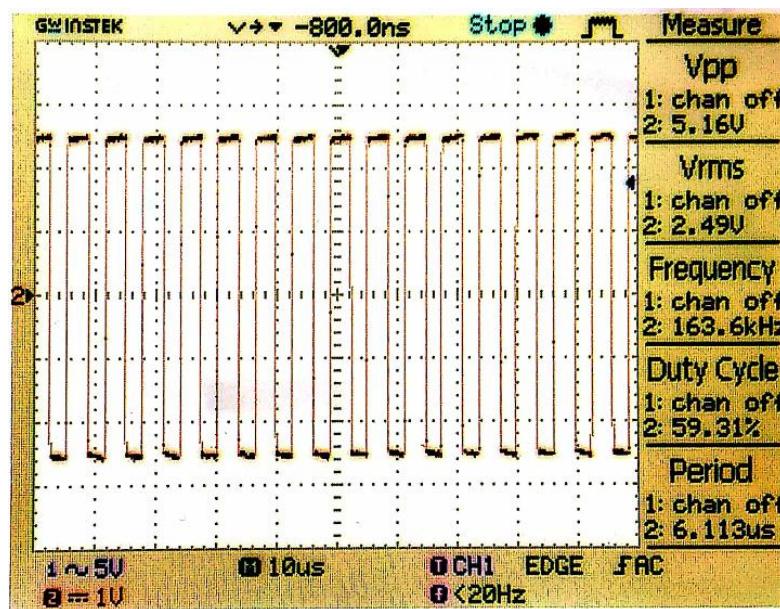
Dari hasil pengamatan dapat dilihat bahwa dengan input sinyal sinusoida 1V yang dibandingkan dengan sinyal gergaji oleh komparator didapatkan sinyal pwm yang diatur oleh gate driver dengan fungsi sebagai

mosfet driver dari pin HO berwarna kuning dan dari pin LO berwarna biru. Dengan pengaturan osiloskop pada kanal 1 5V/div dan kanal 2 500mV/div dengan waktu 2.5us time/div. Probe osiloskop yang digunakan adalah probe 10x. Dari gambar tersebut terlihat bahwa sinyal pwm secara bergantian on/off, hal tersebut untuk men-*driver* mosfet sehingga rangkaian dapat berfungsi. Sinyal HO dengan frekuensi terbaca 147,6kHz dan tegangan Vpp 8,80V yang dikalikan 10x sehingga menjadi 88V. Sedangkan untuk sinyal LO dengan frekuensi terbaca 149,3kHz dan tegangan *peak to peak* 820mV yang dikalikan 10x sehingga menjadi 8,2V.

4.2.4. Sinyal Output Mosfet

Sinyal output mosfet diukur menggunakan osiloskop antara mosfet dan rangkaian LPF. Probe osiloskop yang digunakan adalah 10x karena tegangan *peak to peak* yang dihasilkan besar dan melebihi ukuran volt/div maksimal dari osiloskop yang digunakan. pengaturan osiloskop yaitu 1V/div dan 10us time/div.

Sinyal output dari mosfet berbentuk pwm hasil dari penggabungan sinyal HO dan LO. Frekuensi sinyal pada osiloskop terbaca 163,6kHz dengan tegangan *peak to peak* sebesar 5,16V. Tegangan *peak to peak* dikalikan 10 menjadi 51,6V.



Gambar 4.7 Sinyal Output Mosfet

4.2.5. Sinyal Output Penguat Audio Kelas D IRS2092

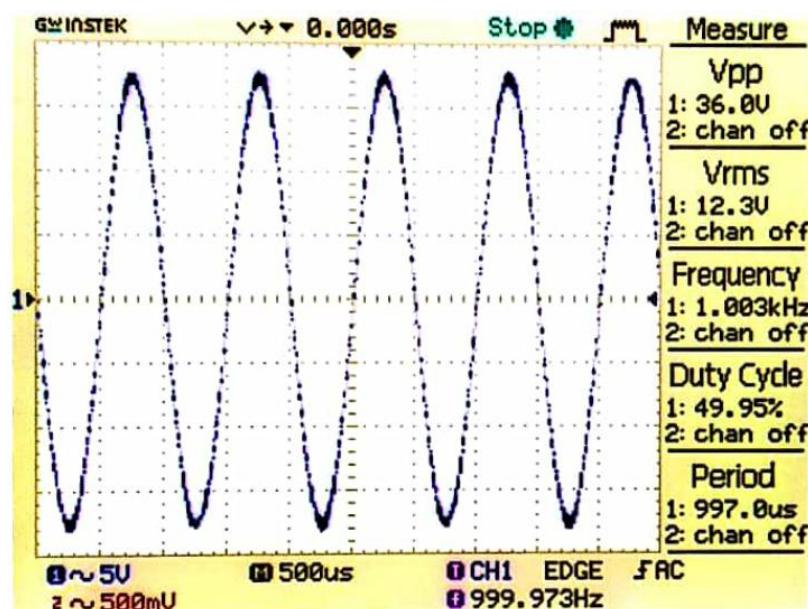
Sinyal output penguat audio kelas D IRS2092 diukur menggunakan osiloskop pada rangkaian yang terhubung ke beban. Probe osiloskop yang digunakan adalah probe 1x. Hal ini karena tegangan output masih dapat diukur dengan pengaturan volt/div maksimal dari osiloskop. Pengaturan osiloskop yaitu 5 volt/div dan 500us time/div.

Sinyal output dari penguat audio kelas D IRS2092 dapat dilihat pada gambar 4.5. Sinyal yang terbentuk dari rekonstruksi sinyal pwm dari mosfet oleh LPF yang mampu membentuk sinyal sinusoida. Frekuensi sinyal pada osiloskop terbaca 1kHz sama dengan frekuensi sinyal input. Tegangan *peak to peak* sebesar 36V. dengan konversi dari Vpp menjadi Vrms maka didapatkan hasil sebesar 25,452V.

$$V_{rms} = V_{pp} \times 0.707 \quad 4.1$$

$$V_{rms} = 36 \times 0.707$$

$$V_{rms} = 25.452 V$$



Gambar 4.8 Sinyal Output Penguat Audio Kelas D IRS2092

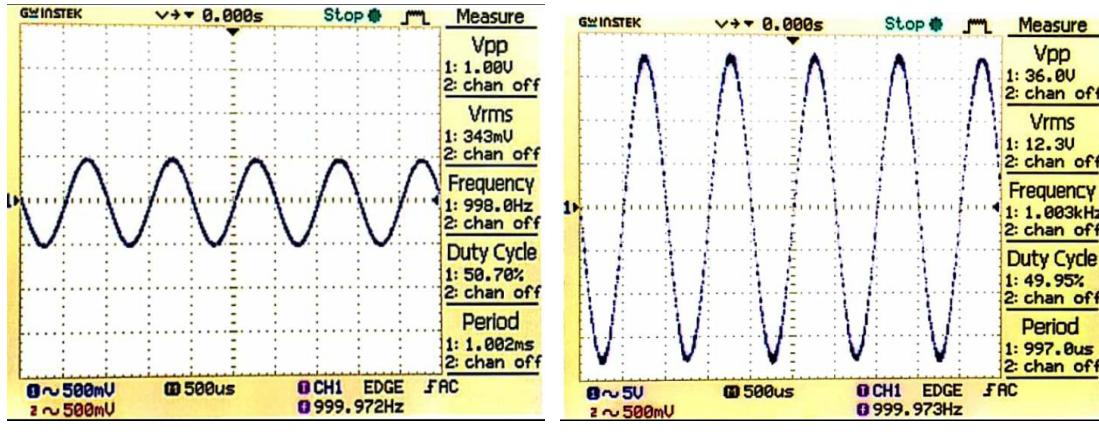
4.2.6. Penguatan Penguat Audio Kelas D IRS2092

Dari hasil pengukuran dengan frekuensi input yang bervariasi dari function generator dan dilihat pada osiloskop, maka mendapatkan hasil penguatan kelas D dengan menggunakan rumus :

$$\Delta V = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad 4.2$$

$$\Delta V = \frac{36V}{1V}$$

$$\Delta V = 36$$



Gambar 4.9 (a) Sinyal Vin, (b) Sinyal Vout

Tabel 4.1 Data Penguatan

Freq (Hz)	Output(V)
100	36
250	36
500	36
750	36
1000	36
2500	36
5000	36
7500	36
10000	36
12500	36
15000	36
17500	36
20000	36

Berdasarkan data tabel diatas penguatan audio kelas D stabil dan penguatannya rata dari frekuensi 100Hz-20kHz.

4.2.7. Efisiensi daya Penguat Audio Kelas D IRS2092

Pengukuran efisiensi merupakan total daya yang diterima oleh beban, dari hasil pengukuran penguat audio kelas D yang disupply menggunakan catu daya sebesar 65,8V secara simetris. Data yang diambil pada saat frekuensi 1kHz, untuk mengetahui daya output menggunakan rumus:

$$V_{rms} = V_{pp} \times 0.707$$

Maka didapatkan hasil:

$$V_{rms} = 36V \times 0.707$$

$$V_{rms} = 25.452 \text{ V}$$

Untuk menghitung daya maksimum menggunakan rumus:

$$P_o = \frac{(V_{rms})^2}{R_{beban}} \quad 4.3$$

Maka didapatkan hasil:

$$P_o = \frac{(25.452)^2}{4\Omega}$$

$$P_o = \frac{647.804}{4\Omega}$$

$$P_o = 161.95 \text{ W}$$

Dari hasil perhitungan diatas maka daya maksimum pada beban 4Ω , menghasilkan daya sebesar 161,95 Watt. Untuk mengetahui efisiensi dengan data pengukuran catu daya dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data Pengukuran Daya Masukkan

Catu Daya (V)	Arus (A)	Daya (W)
65,8	2,55	167,79

Efisiensi dihitung menggunakan rumus:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{161.95}{167.79} \times 100\%$$

$$\eta = 0.9652 \times 100\%$$

$$\eta = 96.52\%$$

4.2.8. Respon Frekuensi Penguat Audio Kelas D IRS2092

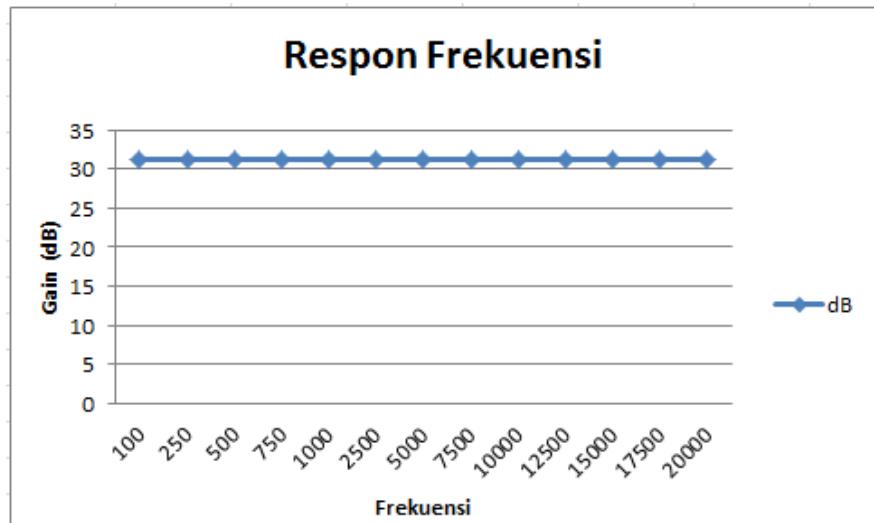
Dari data hasil pengukuran maka respon frekuensi dapat dibuat grafiknya, dengan cara merubah hasil penguatan ke dalam bentuk satuan (dB) menggunakan rumus:

$$\text{Penguatan Tegangan (dB)} = 20 \log \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad 4.4$$

Dari data tabel 4.1 diubah ke dalam satuan dB yang menghasilkan seperti pada tabel 4.3. Dari data tersebut menunjukkan bahwa penguatan audio kelas D IRS2092 stabil dari frekuensi 100Hz-20kHz. Grafik respon frekuensi dapat dilihat pada gambar 4.10.

