



PENURUNAN TOTAL HARMONIC DISTORTION (THD) PADA PENGUAT AUDIO KELAS D MENGGUNAKAN METODE MODIFIED QUANTUM BEHAVED PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (MQPSO)

TESIS

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
MINAT SISTEM KONTROL DAN ELEKTRONIKA**

**Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Magister Teknik**



MOH UHIDA SUBHAN

NIM. 156060300111033

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2019



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xi
RINGKASAN.....	xii
BAB IPENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB HTINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Pengenalan Penguat Audio.....	7
2.2 Klasifikasi Penguat Audio.....	8
2.2.1 Penguat Audio Kelas A.....	9
2.2.2 Penguat Audio Kelas B.....	11
2.2.3 Penguat Audio Kelas AB.....	12
2.2.4 Penguat Audio Kelas D.....	14
2.3 Rangkaian <i>loop</i> terbuka.....	17
2.4 Rangkaian <i>loop</i> tertutup.....	18
2.5 Kontroler dan Kompensator.....	18
2.5.1 Kontrol <i>Proporsional</i> (P).....	19



2.5.2	Kontrol <i>Integratif</i> (I).....	20
2.5.3	Kompensator <i>Proporsional Integral</i> (PI).....	20
2.6	Modified Quantum Behaved Particle Swarm Optimization (MQPSO).....	22
BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN		
3.1	Kerangka Konsep Penelitian.....	25
3.2	Variabel Penelitian.....	27
3.3	Hipotesis.....	27
BAB IV METODE PENELITIAN		
4.1	Tempat dan Waktu Penelitian.....	28
4.2	Bahan dan Peralatan.....	28
4.3	Identifikasi Masalah.....	28
4.4	Pengambilan Data.....	28
4.5	Perancangan Sistem.....	29
4.6	Proses Optimasi.....	32
4.7	Pengujian Sistem.....	34
4.8	Analisis dan Penarikan Kesimpulan.....	34
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		
5.1	Pengujian Tanpa Optimasi menggunakan Multisim.....	36
5.2	Pengujian dengan Optimasi MQPSO menggunakan Multisim.....	37
5.3	Pengujian Tanpa Optimasi menggunakan Matlab Simulink.....	38
5.4	Pengujian dengan Optimasi MQPSO menggunakan Matlab Simulink.....	39
5.5	Analisis hasil pengujian.....	40
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		41
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi elektronik di era kekinian sangat cepat. Berbagai perangkat elektronik di bidang audio visual semula mempunyai bentuk yang cukup besar dengan kebutuhan daya tinggi, saat ini berubah menjadi perangkat yang sederhana dengan konsumsi daya rendah. Perangkat elektronik seperti televisi LED, Notebook, smartphone, dan perangkat portabel lainnya sebagai contoh perkembangan teknologi elektronik (Hwang et al., 2014) . Setiap perangkat elektronik tersebut dilengkapi sistem penguat audio yang mengharuskan perangkatnya mempunyai bentuk yang dapat disesuaikan, konsumsi daya rendah, efisiensi tinggi dan linieritas yang baik. Perkembangan teknologi seperti ini, menjadi tantangan besar untuk menghadirkan penguat audio dengan persyaratan tersebut (Hwang et al., 2014; Kinyua et al., 2015).

Penguat audio analog yang dikategorikan sebagai kelas A, B, AB, mempunyai efisiensi kurang dari 80% dan membutuhkan daya yang tinggi (Wenfeng Yu et al., 2009). Dalam kondisi ideal, Penguat audio kelas A mempunyai efisiensi daya maksimal sebesar 25%, kelas B 78% dan kelas AB mendekati 78% (Schubert Thomas et al., 2015). Melihat efisiensi pada penguat audio analog di bawah 80%, dirancang penguat audio *switching* (digital) yang mempunyai efisiensi lebih dari 90% (Chang et al., 2001). Penguat *switching* ini dikategorikan sebagai Penguat audio kelas D yang bekerja secara penyaklaran dari sinyal *Pulse With Modulation* (PWM) yang dibangkitkan dari modulasi sinyal audio input 20Hz – 20KHz dan sinyal segitiga yang dibangkitkan oleh generator pembangkit sinyal segitiga. Sinyal PWM ini akan dikuatkan oleh penguat Mosfet yang bekerja secara penyaklaran (*switching*). Sinyal keluaran dari penguat mosfet akan dilewatkan *low pass filter* untuk mengubah kembali sinyal PWM menjadi sinyal audio sinusioda yang akan diteruskan ke loudspeaker . Sebagai penguat *non linier*, distorsi harmonik menjadi permasalahan tersendiri yang dapat mempengaruhi efisiensi dan kejernihan suara dari penguat audio.



Banyak penelitian telah dikembangkan pada Penguat audio kelas D untuk mengurangi distorsi dan meningkatkan efisiensi antara lain penelitian yang dikhususkan pada sistem umpan balik negatif menggunakan *inverter base OTAs* (Hwang et al., 2014), menggunakan *PWM feedback loop* (Lam et al., 2013), dan sistem *selfoscillating modulation with complete feedback network* (Wenfeng Yu et al., 2009). Sistem umpan balik negatif terbukti dapat memperkecil *Total harmonic Distortion* (THD) dan meningkatkan efisiensi (Chang et al., 2001).

Sistem umpan balik negatif pada penelitian ini (Hwang et al., 2014) menggunakan rangkaian Kompensator *Proportional Integral* (PI) untuk memperbaiki dari sistem umpan balik negatif menggunakan rangkaian integrator yang belum maksimal dalam menekan distorsi harmonik yang dihasilkan oleh inti ferit dari *low pass filter* (LPF). Permasalahan pada Kompensator PI ini terletak pada penalaan *gain* yang sangat berpengaruh pada kestabilan sistem. Jika *gain* terlalu besar, maka sistem tidak stabil karena sistem umpan balik akan mendeteksi *error* terus menerus. Sedangkan jika *gain* kecil maka sistem akan stabil karena *error* di bawah tegangan referensi. Kondisi ini sangat berpengaruh pada efisiensi karena terdapat *error steady state*. (Hwang et al., 2014). Dalam meningkatkan kestabilan sistem, dibutuhkan keseimbangan pengaturan gain yang optimal pada Kompensator PI untuk memperkecil *error* sehingga *Total Harmonic Distortion* (THD) dapat diperkecil dan efisiensi daya dapat maksimal.

Kompensator PI terdiri atas rangkaian umpan balik R dan C. Kontrol PI pada kompensator berfungsi untuk memperkecil *error* dan menstabilkan sistem pada frekuensi rendah (Hwang et al., 2014). Bukan hal yang mudah untuk memperoleh parameter nilai R dan C yang optimal pada Kompensator PI. Diperlukan optimasi penalaan parameter-parameter Kompensator PI sebagai pelatihan dan pembelajaran (Adriansyah, A., 2006).

Penelitian yang relevan sebagai acuan optimasi pada rangkaian kompensator menggunakan Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) adalah penelitian tentang optimasi *low pass filter* analog *butterworth* orde 4 (Fadloulah et al., 2017). Penggunaan algoritma ini digunakan untuk mencari nilai resistor dan capacitor yang optimal dengan mencari faktor *error* terkecil. Hasilnya ditunjukkan bahwa algoritma PSO mempunyai faktor *error* paling kecil. PSO dapat digunakan



untuk menyelesaikan permasalahan secara cepat dan dapat dibuktikan (Kennedy, J et al., 1995) tetapi kelemahan PSO adalah hasil yang didapatkan bukan *global optimal* tetapi pada *local optimal* (Omkar et al., 2009).

Pada penelitian selanjutnya algoritma *Modified Particle Swarm Optimization* (MQPSO) (Rehman et al., 2019) digunakan pada perangkat elektromagnetik. Hasilnya, dibanding menggunakan algoritma GQPSO, QPSO, LIQPSO, MQPSO ini mempunyai kecepatan konvergensi dalam pencarian global.

Pada penelitian ini diusulkan Penurunan THD dan mempercepat kestabilan sistem Penguat audio kelas D menggunakan Metode MQPSO dengan mengoptimasi parameter Kompensator PI.

1.2 Rumusan Masalah

Penurunan THD pada penguat audio kelas D dan mempercepat kestabilan rangkaian dengan mengoptimasi parameter kompensator PI menggunakan Metode MQPSO sebagai permasalahan yang akan diselesaikan pada penelitian ini.

1.2 Tujuan penelitian

Mendapatkan penurunan THD dengan waktu minimum pada Penguat audio kelas D dengan mengoptimasi parameter Kompensator PI menggunakan Metode *Modified Quantum behaved Particle Swarm Optimization* (MQPSO).

1.3 Batasan masalah

1. Penelitian ini secara keseluruhan menggunakan Simulasi Sistem Penguat audio kelas D tipe analog.
2. Parameter utama yang dicari adalah nilai C_2 , R_2 , dan R_1 Kompensator
3. Pemodelan rangkaian menggunakan Simulink MATLAB dan simulasi multisim.

1.4 Manfaat Penelitian

Pengembangan Sistem Penguat audio kelas D yang mempunyai THD yang rendah dan mempunyai waktu kestabilan yang lebih cepat dengan Metode MQPSO sebagai pengembangan penelitian yang akan datang.



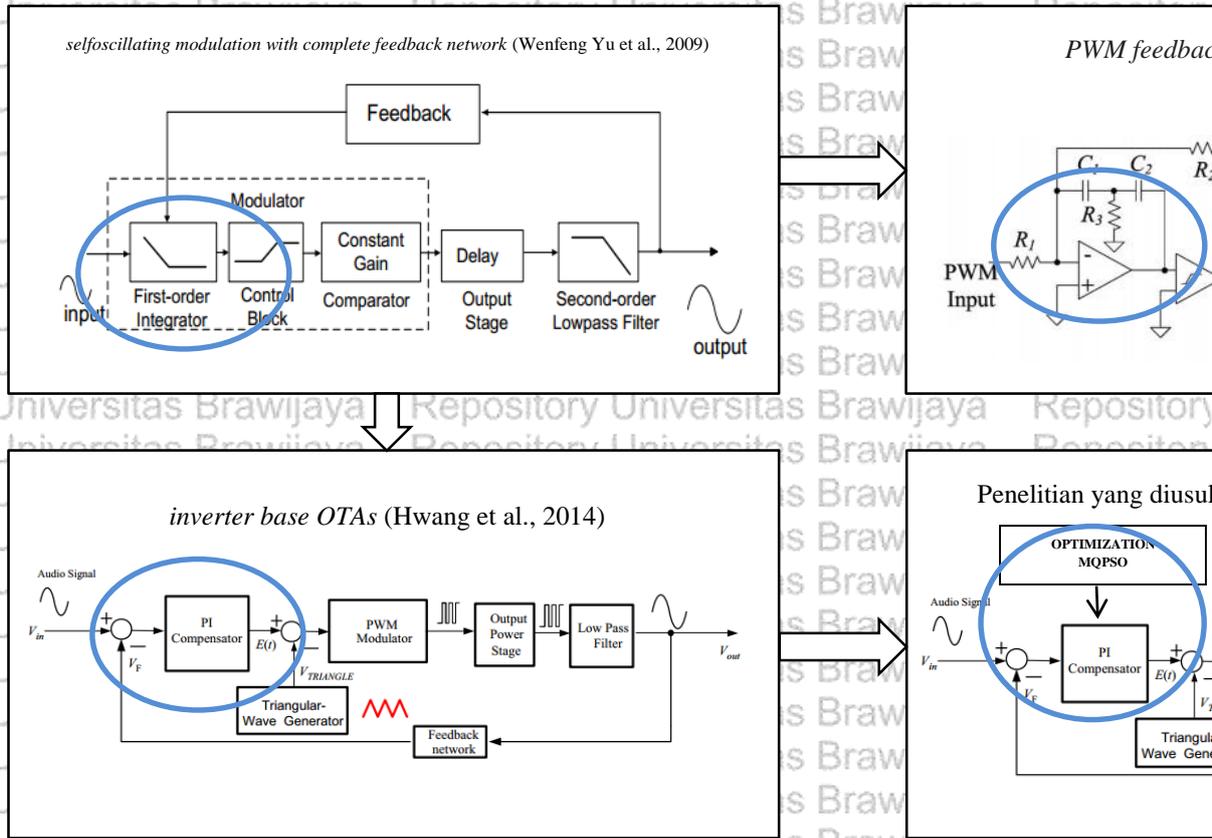
No	Judul	Peneliti	Jurnal Dan Tahun	Permasalahan	Tujuan	Metode Penelitian	Kesimpulan
1	Low THD analog Class D amplifier based on selfoscillating modulation with complete feedback network	Wenfeng Yu et al.,	IEEE, 2009	Non linieritas LC Filter menambah THD pada Sistem penguat audio kelas D. Pada umpan balik sebelum LC Filter masih terdapat THD karena Non linieritas LC Filter tidak difilter.	Memperbaiki THD pada sistem penguat audio kelas D dengan mengurangi non linieritas LC Filter	Metode yang digunakan pada penelitian ini menggunakan umpan balik setelah LC Filter dengan sebuah integrator filter abalog orde 1	Umpan balik setelah LC Filter terbukti menurunkan THD dibanding umpan balik sebelum LC Filter. Masih diperlukan perbaikan lagi dalam menurunkan THD dengan metode yang lain.
2	Class-D Amplifier Power Stage With PWM Feedback Loop	Lam et al.,	IEEE, 2013	Munculnya <i>DC error</i> dan <i>aliasing error</i> pada sistem umpan balik negatif yang disebabkan oleh inherent harmonic	Mereduksi sinyal riak pada umpan balik negatif untuk memperbaiki THD pada penguat audio kelas D	menggunakan <i>second order PWM feedback loop</i> untuk mengurangi sinyal riak pada power supply	Rangkaian filter integrator analog orde 2 lebih baik dalam mereduksi THD dibanding integrator orde 1.



