

PENGUAT KELAS D FREKUENSI TETAP ORDE 2

Budihardja Murtianta¹, Deddy Susilo²

^{1,2}Fakultas Teknik Elektronika dan Komputer, Universitas Kristen Satya Wacana

¹budihardja.murtianta@uksw.edu, ²deddy.susilo@uksw.edu*

* corresponding author

ABSTRACT

The power amplifier determines the output power of the audio amplifier and in this part there will be heat dissipation which is proportional to the output power of the amplifier. To overcome the problem of the audio amplifier, a class D amplifier was designed. The amplifier designed in this paper is Power Amplifier Class D Fixed Frequency Second Order that uses a fixed frequency triangular signal generator and an order 2 low-pass filter. In this case, a power amplifier is designed for a subwoofer that has a frequency range of 20 Hz – 200 Hz because in the audio frequency range it requires relatively large power. The design of the power amplifier and its measurement using the Circuit Maker simulator. The amplifier can work to amplify signals with a maximum amplitude of 1 Vp and a frequency range of 20 Hz – 200 Hz. At a frequency of 20 Hz the shape of the signal is not as good as that of the 200 Hz frequency signal because it is far from the cut-off frequency of the low - pass filter, which is designed to be 250 Hz.

ABSTRAK

Penguat daya menentukan besarnya daya keluaran penguat audio dan pada bagian ini akan terjadi disipasi panas yang sebanding dengan besar daya keluaran penguat. Untuk mengatasi permasalahan penguat audio tersebut dirancanglah penguat kelas D. Penguat yang di rancang pada tulisan ini adalah Penguat Kelas D Frekuensi Tetap Orde Dua yang menggunakan pembangkit sinyal segitiga frekuensi tetap dan tapis pelewat frekuensi rendah orde 2. Dalam hal ini dirancang penguat daya untuk *subwoofer* yang mempunyai jangkauan frekuensi 20 Hz – 200 Hz karena pada jangkauan frekuensi audio tersebut memerlukan daya relatif besar. Perancangan penguat daya dan pengukurannya menggunakan simulator Circuit Maker. Penguat dapat bekerja memperkuat sinyal dengan amplitudo maksimum 1 Vp dan jangkauan frekuensi 20 Hz – 200 Hz. Pada frekuensi 20 Hz bentuk sinyal tidak sebaik bentuk sinyal frekuensi 200 Hz karena jauh dari frekuensi penggal tapis pelewat frekuensi rendah yaitu dirancang 250 Hz.

Article Info

Article history

Received: Oct. 4th, 2021
Revised: May, 10th, 2022
Accepted: May 30th, 2022

Keywords

heat dissipation,
fixed frequency,
order 2 low-pass filter.

PENDAHULUAN

Pada tahap akhir penguat transistor konvensional terdiri dari transistor daya yang memasok arus keluaran secara kontinyu. Beberapa kemungkinan implementasi untuk sistem audio yaitu penguat Kelas A, AB, dan B.

Dibandingkan dengan desain Kelas D, disipasi daya tingkat keluaran adalah sangat efisien. Perbedaan ini memberikan keuntungan Kelas D yang signifikan dalam banyak aplikasi karena semakin rendah disipasi daya akan menghasilkan lebih sedikit panas, menghemat ruang papan sirkuit dan biaya, serta