Tabel 4.3 Data Respon Frekuensi Satuan dB

Freq (Hz)	Output(dB)
100	31,13
250	31,13
500	31,13
750	31,13
1000	31,13
2500	31,13
5000	31,13
7500	31,13
10000	31,13
12500	31,13
15000	31,13
17500	31,13
20000	31,13



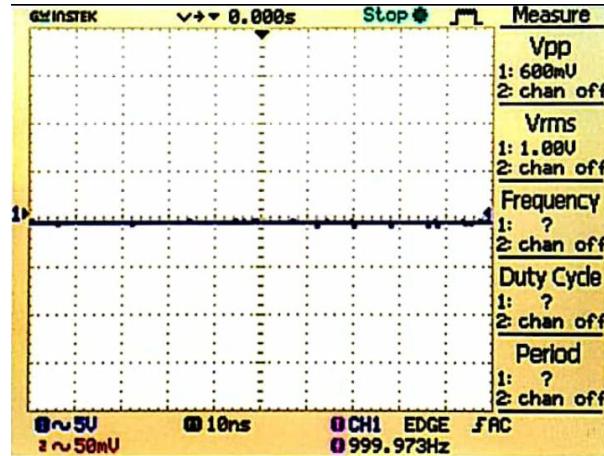
Gambar 4.10 Respon Frekuensi Penguat Audio Kelas D

4.2.9. SNR (Signal to Noise Rasio)

Pengukuran Signal Noise biasa disebut dengan SNR berguna untuk membandingkan tingkat kebisingan atau derau yang terjadi. SNR dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\text{SNR(dB)} = 20 \log \frac{V_{\text{rms}}}{V_n}$$

Dengan V_n merupakan sinyal noise dari penguat audio kelas D sesuai dengan pengukuran menggunakan osiloskop pada gambar 4.8.



Gambar 4.11 Sinyal Noise

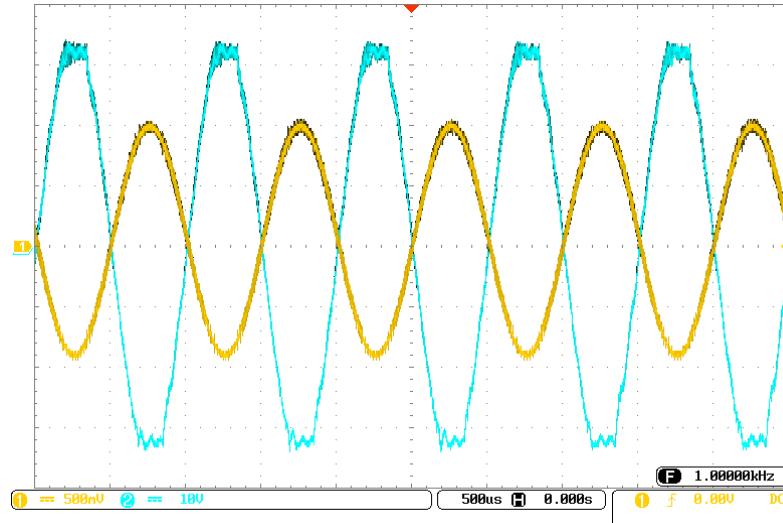
$$\text{SNR(dB)} = 20 \log \frac{25.452}{0.6 \times 10^{-3}}$$

$$\text{SNR(dB)} = 92.55 \text{ dB}$$

4.2.10. Batas Maksimal

Pengukuran batas maksimal digunakan untuk mengetahui besar maksimal dari sinyal input yang dapat diolah oleh penguat audio kelas D dan menghasilkan output tanpa distorsi. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan input dari function generator dengan frekuensi 1kHz dan memperbesar tegangannya. Untuk mengamati sinyal input dan output menggunakan osiloskop dengan pengaturan 500mVolt/div dan 10Volt/div dan untuk waktunya sebesar 500μs time/div.

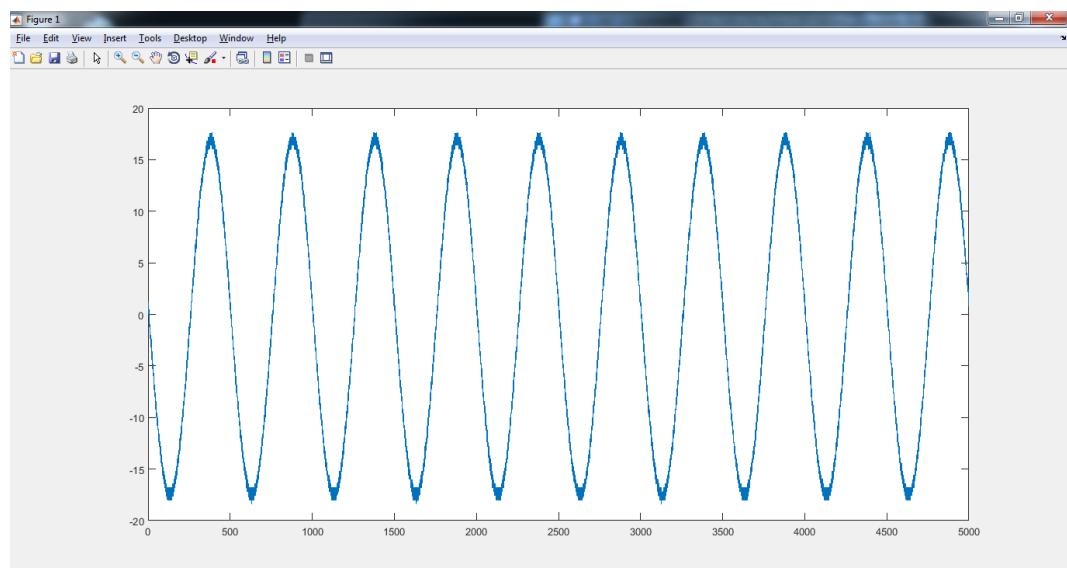
Didapatkan hasil seperti pada gambar 4.12. Pada gambar tersebut dapat diketahui bahwa besar tegangan peak to peak maksimal dari input sebesar 1,97 Volt seperti yang terlihat pada gambar sinyal kanal 1 berwarna kuning. Kemudian untuk sinyal outputnya berada pada tegangan peak to peak sebesar 67,6 Volt sudah mengalami distorsi berupa *clipping* seperti pada gambar sinyal kanal 2 berwarna biru.



Gambar 4.12 Batas Maksimal Clipping

4.2.11. THD (Total Harmonic Distortion)

Pengukuran Total Harmonic Distortion (THD) dilakukan untuk mengetahui besar distorsi dari sinyal output yang dihasilkan oleh penguat audio kelas D. Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan osiloskop. Data yang diambil disimpan dalam bentuk file CSV. Kemudian data tersebut dimasukkan ke dalam matlab. Data dari sinyal Output dari penguat audio kelas D dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

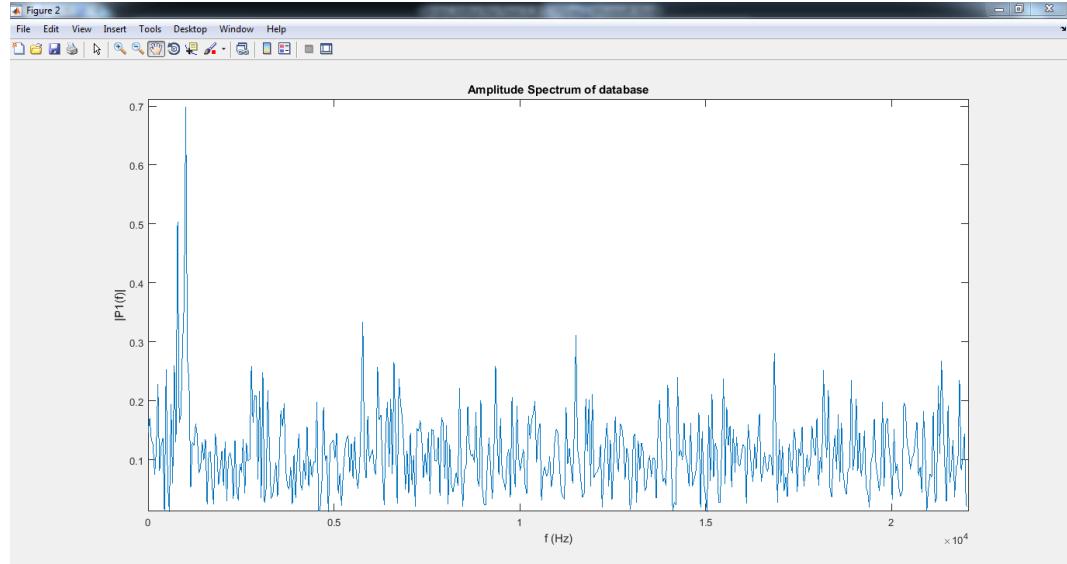


Gambar 4.13 Data Sinyal 1kHz

Pengambilan data pada frekuensi 1 kHz dengan tegangan input peak to peak 1 Volt seperti pada gambar diatas. Data sampling sesuai dengan aturan audio yaitu 44,1 kHz. Telihat pada gambar 4.14 bahwa data thd