				distortion pada power supply yang menghasilkan sinyal riak.			
3	A THD-reduction high-efficiency audio amplifier using inverter-based OTAs with filter-output feedback.	Hwang et al.,	ScienceDirect, 2014	Rangkaian integrator sebagai filter analog belum maksimal dalam menekan distorsi harmonik yang dihasilkan oleh inti ferit dari <i>low pass filter</i> (LPF)	Memperbaiki distorsi harmonik yang disebabkan oleh LC Filter untuk mendapatkan THD yang kecil dan penguat efisiensi maksimal	Penggunaan metode dalam penelitian ini digunakan rangkaian Kompensator <i>Proportional Integral</i> (PI) menggantikan integrator sebagai filter analog	Kompensator PI terdiri atas rangkaian umpan balik R dan C. Kontrol PI pada kompensator berfungsi untuk memperkecil <i>error</i> dan menstabilkan sistem pada frekuensi rendah. Sedangkan nilai R dan C dilakukan dengan metode <i>trial</i> dan <i>error</i> . Masih dibutuhkan metode optimasi untuk meningkatkan kualitas sistem penguat audio kelas D.

Tabel 1.1 Penelitian yang relevan tentang penguat audio kelas D

ROADMAP OF CLASS D AUDIO OPTIMIZATION



Gambar 1.1 Diagram Alir Skema Road Optimasi Kompensator I

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Beberapa kerangka teoritis yang dibahas diantaranya ; Klasifikasi penguat audio kelas A, B, AB, dan D, Kompensator PI, *Open Loop* dan *Close Loop* Penguat audio kelas D. Pada bagian akhir akan dibahas tentang Kontrol *Proportional Integral* (PI) dan Metode MQPSO.

2.1 Pengenalan Penguat Audio

Frekwensi 20 Hz hingga 20 KHz pada penguat audio digunakan untuk memperkuat sinyal (seperti musik atau vokal) yang bisa didengar manusia (Taylor, et al., 2013). Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kekuatan sinyal *input*nya sehingga cukup untuk mendorong impedansi beban pasif yang relatif rendah, seperti speaker audio (Gupta, R.G., 1995). Karena itu, hasilnya impedansi dari setiap tahap *output* penguat daya harus dirancang menjadi cukup rendah. Ini untuk memastikan bahwa sinyal *output* penguat dapat dikirimkan pada beban untuk meminimalisir penurunan penguatan dan linearitas sinyal *output*. Secara umum, linearitas dari sinyal *output* amplifier dapat diukur pada THD. (Thompson, D.M, 2005)

Selain linieritas sinyal *output*, yang perlu diperhatikan dalam merancang tingkatan *output* amplifier adalah efisiensi dayanya (Tan et al., 1998). Tingkatan *output* dari penguat daya harus memberikan kekuatan sinyal yang diperlukan untuk beban yang efisien. Dengan kata lain, daya yang dikonsumsi oleh daya *output* transistor harus dijaga serendah mungkin. Ini sangat penting terutama di perangkat portabel di mana sumber daya terbatas. Daya yang hilang dalam transistor daya diubah menjadi energi panas secara permanen yang dapat merusak perangkat *output*. Dengan demikian, dibutuhkan penggunaan heat sink (pendingin) untuk mengurangi energi panas pada *output* transistor. Akibatnya, ada penambahan biaya dan ukuran dari perangkat tersebut.



2.2 Klasifikasi Penguat Audio

Salah satu aspek penting dalam perancangan penguat audio adalah efisiensi daya *output*. Efisiensi daya pada penguat audio linier sangat bergantung pada sudut konduksi transistor. Berdasarkan bentuk gelombang *input* sinusioda, penguat audio konvensional (analog) dikategorikan menjadi penguat audio kelas A, B, AB dan C (Schubert Thomas, et al., 2015). Pada Gambar 2.1 diperlihatkan Arus *output* (*collector or drain*) melalui transistor untuk kelas A, B, AB, dan penguat audio kelas C. Sedangkan, arus mengalir melalui transistor secara keseluruhan periode : ini diklasifikasikan sebagai operasi Kelas A diperlihatkan Gambar 2.1a.

Dalam operasi Kelas B, ditunjukkan pada Gambar 2.1b, masing-masing Transistor hanya melakukan lebih dari setengah periode gelombang sinusoidal *input*. Selama lebih dari setengah siklus kurang dari siklus penuh pada *input* sinusoid. Operasi Kelas AB, ditunjukkan pada Gambar 2.1c, menggambarkan aliran arus melalui masing-masing transistor. Gambar 2.1d menunjukkan operasi Kelas C di mana masing-masing transistor melakukan lebih dari setengah siklus *input* sinusoida.

Pada awalnya, operasi Kelas A adalah satu-satunya konfigurasi yang menghasilkan sinyal distorsi rendah. *Amplifier* kelas B dan kelas AB memastikan kontinuitas sinyal dengan membuat penggunaan pengaturan dua transistor yang memungkinkan masing-masing transistor untuk berbagi bagian atas *input* sudut konduksi sinyal. *Amplifier* Kelas C memberikan *output* sinusoidal frekuensi tunggal dengan *driver* sirkuit resonansi pada sebagian kecil siklus. *Output* sinusoidal ditentukan oleh pengaturan rangkaian.

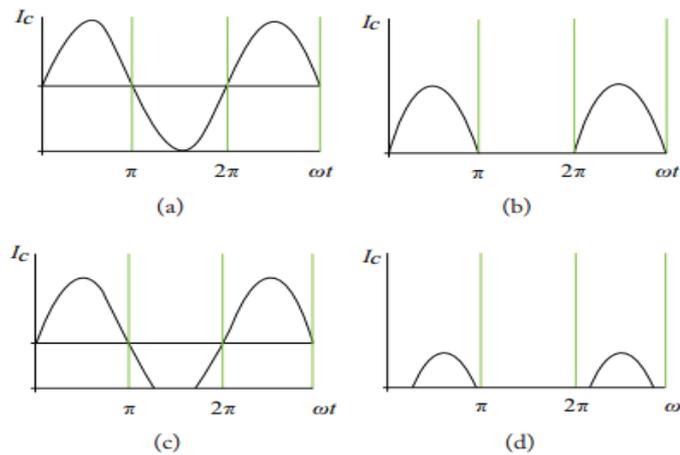
Dalam operasi Kelas D, ada dua *input*, sinyal *input* dan sinyal modulasi lebar gelombang persegi atau sinyal pulsa. Intinya, sinyal pengambilan sampel membuat transistor untuk menghidupkan atau mematikan selama interval gelombang pengambilan sampel, menghasilkan versi sampel dari sinyal *input*. Sinyal sampel ini kemudian disaring untuk menghasilkan bentuk gelombang yang diinginkan.

Sedangkan penguat audio *Switching* (digital) dikategorikan menjadi penguat kelas D. Penguat audio analog kelas A, B dan AB akan dibandingkan

dengan penguat audio kelas D pada penelitian yang dibahas. Sedangkan kelas C karena kurang relevan untuk frekuensi rendah.

Klasifikasi Penguat Audio	Sudut Konduksi Transistor
A	360°
B	180°
AB	$180^{\circ} - 360^{\circ}$
C	Fixed drive, $\leq 180^{\circ}$
D	Sistem kerja Saturasi dan Cut Off

Tabel 2.1 Siklus kerja penguat audio, (Schubert Thomas, et al., 2015).

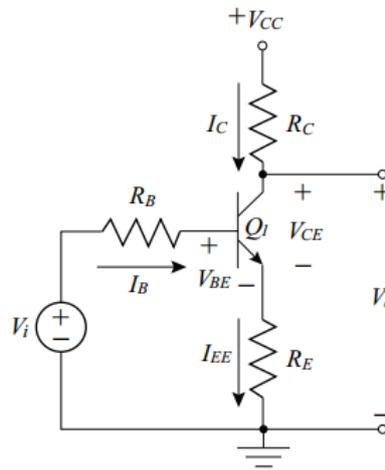


Gambar 2.1 Klasifikasi Periode siklus kerja transistor (a) Penguat kelas A, Periode penuh aliran arus (b) Penguat kelas B, setengah periode aliran arus (c) lebih besar dari setengah periode aliran arus (d) Penguat kelas C, kurang dari setengah periode aliran arus (Schubert Thomas, et al., 2015).

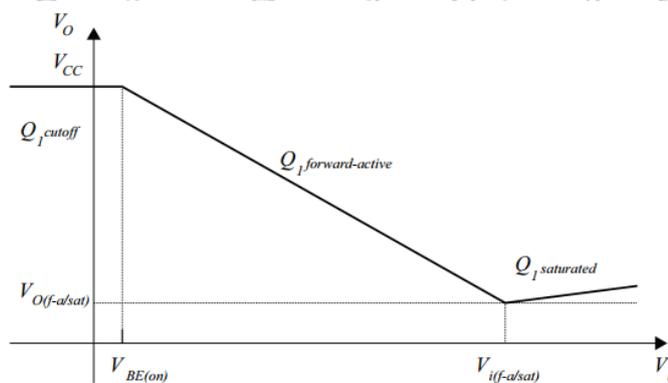


2.2.1 Penguat audio Kelas A Konvensional

Penguat kelas A konvensional mempunyai THD mendekati nol dalam kondisi ideal. Sistem kerjanya menggunakan transistor yang bekerja secara penuh, sehingga dengan efisiensi yang didapatkan sangat rendah dan sisanya terbuang menjadi panas. Linieritas yang dihasilkan penguat ini lebih tinggi dari penguat audio yang lain. Rangkaian tersebut ditunjukkan pada gambar 2.2. Sinyal *Input* satu gelombang penuh atau 360° dihasilkan pada penguat audio Kelas A. Efisiensi yang dihasilkan sekitar 25%. (Schubert Thomas, et al., 2015).



Gambar 2.2 Penguat audio kelas A *common emitter* (Schubert Thomas, et al., 2015).



Gambar 2.3 Karakteristik Penguat audio *common emitter* (Schubert Thomas, et al., 2015).

