

Karakteristik *Power Amplifier* Kelas D dengan Teknologi PFC

**Indah Martha Fitriani, Candra Pradhana, Erlillah Rizqi Kusuma Pradani,
Syarifatul Izza**

Universitas Islam Raden Rahmat, Universitas Islam Malang

indahmartha28@gmail.com

Abstract. *Power amplifier* alat penguat sinyal yang banyak digunakan sebagai pengeras suara. Masalah yang sering dijumpai dalam penggunaan *power amplifier* adalah efisiensi yang dihasilkan. Efisiensi *power amplifier* rata-rata berkisar 30% sampai dengan 70%. Berdasarkan masalah yang timbul, dibuat *power amplifier* kelas D yang dilengkapi dengan teknologi PFC (*power factor correction*) untuk menaikkan efisiensi tersebut. Dalam penelitian ini, *power amplifier* kelas D tanpa PFC menghasilkan efisiensi 54% saat beban 896Watt. Namun, saat dilengkapi PFC mampu menghasilkan efisiensi 90% saat beban 896Watt. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan PFC mampu memperbaiki efisiensi yang dihasilkan oleh *power amplifier* kelas D.

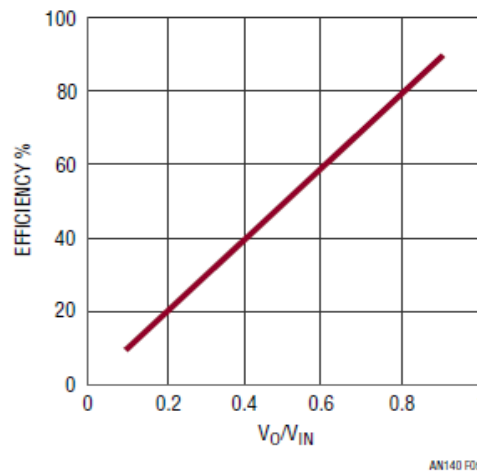
Kata kunci: *Power amplifier*, Efisiensi, Kelas D

1. Pendahuluan

Teknologi saat ini berkembang cukup pesat, khususnya dibidang audio. Hal ini dibuktikan dengan munculnya jenis-jenis *power amplifier* untuk pengeras suara seperti kelas A, B, AB, C, D, H, dst. *Power amplifier* merupakan alat penguat daya tingkat terakhir sebelum penguat sinyal [1]. Input semua kelas *power amplifier* sama, yaitu sinyal dengan amplitudo kecil. Perbedaan dari setiap kelas *power amplifier* terletak pada bentuk rangkaiannya. Poin penting yang harus diperhatikan dalam pembuatan *power amplifier* adalah efisiensi yang dihasilkan. Efisiensi pada *power amplifier* dapat mempengaruhi penggunaan daya listrik. Semakin tinggi efisiensi, maka daya yang terbuang menjadi panas akan semakin sedikit. Sedangkan, apabila efisiensi keluaran rendah, maka akan semakin boros listrik.

Power amplifier kelas A, B, AB, dan C masih tersusun dari rangkaian transistor, hal ini dapat menimbulkan banyak daya yang terbuang menjadi panas (disipasi daya) sehingga efisiensinya sangat rendah (kurang dari 70%) [2], [3], sedangkan rangkaian kelas D mampu lebih dari 90% [3], [4]. Pendapat ini memperkuat penelitian sebelumnya oleh Santoso (2013) yang berpendapat bahwa penguat audio kelas D memiliki efisiensi 90% - 95% dibandingkan kelas lain karena penggunaan MOSFET pada kelas D sebagai penguat akhir mampu menghasilkan panas yang lebih rendah dibandingkan penggunaan transistor sebagai penguat akhirnya, sehingga daya pada kelas D yang terbuang lebih sedikit [4].

Komponen utama penyusun *power amplifier* adalah transformator seperti transformator konvensional dan SMPS, namun penggunaan transformator konvensional memiliki efisiensi yang cukup rendah dibandingkan SMPS dikarenakan proses regulasi linear membuang daya yang tidak terpakai menjadi panas, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 berikut ini.