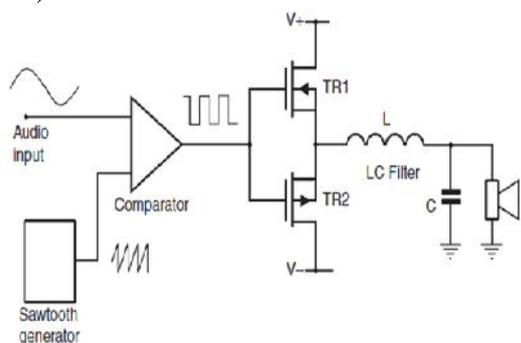
memperpanjang masa pakai baterai dalam sistem portabel. Topologi Kelas A menggunakan transistor sebagai sumber arus dc, mampu memasok arus audio maksimum yang diperlukan oleh penyuar. Kualitas suara yang baik dimungkinkan dengan Kelas A pada tahap keluaran, tetapi disipasi daya berlebihan karena Arus bias dc besar tetap mengalir di transistor tahap keluaran walaupun tidak ada sinyal audio. Topologi Kelas B menghilangkan arus bias dc dan mengurangi disipasi daya secara signifikan. Transistor keluarannya dikontrol secara push-pull, memungkinkan penyuar dipasok arus dari catu positif atau negatif secara bergantian. Ini mengurangi disipasi daya tahap keluaran, dengan hanya arus sinyal yang dihantarkan melalui transistor. Sirkuit Kelas B memiliki kualitas suara yang lebih rendah, karena perilaku tak linear (distorsi *crossover*) ketika arus keluaran melewati arus 0 dan transistor berubah antara kondisi hidup dan mati. Kelas AB, merupakan kompromi hibrida dari Kelas A dan B, menggunakan arus bias dc, tetapi jauh lebih sedikit daripada Kelas A. Arus bias dc yang kecil cukup untuk mencegah distorsi *crossover*, memungkinkan kualitas suara yang baik. Disipasi daya meskipun antara batas Kelas A dan Kelas B, biasanya lebih dekat ke Kelas B. Transistor keluarannya dikontrol secara dorong-tarik (*push-pull*) seperti halnya kelas B. Disipasi Kelas AB disebabkan oleh arus sinyal yang menghantar pada transistor.

Penguat kelas-D atau penguat *switching* adalah penguat elektronik di mana perangkat penguat (transistor, biasanya MOSFET) beroperasi sebagai sakelar elektronik, dan bukan sebagai perangkat penguatan linier seperti pada penguat lainnya. Penguat ini beroperasi dengan cepat beralih bolak-balik antara polaritas positif dan negatif, diberi umpan oleh modulator lebar pulsa, atau teknik terkait untuk mengkodekan input audio ke dalam rangkaian pulsa. Audio lewat melalui tapis pelewat frekuensi rendah sederhana ke penyuar. Pulsa frekuensi tinggi diblokir. Karena pasangan transistor keluaran tidak

pernah konduksi pada saat yang sama, tidak ada jalur lain untuk aliran arus selain dari tapis pelewat frekuensi rendah dan penyuar. Efisiensi sangat tinggi mengingat idealnya tidak ada disipasi daya pada komponen penguat tahap akhirnya. Penguat yang bekerja di Kelas D berbeda secara radikal dari kelas A, B, dan AB yang lebih dikenal sebelumnya. Kelas-D tidak ada perangkat output yang beroperasi dalam mode linier. Penguat tahap akhir diaktifkan dan dimatikan pada frekuensi ultrasonik, keluaran dihubungkan secara bergantian ke tiap polaritas catu. Saat arus dari sinyal masukan bervariasi, rata-rata tegangan keluaran bervariasi sebanding dengan masukannya juga dan rata-rata dilakukan oleh tapis pelewat frekuensi rendah keluaran. Besar keluaran juga berbanding lurus dengan tegangan catu yang dipergunakan. Frekuensi pensakelaran (*switching*) yang lebih tinggi membuat filter keluaran lebih sederhana dan lebih kecil, tetapi cenderung meningkatkan rugi-rugi *switching* dan distorsi.

Permasalahan disipasi daya yang dialami pada penguat-penguat kelas A, B dan AB akan diatasi oleh penguat kelas D. Penerapan penguat kelas D sebagai penguat daya *subwoofer* yang mempunyai rentang frekuensi 20 Hz -200 Hz. Penguat untuk sinyal dengan frekuensi rendah ini memerlukan daya yang lebih besar daripada sinyal-sinyal audio dengan frekuensi yang lebih tinggi. Sehingga penguat kelas D adalah cukup efisien dipergunakan untuk memperkuat sinyal-sinyal frekuensi rendah yang membutuhkan daya lebih besar karena disipasi daya penguat ini kecil. Pada penelitian ini akan dibahas tentang penguat kelas D frekuensi tetap orde dua secara prinsip dasar, bagan dasar, untai dasar serta hasil pengukuran yang dilakukan dengan menggunakan simulator Circuit Maker. Penguat kelas D yang dirancang menggunakan pembangkit gelombang segitiga dengan frekuensi yang tetap serta menggunakan tapis pelewat frekuensi rendah orde 2. Penguat kelas D terdiri dari bagian-bagian dasar yaitu: sinyal masukan audio, pembangkit gelombang

periodik, pembanding, penguat daya, tapis dan penyuar. Bagan dasar dari penguat kelas D ditunjukkan pada Gambar 1 (Douglas Self, 2009).