Efisiensi maksimal pada penguat audio kelas A ditunjukkan pada persamaan berikut ini :

$$\eta_{max} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \times 100\% = \frac{I_{CP}V_{CP}}{2(V_{CC}I_{CQ})} \times 100\% \quad (2-1)$$

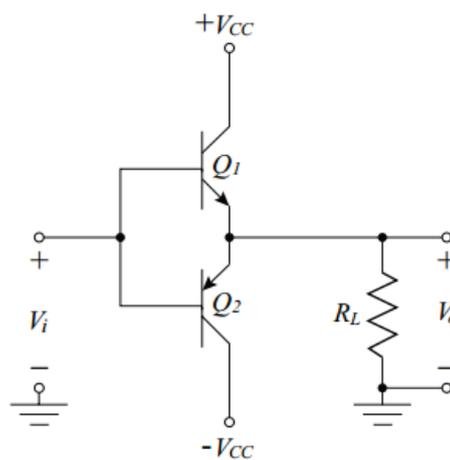
$$= \frac{\left(\frac{2I_{CQ}}{2}\right)\left(\frac{V_{CC}-V_{CE(sat)}}{2}\right)}{2(V_{CC}I_{CQ})} \times 100\% \approx 25\%$$

I_{CP} = Arus puncak collector

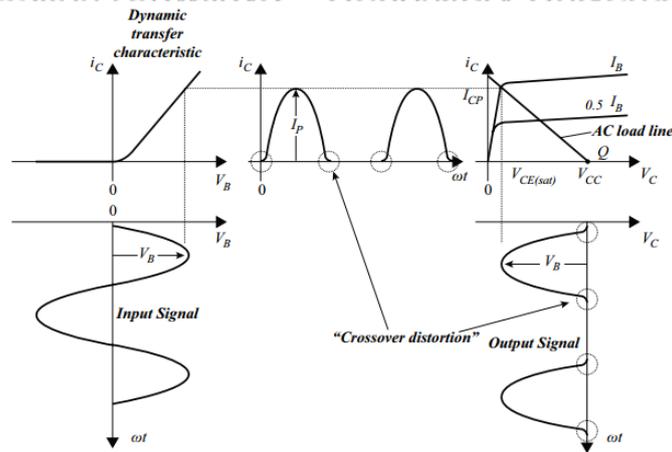
V_{CP} = Tegangan puncak collector ke Ground

2.2.2 Penguat Audio Kelas B Konvensional

Penguat audio kelas B konvensional penguat yang dirancang untuk memperbaiki efisiensi dari penguat audio kelas A. Titik *cut-off* transistor digunakan sebagai titik kerja. Sinyal *input* pada penguat dengan level diatas 0.6 Volt merupakan kondisi tidak ada sinyal *input* yang selanjutnya berada dalam kondisi OFF. Penguatan setengah *input* gelombang atau 180° gelombang Letak titik kerja berada di ujung kurva karakteristik digunakan untuk melemahkan setengah gelombang yang lain. Efisiensi penguat ini sebesar 78%. Permasalahan cacat pada persimpangan sinyal sinus bagian atas dan bagian bawah disebut distorsi *cross-over* (Schubert, et al., 2015). Gambar 2.4 menunjukkan rangkaian sederhana dari penguat audio kelas B



Gambar 2.4 Rangkaian sederhana penguat audio kelas B (Schubert Thomas, et al., 2015)



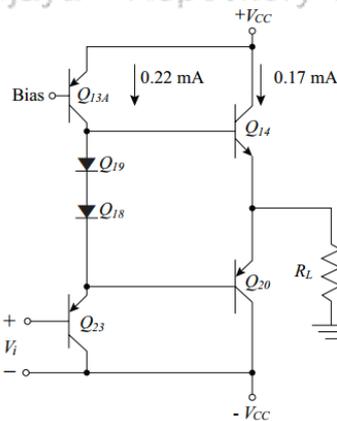
Gambar 2.5 Bentuk gelombang penguat audio kelas B (Schubert Thomas, et al., 2015)

Efisiensi maksimal pada penguat audio kelas B ditunjukkan pada persamaan berikut ini :

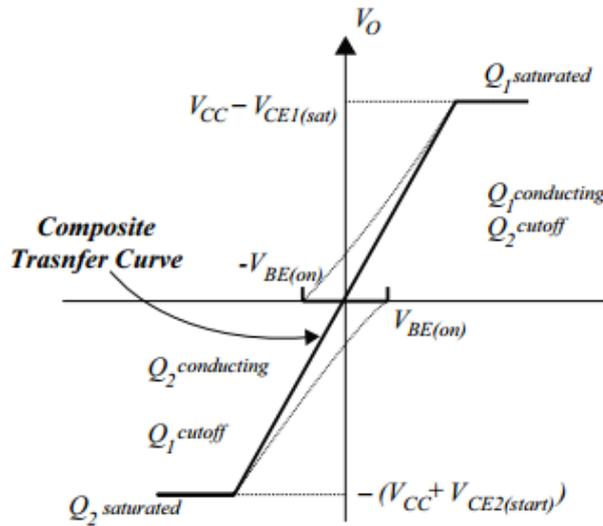
$$\eta_{max} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \times 100\% = \frac{V_{CC} I_{CP}}{\frac{2}{\pi} V_{CC} I_{CP}} \times 100\% = \frac{\pi}{4} \times 100\% \approx 78\% \quad (2-2)$$

2.2.3 Penguat Audio Kelas AB Konvensional

Penguat audio kelas AB dirancang untuk meminimalkan distorsi *cross-over* dengan menggeser titik kerja transistor. Garis *cut-off* diletakkan di atas titik kerja transistor dan sinyal yang dikuatkan dari 180° hingga 360° dengan efisiensi daya antara 25 - 78%. (Schubert, et al., 2015). Gambar 2.6. menunjukkan rangkaian sederhana dari penguat audio kelas AB



Gambar 2.6 Rangkaian sederhana penguat audio kelas AB (Schubert Thomas, et al., 2015)



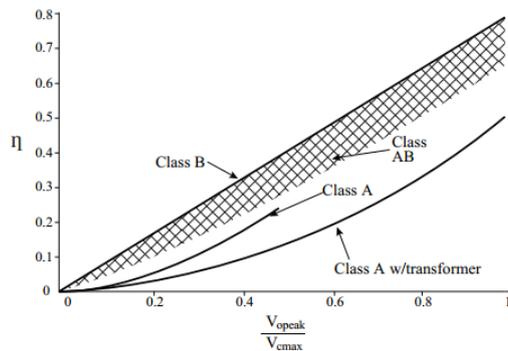
Gambar 2.7 Karakteristik penguat audio kelas AB tanpa distorsi *cross-over*

(Schubert Thomas, et al., 2015)

Efisiensi maksimal pada penguat audio kelas AB ditunjukkan pada persamaan berikut ini :

$$\eta_{max} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \times 100\% = \frac{\frac{V_{CC} I_{CP}}{2}}{\frac{2V_{CC} I_{CP}}{\pi} + V_{CC} I_{Bias}} \times 100\% = \frac{\pi I_{CP}}{4I_{CP} + 2\pi I_{Bias}} \times 100\% \quad (2-3)$$

Grafik 2.8 menunjukkan perbandingan efisiensi Penguat audio konvensional



Gambar 2.8 Grafik Perbandingan efisiensi penguat audio konvensional

(Schubert Thomas, et al., 2015)

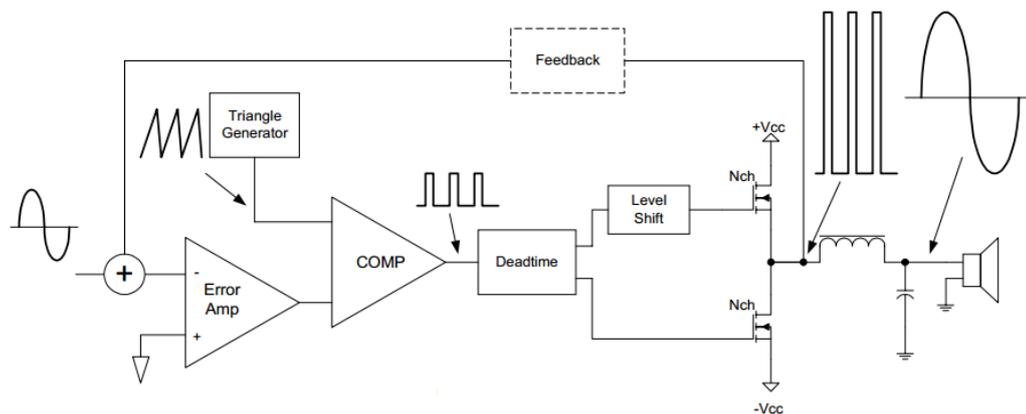


2.2.4 Penguat Audio *Switching* Kelas D

Penguat Audio *Switching* kelas D adalah penguat audio yang bekerja dengan sistem PWM. Penggunaan Mosfet dapat memaksimalkan dari kinerja penguat ini. (Gaalaas, 2006). Penguat ini mempunyai kelebihan efisiensi tinggi di atas 90% dalam kondisi ideal dibanding penguat konvensional (Chang et al., 2000).

Jika dibandingkan dengan penguat kelas A, B maupun AB, efisiensi yang dihasilkan penguat audio *switching* lebih tinggi dan berdampak pada disipasi daya yang rendah. Sehingga penggunaan pendingin (*heatsink*) yang besar dan catu daya yang besar dapat dikurangi.

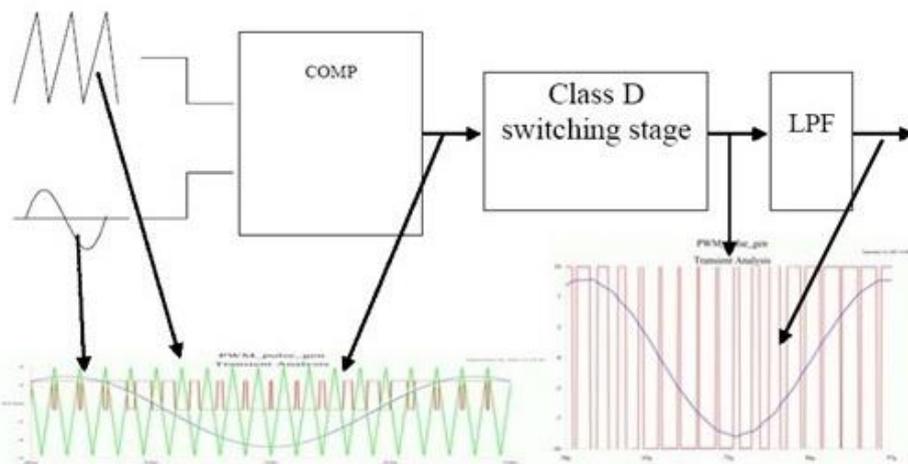
Prinsip kerja penguat audio *switching* ini dengan memodulasi sinyal input audio dengan sinyal segitiga yang akan dibandingkan dengan sebuah pembanding (*comparator*) untuk menghasilkan sinyal PWM. Sinyal PWM selanjutnya akan dimasukkan ke rangkaian *dead time* dan driver penguat untuk menghindari hubung singkat pada saat mosfet high dan mosfet low bekerja. Sinyal PWM yang telah dikuatkan akan dilewatkan *Low Pass Filter* (LPF) untuk mengembalikan menjadi sinyal audio yang selanjutnya dihubungkan ke loud speaker. (Honda, et al., 2005)



Gambar 2.9 Skema blok penguat audio kelas D (Honda, et al., 2005)

Gambar diatas memperlihatkan tahapan dari proses kerja penguat audio *switching* menggunakan rangkaian umpan balik.

Sinyal audio 20hz-20KHz akan dimodulasi menggunakan sinyal segitiga yang dibangkitkan oleh sebuah rangkaian integrator pembangkit sinyal segitiga. Pada gambar 2.10 dapat dilihat hasil dari modulasi yang dibandingkan menggunakan comparator hingga low pass filter (LPF) (Honda, et al.,2005).



Gambar 2.10 Proses modulasi penguat audio *switching* (Honda, et al.,2005)

Sinyal PWM dihasilkan oleh comparator dan akan dikuatkan lagi menggunakan penguat mosfet yang selanjutnya akan diubah kembali menjadi sinyal sinusoida menggunakan low pass filter (LPF).