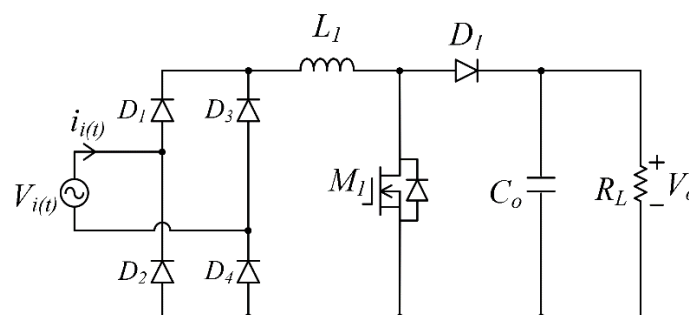
Gambar 1. Maksimum Efisien pada Regulasi Linear [5]

Regulasi dengan V_o/V_{in} kecil kurang efisien, ini dikarenakan pada kondisi tersebut, drop tegangan yang dihasilkan dibuang menjadi panas. Pada SMPS (*Switching Mode Power Supply*) regulasi yang dihasilkan berupa perubahan PWM (*Pulse Wave Modulation*), dimana pada metode ini tidak memotong tegangan menjadi panas, melainkan merubah waktu *on* dan waktu *off* pada saklar semikonduktor seperti MOSFET, Transistor, IGBT, dan GTO, karena daya yang dibuang menjadi panas sangat sedikit maka efisiensi sangat tinggi yaitu dapat mencapai lebih dari 80% [6]–[8]. Oleh sebab itu penelitian ini menerapkan SMPS pada power amplifier kelas D supaya tidak terlalu mempengaruhi efisiensi keluaran *power amplifier*.

Power amplifier kelas D yang di desain pada penelitian ini menggunakan transformator SMPS dan dilengkapi dengan teknologi PFC untuk dapat memperbaiki efisiensi. Penggunaan PFC dapat diterapkan sebagai metode regulasi dengan kecepatan yang tinggi seperti SMPS. Selain itu, PFC dengan dual *boost converter* dapat memperbaiki *power factor* sampai 0,9332 [9].

2. Metode Penelitian

2.1. Perancangan PFC



Gambar 2. Desain rangkaian PFC [10]

Penggunaan PFC digunakan untuk memperbaiki faktor daya pada sistem SMPS. Untuk desain PFC jika daya yang diinginkan 2000 watt, maka dapat dihitung dengan persamaan (1).

Maksimum daya dengan efisiensi 90%,

$$P_{max} = \frac{P_{Out}}{n} \tag{1}$$

$$P_{max} = \frac{2000}{0.9}$$

$$P_{max} = 2223 \text{ Watt atau } 1111 \text{ Watt/Channel}$$

Untuk dapat men-supply *amplifier*, jika SMPS memiliki target efisiensi 90% maka SMPS harus memiliki daya minimum.

Minimum daya dengan efisiensi 90%,

$$P_{min} = \frac{P_{Amp}}{\eta} \tag{2}$$

$$P_{min} = \frac{2423}{0.9}$$

$$P_{min} = 2440 \text{ Watt}$$

Input SMPS diambil pada PFC, jika PFC memiliki efisiensi 90% maka minimum daya yang dibutuhkan.

Minimum daya dengan efisiensi 90%,

$$P_{min} = \frac{P_{SMPS}}{\eta} \tag{3}$$

$$P_{min} = \frac{2440}{0.9}$$

$$P_{min} = 2710 \text{ Watt}$$

Maka parameter PFC yang akan digunakan seperti Tabel 1.

Tabel 1. Parameter PFC

Parameter	Simbol	Nilai
Range AC Input Voltage	V_i	150 ~ 250VAC
Line Frequency	F_{in}	50Hz
Nominal DC Output	V_o	400VDC
Maximum DC Output	$V_{o \max}$	420VDC
Switching Frequency	F_{sw}	100KHz
Maximum Output Power	$P_{o \max}$	2710Watt
Target Efficiency	η	90%
Power Factor	PF	0.9

Pada bagian dioda penyearah, dibutuhkan untuk merubah tegangan AC menjadi tegangan DC agar dapat di-switch oleh MOSFET, sehingga *diode bridge* yang dibutuhkan dapat ditentukan persamaan (4), tentang maksimum arus RMS masukan.

$$I_{in} = \frac{P_{o \max}}{V_{ac \min} \cdot PF} \tag{4}$$

$$I_{in} = \frac{2710}{150 \cdot 0.9}$$

$$I_{in} = 20,07A$$

Sehingga *diode bridge* yang digunakan harus memiliki kemampuan arus > 20A .