Gambar 1. Bagan Dasar Penguat Kelas D

Pada masukan pembanding (*comparator*) sinyal audio dibandingkan dengan gelombang yang dapat berupa gigi gergaji atau segitiga yang dihasilkan oleh pembangkit gelombang periodik. Hasil pembandingan tersebut menghasilkan sinyal Modulasi Lebar Pulsa atau PWM (*Pulse Width Modulation*) dimana lebar pulsa akan sebanding dengan aras sinyal audio. Sinyal PWM ini akan diumpankan ke penguat tahap akhir untuk diperkuat dayanya. Penguat tahap akhir bisa berupa penguat daya transistor atau MOSFET yang bekerja secara dorong-tarik (*push-pull*). Keluaran penguat daya berupa sinyal PWM dengan daya besar akan dilewatkan pada tapis pelewat frekuensi rendah orde 2 yang terdiri dari induktor dan kapasitor sehingga keluaran sinyal pada beban dalam hal ini berupa penyuar (*loud speaker*) akan sesuai dengan bentuk sinyal audio pada masukan pembanding.

Pembangkit Gelombang Segitiga

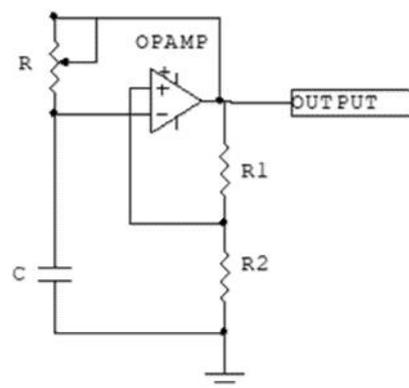
Pembangkit gelombang segitiga terdiri dari untai pembangkit gelombang kotak dan untai integrator.

Untai Pembangkit Gelombang Kotak

Untai ini menggunakan penguat operasi yang diaplikasikan sebagai pembangkit gelombang kotak periodik yang mempunyai *duty cycle* 50% dengan frekuensi tertentu. Untai pembangkit gelombang kotak ditunjukkan pada Gambar 2. Besarnya frekuensi gelombang kotak ditentukan oleh hambatan R dan

kapasitor C dengan hubungan formula (Ronak Patel, 2021).

$$f = \frac{1}{2,1976.R.C} \tag{1}$$



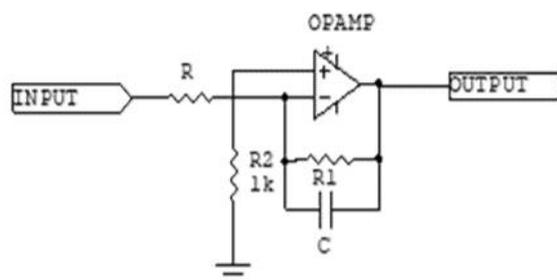
Gambar 2. Pembangkit Gelombang Kotak

Untai Integrator

Untai ini menggunakan penguat operasi yang diaplikasikan sebagai integrator dan dapat dilihat pada Gambar 3. Keluaran untai merupakan hasil integrasi dari sinyal masukan. Dalam hal ini sinyal masukan berupa aras “1” atau “-1” maka keluarannya akan berupa lereng yang naik atau turun sebagai fungsi waktu. Karena keluaran berupa lereng naik atau turun maka terbentuklah gelombang segitiga. Kecepatan naik atau turunnya lereng ditentukan oleh hambatan R dan kapasitor C dengan hubungan rumus sebagai berikut (George Clayton, 2003):

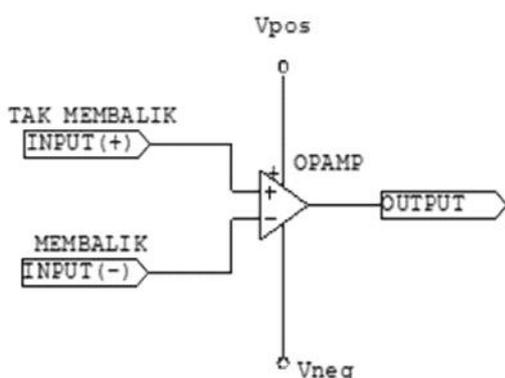
$$V_o = \frac{1}{C} \int_0^t I_i . dt \tag{2}$$

$$V_o = \frac{V_i}{R.C} \times t \tag{3}$$



Gambar 3. Untai Integrator
Pembanding (*Comparator*)