Low Pass Filter (LPF) digunakan untuk meloloskan sinyal dengan frekuensi yang lebih rendah dari frekuensi cut off (f_c).

Frekwensi cut off (F_c) dari LPF dituliskan sebagai berikut :

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-4)$$

dimana,

f_c = Frekuensi cut off (Hz)

π = 3.14

L = Nilai Induktor (H)

C = Nilai Kapasitor (F)



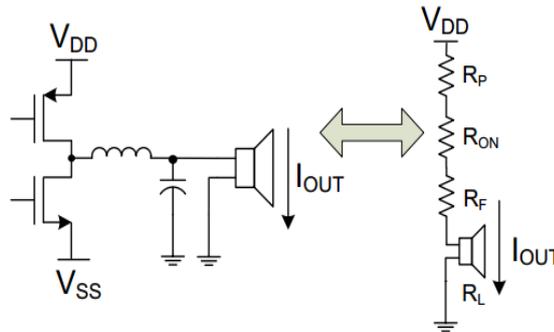
Rangkaian umpan balik negatif digunakan untuk melemahkan distorsi dan noise yang ada. *Total Harmonic Distortion* (THD) selalu menjadi parameter utama untuk menentukan linieritas sebuah penguat audio kelas d. THD dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$\%THD = \frac{\sqrt{V_{OUT@2f}^2 + V_{OUT@3f}^2 + V_{OUT@4f}^2 \dots}}{V_{OUT@f}} \times 100\% \quad (2-5)$$

$V_{out@f}$ = Tegangan *frekuensi* dasar

$V_{out@2,3,4f \text{ dst}}$ = Tegangan *frekuensi* harmonik

Pada gambar 2.11 dilihat Rangkaian ekivalen *output* penguat untuk mengetahui efisiensi pada penguat audio kelas D



Gambar 2.11. Penguat half bridge (Iam, 2014)

Persamaan efisiensi *half bridge* dijelaskan sebagai berikut :

$$Efficiency_{HalfBridge} = \eta_{HB} (\%) = \frac{P_{OUT}}{P_{SUPPLY}} = \frac{R_L}{R_L + R_{ON} + R_F + R_P} \times 100\% \quad (2-6)$$

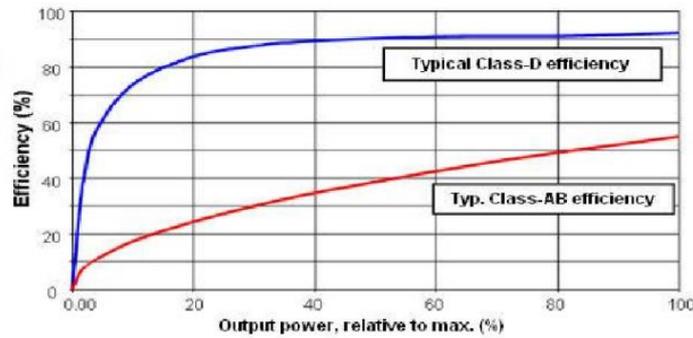
Diketahui :

R_{ON} : Nilai Resistansi On Off transistor daya

R_F : Nilai Resistansi komponen filter L dan C

R_P : Nilai Resistansi Parasitic Mosfet

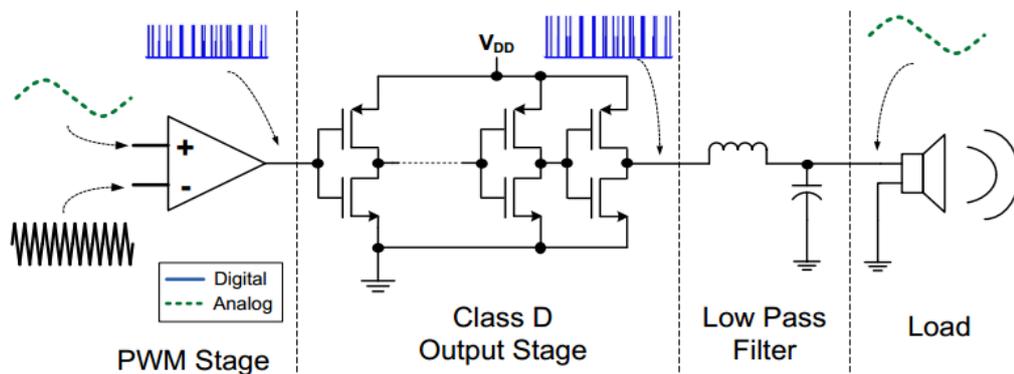
Sedangkan perbandingan efisiensi penguat audio kelas AB dan kelas D ditunjukkan pada grafik 2.12



Gambar 2.12 Grafik Perbandingan efisiensi penguat audio kelas AB dan D (Lam, 2014)

2.3 Rangkaian *loop* terbuka

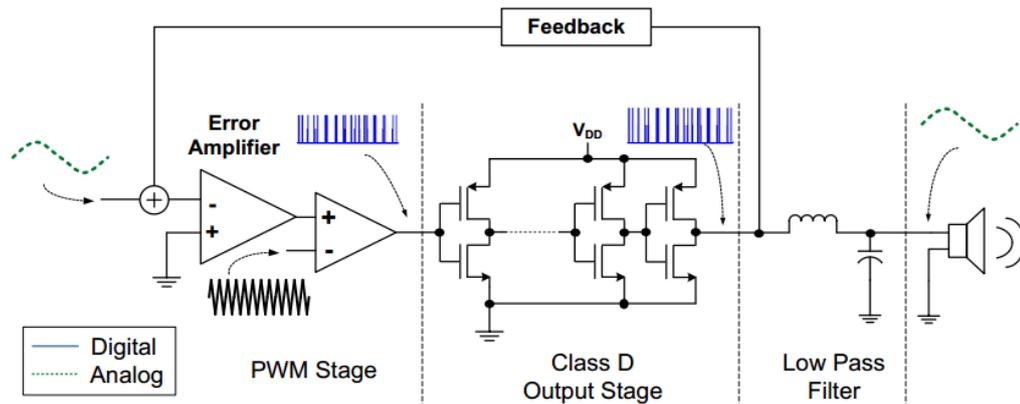
Penguat kelas d analog *loop* terbuka dengan PWM, merupakan rangkaian paling sederhana. Sinyal PWM dihasilkan dari modulasi sinyal audio masukan dan sinyal segitiga atau gigi gergaji yang dibawa oleh pembawa sinyal (Hiorns and Sandler, 1993). Dalam kondisi tanpa *noise*, struktur penguat Kelas-D *loop* terbuka memberikan kinerja efisiensi daya yang sangat tinggi dan kualitas sinyal audio *output* yang sangat tinggi. Namun, kurangnya mekanisme koreksi kesalahan dalam *loop* terbuka penguat Kelas D selalu menjadi kelemahan utama dalam aplikasi penguat audio mobile modern. Dengan kata lain, *noise* atau non-linearitas yang muncul dalam proses penguatan bisa menurunkan kualitas sinyal audio *output*.



Gambar 2.13 Penguat *loop* terbuka Penguat audio kelas D (Lam, 2014)

2.4 Rangkaian *loop* tertutup analog

Sebagian besar literatur menunjukkan bahwa sistem umpan balik negatif dapat diterapkan pada penguat audio kelas d analog *loop* terbuka. Hal ini dilakukan untuk mengurangi efek *error* dan *noise* pada sinyal *output* penguat. Koreksi *error* pada sinyal *output* biasanya diperoleh dengan mengambil perbedaan sinyal umpan balik dari *output* penguat mosfet dan sinyal *input* audio. Sinyal tersebut akan diperkuat dengan penguat berbasis op-amp (Magrath et al., 1997). Pada tahapan PWM, sinyal *error* tersebut akan dimodulasi oleh Pembawa sinyal segitiga frekuensi tinggi. Sehingga pada umpan balik negatif penguat audio kelas d berfungsi meningkatkan linieritas dan mampu menekan *noise*.



Gambar 2.14 Penguat *loop* tertutup Penguat audio kelas D (Lam, 2014)

2.5 Kontroler dan Kompensator

Kontroler dan Kompensator adalah sub sistem yang ditambahkan dalam sistem kontrol yang bertujuan untuk membuat *output* sistem kontrol menjadi lebih stabil. Secara khusus kompensator berfungsi untuk memperbaiki respon *output* diluar jangkauan kemampuan operasi kontrolernya (Siswojo, B, 2017). Penggunaan integrator murni pada kompensator berfungsi untuk memperbaiki *error* keadaan mantap atau *differensiator* murni untuk meningkatkan respon transien yang didefinisikan sebagai kompensator ideal. Kompensator ideal harus diimplementasikan sebagai rangkaian aktif yang dimungkinkan menggunakan sumber daya tambahan. Oleh karena itu, kontroler PID sering juga disebut sebagai kompensator dalam sistem kontrol *loop* tertutup.

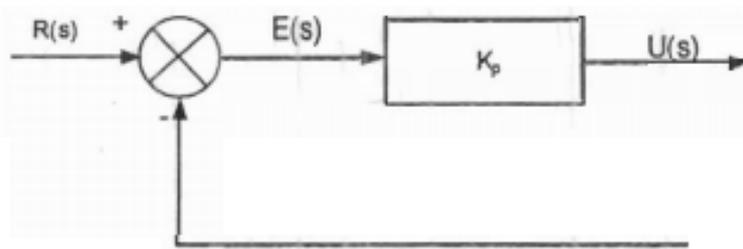
Kontroler merupakan sub sistem dalam sebuah sistem control secara keseluruhan yang menentukan besarnya aksi yang diberikan ke masukan actuator untuk mengubah respon *output*. Jenis kontroler yang umum adalah kontroler P (*Proportional*), PI (*Proportional-Integral*), PD (*Proportional-Differential*) dan PID (*Proportional-Integral-Differential*). Kontroler analog dibangun menggunakan penguat operasi (*operational amplifier, op amp*).

2.5.1 Kontrol Proporsional (P)

$G(s) = K_p$, sedangkan K_p adalah konstanta.

$$u = G(s) \cdot e(t) \text{ sehingga: } u = K_p \cdot e(t) \quad (2-7)$$

Kinerja kontroler tidak terjadi efek dinamik dengan penggunaan K_p sebagai penguat. Sifat kontrol tidak dinamik menjadi keterbatasan pada penggunaan kontrol P. Perbaikan respon transien khususnya *rise time* dan *settling time* dapat dikerjakan dalam aplikasi-aplikasi dasar yang sederhana. Kesalahan mantap (galat offset) menjadi kekurangan pada pengendali ini ketika terjadi perubahan beban. Penguatan dapat dilakukan untuk mengurangi *Error steady state*, tetapi jika berlebihan akan mengakibatkan sistem menjadi tidak stabil (Phillips, L. et al, 1998). Blok diagram dari sistem dengan elemen pengendali *proporsional* dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.15 Blok diagram sistem dengan elemen pengendali proporsional

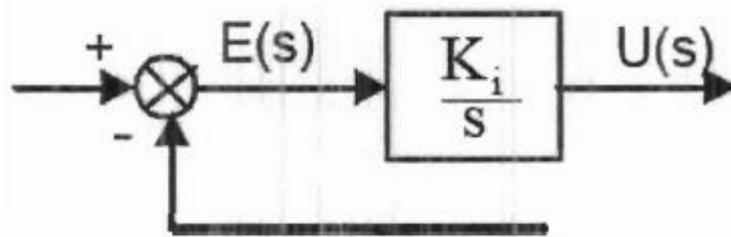
(Phillips, L. et al, 1998)