Pada rangkaian PFC dibutuhkan komponen induktor yang digunakan untuk menaikkan tegangan (*Boost Converter*) sampai 420VDC_{peak}, maka perlu adanya desain induktor untuk spesifikasi diatas.

Untuk desain induktor PFC adalah,

$$L = \frac{1}{\%Ripple} \times \frac{V_i \min^2}{P_{o \max}} \times \left(1 - \left(\frac{\sqrt{2} \cdot V_i \min}{V_o}\right)\right) \times F_{sw} \tag{5}$$

$$\%Ripple = \frac{\sqrt{2} \cdot V_i \min}{V_o \max} \tag{6}$$

$$\%Ripple = \frac{\sqrt{2} \cdot 150}{420}$$

$$\%Ripple = 0,5$$

$$L = \frac{1}{0.5} \times \frac{150^2}{2710} \times \left(1 - \left(\frac{\sqrt{2} \cdot 150}{400}\right)\right) \times \frac{1}{100.000}$$

$$L = 78\mu H$$

Untuk dapat bekerja dengan baik, kawat lilitan yang digunakan untuk lilitan induktor harus disesuaikan kemampuan antara daya yang akan dihasilkan dan daya kawat lilitan yang digunakan, untuk kawat lilitan dapat ditentukan dengan mencari arus yang lewat pada induktor dan diameter kawat yang akan digunakan sesuai persamaan (7), tentang maksimum arus pada induktor.

$$I_{L\max} = \frac{\sqrt{2} \cdot P_{o\max}}{V_{i\min}} \times \left(1 + \left(\frac{\%Ripple}{2}\right)\right) \tag{7}$$

$$I_{L\max} = \frac{\sqrt{2} \cdot 2710}{150} \times \left(1 + \left(\frac{0.25}{2}\right)\right)$$

$$I_{L\max} = 31,8A$$

Ukuran kawat yang digunakan untuk lilitan induktor dapat ditentukan dengan tabel kemampuan hantar arus kawat tembaga email pada Gambar 3.

Conductor			Inductance	Current - Carrying Capacity at 30° C *		Short circuit current at 1 sec
Nom. Cross Section Area	DC Resistance at 20°C	AC Resistance at 70°C		in air	in ground	
(mm ²)	Max. (Ω/km)	Max. (Ω/km)	(mH/km)	Max. (A)	Max. (A)	Max. (kA)
1.5	12.1	14.478	0.328	22	27	0.17
2.5	7.41	8.866	0.304	29	36	0.29
4	4.61	5.516	0.303	40	47	0.46
6	3.08	3.685	0.288	50	58	0.69
10	1.83	2.190	0.269	69	78	1.15

Gambar 3. Tabel Kemampuan Hantar Arus [11]

Merujuk pada Gambar 3, ukuran kawat yang digunakan untuk membuat lilitan PFC minimum berdiameter 4mm² dengan kemampuan arus 40A.

Pada penggunaan MOSFET sebagai *Switch* pada PFC, penentuan MOSFET harus disesuaikan dengan arus yang mengalir pada *switch*, untuk arus RMS pada MOSFET dapat dicari pada persamaan (8) tentang arus pada saklar (MOSFET) PFC.

$$I_{sw\ RMS} = \frac{P_{o\max}}{\sqrt{2} \cdot V_{i\min} \cdot PF} \times \sqrt{2 - \frac{16 \cdot \%Ripple}{3\pi}} \tag{8}$$

$$I_{sw\ RMS} = \frac{2710}{\sqrt{2} \cdot 150 \cdot 0.9} \times \sqrt{2 - \frac{16 \cdot 0,5}{3\pi}}$$

$$I_{sw\ RMS} = 15,29A$$

Sehingga MOSFET yang digunakan harus memiliki $I_D > 15,29A$. Sehingga pada pembuatan alat ini digunakan 2x MOSFET 47N60C3.