Pembanding menggunakan penguat operasi yang dioperasikan sebagai pembanding yang akan membandingkan besar aras sinyal pada masukan membalik dan aras sinyal pada masukan tak membalik. Jika aras sinyal pada masukan tak membalik lebih besar dari aras sinyal pada masukan membalik maka keluarannya akan berupa aras +Vcc dan jika aras sinyal pada masukan tak membalik lebih kecil dari aras sinyal pada masukan membalik maka keluarannya akan berupa aras -Vcc. Jadi keluaran pembanding hanya berupa aras “1” atau “-1”. Dalam hal ini yang dibandingkan pada masukannya adalah sinyal audio dan gelombang segitiga sehingga keluarannya akan berupa sinyal PWM. Penguat operasi sebagai pembanding ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pembanding

Penguat operasi yang dipergunakan harus diperhatikan tanggapan frekuensi atau frekuensi penggal atasnya untuk memastikan kemampuan mengolah sinyal dengan frekuensi tertentu. Adapun kemampuan penguat operasi terhadap tanggapan frekuensi dinyatakan dengan faktor *Slew-Rate* SR (James M Fiore, 2021) dengan rumus berikut:

$$SR = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot Vp \tag{4}$$

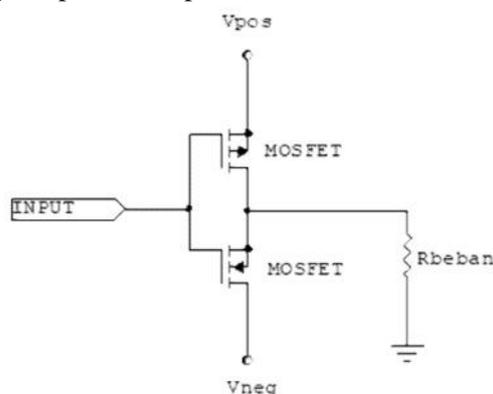
Dimana: f = frekuensi sinyal maksimum

Vp = amplitudo sinyal keluaran

Penguat Daya

Penguat daya berfungsi memperbesar daya dalam hal ini yang diperbesar adalah tegangan atau arus atau keduanya. Penguat daya pada umumnya akan terdapat disipasi daya

yang berupa panas yang besarnya sebanding perkalian arus yang melewati komponen penguat daya dengan beda tegangan pada komponen penguat daya tersebut. Pada penguat kelas D komponen penguat daya berupa sepasang transistor atau MOSFET sebagai dorong tarik dan titik kerjanya diatur sedemikian sehingga komponen tersebut bekerja sebagai sakelar elektronik yang hanya mengenal keadaan “on” atau saturasi dan “off” atau mati. Pada keadaan “on” beda tegangan antara kaki Collector dan Emitter transistor atau kaki Drain dan Source MOSFET adalah kecil mendekati nol tetapi arus yang mengalir adalah besar sesuai arus beban sehingga disipasi dayanya akan kecil sekali mendekati nol. Pada keadaan “off” beda tegangan antara kaki Collector dan Emitter transistor atau kaki Drain dan Source MOSFET adalah besar mendekati tegangan catu tetapi arus yang mengalir adalah kecil sekali mendekati nol sehingga disipasi dayanya akan kecil sekali mendekati nol. Dengan demikian penguat daya kelas D mempunyai disipasi daya yang kecil. Penguat daya dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Penguat Daya

Besarnya daya keluaran penguat dinyatakan dengan persamaan:

$$Pout = \frac{Vp^2}{2Rl} \tag{5}$$

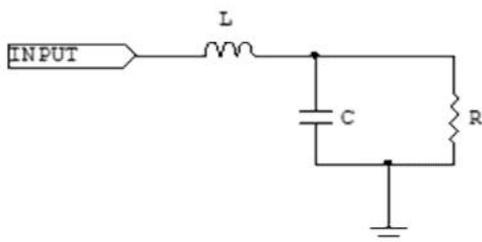
Dimana: Pout = daya keluaran penguat

Vp = tegangan puncak sinusoida

Rl = beban pada keluaran penguat

Tapis

Tapis yang dipergunakan pada keluaran penguat kelas D berupa tapis pelewat frekuensi rendah orde 2 yang terdiri dari induktor L dan kapasitor C. Keluaran tapis berhubungan dengan beban penguat berupa resistor R atau umumnya berupa penyuar (*loudspeaker*). Untai tapis yang dipergunakan dapat dilihat pada Gambar 6. Parameter penting untuk merancang tapis antara lain frekuensi resonansi, frekuensi penggal, faktor kualitas dan orde tapis.