2.5.2 Kontrol Integratif (I)

$G(s)$ adalah dijelaskan sebagai kontrol I sehingga u dinyatakan,

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2-8)$$

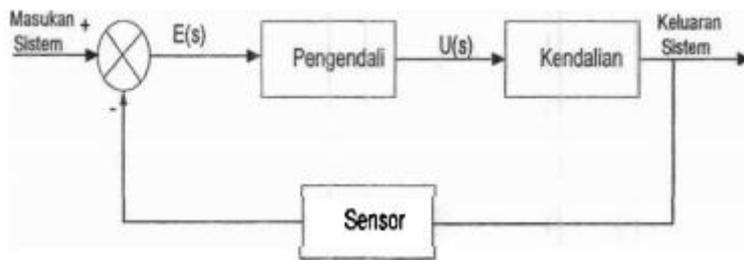
Dengan K_i adalah konstanta *Integral*. Perbaikan *error* diharapkan dapat dilakukan dengan $e(t)$ mendekati konstan (bukan nol) sehingga $u(t)$ akan menjadi sangat besar. Perubahan efek kontrol I ini dapat diperkecil jika $e(t)$ mendekati nol. Sedangkan respon *steady-state* dapat dioptimalkan menggunakan Kontrol I, namun ketidakstabilan sistem menjadi bermasalah jika pemilihan K_i yang tidak tepat yang mengakibatkan respon transien tinggi yang akhirnya dapat menambah orde sistem (Philips, L. et al, 1998). Blok diagram dari sistem dengan elemen pengendali *integratif* dapat digambarkan sebagai berikut



Gambar 2.16 Blok diagram sistem dengan elemen pengendali integral (Philips, L. et al, 1998)

2.5.3 Kompensator Proporsional Integral (P I)

Kompensator PI (*Proporsional Integral*) sering digunakan dalam sistem kontrol industri. Sesuai namanya kompensator PI (*proporsional, integral*) merupakan kontroler yang menggabungkan 2 buah jenis kontroler dengan karakteristiknya masing-masing. Gambar 2.19 menggambarkan dasar blok kendali



Gambar 2.17 Blok diagram sistem kendali (Philiips, L. et al, 1998)

Elemen pengendali *integral* digunakan untuk memperkecil kekurangan pengendali *proporsional* dinyatakan :

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \tag{2-9}$$

fungsi alih dinyatakan :

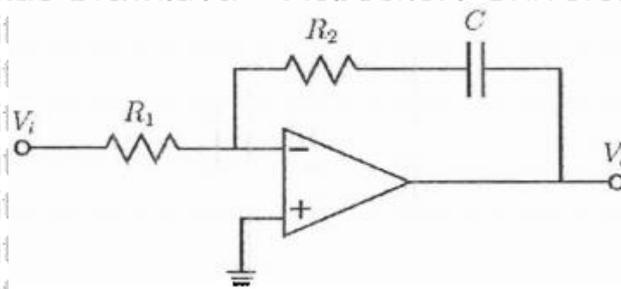
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \tag{2-10}$$

Dengan

K_p : Penguatan Operasional

T_i : Waktu Integral

K_i : Penguatan Integral



Gambar 2.18 Realisasi Kompensator PI menggunakan Op Amp (Philiips, L. et al, 1998)

Fungsi alih kompensator PI dapat ditulis sebagai berikut :

$$G_c(s) = \frac{sC_2R_2 + 1}{sC_2R_1} \quad (2-11)$$

Sifat kompensator Proporsional plus Integral akan cenderung dapat menstabilkan sistem sedangkan penambahan kendali integral digunakan untuk memperkecil galat keadaan tunak dari berbagai masukan

2.6 Modified Quantum Behaved Particle Swarm Optimization (MQPSO)

Metode optimasi MQPSO merupakan pengembangan dari algoritma *PSO* dan *MQPSO*. *PSO* mulai diperkenalkan pada tahun 1995 oleh Eberhart dan Kennedy untuk optimasi fungsi nonlinier (Kennedy, J. et al, 2005) . *PSO* merupakan algoritma optimasi yang terdiri dari M individu yang dikenal sebagai partikel pada dimensi D . partikel ini akan bergerak pada bidang pencarian berdasarkan vektor posisi (x_i) dan kecepatan (v_i). Pergerakan ini dapat ditulis pada persamaan berikut.

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1r_1(pbest_t - x_t(t)) + c_2r_2(gbest_t - x_t(t)) \quad (2-12)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (2-13)$$

Nilai posisi terbaik dari tiap partikel akan disimpan pada matrik *pbest* dan nilai posisi partikel terbaik terhadap seluruh partikel yang disebut posisi global terbaik akan disimpan pada matrik *gbest*. Keadaan tiap particle pada algoritma *PSO* ditentukan oleh vektor posisi dan vektor kecepatan. Hubungan antara dua vektor ini akan menentukan lintasan dari partikel. Lintasan partikel ini diperlukan untuk analisa konvergensi tiap partikel terhadap *local-attractor* p_i yang ditentukan dengan persamaan berikut.

$$p_i = \beta \times pbest_i + (1 - \beta) \times gbest_i \quad (2-14)$$

$$\beta = \frac{c_1r_1}{c_1r_1 + c_2r_2} \quad (2-15)$$



PSO dapat mencapai konvergensi dilihat dari nilai *local fitness*, tetapi tidak dapat dipastikan nilai *global fitness* sudah mencapai konvergensi (Sun, J et al, 2004). Hal ini dikarenakan PSO bukan algoritma yang memiliki konvergensi global berdasarkan pada vektor kecepatan yang memiliki keterbatasan pada ruang pencarian. Keterbatasan ini dapat diatasi oleh penggunaan hukum mekanika kuantum pada PSO yang menjamin adanya konvergensi pada nilai global fitness pada saat nilai local fitness mencapai konvergensi. Algoritma ini menggunakan dasar mekanika kuantum sebagai fungsi gelombang $\psi(x,t)$ dalam proses PSO. Oleh karena adanya penggunaan hukum mekanika kuantum pada PSO maka algoritma ini disebut sebagai *Quantum particle swarm optimization* yang pertama kali diperkenalkan oleh Sun (Hunaini dkk, 2016).

Salah satu perkembangan terhadap metode optimasi PSO adalah *Quantum behaved Particle Swarm Optimization* (QPSO). QPSO adalah suatu metode yang mengembangkan algoritma PSO dengan suatu inovasi pada fungsi posisi dari partikel yang tersebar dalam algoritma PSO sehingga perbedaan antara PSO dan QPSO terletak pada sifat dari fungsi posisi yang digunakan. Tiap partikel dari QPSO memiliki perilaku kuantum karena posisi dan kecepatan dari partikel tidak dapat ditentukan secara langsung (Zuhail, 1998). Posisi dari partikel (x_i) ini dapat dihitung menggunakan metode *Monte-Carlo* pada persamaan *Schrodinger*.

$$x_i = p_i \pm \frac{L}{2} \ln(1/u) \quad (2-16)$$

$$L = 2\beta \cdot |p_i - x_i| \quad (2-17)$$

$$P_{id} = \beta P_{id} + (1 - \beta) P_{gd} \quad (2-18)$$

Pada persamaan (2-16) variabel L merupakan lingkup pencarian dari tiap partikel yang digunakan untuk menyeimbangkan kemampuan pencarian solusi secara lokal dan global. Berdasarkan simulasi (Zuhail, 1998), dapat disimpulkan bahwa pada QPSO akan menghasilkan partikel yang konvergen.



Pada QPSO proses konvergensi pada pencarian solusi secara global dilakukan dengan menggunakan variabel *Mean Best Position* (*mbest*). Nilai ini merupakan nilai rata-rata dari posisi partikel secara lokal yang memiliki tingkat *fitness* yang terbaik. Berdasarkan penambahan nilai *mbest* pada algoritma QPSO maka penentuan posisi akan ditentukan oleh persamaan (2-19).

$$x_i(t+1) = p_i \pm \alpha |mbest - x_i(t)| * \ln(1/u) \quad u \approx U(0,1) \quad (2-19)$$

Pada persamaan diatas nilai α merupakan koefisien *contraction-expansion* untuk mengatur laju konvergensi dari QPSO.

MQPSO (*Modified QPSO*) merupakan variasi dari QPSO dengan merubah nilai *mbest* yang merupakan rata-rata nilai dari *pbest* menjadi nilai *gbest* untuk menghasilkan pencarian yang lebih spesifik (Zuhal, 1998). Oleh karena itu perhitungan posisi partikel dari MQPSO adalah sebagai berikut :

$$x_i(t+1) = p_i \pm \alpha |gbest - x_i(t)| * \ln(1/u) \quad u \approx U(0,1) \quad (2-20)$$

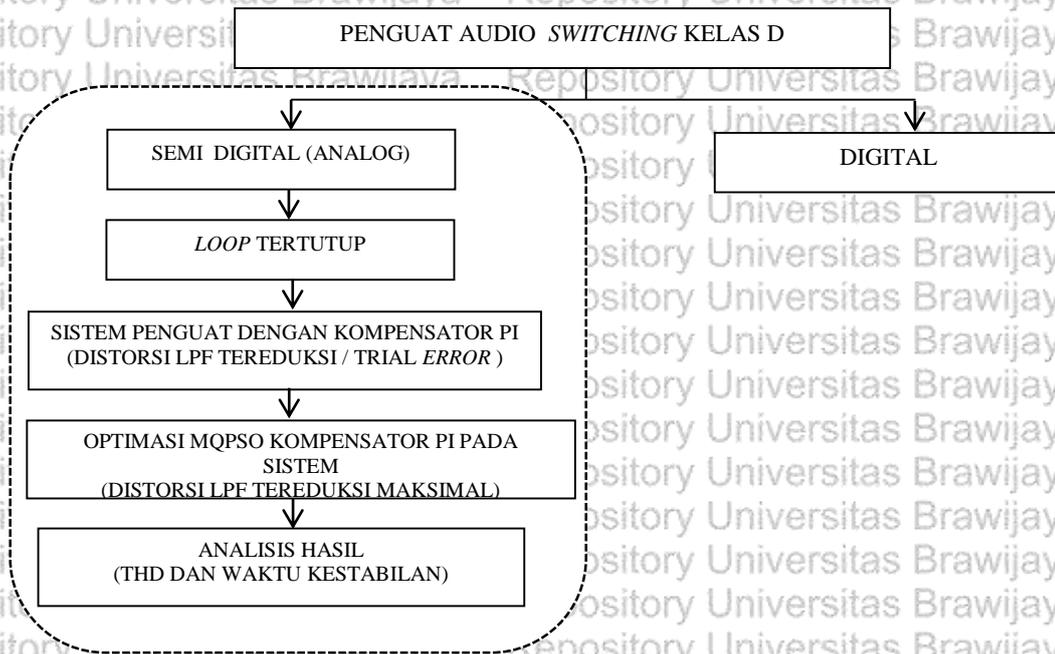
MQPSO melakukan pencarian secara global pada awal iterasi dan semakin lama pencarian secara lokal dilakukan.

$$\alpha = (\alpha_0 - \alpha_1) \times (iter / maxiter) + \alpha_1 \quad (2-21)$$

BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN

3.1 Kerangka Konsep Penelitian

Pada gambar 3.1 menunjukkan alur penelitian tentang kinerja Kompensator PI yang akan dioptimasi menggunakan metode MQPSO sebagai parameter umpan balik pada penguat audio *switching* kelas D.



Gambar 3.1 Kerangka konsep penelitian

Penguat kelas D analog *loop* terbuka dengan PWM, merupakan rangkaian paling sederhana. Sinyal PWM dihasilkan dari modulasi sinyal audio masukan dan sinyal segitiga atau gigi gergaji yang dibawa oleh pembawa sinyal. Dalam kondisi tanpa *noise*, struktur penguat Kelas D *loop* terbuka memberikan kinerja efisiensi daya yang sangat tinggi dan kualitas sinyal audio *output* yang sangat tinggi.

Namun, kurangnya mekanisme koreksi kesalahan dalam *loop* terbuka penguat Kelas D selalu menjadi kelemahan utama dalam aplikasi penguat audio mobile modern. Dengan kata lain, *noise* atau *non-linearitas* yang muncul dalam proses penguatan bisa menurunkan kualitas sinyal *output* audio.



Sebagian besar literatur menunjukkan bahwa sistem umpan balik negative dapat diterapkan pada penguat audio kelas D analog *loop* terbuka. Hal ini dilakukan untuk mengurangi efek *error* dan *noise* pada sinyal *output* penguat. Koreksi *error* pada sinyal *output* biasanya diperoleh dengan mengambil perbedaan sinyal umpan balik dari *output* penguat mosfet dan sinyal input audio. Sinyal tersebut akan diperkuat dengan penguat berbasis *op-amp*. Pada tahapan PWM, sinyal *error* tersebut akan dimodulasi oleh Pembawa sinyal segitiga frekuensi tinggi. Sehingga pada umpan balik negative penguat audio kelas D berfungsi meningkatkan linieritas dan mampu menekan *noise*.