Penggunaan dioda pada output PFC dapat ditentukan dari persamaan (9) tentang arus pada dioda PFC.

$$I_{D\ out} = \frac{P_{o\max}}{\sqrt{2} \cdot V_{i\min} \cdot PF} \times \sqrt{\frac{16 \cdot \%Ripple}{3\pi}} \tag{9}$$

$$I_{D\ out} = \frac{2710}{\sqrt{2} \cdot 150 \cdot 0,9} \times \sqrt{\frac{16 \cdot 0,5}{3\pi}}$$

$$I_{D\ out} = 13,13A$$

Sehingga dibutuhkan dioda dengan kemampuan arus 13,13A sesuai perhitungan pada persamaan (9). Untuk Spesifikasi dioda yang digunakan harus memiliki parameter seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Dioda yang Digunakan

Parameter	Simbol	Nilai
<i>Voltage Foward</i>	V_F	150% Output Nominal PFC (600V)
<i>Foward Current</i>	I_F	300% $I_{D out}$ (39,4A)
<i>Time Recovery</i>	T_{rr}	$\leq 100nS$ (UF diode)

Karena PFC direncanakan bekerja pada frekuensi 100KHz maka dioda yang digunakan berjenis *Ultra-Fast Diode* dengan t_{rr} (*time reverse recovery*) minimum 5uS Sehingga pada pembuatan alat ini menggunakan tipe DSEC60-06.

Untuk bagian filter kapasitor dibagian keluaran PFC berguna untuk mengurangi ripple yang dihasilkan, sehingga tegangan menjadi DC dengan rendah ripple, untuk penentuan kapasitor dapat dicari dengan persamaan (10) tentang minimum kapasitor yang digunakan pada keluaran PFC.

$$C_{out} \geq \frac{P_{o max}}{2\pi \cdot f_{in} \cdot V_o \cdot \Delta V_o} \tag{10}$$

$$C_{out} \geq \frac{2710}{2\pi \cdot 50 \cdot 400 \cdot 20}$$

$$C_{out} \geq 1,07mF$$

Dengan toleransi kapasitor sebesar 20%, sehingga minimum kapasitor yang dibutuhkan seperti persamaan (11).

$$C_{min} \geq \frac{C_{out}}{1-20\%} \tag{11}$$

$$C_{min} \geq \frac{1,07}{1-0,2}$$

$$C_{min} \geq 1,378mF$$

Dengan mempertimbangkan kapasitor yang tersedia di pasaran, maka dipilih kapasitor sebesar 470uF secara paralel 3.

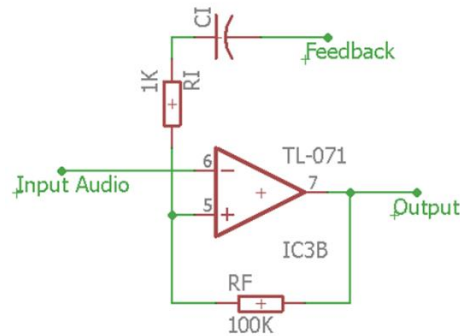
2.2. Perancangan Power Amplifier Kelas D

Power Amplifier didesain memiliki output 1000Watt. Bentuk rangkaian elektronik secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 5, sedangkan dan parameter yang digunakan untuk pembuatan Class D seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter *Power Amplifier* Kelas D

Parameter	Simbol	Nilai
<i>Range DC Input Voltage</i>	V_i	80VDC~100VDC
<i>Range Frequency</i>	F_{audio}	20Hz ~ 20KHz
<i>Switching Frequency</i>	F_{sw}	200KHz
<i>Maximum Output Power</i>	$P_{o max}$	1111Watt
<i>Target Efficiency</i>	η	90%
<i>Load Impedance</i>	R_L	4 Ω

Untuk perancangan komparator sebagai pembanding sinyal audio masukan dan sinyal *carier* gigi gergaji dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian *Comparator* Kelas D

Komparator yang digunakan pada kelas D merupakan komparator yang dikombinasikan sebagai *differentiator* yang difungsikan untuk rangkaian pembangkit sinyal gigi gergaji.

Untuk *hysteresis* yang dihasilkan oleh rangkaian komparator dapat dicari dengan persamaan (12).

$$\beta = \frac{RI}{RI+RF} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{1000}{1000+100.000}$$

$$\beta = 0,01$$

Dengan β yang diketahui, maka dapat dicari *upper trip point* (UTP), *lower trip point* (LTP) dan hysteresis (V_{hys}) komparator dengan persamaan (13).