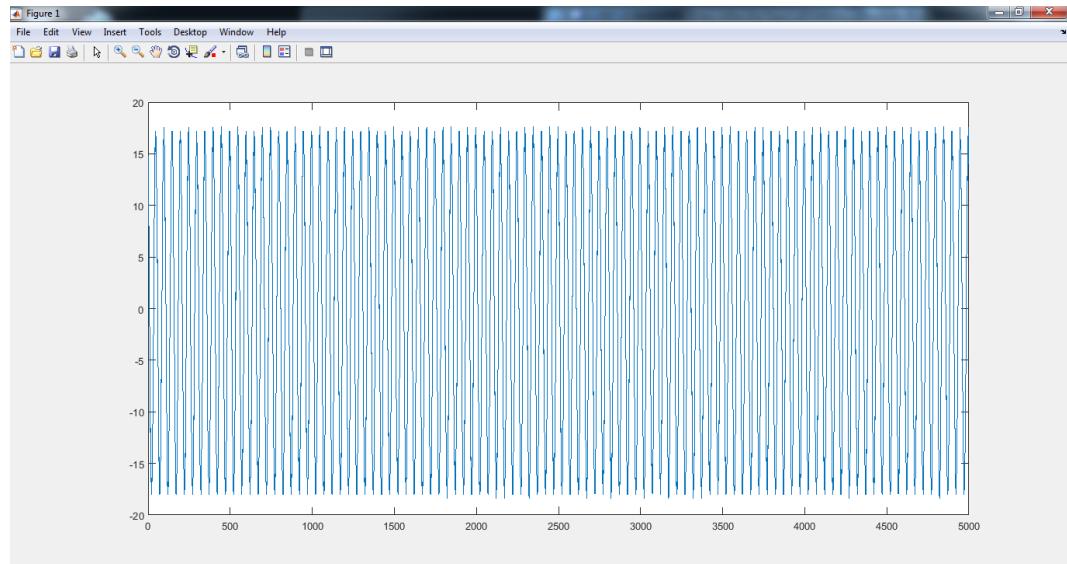
yang paling tinggi berada mendekati 1 kHz dan setelah dilakukan perhitungan didapatkan THD sebesar 0,287%.

$$THD(\%) = 100 * (10^{\frac{THD(dB)}{20}}) \quad 4.5$$



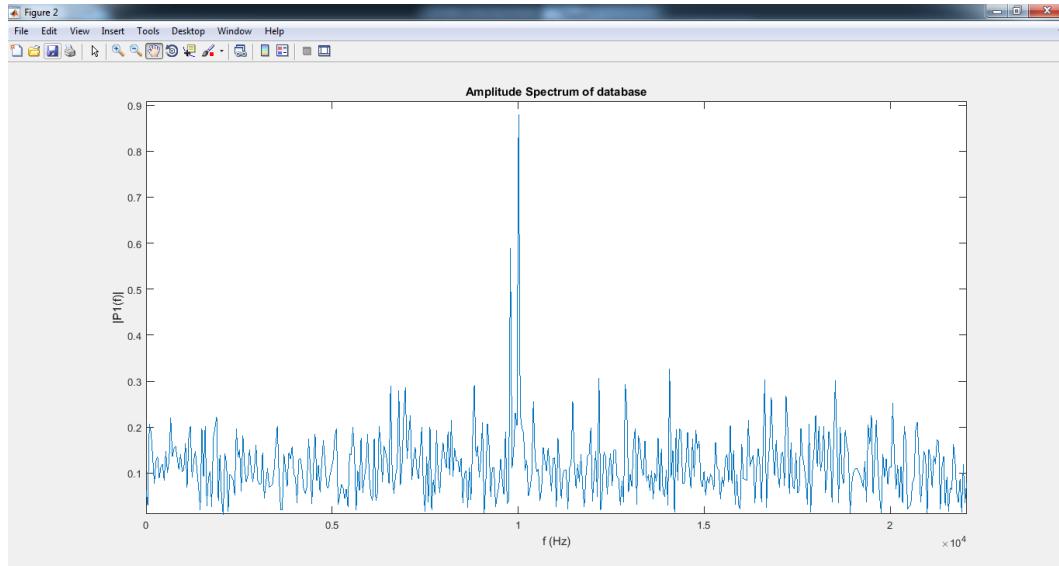
Gambar 4.14 Pengukuran THD 1 kHz

Kemudian diambil data pada frekuensi 10kHz dengan tegangan input peak to peak 1 Volt seperti pada gambar dibawah ini.



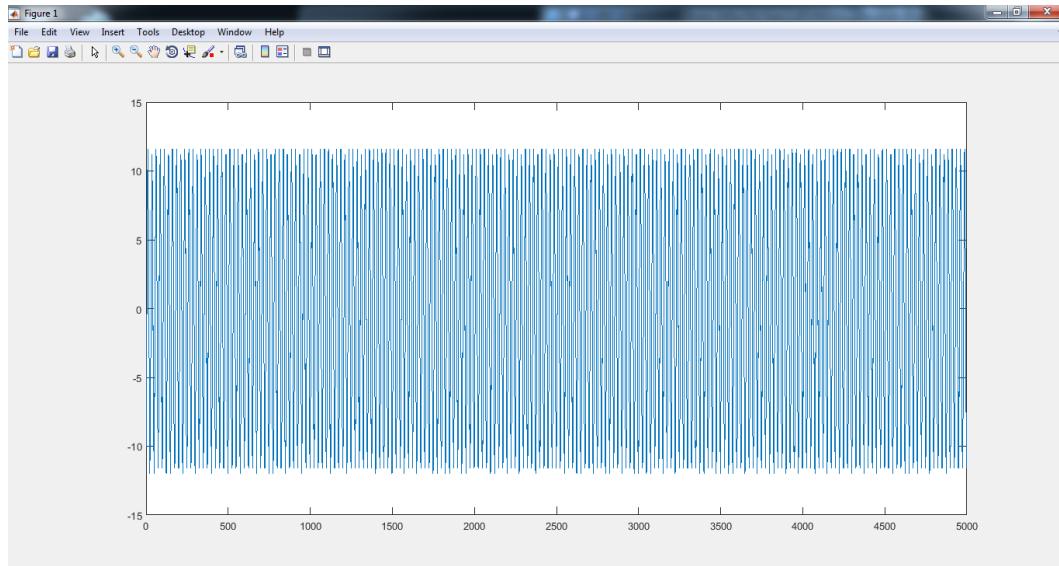
Gambar 4.15 Data Sinyal 10kHz

Data sampling sesuai dengan aturan audio yaitu 44,1 kHz. Telihat pada gambar 4.16 bahwa data thd yang paling tinggi berada mendekati 10 kHz dan setelah dilakukan perhitungan didapatkan THD sebesar 0,575%.



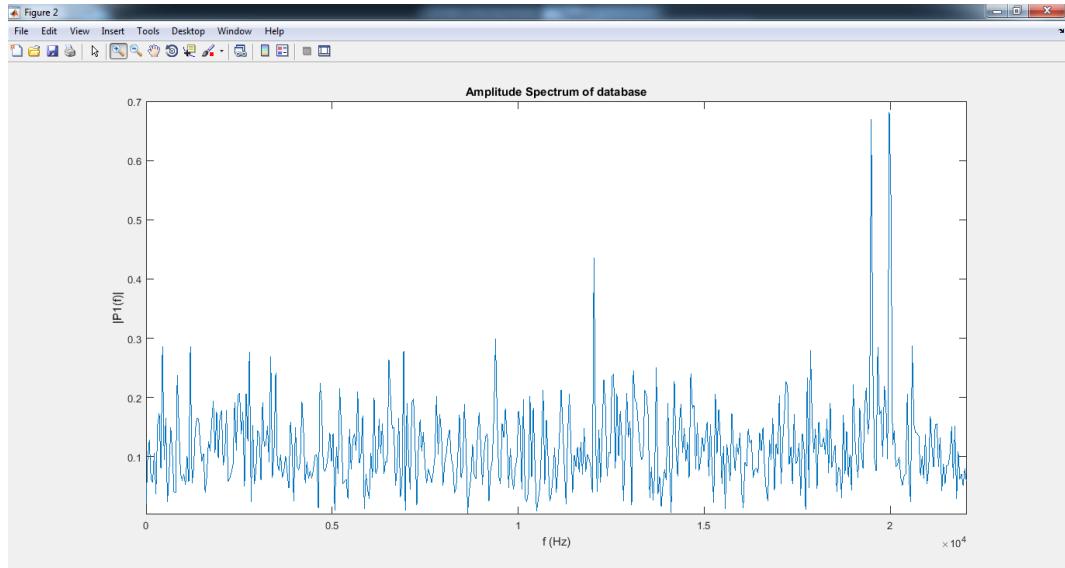
Gambar 4.16 Pengukuran THD 10 kHz

Selanjutnya diambil data pada frekuensi 20kHz dengan tegangan input peak to peak 1 Volt seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.17 Data Sinyal 20kHz

Data sampling sesuai dengan aturan audio yaitu 44,1 kHz. Telihat pada gambar 4.18 bahwa data thd yang paling tinggi berada mendekati 20 kHz dan setelah dilakukan perhitungan didapatkan THD sebesar 1,211%

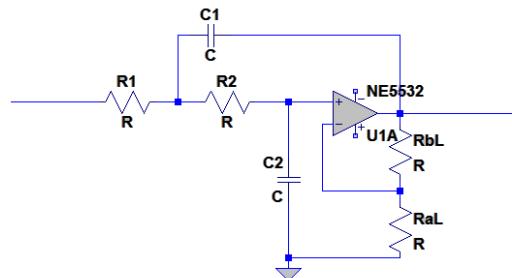


Gambar 4.18 Pengukuran THD 20 kHz

4.3. Rancangan Equalizer Sallen-Key

Perancangan equalizer sallen-key diawali dengan perhitungan untuk frekuensi *cutoff* dan penentuan besar dari komponen yang digunakan. Perhitungan menggunakan 3 jenis rangkaian yaitu LPF untuk frekuensi rendah, BPF untuk frekuensi menengah, dan HPF untuk frekuensi tinggi. Rumus perhitungan tiap rangkaian dimasukkan ke dalam software matlab. Untuk hasilnya seperti pada penjelasan berikut.

4.3.1. LPF



Gambar 4.19 Rangkaian LPF

Untuk menentukan besarnya komponen yang digunakan dan penentuan frekuensi *cutoff*, diperlukan transfer fungsi sebagai berikut.