Gambar 6. Tapis Pelewat Frekuensi Rendah Orde 2

Faktor kualitas Q dari tapis didefinisikan sebagai:

$$Q = 2\pi \frac{\text{energi tersimpan maksimum}}{\text{distipasi energi per-siklus}} \quad (6)$$

Besarnya faktor kualitas untuk untai resistor seri dengan induktor atau kapasitor adalah:

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} \quad (7)$$

Besarnya faktor kualitas untuk untai resistor paralel dengan induktor atau kapasitor adalah:

$$Q = \frac{R}{\omega_0 L} = \omega_0 C \cdot R \quad (8)$$

Besarnya frekuensi resonansi dari tapis adalah:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (9)$$

Agar diperoleh respon tapis yang tidak mempunyai pemuncakan (*spike*) maka nilai faktor kualitas Q harus = 1 (Albert Paul Malvino, 2021). Dengan demikian dari persamaan (5) dan (6) diperoleh nilai komponen induktor yang seri dengan resistor R dan kapasitor yang paralel dengan resistor R adalah (Charles K. Alexander, 2013):

$$L = \frac{R}{\omega_0} = \frac{R}{2\pi f_0} \quad (10)$$

$$C = \frac{1}{\omega_0 R} = \frac{1}{2\pi f_0 R} \quad (11)$$

METODE

Metode yang digunakan pada perancangan Penguat Kelas D Frekuensi Tetap Orde Dua ini mempunyai urutan sebagai berikut:

1. Menentukan penggunaannya untuk penguat *subwoofer* dengan daya = 5 W, impedansi = 8 dan tanggapan frekuensi = 20 Hz – 200 Hz.
2. Merancang penguat sesuai dengan tujuan penggunaan dengan menentukan komponen-komponen elektronika bagi untai-untai pembentuk penguat berdasarkan dasar teori dan perhitungan-perhitungan sesuai rumus-rumus dari pustaka yang tersedia.
3. Melakukan pengukuran dengan menggunakan simulator *Circuit Maker*.
4. Melakukan analisa dari hasil tiap-tiap pengukuran pada penguat tersebut.

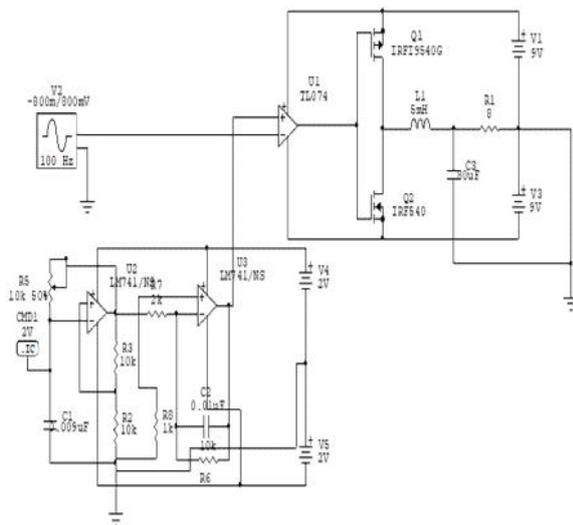
HASIL DAN PEMBAHASAN

Teorema pengambilan sampel yang sangat berguna dikenal sebagai Teorema Nyquist atau Teorema Shannon yang memberikan kondisi yang memadai untuk memulihkan sinyal kontinu dari sampelnya (Benoit Boulet, 2006). Dengan jangkauan frekuensi penguat 20 Hz – 200 Hz maka sesuai dengan syarat Nyquist frekuensi sampling minimal adalah 2 kali frekuensi sinyal harmonik tertinggi yang dikehendaki. Dalam hal ini frekuensi tertinggi adalah 200 Hz dan frekuensi harmonik yang dikehendaki hingga harmonik ke-10 atau 2 KHz. Jadi ditetapkan frekuensi sampling yang dihasilkan oleh gelombang kotak adalah 10 KHz.