Sistem umpan balik negatif menggunakan rangkaian *integrator* sebagai filter analog belum maksimal dalam menekan *distorsi harmonic* yang dihasilkan oleh inti ferit dari *low pass filter* (LPF) sehingga pada rangkaian umpan balik tersebut digunakan Kompensator PI untuk meningkatkan kestabilan sistem Penguat audio kelas D. Permasalahan pada Kompensator PI ini terletak pada penalaan *gain* yang sangat berpengaruh pada kestabilan sistem.

Jika *gain* terlalu besar, maka sistem tidak akan stabil karena sistem umpan balik akan mendeteksi *error* terus menerus. Sedangkan jika *gain* kecil maka sistem akan stabil karena *error* di bawah tegangan referensi. Kondisi ini sangat berpengaruh pada efisiensi karena terdapat *error steady state*. (Hwang et al., 2014).

Dalam meningkatkan kestabilan sistem, dibutuhkan keseimbangan pengaturan *gain* yang optimal pada Kompensator PI untuk memperkecil *error* sehingga *Total harmonic Distortion* (THD) dapat diperkecil.

Pada penelitian ini diusulkan perancangan Penguat audio kelas D yang mempunyai THD yang rendah menggunakan metode *Modified Quantum behaved Particle Swarm Optimization* (MQPSO) untuk menggantikan metode konvensional *trial* dan *error*. Hasil yang diharapkan dari simulasi Penguat kelas D adalah mendapatkan THD yang lebih rendah dan Rangkaian lebih cepat stabil dilihat dari waktu yang dibutuhkan dalam mencapai THD terbaik.



3.2 Variabel Penelitian

Secara umum sistem umpan balik pada penguat audio kelas D menggunakan parameter Kompensator PI dipengaruhi oleh nilai $R2/R1$ dan C .

Dalam penelitian ini, variabel utama menentukan *Total Harmonic Distortion* (THD) yang digambarkan dalam *Fast Fourier Transform* (FFT) pada *SIMULINK-MATLAB* dan perbandingan THD rangkaian terhadap waktu kerja disimulasikan menggunakan Software Multisim.

3.3 Hipotesis

Penurunan THD dan Kestabilan rangkaian berdasarkan perbandingan THD dan waktu kerja diharapkan dapat optimal dengan mengoptimasi parameter $C2$, $R2$, dan $R1$ pada Kompensator PI sebagai filter analog menggunakan metode MQPSO. Proses ini akan dimodelkan menggunakan *SIMULINK-MATLAB* untuk mengetahui perbandingan THD dan simulasi Multisim untuk mengetahui perbandingan THD dan kestabilan waktu kerja.



BAB IV METODE PENELITIAN

4.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan mulai bulan agustus 2019 sampai dengan bulan desember 2019. Tempat yang digunakan untuk penelitian ini adalah perpustakaan Gedung C Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang. Pengambilan data termasuk jurnal internasional dan nasional dilakukan di gedung C. Sedangkan pengujian Simulink matlab dan Multisim dilakukan di Ruang belajar Pasca Sarjana gedung C.

4.2 Bahan dan Peralatan

Pada simulasi perancangan penguat audio kelas D, dibutuhkan sebuah laptop dengan dapur pacu intel core i5 sedangkan software yang digunakan adalah Operating System Windows 10, Multisim V14 dan Matlab V17.

4.3 Identifikasi Masalah

Penurunan THD dan kestabilan sistem menjadi permasalahan utama pada perancangan Penguat audio kelas D menggunakan umpan balik Kompensator PI yang dioptimalisasi dengan Metode Optimasi MQPSO. Pada tahap ini dilakukan pemilihan metode atau cara-cara untuk menyelesaikan akar permasalahan utama. Pada penulisan ini, permasalahan yang diangkat menjadi topik adalah Penurunan THD Penguat audio kelas D menggunakan Metode *Modified Quantum behaved Particle Swarm Optimization (MQPSO)*.

4.4 Pengambilan Data

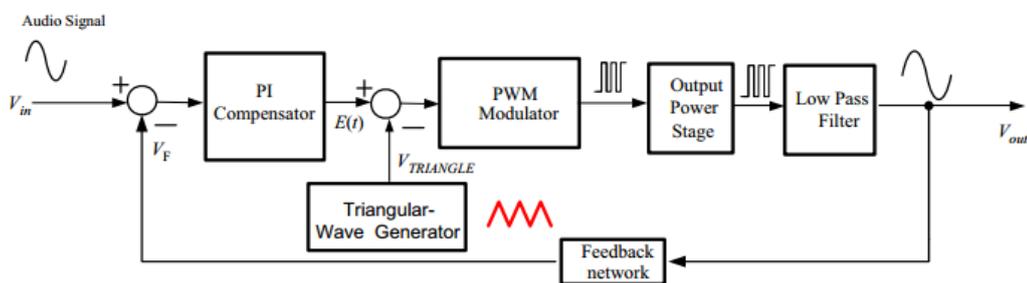
Tahapan proses pengambilan data sebagai berikut :

1. Tahap pengambilan data berdasarkan hasil Simulasi Penguat audio kelas D menggunakan software *MATLAB-SIMULINK* dan *MULTISIM*. Data yang diperlukan yaitu Frekuensi *input*, Frekuensi *output*, kestabilan rangkaian berdasarkan waktu dan THD dengan membandingkan rangkaian *loop* tertutup sebelum dioptimasi dan rangkaian *loop* tertutup yang diberikan optimasi.

2. Tahap berikutnya, menggunakan jurnal, proseding, *e-book*, hasil pencarian di internet, penelitian terdahulu dan catatan pribadi yang berkaitan dengan topik penelitian.

4.5 Perancangan Sistem

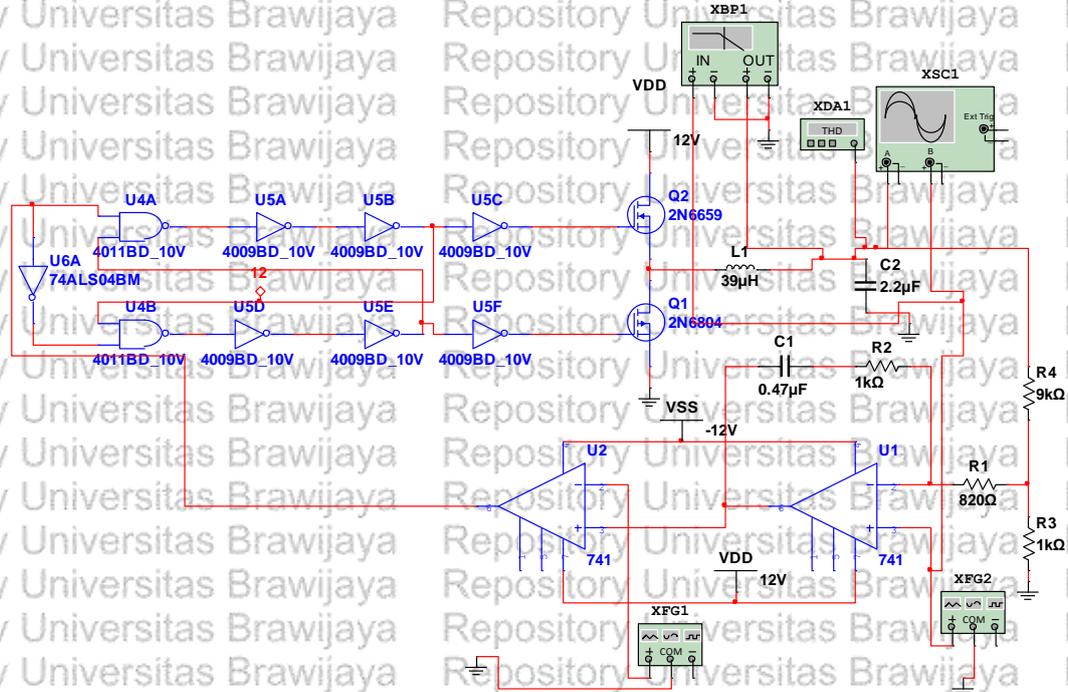
Perancangan sistem Penguat audio kelas D ini dilakukan dengan membuat rangkaian *loop* terbuka dan *loop* tertutup. Penguat audio kelas D dengan *loop* tertutup dengan Kompensator PI.



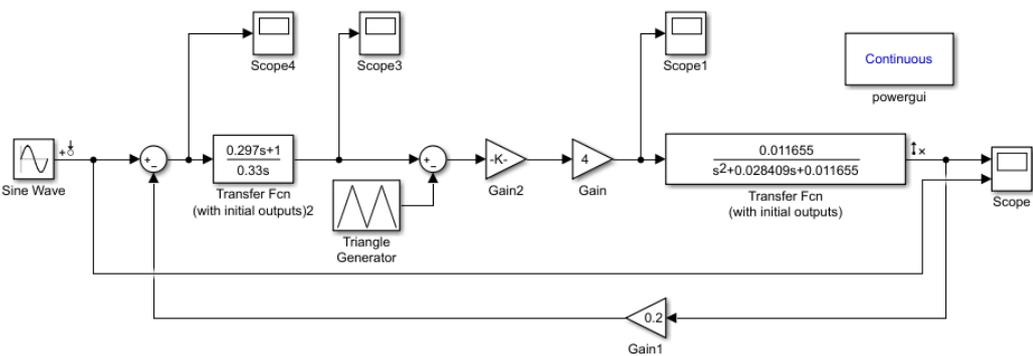
Gambar 4.1 Pemodelan *loop* tertutup Kompensator PI

Diagram blok dari Penguat audio kelas D *loop* tertutup terkompensasi terdiri dari modulator PWM, generator gelombang segitiga, Penguat daya *output* (*Switching*), Low pass filter orde dua *butterworth*, jaringan umpan balik, dan kompensator. V_F dibandingkan dengan sinyal audio, dan sinyal kesalahan yang dihasilkan $E(t)$ adalah ditentukan oleh kompensator PI. Terminal *input* positif komparator terhubung ke $E(t)$ yang merupakan *output* dari kompensator PI, dan terminal *input* negatif dari komparator terhubung ke $V_{TRIANGLE}$ yang berasal dari generator gelombang segitiga. Sinyal kesalahan $E(t)$ dibandingkan dengan $V_{TRIANGLE}$ untuk menghasilkan *switching* kontrol gelombang. Gelombang *switching* mendorong Penguat daya *output*. Sinyal frekwensi tinggi pada penguat ini dapat dihilangkan menggunakan LPF. Kompensator PI berbeda dari kompensator proporsional-integral-derivatif (PID). Tanpa derivatif membuat kerja sistem lebih stabil. Hal ini dikarenakan kontrol integral lebih sensitif terhadap frekuensi tinggi dalam *input*. Kompensator PI digunakan untuk meningkatkan gain *loop* frekuensi rendah dan mempunyai redaman yang lebih baik terhadap gangguan frekuensi rendah. Rangkaian

umpan balik resistor adalah pembagi tegangan yang terdiri dari resistor presisi. Sistem ini diharapkan mampu meningkatkan gain dan dapat menekan gangguan noise Frekuensi rendah dan *non linieritas* power supply. Schematic rangkaian dapat dilihat pada gambar 4.2