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{\mu}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1-\mu}{R_2 C_2} \right) s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad 4.5$$

Dengan

$$\mu = 1 + \frac{R_B L}{R_A L} \quad 4.6$$

Dari rumus diatas ditentukan besar frekuensi *cutoff* 225Hz sesuai dengan frekuensi kerja dari *low pass filter* dan besar R1 dan R2 dipilih sebesar 15kΩ. Untuk kapasitornya dicari nilainya menggunakan rumus frekuensi *cutoff* seperti berikut.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad 4.7$$

Karena R1 dan R2 besarnya sama, begitu juga C1 dan C2 memiliki besar yang sama, maka menggunakan rumus sebagai berikut.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R C} \quad 4.8$$

$$225 = \frac{1}{2\pi \times (15 \times 10^3) \times C}$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times (15 \times 10^3) \times 225}$$

$$C = 47.15702 \times 10^{-9}$$

$$C = C_1 = C_2$$

Pada hasil perhitungan maka didapatkan nilai C1 dan C2 yang mendekati sebesar 47nF. Untuk rangkaian gainnya yaitu RaL dan RbL masing-masing menggunakan komponen sebesar 12kΩ dan 15kΩ. Dari besar komponen yang telah ditentukan, dimasukkan ke rumus yang telah ditulis pada software matlab. Didapatkan nilai gain seperti dibawah ini.

$$G = \mu$$

$$G = 1 + \frac{15k\Omega}{12k\Omega}$$

$$G = 1 + 1.25$$

$$G = 2.25$$

Kemudian untuk nilai Q mendapatkan hasil perhitungan seperti dibawah ini.

$$Q = \frac{\frac{1}{\sqrt{15k\Omega \times 15k\Omega \times 47nF \times 47nF}}}{\frac{1}{15k\Omega \times 47nF} + \frac{1}{15k\Omega \times 47nF} + \frac{1-\mu}{15k\Omega \times 47nF}}$$

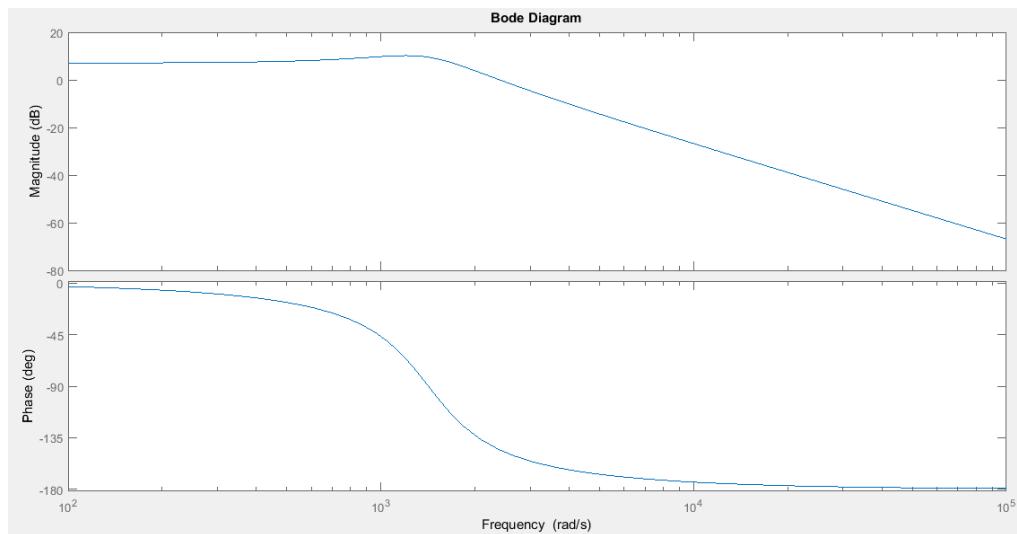
$$Q = \frac{1.4148 \times 10^3}{1.0638 \times 10^3}$$

$$Q = 1.3333$$

Untuk transfer fungsi dari rangkaian *low pass filter* ini menghasilkan perhitungan sebagai berikut.

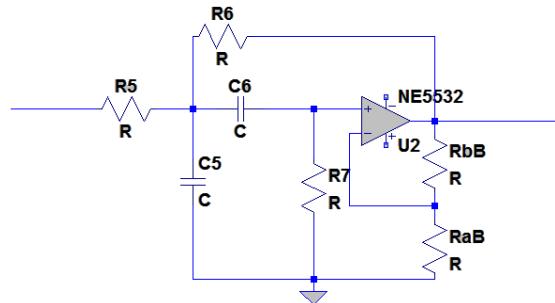
$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{4.527 \times 10^6}{s^2 + 1064s + (2.1012 \times 10^6)}$$

Bode diagram dari perhitungan *low pass filter sallen-key* diatas menghasilkan seperti gambar berikut ini.



Gambar 4.20 Bode Diagram LPF Sallen-Key

4.3.2. BPF



Gambar 4.21 Rangkaian BPF

Untuk menentukan besar komponen yang digunakan dan penentuan frekuensi *cutoff*, diperlukan transfer fungsi sebagai berikut.

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{\mu}{R_5 C_5} s}{s^2 + \left(\frac{1}{R_5 C_5} + \frac{1}{R_7 C_6} + \frac{1}{R_7 C_5} + \frac{1-\mu}{R_6 C_5} \right) s + \frac{R_5 + R_6}{R_5 R_6 R_7 C_5 C_6}} \quad 4.9$$

Dengan

$$\mu = 1 + \frac{R_p B}{R_a B} \quad 4.10$$

Dari rumus diatas ditentukan besar frekuensi *cutoff* dari *band pass filter* 1500Hz.

$$\omega_0^2 = (2\pi f_c)^2 \quad 4.11$$

$$\omega_0^2 = (2\pi \times 1500)^2$$

$$\omega_0^2 = (9424,778)^2$$

$$\omega_0^2 = 88826439,6$$

Kemudian untuk mencari nilai C6 dengan ditentukan besar R5, R6, R7, dan C5 adalah 4,7kΩ, 10kΩ, 33kΩ, dan 22nF menggunakan rumus sebagai berikut.

$$\omega_0^2 = \frac{R_5 + R_6}{R_5 R_6 R_7 C_5 C_6} \quad 4.12$$

$$88826439,6 = \frac{4700 + 10000}{4700 \times 10000 \times 33000 \times (22 \times 10^{-9}) \times C_6}$$

$$88826439,6 = \frac{14700}{34122 \times C_6}$$

$$C_6 = \frac{14700}{34122 \times 88826439,6}$$

$$C_6 = \frac{14700}{3,030936 \times 10^{12}}$$

$$C_6 = 4,849987 \times 10^{-9}$$

$$C_6 \approx 4,7 \text{ nF}$$

Untuk kapasitor C6 didapatkan paling mendekati dari hasil perhitungan adalah 4,7nF. Untuk rangkaian gainnya yaitu RaB dan RbB masing-masing menggunakan komponen sebesar 33kΩ dan 47kΩ. Dari besar komponen yang telah ditentukan, dimasukkan ke rumus yang telah ditulis pada software matlab. Didapatkan nilai gain seperti dibawah ini.

$$G = \frac{\frac{\mu}{R_5 C_5}}{\frac{1}{R_5 C_5} + \frac{1}{R_7 C_6} + \frac{1}{R_7 C_5} + \frac{1-\mu}{R_6 C_5}} \quad 4.13$$

$$G = \frac{\frac{2.4242}{4.7k\Omega \times 10k\Omega}}{\frac{1}{4.7k\Omega \times 22nF} + \frac{1}{10k\Omega \times 4.7nF} + \frac{1}{33k\Omega \times 22nF} + \frac{1-2.4242}{10k\Omega \times 22nF}}$$

$$G = \frac{2.3445 \times 10^4}{1.1022 \times 10^4}$$

$$G = 2.1271$$

Kemudian untuk nilai Q mendapatkan hasil perhitungan seperti dibawah ini.

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{R_5+R_6}{R_5R_6R_7C_5C_6}}}{\frac{1}{R_5C_5} + \frac{1}{R_7C_6} + \frac{1}{R_7C_5} + \frac{1-\mu}{R_6C_5}} \quad 4.14$$

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{4.7k\Omega+10k\Omega}{4.7k\Omega \times 10k\Omega \times 33k\Omega \times 22nF \times 4.7nF}}}{\frac{1}{4.7k\Omega \times 22nF} + \frac{1}{10k\Omega \times 4.7nF} + \frac{1}{33k\Omega \times 22nF} + \frac{1-2.4242}{10k\Omega \times 22nF}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{9.1661 \times 10^7}}{1.1022 \times 10^4}$$

$$Q = \frac{9.574 \times 10^3}{1.1022 \times 10^4}$$

$$Q = 0.8686$$

Untuk bandwidth hasil dari perhitungan adalah sebagai berikut.

$$BW = \frac{\left(\frac{Q}{2\pi \times \left(\frac{C_1C_2}{2} \right) \times \left(\frac{R_6}{2 \times R_5} \right) \times R_5} \right)}{Q} \quad 4.15$$

$$BW = \frac{\left(\frac{0.8686}{2\pi \times \left(\frac{22nF \times 4.7nF}{2} \right) \times \left(\frac{10k\Omega}{2 \times 4.7k\Omega} \right) \times 4.7k\Omega} \right)}{0.8686}$$

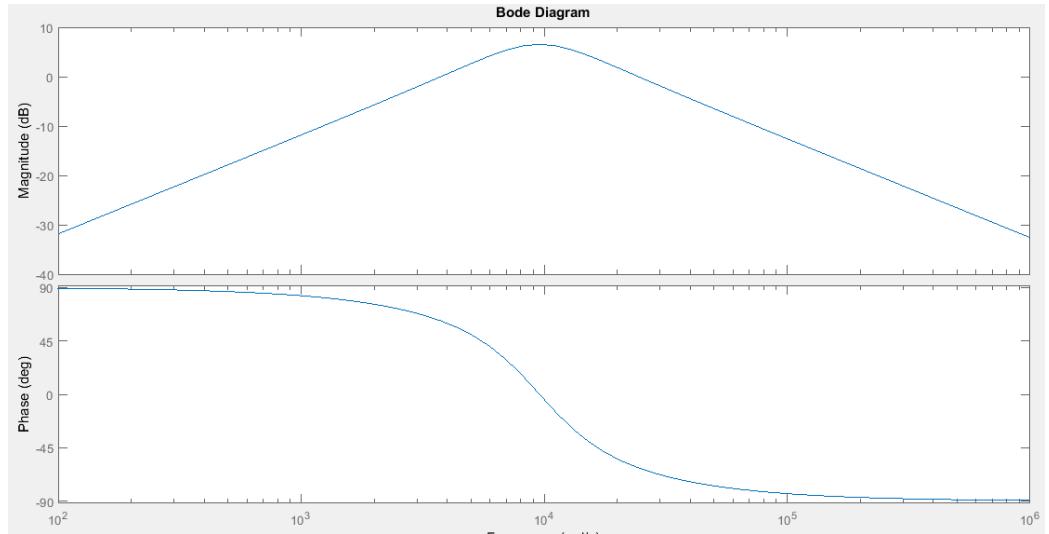
$$BW = \frac{2.0711 \times 10^3}{0.8686}$$

$$BW = 2384.3 \text{ Hz}$$

Untuk transfer fungsi dari rangkaian *band pass filter* ini menghasilkan perhitungan sebagai berikut.