$$ULP = \beta * (+VCC) \quad (13)$$

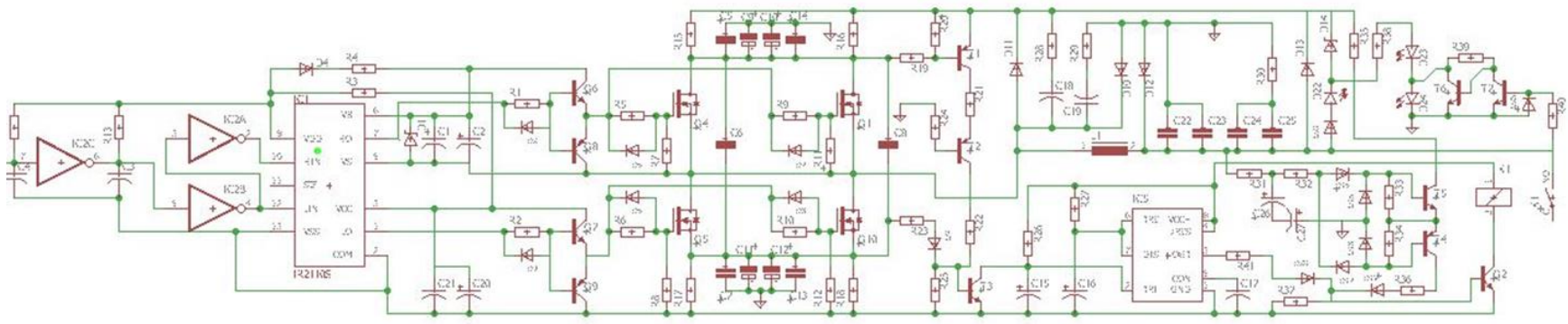
$$ULP = 0,01 * 12$$

$$ULP = 0,12V$$

$$LTP = \beta * (-VCC) \quad (14)$$

$$LTP = 0,01 * (-12)$$

$$LTP = -0,12V$$



Gambar 5. Rangkaian Elektronik *Power Amplifier Kelas D*

$$\begin{aligned}
 V_{\text{hys}} &= \text{ULP} - \text{LTP} \\
 V_{\text{hys}} &= 0,12 - (-0,12) \\
 V_{\text{hys}} &= 0,24\text{V}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Dan untuk penentuan CI yang digunakan sebagai *differentiator* dapat dicari menggunakan persamaan konstanta R-C.

$$\begin{aligned}
 T &= R * C \\
 5 &= 1000 * C \\
 C &= 5\text{nF}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

T = 5 uS untuk F_{sw} 200KHz

Sehingga untuk penggunaan CI yang ideal adalah sekitar 5nF atau nilai lainnya yang tersedia dipasaran yaitu 4n7F.

Untuk perancangan filter induktor dapat diperoleh dari persamaan (17).

$$\begin{aligned}
 L_{\text{Filter}} &= \frac{RL}{2 \cdot \pi \cdot \max F_{\text{audio}}} \\
 L_{\text{Filter}} &= \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 20000} \\
 L_{\text{Filter}} &= 31\mu\text{H}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

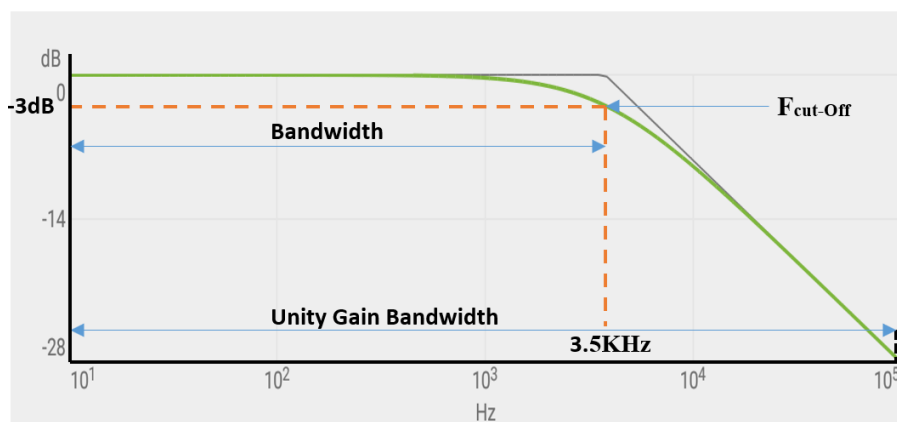
Untuk perancangan filter kapasitor dapat diperoleh dari persamaan (18).

$$\begin{aligned}
 C_{\text{Filter}} &= \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot \max F_{\text{audio}})^2 \cdot L_{\text{Filter}}} \\
 C_{\text{Filter}} &= \frac{1}{(2 \cdot 3.14 \cdot 20 \cdot 10^3)^2 \cdot 31 \cdot 10^{-6}} \\
 C_{\text{Filter}} &= 2,04\mu\text{F}
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Jadi untuk perancangan filter LC didapatkan nilai induktor 31uH dan kapasitor 2,04uF yang akan digunakan sebagai LPF pada *Class D*, LPF ini akan bekerja merubah SPWM menjadi sinyal sinus.