Sesuai dengan persamaan (1) jika frekuensi = 10 kHz dan ditetapkan nilai R5 = 5 K maka diperoleh nilai C1 = 1,009 uF.

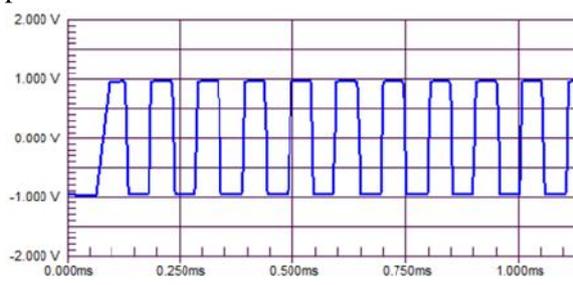
Untuk daya keluaran penguat ditetapkan sebesar 5 W, maka dengan beban R1 = 8 sesuai persamaan (5) maka besar keluaran penguat = 8,94 V. Maka besarnya tegangan catu di tetapkan = 9 V.

Untuk tapis pelewat frekuensi rendah orde 2 dirancang melewatkan frekuensi 200 Hz ke bawah dan ditentukan frekuensi resonansi tapis = 250 Hz serta beban $R1 = 8 \Omega$, maka sesuai dengan persamaan (10) dan (11) diperoleh nilai induktor $L1 = 5 \text{ mH}$ dan kapasitor $C3 = 80 \mu\text{F}$. Untai hasil rancangan ditunjukkan pada Gambar 7.



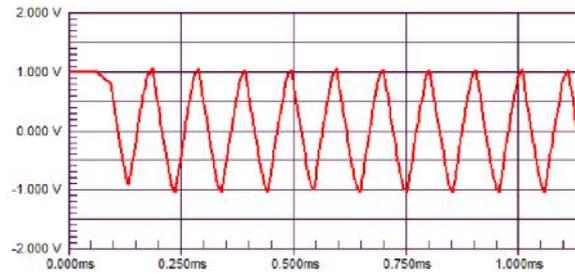
Gambar 7. Untai Penguat Kelas D Frekuensi Tetap Orde 2

Pembangkit gelombang kotak menggunakan penguat operasi LM741 yang diberi tegangan catu $\pm 2 \text{ V}$ menghasilkan amplitudo 1 V dengan frekuensi 10 kHz dan hasil pengukuran seperti pada Gambar 8.



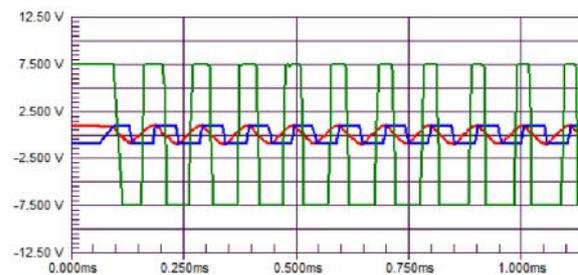
Gambar 8. Keluaran Pembangkit Gelombang Kotak

Pembangkit gelombang segitiga menggunakan penguat operasi LM741 dioperasikan sebagai integrator yang diberi tegangan catu $\pm 2 \text{ V}$ menghasilkan amplitudo 1 V dengan frekuensi 10 kHz dan hasil pengukuran seperti pada Gambar 9.



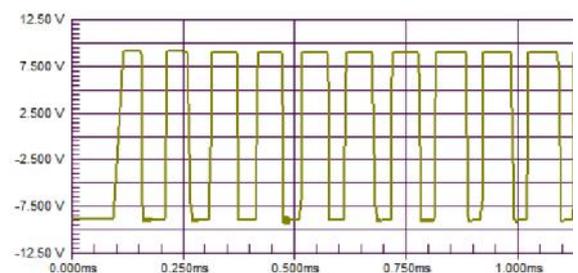
Gambar 9. Keluaran Untai Integrator

Untuk membandingkan sinyal audio dan gelombang segitiga (merah) digunakan penguat operasi TL072 yang dioperasikan sebagai pembanding yang diberi tegangan catu $\pm 9 \text{ V}$ menghasilkan gelombang kotak (hijau) dengan amplitudo 7,5 V dengan frekuensi 10 kHz dan hasil pengukuran seperti pada Gambar 10. Dalam hal ini belum ada sinyal audio atau $V_i = 0$.