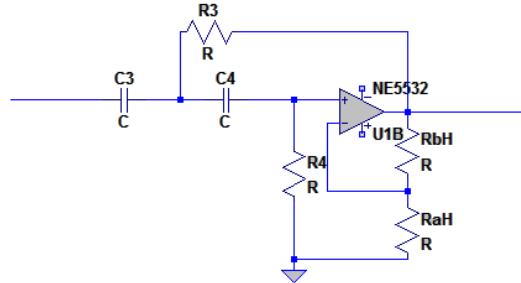
$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(2.345 \times 10^4)s}{s^2 + (1.102 \times 10^4)s + (9.166 \times 10^7)}$$

Bode diagram dari perhitungan *band pass filter sallen-key* diatas menghasilkan seperti gambar berikut ini.



Gambar 4.22 Bode diagram BPF Sallen-Key

4.3.3. HPF



Gambar 4.23 Rangkaian HPF

Untuk menentukan besar komponen yang digunakan dan penentuan frekuensi *cutoff*, diperlukan transfer fungsi sebagai berikut.

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\mu s^2}{s^2 + \left(\frac{1}{R_4 C_4} + \frac{1}{R_4 C_3} + \frac{1-\mu}{R_3 C_3} \right) s + \frac{1}{R_3 R_4 C_3 C_4}} \quad 4.16$$

Dengan

$$\mu = 1 + \frac{R_b H}{R_a H} \quad 4.17$$

Dari rumus diatas ditentukan besar frekuensi *cutoff* 7200Hz sesuai dengan frekuensi kerja dari *high pass filter* dan besar R3 dan R4 masing-masing 10kΩ. Untuk kapasitornya dicari nilainya menggunakan rumus frekuensi *cutoff* seperti berikut.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_3 R_4 C_3 C_4}} \quad 4.18$$

Karena R3 dan R4 besarnya sama, begitu juga C3 dan C4 memiliki besar yang sama, maka menggunakan rumus sebagai berikut.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad 4.19$$

$$7200 = \frac{1}{2\pi x (10x10^3) x C}$$

$$C = \frac{1}{2\pi x (10x10^3) x 7200}$$

$$C = 2.210485 \times 10^{-9}$$

$$C = C_3 = C_4$$

Pada hasil perhitungan maka didapatkan nilai C3 dan C4 yang mendekati sebesar 2.2nF. Untuk rangkaian gainnya yaitu RaH dan RbH masing-masing menggunakan komponen sebesar 12kΩ dan 15kΩ. Dari besar komponen yang telah ditentukan, dimasukkan ke rumus yang telah ditulis pada software matlab. Didapatkan nilai gain seperti dibawah ini.

$$G = \mu$$

$$G = 1 + \frac{15k\Omega}{12k\Omega}$$

$$G = 1 + 1.25$$

$$G = 2.25$$

Kemudian untuk nilai Q mendapatkan hasil perhitungan seperti dibawah ini.

$$Q = \frac{\frac{1}{\sqrt{10k\Omega x 10k\Omega x 2.2nF x 2.2nF}}}{\frac{1}{10k\Omega x 2.2nF} + \frac{1}{10k\Omega x 2.2nF} + \frac{1-\mu}{10k\Omega x 2.2nF}}$$

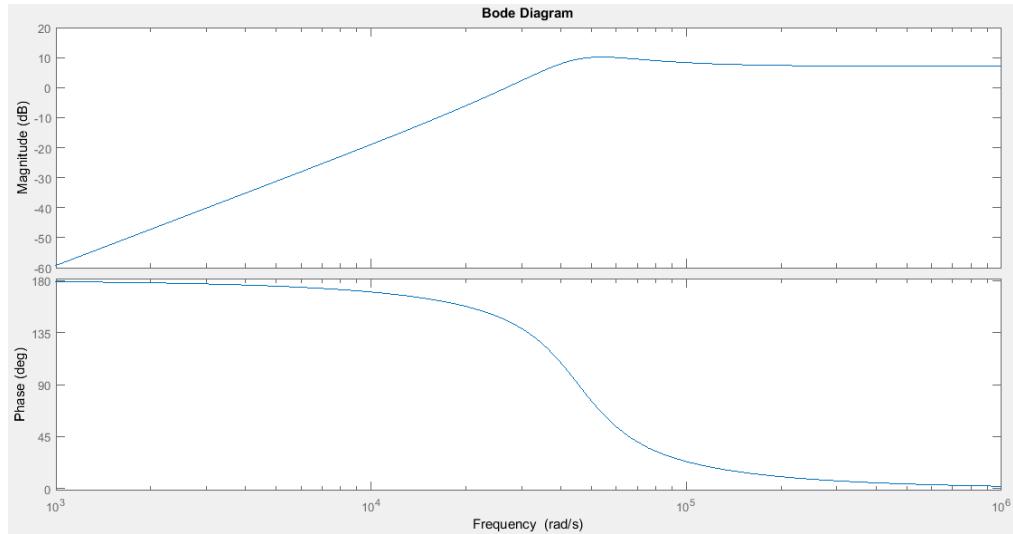
$$Q = \frac{4.54545 \times 10^4}{3.4091 \times 10^4}$$

$$Q = 1.333$$

Untuk transfer fungsi dari rangkaian *high pass filter* ini menghasilkan perhitungan sebagai berikut.

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{2.25 s^2}{s^2 + (3.409 \times 10^4)s + (2.066 \times 10^9)}$$

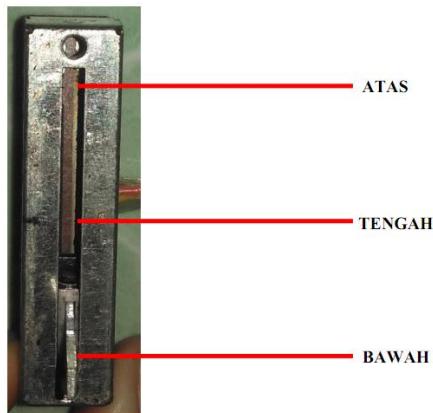
Bode diagram dari perhitungan *high pass filter sallen-key* diatas menghasilkan seperti gambar berikut ini.



Gambar 4.24 Bode diagram HPF Sallen-Key

4.4. Hasil Eksperimen Equalizer Sallen-Key

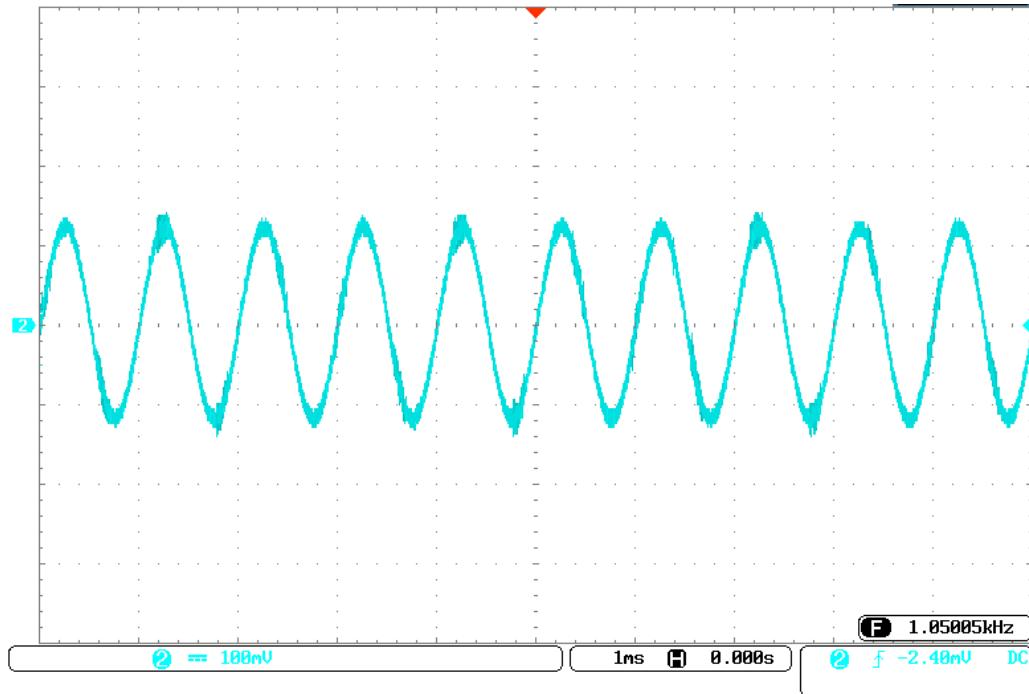
Hardware equalizer salien-key diawali dengan pengamatan sinyal input dari function generator. Kemudian pengamatan sinyal output hasil pengolahan filter untuk melihat frekuensi hasil dari masing-masing filter. Setiap filter dilakukan 3 keadaan berdasarkan posisi dari potensiometer yaitu atas, tengah, dan bawah.



Gambar 4.25 Posisi Pengukuran Potensiometer

4.4.1. Sinyal input

Pembacaan sinyal input dilakukan digunakan untuk mengkalibrasi bentuk sinyal berupa sinusoida dengan besar seminimal mungkin. Function generator dihubungkan dengan osiloskop untuk pengamatan dengan pengaturan 100mVolt/div dan 5ms time/div. Dapat dilihat hasil pengukuran pada gambar dibawah ini dengan besar tegangan 280mv.