Untuk frekuensi *cut-off* yang dihasilkan dapat dihitung dengan persamaan (19).

$$\begin{aligned}
 F_{\text{cut-off}} &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \\
 F_{\text{cut-off}} &= \frac{1}{2\pi\sqrt{31 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}} \\
 F_{\text{cut-off}} &= 3.5\text{Khz}
 \end{aligned}
 \tag{19}$$



Gambar 6. *Frequency Cut-Off* LPF yang Digunakan

Untuk penentuan MOSFET yang digunakan dapat dicari dengan persamaan (20) dan (21).

$$I_{D\ RMS} = \sqrt{\frac{P_{o\ max}}{R_L}} \quad (20)$$

$$I_{D\ RMS} = \sqrt{\frac{1111}{4}}$$

$$I_{D\ RMS} = 16,67A$$

$$V_{DS\ Min} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{o\ Max} \cdot R_L}{M}} \cdot 1.5 \quad (21)$$

Keterangan : $M = 0,8 \sim 0,9$

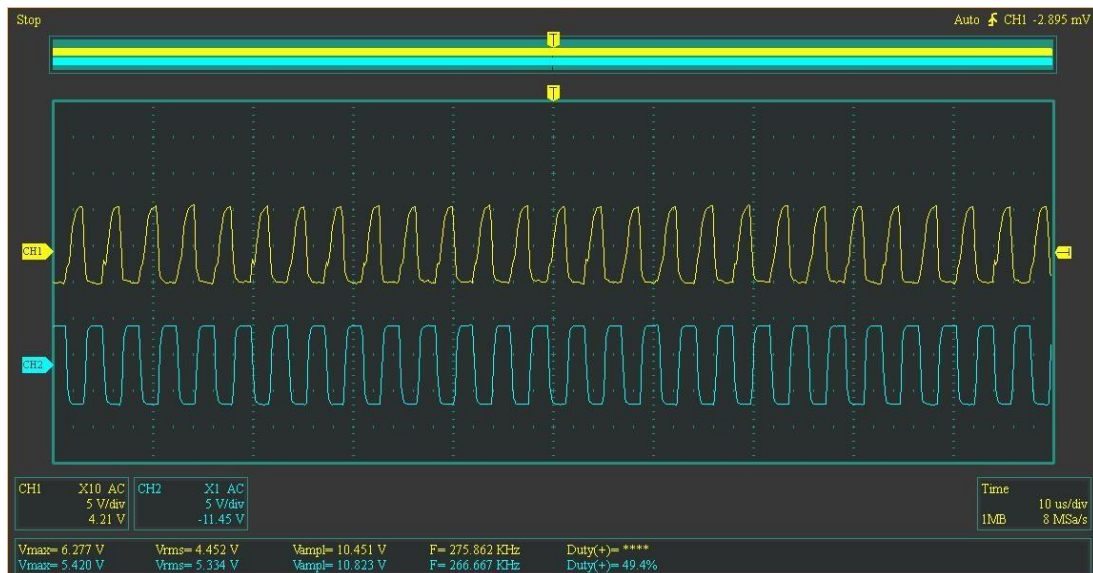
$$V_{DS\ Min} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1111 \cdot 4}{0,9}} \cdot 1.5$$

$$V_{DS\ Min} = 165,62V$$

Jadi MOSFET digunakan adalah seri IRF260N atau 2x IRF250N, karena memiliki spesifikasi yang sudah memenuhi parameter yang ada.