Gambar 10. Keluaran Pembanding

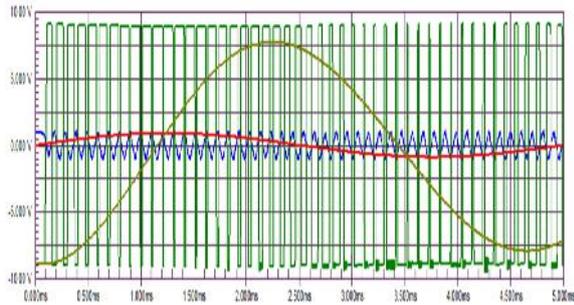
Penguat daya menggunakan penguat daya MOSFET IRFI9540 dan MOSFET IRFI540 yang dioperasikan dorong tarik yang diberi tegangan catu $\pm 9 \text{ V}$ menghasilkan amplitudo 9 V dengan frekuensi 10 kHz dan hasil pengukuran seperti pada Gambar 11.



Gambar 11. Keluaran Penguat Daya MOSFET

Berikut ini ditunjukkan besaran dari bentuk-bentuk yang dihasilkan pengukuran pada tiap-

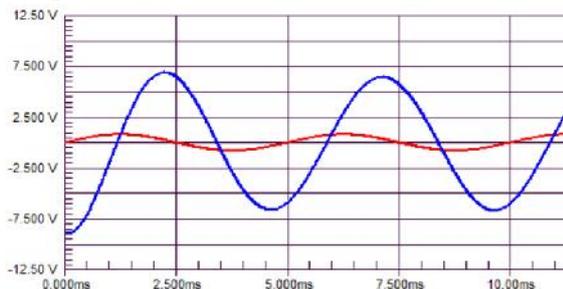
tiap bagian dari penguat yang dapat dilihat pada Gambar 12.



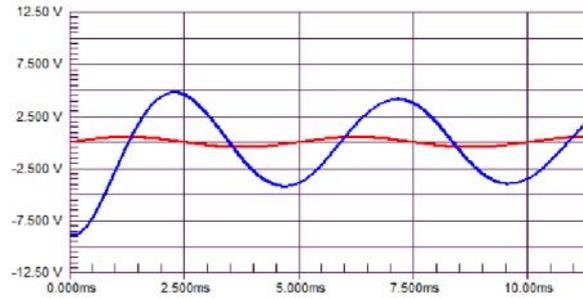
Gambar 12. Sinyal-Sinyal Penguat Kelas D Frekuensi Tetap Orde 2

1. Sinyal audio dengan amplitudo 900 mVp dan frekuensi 200 Hz diumpankan ke masukan membalik pembeding (merah).
2. Gelombang segitiga dengan amplitudo 1 Vp dan frekuensi 10 kHz diumpankan ke masukan tak membalik pembeding (biru).
3. Keluaran MOSFET berupa PWM dimana *duty cycle* sebanding dengan besarnya tegangan sinyal audio (hijau).
4. Keluaran tapis pelewat frekuensi rendah yang sama bentuk dan frekuensinya dengan sinyal audio tetapi beda amplitudo karena ada faktor penguatan (coklat).

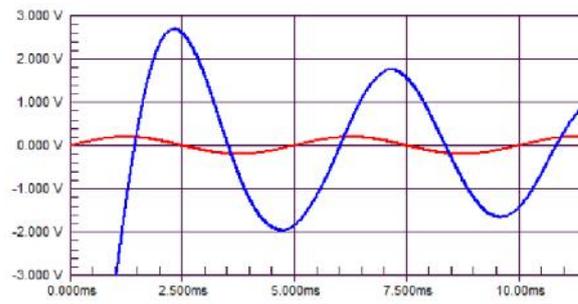
Berikut dilakukan pengukuran dengan variasi amplitudo signal masukan audio 800 mV, 500 mV dan 200 mV serta frekuensi signal masukan audio 200 Hz, 100 Hz dan 20 Hz dan hasil pengukuran ditunjukkan pada Gambar 13 sampai dengan Gambar 18.