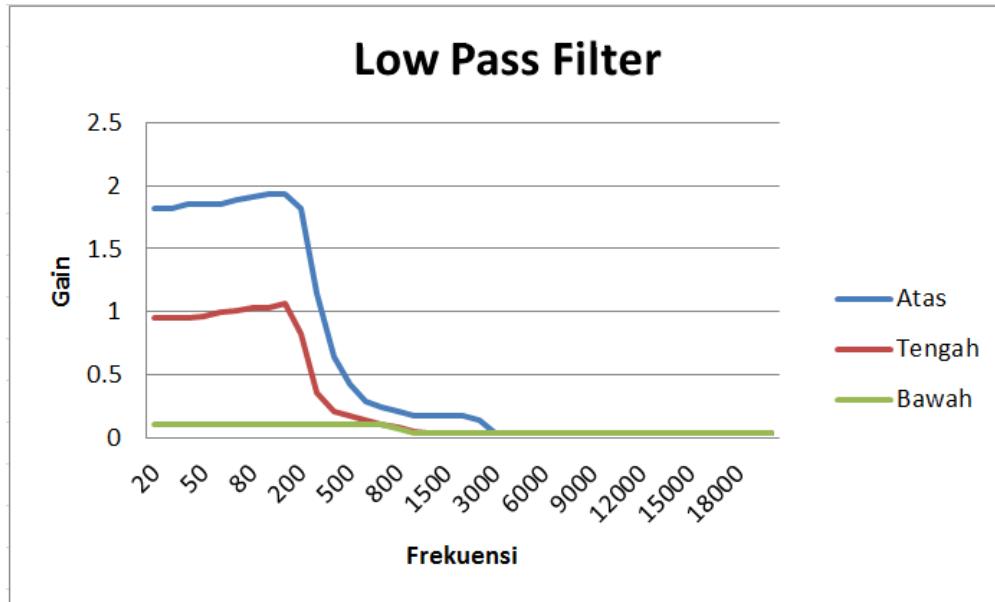
Gambar 4.26 Sinyal Input Equalizer

4.4.2. Sinyal Output LPF

Sinyal output pada *low pass filter* diukur menggunakan osiloskop dengan probe yang digunakan adalah 1x. Pengaturan osiloskop yaitu 200mVolt/div dan 5ms time/div. Dari pengukuran 3 kondisi posisi potensiometer dan variasi frekuensi dari 20Hz-20kHz didapatkan data seperti pada tabel 1 pada lampiran. Untuk mengetahui penguatan rangkaian menggunakan rumus:

$$\text{Gain} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

Dari tabel 1 pada lampiran dapat diamati bahwa pada sinyal output LPF dari frekuensi 20Hz-300Hz merupakan frekuensi kerjanya dengan gain paling besar mencapai 1,928 pada frekuensi 90Hz-100Hz. Setelah frekuensi 300Hz yaitu 400Hz-700Hz merupakan transisi peredaman frekuensi yang dilakukan oleh rangkaian LPF. Untuk lebih jelasnya dapat diamati pada gambar grafik dibawah ini.



Gambar 4.27 Grafik Sinyal Output LPF

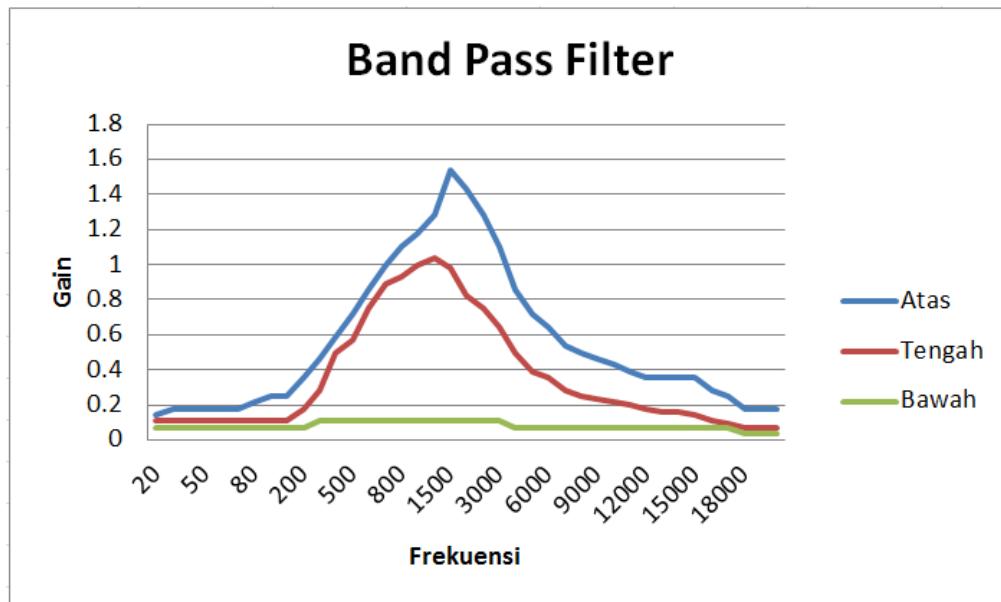
Pada gambar grafik diatas terdapat 3 warna sebagai indikator letak dari potensiometer. Grafik tersebut sudah sesuai dengan rentang kerja dari LPF yang telah ditentukan yaitu pada frekuensi *cutoff* 225 Hz sesuai dengan perhitungan pada matlab. Letak *cutoff* paling terlihat pada posisi potensiometer paling atas. Dan peredaman frekuensi lainnya dengan grafik yang curam kemudikan pada frekuensi 500Hz melandai mencapai frekuensi 2500Hz pada posisi paling atas sesuai dengan bode diagram perhitungan, hal tersebut memiliki pengaruh pada pemilihan komponen dan rangkaian yang dibuat.

4.4.3. Sinyal Output BPF

Sinyal output pada *band pass filter* diukur menggunakan osiloskop dengan probe yang digunakan adalah 1x. Pengaturan osiloskop yaitu 200mVolt/div dan 5ms time/div. Dari pengukuran 3 kondisi posisi potensiometer dan variasi frekuensi dari 20Hz-20kHz didapatkan data seperti pada tabel 2 pada lampiran. Untuk mengetahui penguatan rangkaian menggunakan rumus:

$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

Dari tabel 2 pada lampirann dapat diamati bahwa pada sinyal output BPF dari frekuensi 600Hz-4000Hz merupakan frekuensi kerjanya dengan gain paling besar mencapai 1,535. Pada frekuensi 1500Hz. Sebelum frekuensi 600Hz dan setelah frekuensi 4000Hz merupakan transisi peredaman frekuensi yang dilakukan oleh rangkaian BPF. Untuk lebih jelasnya dapat diamati pada gambar grafik dibawah ini.



Gambar 4.28 Grafik Sinyal Output BPF

Pada gambar grafik diatas terdapat 3 warna sebagai indikator letak dari potensiometer. Grafik tersebut sudah sesuai dengan rentang kerja dari BPF yang telah ditentukan yaitu pada frekuensi *cutoff* 1500 Hz sesuai dengan perhitungan pada matlab. Letak *cutoff* paling terlihat pada posisi potensiometer paling atas. Dan peredaman frekuensi lainnya dengan grafik melandai mencapai frekuensi 20Hz pada frekuensi rendah dan mencapai frekuensi 20kHz pada frekuensi tinggi sesuai dengan bode diagram perhitungan, hal tersebut memiliki pengaruh pada pemilihan komponen dan rangkaian yang dibuat.

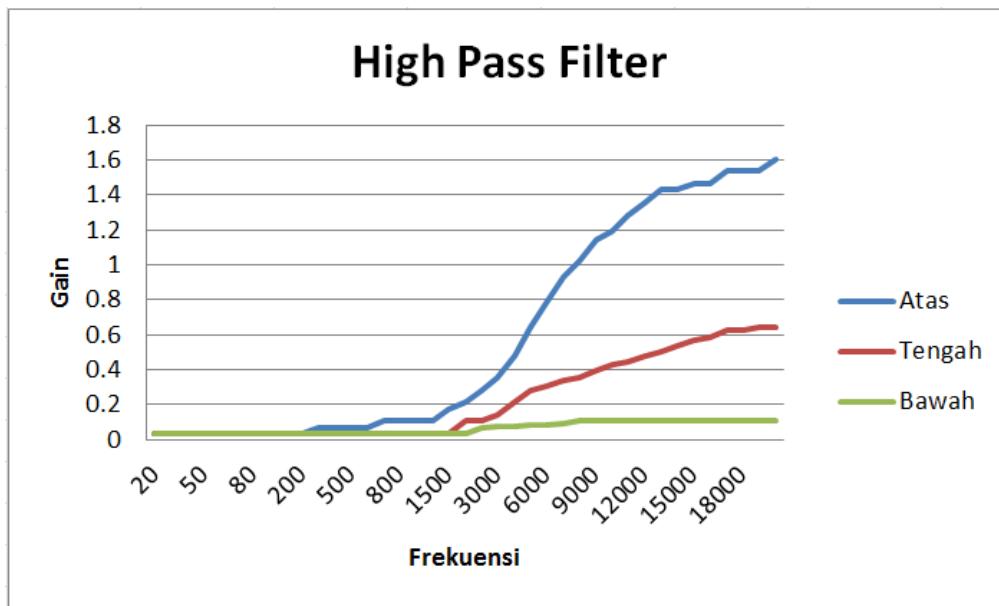
4.4.4. Sinyal Output HPF

Sinyal output pada *high pass filter* diukur menggunakan osiloskop dengan probe yang digunakan adalah 1x. Pengaturan osiloskop yaitu 200mVolt/div dan 5ms time/div. Dari pengukuran 3 kondisi posisi potensiometer dan variasi frekuensi dari 20Hz-20kHz didapatkan data

seperti pada tabel 3 pada lampiran. Untuk mengetahui penguatan rangkaian menggunakan rumus:

$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

Dari tabel 3 pada lampiran dapat diamati bahwa pada sinyal output HPF dari frekuensi 6000Hz-20kHz merupakan frekuensi kerjanya dengan gain paling besar mencapai 1,607. Pada frekuensi 20kHz. Sebelum frekuensi 6000Hz merupakan transisi peredaman frekuensi yang dilakukan oleh rangkaian HPF. Untuk lebih jelasnya dapat diamati pada gambar grafik dibawah ini.