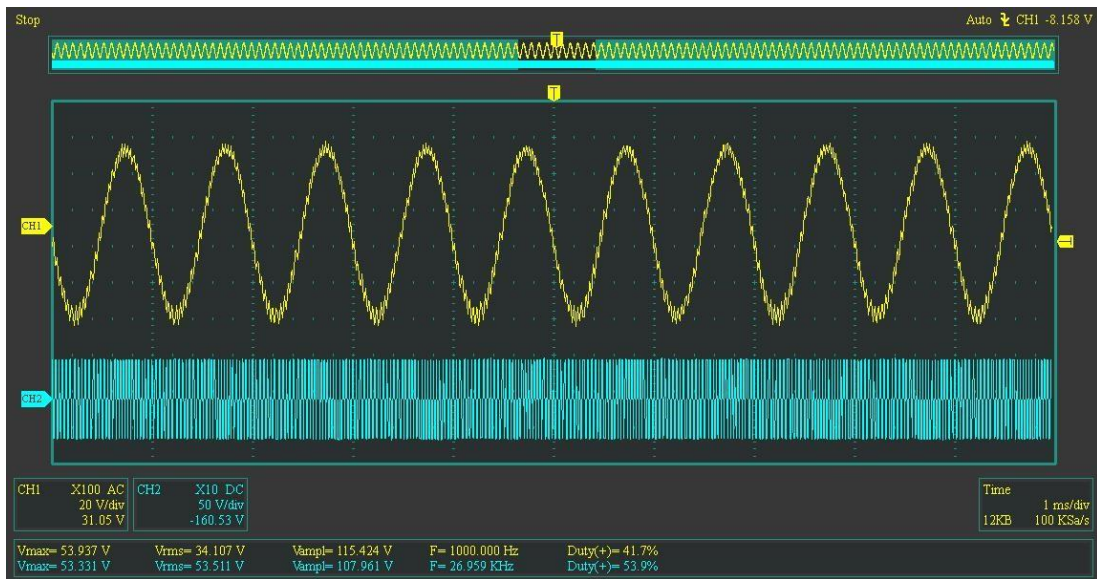
3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 7 merupakan hasil pengujian pada amplifier yang telah diperoleh.

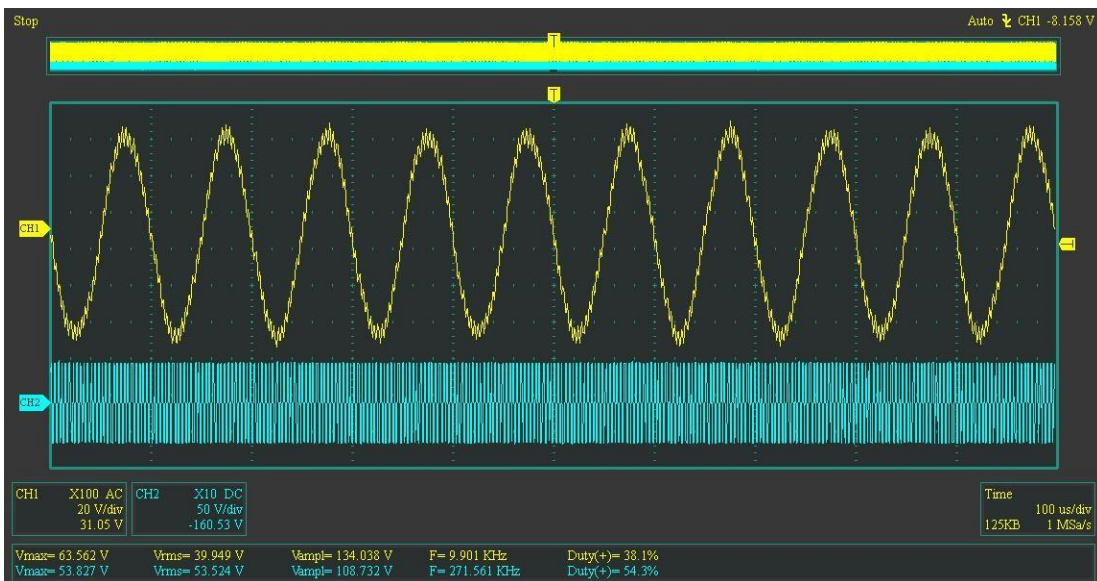


Gambar 7. Sinyal Gate pada Sisi High Side (biru) dan Low Side (kuning)

Gambar 7 merupakan sinyal gate ketika tidak ada sinyal audio, menghasilkan *duty cycle* sebesar 50%, titik pengujian antara gate dan titik referensi (*ground*), ketika ada sinyal audio masuk pada komparator, sinyal audio akan dicacah sehingga menghasilkan *duty cycle* yang bervariasi mulai dari 0% s.d. 100%. Sinyal keluaran yang dihasilkan oleh kelas D ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9.