Gambar 4.2 Schematic Penguat Audio Kelas D Tanpa Beban



Gambar 4.3 Model *SIMULINK MATLAB* Penguat audio kelas D dengan Metode MQPSO



Fungsi alih Kompensator PI yang akan dioptimasi menggunakan metode MQPSO dapat ditulis sebagai berikut :

$$G_c(s) = \frac{sc_2R_2+1}{sc_2R_1} \quad (4-1)$$

Nilai C_2 , R_2 dan R_1 akan diberikan range nilai menggunakan Software Matlab untuk mencari nilai terbaik dengan optimasi MQPSO. Nilai terbaik tersebut akan dimasukkan kembali ke Blok Simulink untuk mengetahui perbandingan THD sebelum dioptimasi menggunakan nilai awal dan sesudah dioptimasi. Range nilai awal yang akan diberikan pada persamaan (4-1) sebagai percobaan secara *trial* dan *error* sebagai berikut :

$$C_2 : 0.1\mu\text{F} - 0.47\mu\text{F}$$

$$R_2 : 82\Omega - 1\text{K}\Omega$$

$$R_1 : 50\Omega - 1\text{K}\Omega$$

Tabel Percobaan metode *trial* dan *error* untuk mencari nilai C_2 , R_2 , dan R_1 terbaik sebagai berikut :

No	C_2 (μF)	R_2 (Ω)	R_1 (Ω)
1	0.1	82	50
2	0.16	220	82
3	0.22	330	220
4	0.33	470	430
5	0.39	820	560
6	0.47	1000	1000

Tabel 4.1 Percobaan metode *trial* dan *error*

Fungsi alih *low pass filter* orde 2 *butterworth* dapat ditulis sebagai berikut :

$$H_{LRC}(s) = \left(\frac{1}{LC}/s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC} \right) \quad (4-2)$$

dengan rincian sebagai berikut :

$$L : 39\mu\text{H}$$

$$C : 2.2\mu\text{F}$$

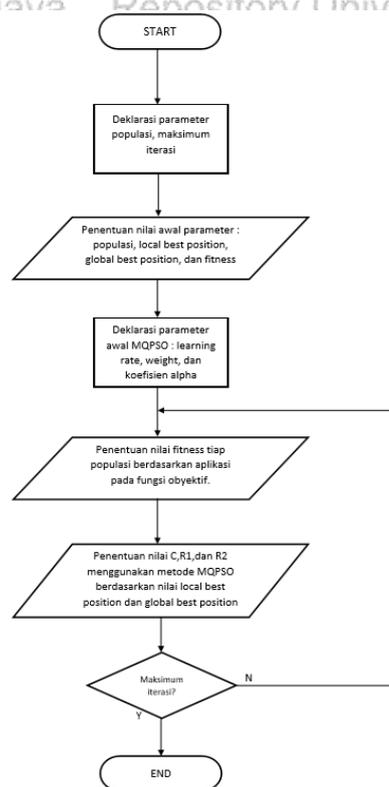
$$R : 8\Omega$$

Nilai pada persamaan fungsi alih ini akan dimasukkan pada blok LPF Simulink



4.6 Proses Optimasi

Algoritma MQPSO merupakan algoritma optimasi yang akan digunakan pada penelitian ini. Parameter Kompensator *Proportional-Integral* (PI) yang dioptimasi adalah nilai C2, R2 dan R1 pada blok fungsi alih Kompensator menggunakan Metode MQPSO. Proses optimasi MQPSO digambarkan pada diagram alir berikut ini :



Gambar 4.4 Flow Chart Optimasi dengan MQPSO



Algoritma pemrograman MQPSO dituliskan dengan Pseudo-code sebagai berikut

Begin:

Default random (Step (1) and Step (2))

STEP (1) → INITIALIZATION PARAMETER SETTING.

Max iterations, Swarm_size.

For (i,j)=1 to Swarm_size,

Component C2 (i,j), R1 (i,j), R2 (i,j) using distribute with minimum and maximum range random

With output is matrix [1 Swarm_size] each component C2, R1, R2 (R2>R1).

End

Component [C2 R2 R1] in one matrix table.

STEP (2) → INITIALIZATION SWARM POSITION.

Swarm Parameter.

For (i,j)=1 to Swarm_size,

Swarm_position C2 (i,j), R1 (i,j), R2 (i,j) using random distribute with minimum and maximum range.

With output is matrix [1 Swarm_size] each Swarm_position C2, R1, R2.

End

Swarm [C2 R2 R1] in one matrix table.

Best Local position = Swarm.

Calculate Fitness using Ackley's Function with Best Local position.

Find the Local Best using Minimum the Best Fitness.

STEP (3) → FIND RESULT USING MQPSO.

Initialize MQPSO parameters.

Iteration: 1

While iteration < Max iteration and Max Value,

Do

Calculate Alpha, Mean best, Fitness Global Using Ackley's Function.

Error Value, Global Best by Minimum Fitness and Error Value.

Iteration: + 1

End

End

STEP (4) → STORE THE RESULT.

Get Best Component by indexing the minimum Global Best.

Simulating to Plant, using Best Component and get THD and ERROR.

Plotting All Result.



If $THD(j) > THD(i)$ in simulation,

Then Increase *Max Iteration* until *Fitness* Convergence.

End

End

4.7 Pengujian Sistem

Pengujian sistem Penguat audio kelas D ini dilakukan pada 2 tahapan, yaitu meliputi pengukuran THD menggunakan Simulink dan Kestabilan waktu menggunakan Software Multisim.

1. Pengujian sistem penguat audio kelas D *loop* tertutup dengan Kompensator PI
2. Pengujian sistem penguat audio kelas D *loop* tertutup setelah dioptimasi menggunakan metode MQPSO.

4.8 Analisis dan Penarikan Kesimpulan

Analisis hasil penelitian dilakukan dengan membandingkan hasil dari THD dan waktu transien menggunakan software Multisim V14 dan analisis THD menggunakan software Simulink Matlab V17. Hasil tersebut didapatkan perbedaan antara metode penyelesaian menggunakan optimasi dan tanpa optimasi. Sedangkan kesimpulan dapat diambil dari selisih THD maupun waktu transien dari pengujian menggunakan kedua software tersebut.

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sistem Penguat audio kelas D ini dilakukan pada 2 tahapan, yaitu meliputi pengukuran THD menggunakan *Simulink* dan Pengukuran waktu Kestabilan Rangkaian penguat menggunakan Software Multisim. Berikut ini tabel nilai komponen hasil optimasi dengan Metode MQPSO :

NO	C2	R2	R1	NO	C2	R2	R1
1	0.1114	87.56	58.40	33	0.3138	537.73	534.99
2	0.1179	89.85	107.69	34	0.3245	540.62	541.02
3	0.1246	149.25	108.99	35	0.3260	555.54	582.37
4	0.1254	150.88	138.38	36	0.3325	559.85	624.73
5	0.1319	159.00	168.33	37	0.3340	572.27	625.96
6	0.1359	171.09	170.21	38	0.3479	593.18	632.95
7	0.1513	179.87	195.73	39	0.3498	594.66	633.44
8	0.1532	182.17	206.76	40	0.3518	626.00	658.31
9	0.1680	183.72	215.33	41	0.3545	642.34	659.24
10	0.1716	242.20	226.25	42	0.3591	643.66	670.76
11	0.1754	262.87	234.07	43	0.3592	649.59	684.24
12	0.1867	266.78	257.10	44	0.3606	656.86	718.30
13	0.1974	269.82	281.52	45	0.3666	678.70	722.10
14	0.1976	269.87	290.78	46	0.3726	683.27	723.28
15	0.2014	282.71	293.39	47	0.3758	704.30	749.23
16	0.2115	305.04	295.42	48	0.3769	759.69	762.87
17	0.2164	306.78	303.15	49	0.3840	767.64	780.41
18	0.2180	318.59	309.65	50	0.3964	810.95	781.39
19	0.2262	344.40	323.63	51	0.3968	833.57	815.10
20	0.2263	345.83	346.41	52	0.4018	849.83	838.74
21	0.2304	356.58	348.81	53	0.4122	878.98	855.92
22	0.2355	367.46	350.53	54	0.4146	882.88	874.97
23	0.2551	374.81	353.54	55	0.4169	888.15	897.65
24	0.2565	393.35	365.54	56	0.4189	908.21	903.09
25	0.2609	427.44	368.22	57	0.4267	910.85	903.78
26	0.2672	443.97	398.71	58	0.4271	912.93	933.62
27	0.2744	458.83	399.98	59	0.4326	931.77	942.78
28	0.2995	466.87	443.92	60	0.4464	934.68	942.91
29	0.3008	504.83	512.94	61	0.4492	976.37	990.21
30	0.3020	517.10	514.57	62	0.4520	979.60	993.37
31	0.3094	532.19	520.23	63	0.4560	981.82	996.12
32	0.3133	536.97	526.38	64	0.4604	988.93	998.51

Gambar 5.1 Hasil Optimasi parameter Kompensator PI menggunakan MQPSO



5.1 Pengujian Sistem Penguat Audio Kelas D *loop* tertutup dengan Kompensator PI (tanpa optimasi) menggunakan Software Multisim V14.0

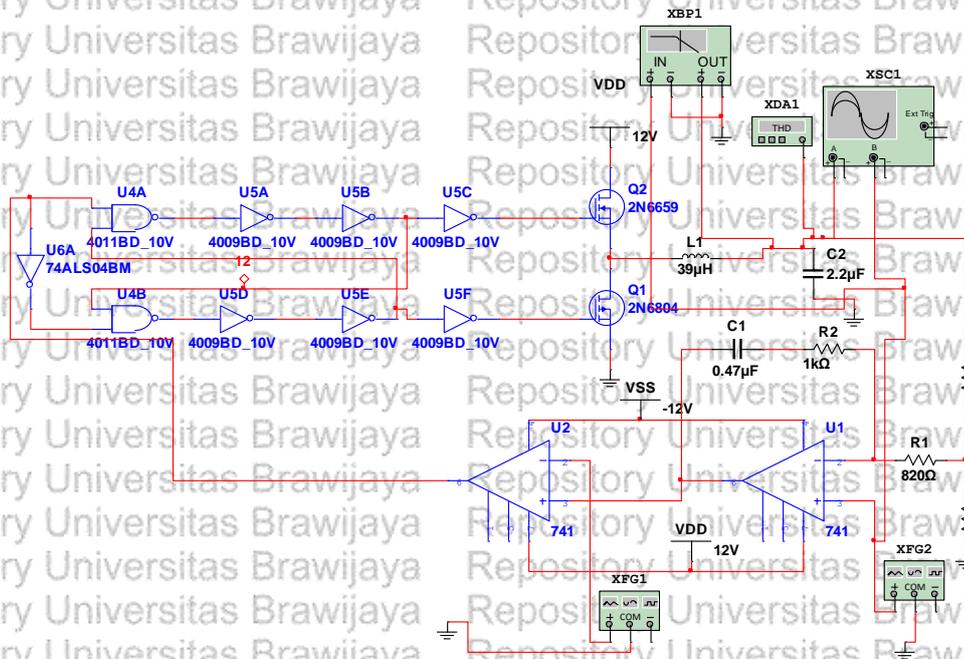
Pada pengujian ini, Range nilai awal yang akan diberikan sebagai percobaan secara *trial* dan *error* sebagai berikut :

C_2 : $0.1\mu\text{F} - 0.47\mu\text{F}$

R_2 : $82\Omega - 1\text{K}\Omega$

R_1 : $50\Omega - 1\text{K}\Omega$

Simulasi rangkaian Penguat Audio Kelas D pada frekuensi dasar 1KHZ menggunakan Multisim V14.0 ditunjukkan gambar 5.1



Gambar 5.1 Simulasi Penguat audio kelas D tanpa optimasi

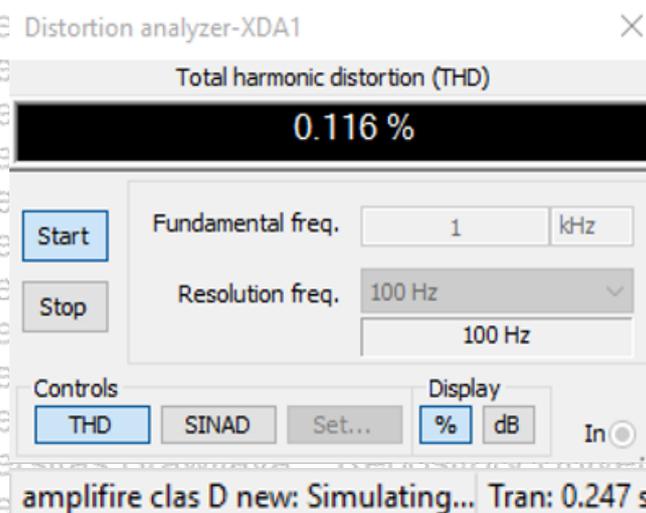
Nilai komponen C_2 , R_2 dan R_1 yang digunakan pada kompensator sebagai berikut :

$$C_2 : 0.47\mu\text{F}$$

$$R_2 : 1\text{K}\Omega$$

$$R_1 : 820\Omega$$

Hasil simulasi THD ditampilkan menggunakan Distortion Analyzer – XDA1 dan pencapaian waktu THD terbaik ditampilkan perwaktu Multisim