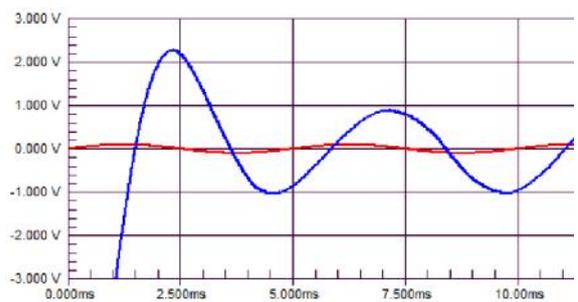
Gambar 13. Sinyal Keluaran Penguat Kelas D (Biru) 6,4 Vp dengan Masukan Sinyal Audio (Merah) 800 mVp Frekuensi 200 Hz.



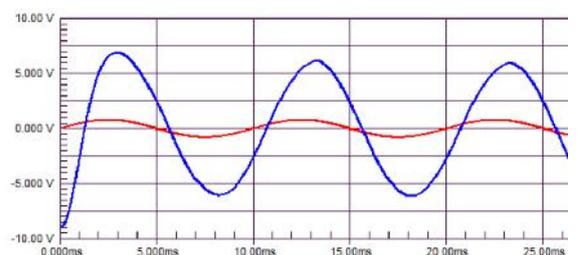
Gambar 14. Sinyal keluaran penguat kelas D (biru) 4 Vp dengan masukan sinyal audio (merah) 500 mVp.



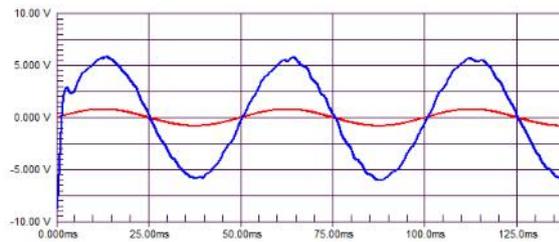
Gambar 15. Sinyal Keluaran Penguat Kelas D (Biru) 1,6 Vp Dengan Masukan Sinyal Audio (Merah) 200 mVp



Gambar 16. Sinyal keluaran penguat kelas D (biru) 800 mVp dengan masukan sinyal audio (merah) 100 mVp.



Gambar 17. Sinyal keluaran penguat kelas D (biru) 6,2 Vp dengan masukan sinyal audio (merah) 800mVp frekuensi 100 Hz.



Gambar 18. Sinyal keluaran penguat kelas D (biru) 6 Vp dengan masukan sinyal audio (merah) 800 mVp frekuensi 20 Hz.

SIMPULAN

Berdasarkan penelitian dan pengukuran yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut: (1) Sinyal keluaran dan sinyal masukan penguat adalah sefasa untuk frekuensi yang jauh dengan frekuensi penggal tapis dan akan berbeda fasa mendekati 90° untuk frekuensi yang mendekati frekuensi penggal tapis, (2) Sinyal keluaran untuk frekuensi terendah 20 Hz tampak tidak sempurna karena frekuensi sinyal makin jauh dari frekuensi penggal tapis, (3) Duty cycle sinyal PWM sebanding dengan besarnya aras tegangan sinyal masukan audio, (4) Besarnya aras tegangan sinyal keluaran penguat sebanding dengan duty cycle sinyal PWM, (5) Amplitudo maksimal sinyal audio tidak boleh melebihi amplitudo gelombang segitiga, dan (6) Faktor penguatan tegangan penguat sebanding dengan besarnya tegangan catu.

DAFTAR RUJUKAN

- Self, Douglas. 2009. *Audio power amplifier design handbook*. Edisi ke-5. Elsevier Ltd, USA, hal. 368.
- Patel, Ronak M.Sc. *Physics, Operational Amplifier and It's Application*. https://coursecontent.indusuni.ac.in/wp-content/uploads/sites/8/2020/03/EMT_Electronics-I_Unit-IV.pdf, diakses 1 September 2021.
- Clayton, George and Winder, Steve. 2003. *Operational Amplifier*. Edisi ke-5, Newnes-Butterworth, USA, hal. 147.
- Fiore, James M. 2021. *Operational Amplifiers & Linear Integrated Circuits: Theory and Application*. ISBN13: 978-1796856897, hal. 173.
- Malvino, Albert Paul. 2016. *Electronic principles*. Edisi ke-8, McGraw-Education, New York, hal 804-808.
- Alexander, Charles K. 2013. *Fundamentals of electric circuits*. Edisi ke- 5, McGraw-Hill Companies, Inc. New York, hal. 632-635.
- Boulet, Benoit. 2006. *Fundamentals of Signals and Systems*. Charles River Media, Boston, Massachusetts, hal 541-543.