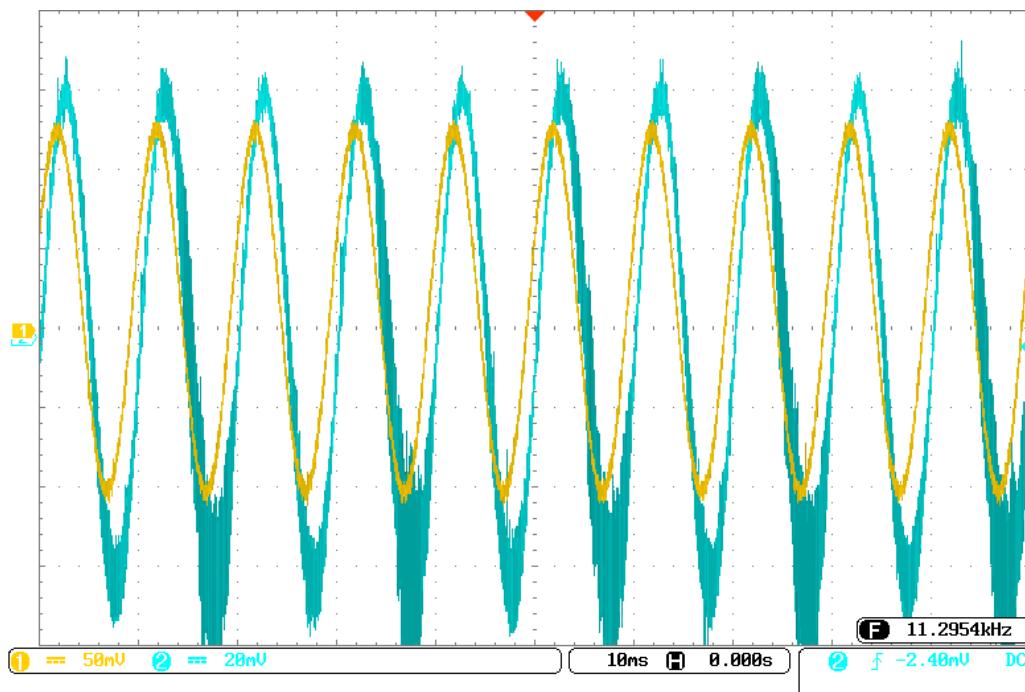
Gambar 4.29 Grafik Sinyal Output HPF

Pada gambar grafik diatas terdapat 3 warna sebagai indikator letak dari potensiometer. Grafik tersebut sudah sesuai dengan rentang kerja dari HPF yang telah ditentukan yaitu pada frekuensi *cutoff* 7000Hz sesuai dengan perhitungan pada matlab. Letak *cutoff* paling terlihat pada posisi potensiometer paling atas. Dan peredaman frekuensi lainnya dengan grafik melandai dari frekuensi 6000Hz ke 20Hz sesuai dengan bode diagram perhitungan, hal tersebut memiliki pengaruh pada pemilihan komponen dan rangkaian yang dibuat.

4.4.5. Paduan Dengan Penguat Audio Kelas D

Sinyal output hasil dari pengolahan *equalizer salien-key* menghasilkan gelombang sinusoida. Hal tersebut merupakan syarat utama untuk

dihubungkan dengan penguat audio kelas D harus berupa sinyal sinusoida. Untuk sinyal output dari equalizer seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.30 Sinyal Input dan Output Equalizer Sallen-key

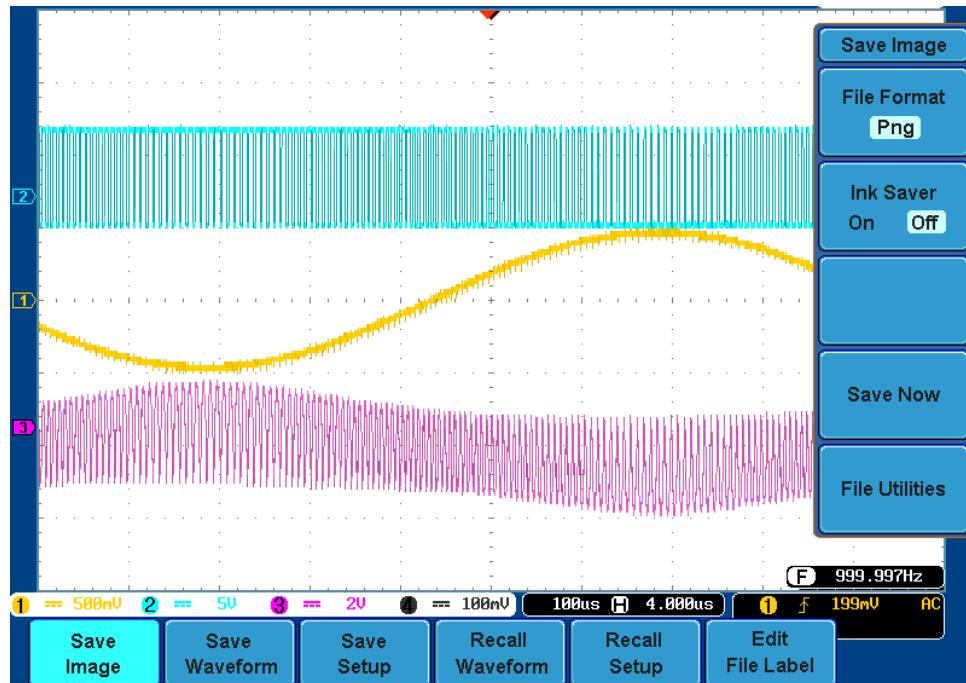
Dari gambar diatas merupakan gambar dari gelombang output equalizer salen-key. Dari ketiga filter yang dibuat kemudian disatukan menjadi satu input dan satu output dengan menambahkan resistor pada output setiap filter agar tidak saling distorsi antara filter satu dengan filter lainnya.

Sinyal sinus warna kuning merupakan sinyal input yang berasal dari function generator, sedangkan sinyal sinus berwarna biru merupakan sinyal output equalizer salen-key. Rangkaian equalizer salen-key menggunakan non-inverting sehingga sinyal input dan output memiliki periode yang sama seperti terlihat pada gambar.

Kemudian sinyal output equalizer salen-key dihubungkan ke input penguat audio kelas D. Setelah dihubungkan kemudian dilakukan pengamatan dari sinyal gergaji, sinyal pwm dan sinyal output. Hasil dari pengamatan dapat dilihat pada gambar 4.31.

Pada gambar 4.31 dapat dilihat bahwa terdapat tiga gelombang yaitu dengan warna biru, kuning, dan ungu. Dengan pengaturan probe osiloskop 10x dikarenakan sinyal yang diamati besar. Warna biru yang paling atas

merupakan sinyal pwm setelah rangkaian mosfet half-bridge yang diukur dengan pengaturan 5 volt/div. Warna kuning merupakan sinyal output dari penguat audio amplifier berupa gelombang sinyal sinus yang diukur dengan pengaturan 50m volt/div. Warna ungu merupakan sinyal integrator berupa gelombang sinyal gergaji yang diukur dengan pengaturan 2 volt/div.



Gambar 4.31 Sinyal Gergaji, PWM, dan Output Penguat Audio Kelas D

Hasil dari pengamatan gelombang tiap perubahan sinyal didapatkan bahwa penguat audio masih dapat berjalan dan berfungsi dengan baik. Mulai dari sinyal pembanding integrator berupa sinyal gergaji, sinyal pwm hasil dari penguatan mosfet, dan sinyal output setelah melewati rangkaian LPF berbentuk sinus. Terlihat bentuk sinus dari gambar diatas terdapat noise yang merupakan bawaan dari rangkaian equalizer salien-key.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai kesimpulan dan saran, sebagai hasil dan analisis pembuatan penguat audio kelas D dan equalizer sallen-key. kesimpulan disusun berdasarkan tujuan dari penelitian ini. Kesimpulan didapatkan berdasarkan analisis data yang telah dilakukan. Saran dibuat berdasarkan beberapa kendala yang dialami selama proses penelitian.

5.1. Kesimpulan

Dalam penelitian rancang bangun penguat audio kelas D yang dipadukan dengan equalizer sallen-key dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Telah berhasil dibuat rancang bangun penguat audio kelas D menggunakan IC IRS2092 khusus untuk penguat audio kelas D yang menggunakan topologi half-bridge pada mosfet IRFB4227. Penguat audio kelas D IRS2092 yang dibuat menghasilkan gelombang sinyal putput berbentuk sinusoidal dengan frekuensi sesuai input dan penguatan mencapai 36 kali. Dengan dihubungkan beban berupa speaker yang memiliki impedansi 4Ω menghasilkan efisiensi mencapai 96,52% melebihi dari perkiraan rancangan. Dari daya input 167,79 Watt dan daya output 161,95 Watt. Batas maksimal tegangan input yang dapat diproses penguat audio mencapai clipping sebesar 1,97 Volt. THD pada frekuensi 1kHz, 10kHz, dan 20kHz adalah 0,287%, 0,575%, dan 1,211%
2. Telah berhasil dibuat equalizer dengan topologi sallen-key menggunakan IC NE5532. Rangkaian dibuat menjadi 3 jenis yaitu LPF, BPF, dan HPF yang masing-masing bekerja sesuai dengan frekuensi cutoff yaitu 225 Hz, 1500 Hz, 7200 Hz sesuai dengan perhitungan pada matlab dan gain 1,928, 1,535, dan 1,607 kali dengan input 0,28V.

5.2. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat diambil beberapa saran sebagai berikut:

1. Kecepatan pensaklaran mosfet berpengaruh dengan hasil dari kinerja penguat audio kelas D dikarenakan akan mempengaruhi dari rangkaian LPF yang akan digunakan.

2. Pada pembuatan penguat audio kelas D dalam rangkaian LPF terutama induktor berupa toroid harus melakukan pengujian secara manual dengan memperkirakan lilitan yang digunakan agar penguat audio dapat berfungsi dan menghasilkan gelombang sinus.
3. Penggunaan jenis catu daya dan besarnya daya dapat mempengaruhi hasil dari output dan juga komponen yang digunakan dalam penguat audio agar tidak kelebihan ataupun kekurangan daya.
4. Pemilihan komponen yang memiliki toleransi kecil diperlukan agar rugi-rugi dapat dikurangi sehingga rangkaian dapat berfungsi normal dan efisiensi akan meningkat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hidayat, Rahmat. "Penerapan Audio Amplifier Stereo Untuk Beban Bersama dan Bergantian dengan Menggunakan Saklar Ganda sebagai Pengatur Beban". Vol.5 No.2. Juli-Desember 2013.
- [2] Kharis, M., Prastiyanto, D., dan Suryono. "Perbandingan Efisiensi Daya Penguat Audio Kelas AB dengan Penguat Audio Kelas D untuk Keperluan Sound System Lapangan". Vol.10 No.2. Juli-Desember 2018.
- [3] B. Juniarto. "Pengembangan Trainer Audio Amplifier Class D dan Class H sebagai Media Pembelajaran Kelas XII Program Keahlian Teknik Audio Video Di SMK Muhammadiyah 3 Yogyakarta." Skripsi. 2016.
- [4] Maldonado, Joseph dan Vega, Jeovany. "Class-D Power Amplifier". Senior Project. 2010.
- [5] Honda, Jun dan Cerezo, Jorge. "Class D Audio Amplifier Design". [Online]. Available: <http://www.irf.com/product-info/audio/classdtutorial.pdf>. [Diakses 10 Februari 2019].
- [6] Praditya, Rohmad. "Power Amplifier Kelas D Self Oscillating dengan Power Mosfet IRFP4227, IRFP250N dan IRFP460". Naskah Publikasi. 2017
- [7] Kartino. "IRS-900D Class-D Amplifier Tutorial". Makalah tidak dipublikasikan. 2012.
- [8] Santoso, Suryo. "Penguatan audio Kelas D Tanpa tapis LC dengan Modulasi Tiga aras." Thesis, 2013
- [9] Dewantoro, G., Dalu, F., dan Pragustha, T. "Penguatan Audio Kelas D Dengan Umpulan Balik Tipe BUTTERWORTH". Vol:5 No. 1. Maret 2016.
- [10] Honda, Jun, Rodrlguez, Manuel, dan Liu, Wenduo. "IRAUDAMP7D". [Online]. Available: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/481304/IRF/IRAUDAMP7D.html>. [Diakses 26 November 2019]