Gambar 5.2 THD terhadap Waktu

5.2 Pengujian Sistem Penguat Audio Kelas D *loop* tertutup dengan Kompensator PI (optimasi MQPSO) menggunakan Software Multisim V14.0

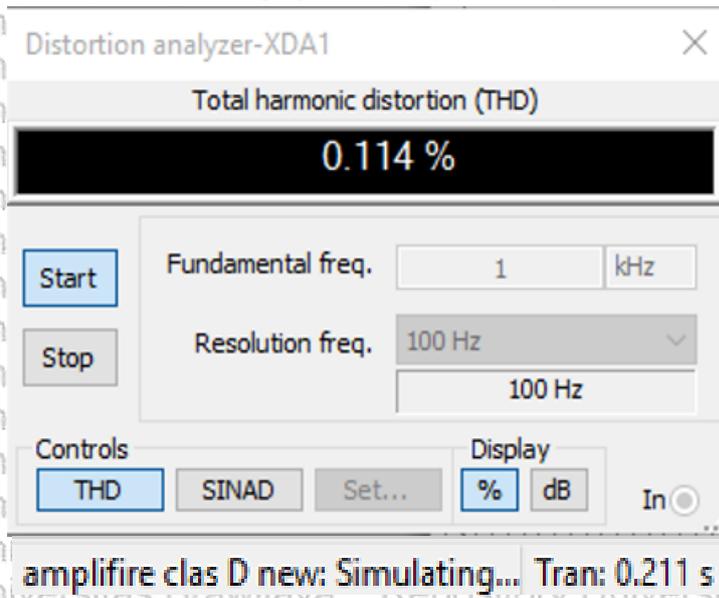
Pada pengujian ini, nilai komponen yang didapatkan setelah range nilai komponen dioptimasi menggunakan metode MQPSO dengan iterasi 1000 sebagai berikut :

$$C_2 : 0.3325\mu\text{F} \approx 0.33\mu\text{F}$$

$$R_2 : 897\Omega \approx 900\Omega$$

$$R_1 : 989\Omega \approx 1000\Omega$$

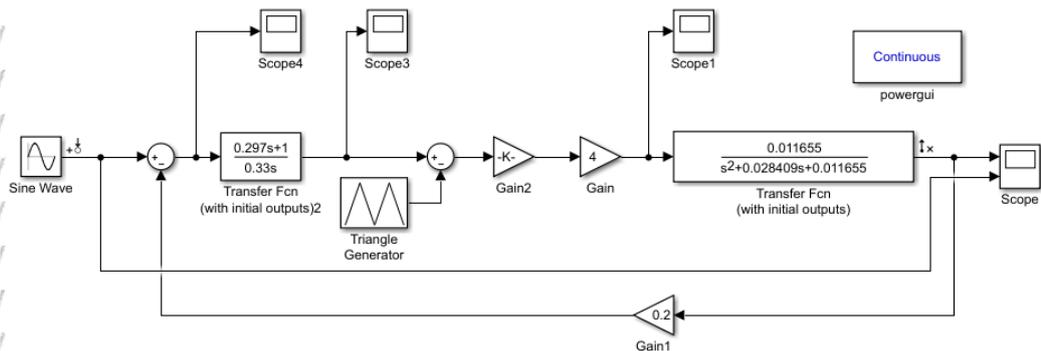
Hasil simulasi THD ditampilkan menggunakan Distortion Analyzer – XDA1 dan pencapaian waktu THD terbaik ditampilkan perwaktu Multisim



Gambar 5.3 THD terhadap waktu (Optimasi MQPSO)

5.3 Pengujian Sistem Penguat Audio Kelas D *loop* tertutup dengan Kompensator PI (tanpa optimasi) menggunakan *Matlab Simulink V17*

Pada pengujian ini, digunakan blok *Simulink* untuk mencari THD dengan memberikan nilai komponen C2, R2, dan R1 ke persamaan fungsi alih kompensator PI. Model *Simulink* Penguat Audio Kelas D pada frekwensi dasar 1KHz ditunjukkan gambar 5.5



Gambar 5.4 Model *Simulink* Penguat audio kelas D

- dengan nilai,
- Sinyal audio input : 1KHz (Range 20Hz – 20KHz)
- Sinyal segitiga : 25KHz
- Gain feedback : 0.2



Gain PWM : 1/0.000002

Gain Driver : 4

Parameter kompensator:

C_2 : 0.47 μ F

R_2 : 1K Ω

R_1 : 820 Ω

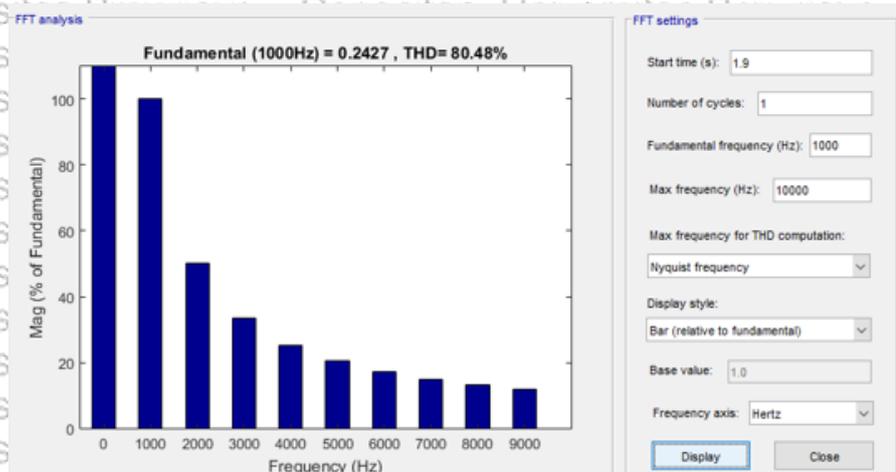
Parameter Low Pass Filter butterworth orde-2

L : 39 μ H

R : 8 Ω

C : 2.2 μ F

Analisis THD digunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) tool pada *Simulink* ditunjukkan pada gambar 5.5, dihasilkan nilai THD 80.48% pada frekwensi 1000-10000 Hz.



Gambar 5.5 Analisis THD menggunakan FFT Tool sebelum Optimasi

5.4 Pengujian Sistem Penguat Audio Kelas D *loop* tertutup dengan Kompensator PI (optimasi MQPSO) menggunakan *Matlab Simulink V17*

Pada pengujian ini, dilakukan dengan mengubah nilai parameter pada kompensator PI setelah didapatkan nilai terbaik dari optimasi MQPSO.

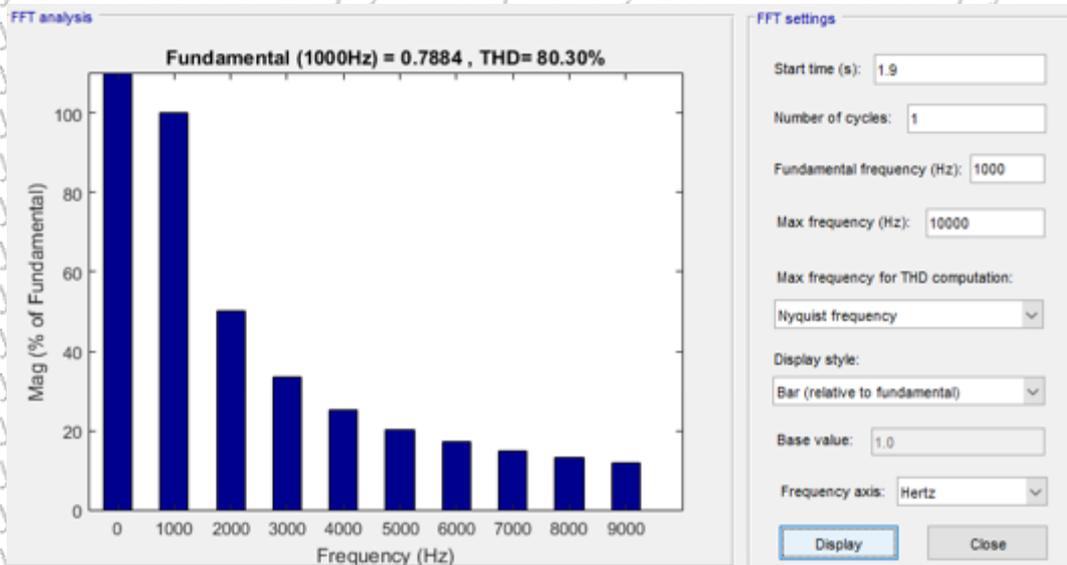
Parameter nilai yang didapatkan sebagai berikut :

C_2 : 0.3325 μ F \approx 0.33 μ F

R_2 : 897 $\Omega \approx$ 900 Ω

R_1 : 989 $\Omega \approx$ 1000 Ω

Analisis THD digunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) tool pada *Simulink* ditunjukkan pada gambar 5.6, dihasilkan nilai THD 80.30% pada frekwensi 1000-10000 Hz.



Gambar 5.6 Analisis THD menggunakan FFT Tool setelah Optimasi

5.5 Analisis Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan menggunakan Software Multisim V14.0 dan *Simulink Matlab* V17. Pada gambar 5.2 dan 5.3 ditunjukkan hasil THD dan waktu kestabilan menggunakan Software Multisim V14.0.

Distortion Analyzer – XDA1 menampilkan nilai THD terbaik sebelum dioptimasi sebesar 0.116% dengan waktu kestabilan 0.247s di gambar 5.2. Sedangkan pada gambar 5.3 Distortion Analyzer – XDA1 menampilkan nilai THD terbaik setelah dioptimasi sebesar 0.114% dengan waktu kestabilan 0.211s. Hasil tersebut menunjukkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kestabilan sistem lebih cepat setelah dioptimasi menggunakan MQPSO. Selisih waktu sebesar 0.036s dan selisih THD akhir sebesar 0.002% menggunakan *Multisim* V14.0. Pengujian menggunakan *Simulink Matlab* V17 ditunjukkan pada gambar 5.5 dan 5.6 menggunakan analisis FFT tool. Hasil nilai THD sebelum dioptimasi sebesar 80.48% dan nilai THD menggunakan optimasi MQPSO sebesar 80.30%. Selisih nilai THD setelah dan sebelum optimasi sebesar 0.14%.



BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Penurunan THD dan kestabilan waktu transien pada Penguat audio *switching* kelas D dengan mengoptimasi parameter Kompensator PI menggunakan Metode *Modified Quantum behaved Particle Swarm Optimization* (MQPSO). Hasilnya menunjukkan bahwa dengan tambahan metode MQPSO untuk mengoptimasi parameter kompensator PI yang terdiri dari C2, R2, dan R1 dengan pengujian didapatkan selisih waktu sebesar 0.036s dan THD akhir sebesar 0.002% untuk mencapai kestabilan menggunakan software *Multisim V14.0* dan selisih THD optimal sebesar 0.14% menggunakan software *Simulink Matlab V17*. Sehingga penggunaan metode MQPSO ini terbukti dapat membantu dalam hal optimasi sistem penguat audio kelas D.

Pengembangan selanjutnya pada penelitian ini dapat dilakukan dengan membangun sebuah simulasi sistem penguat audio kelas D yang ideal dilihat dari nilai THD yang minimum, efisiensi di atas 90% dan waktu kestabilan yang lebih cepat (mendekati real time). Metode optimasi lain seperti *Cuckoo Search Algorithm* (CSA), *Firefly Algorithm* (FA), dan lainnya yang terbaru bisa digunakan untuk mengoptimalkan sistem.