- [11] Quek, Yang Boon. "Class-D LC Filter Design". TI literature number SLOA119B. Available on the TI Internet site www.ti.com. (pp 3-5). 2015.
- [12] International Rectifier, "IRS2092 Datasheet," [Online]. Available: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/202425/IRF/IRS2092.html>. [Diakses 22 Oktober 2019].
- [13] International Rectifier, "IRFB4227 Datasheet," [Online]. Available: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/138120/IRF/IRFB4227PBF.html>. [Diakses 7 Mei 2019].
- [14] Chattopadhyay. "Dasar Elektronika". Jakarta: Universitas Indonesia. 1989
- [15] K. Su. Analog Filter Second Edition. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2003, pp. 217-247
- [16] Texas Instruments, "NE5532 Dual Low Noise Operational Amplifiers Datasheet," [Online]. Available: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/27244/TI/NE5532.html>. [Diakses 20 November 2019].
- [17] Hlaing, K.Y.Y. "Audio Equalizer Design Using Sallen-Key Filter". Vol.8 Issue 7. July 2019.
- [18] NTI audio, "Fast Fourier Transformation FFT-Basics," [Online]. Available: <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transform-fft>. [Diakses 4 Agustus 2020].
- [19] Dolphin Music, "What does the bit depth and sample rate," [Online]. Available: <http://www.dolphinmusic.co.uk/article/120-what-does-the-bit-depth-and-sample-rate-refer-to-.html>. [Diakses 04 Agustus 2020].

LAMPIRAN

1. Gambar Pengemasan Penguat Audio Kelas D Tampak Depan



2. Gambar Pengemasan Penguat Audio Kelas D Tampak Belakang



3. Gambar Pengemasan Penguat Audio Kelas D Tampak Atas



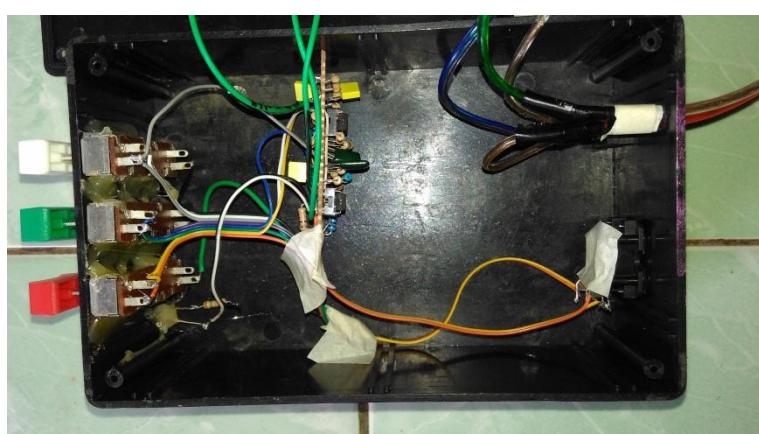
4. Gambar Pengemasan Equalizer Sallen-Key Tampak Depan



5. Gambar Pengemasan Equalizer Sallen-Key Tampak Belakang



6. Gambar Pengemasan Equalizer Sallen-Key Tampak Atas



Tabel 1 Data Pengukuran Sinyal Output LPF

Frekuensi	Low									
	Input	Atas	Gain	Input	Tengah	Gain	Input	Bawah	Gain	
20	280	510	1.821429	280	265	0.946429	280	30	0.107143	
30	280	510	1.821429	280	265	0.946429	280	30	0.107143	
40	280	520	1.857143	280	265	0.946429	280	30	0.107143	
50	280	520	1.857143	280	270	0.964286	280	30	0.107143	
60	280	520	1.857143	280	280	1	280	30	0.107143	
70	280	530	1.892857	280	283	1.010714	280	30	0.107143	
80	280	535	1.910714	280	288	1.028571	280	30	0.107143	
90	280	540	1.928571	280	290	1.035714	280	30	0.107143	
100	280	540	1.928571	280	300	1.071429	280	30	0.107143	
200	280	510	1.821429	280	230	0.821429	280	30	0.107143	
300	280	320	1.142857	280	100	0.357143	280	30	0.107143	
400	280	180	0.642857	280	60	0.214286	280	30	0.107143	
500	280	120	0.428571	280	50	0.178571	280	30	0.107143	
600	280	80	0.285714	280	40	0.142857	280	30	0.107143	
700	280	70	0.25	280	30	0.107143	280	30	0.107143	
800	280	60	0.214286	280	25	0.089286	280	20	0.071429	
900	280	50	0.178571	280	15	0.053571	280	10	0.035714	
1000	280	50	0.178571	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
1500	280	50	0.178571	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
2000	280	50	0.178571	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
2500	280	40	0.142857	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
3000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
4000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
5000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
6000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
7000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
8000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
9000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
10000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
11000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
12000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
13000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
14000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
15000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
16000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
17000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
18000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
19000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
20000	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	

Tabel 2 Data Pengukuran Sinyal Output BPF

Frekuensi	Mid									
	Input	Atas	Gain	Input	Tengah	Gain	Input	Bawah	Gain	
20	280	40	0.142857	280	30	0.107143	280	20	0.071429	
30	280	50	0.178571	280	30	0.107143	280	20	0.071429	
40	280	50	0.178571	280	30	0.107143	280	20	0.071429	
50	280	50	0.178571	280	30	0.107143	280	20	0.071429	
60	280	50	0.178571	280	30	0.107143	280	20	0.071429	
70	280	50	0.178571	280	30	0.107143	280	20	0.071429	
80	280	60	0.214286	280	30	0.107143	280	20	0.071429	
90	280	70	0.25	280	30	0.107143	280	20	0.071429	
100	280	70	0.25	280	30	0.107143	280	20	0.071429	
200	280	100	0.357143	280	50	0.178571	280	20	0.071429	
300	280	130	0.464286	280	80	0.285714	280	30	0.107143	
400	280	165	0.589286	280	140	0.5	280	30	0.107143	
500	280	200	0.714286	280	160	0.571429	280	30	0.107143	
600	280	240	0.857143	280	210	0.75	280	30	0.107143	
700	280	280	1	280	250	0.892857	280	30	0.107143	
800	280	310	1.107143	280	260	0.928571	280	30	0.107143	
900	280	330	1.178571	280	280	1	280	30	0.107143	
1000	280	360	1.285714	280	290	1.035714	280	30	0.107143	
1500	280	430	1.535714	280	275	0.982143	280	30	0.107143	
2000	280	400	1.428571	280	230	0.821429	280	30	0.107143	
2500	280	360	1.285714	280	210	0.75	280	30	0.107143	
3000	280	310	1.107143	280	180	0.642857	280	30	0.107143	
4000	280	240	0.857143	280	140	0.5	280	20	0.071429	
5000	280	200	0.714286	280	110	0.392857	280	20	0.071429	
6000	280	180	0.642857	280	100	0.357143	280	20	0.071429	
7000	280	150	0.535714	280	80	0.285714	280	20	0.071429	
8000	280	140	0.5	280	70	0.25	280	20	0.071429	
9000	280	130	0.464286	280	65	0.232143	280	20	0.071429	
10000	280	120	0.428571	280	60	0.214286	280	20	0.071429	
11000	280	110	0.392857	280	55	0.196429	280	20	0.071429	
12000	280	100	0.357143	280	50	0.178571	280	20	0.071429	
13000	280	100	0.357143	280	45	0.160714	280	20	0.071429	
14000	280	100	0.357143	280	45	0.160714	280	20	0.071429	
15000	280	100	0.357143	280	40	0.142857	280	20	0.071429	
16000	280	80	0.285714	280	30	0.107143	280	20	0.071429	
17000	280	70	0.25	280	25	0.089286	280	20	0.071429	
18000	280	50	0.178571	280	20	0.071429	280	10	0.035714	
19000	280	50	0.178571	280	20	0.071429	280	10	0.035714	
20000	280	50	0.178571	280	20	0.071429	280	10	0.035714	

Tabel 3 Data Pengukuran Sinyal Output HPF

Frekuensi	High									
	Input	Atas	Gain	Input	Tengah	Gain	Input	Bawah	Gain	
20	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
30	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
40	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
50	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
60	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
70	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
80	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
90	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
100	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
200	280	10	0.035714	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
300	280	20	0.071429	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
400	280	20	0.071429	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
500	280	20	0.071429	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
600	280	20	0.071429	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
700	280	30	0.107143	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
800	280	30	0.107143	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
900	280	30	0.107143	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
1000	280	30	0.107143	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
1500	280	50	0.178571	280	10	0.035714	280	10	0.035714	
2000	280	60	0.214286	280	30	0.107143	280	10	0.035714	
2500	280	80	0.285714	280	30	0.107143	280	20	0.071429	
3000	280	100	0.357143	280	40	0.142857	280	21	0.075	
4000	280	135	0.482143	280	60	0.214286	280	22	0.078571	
5000	280	180	0.642857	280	80	0.285714	280	23	0.082143	
6000	280	220	0.785714	280	85	0.303571	280	24	0.085714	
7000	280	260	0.928571	280	95	0.339286	280	25	0.089286	
8000	280	285	1.017857	280	100	0.357143	280	30	0.107143	
9000	280	320	1.142857	280	110	0.392857	280	30	0.107143	
10000	280	335	1.196429	280	120	0.428571	280	30	0.107143	
11000	280	360	1.285714	280	125	0.446429	280	30	0.107143	
12000	280	380	1.357143	280	135	0.482143	280	30	0.107143	
13000	280	400	1.428571	280	140	0.5	280	30	0.107143	
14000	280	400	1.428571	280	150	0.535714	280	30	0.107143	
15000	280	410	1.464286	280	160	0.571429	280	30	0.107143	
16000	280	410	1.464286	280	165	0.589286	280	30	0.107143	
17000	280	430	1.535714	280	175	0.625	280	30	0.107143	
18000	280	430	1.535714	280	175	0.625	280	30	0.107143	
19000	280	430	1.535714	280	180	0.642857	280	30	0.107143	
20000	280	450	1.607143	280	180	0.642857	280	30	0.107143	