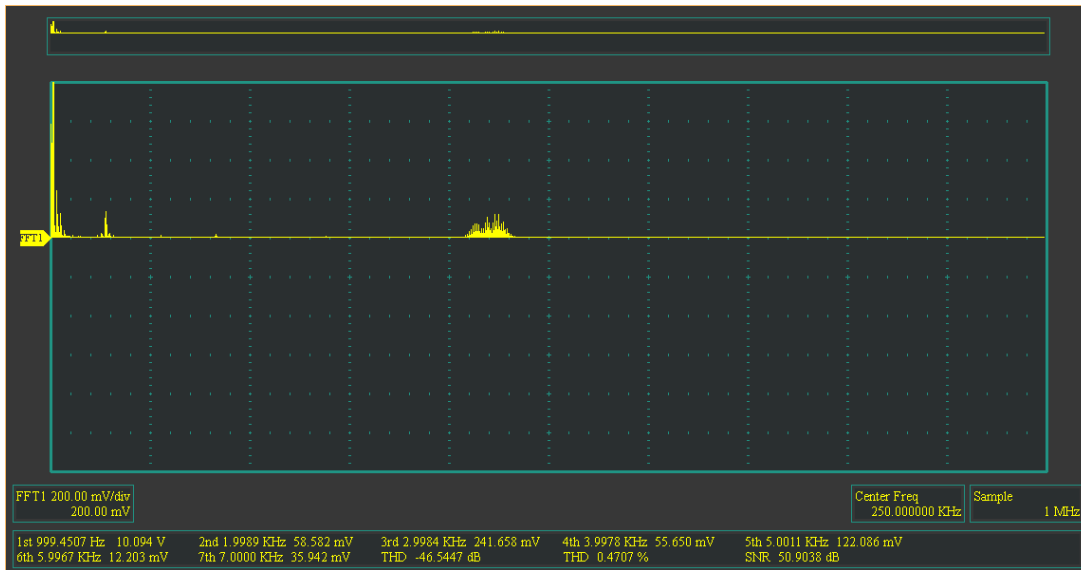


Gambar 8. Hasil Sinyal Keluaran Kelas D pada Sinyal Masukan Sinus 1KHz (Kuning) dan PWM MOSFET (Biru)

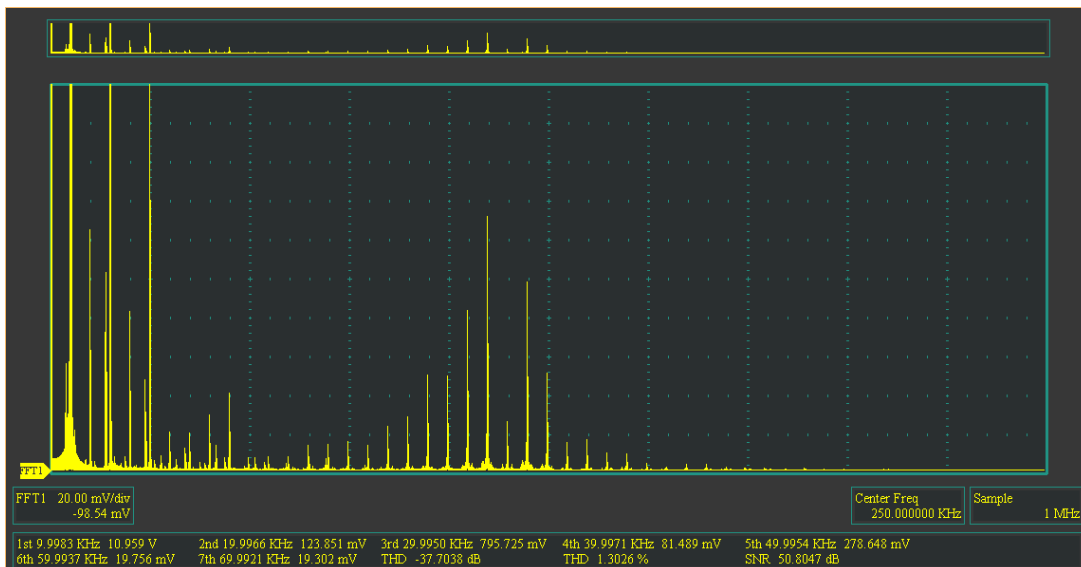


Gambar 9. Hasil Sinyal Keluaran Kelas D pada Sinyal Masukan Sinus 10KHz (Kuning) dan PWM MOSFET (Biru)

Pada Gambar 8 dan Gambar 9, *trace* kuning merupakan sinyal keluaran setelah di filter rangkaian LC yang menghasilkan sinyal sinus, dan *trace* biru merupakan sinyal modulasi sebelum difilter menggunakan rangkaian LC, untuk sinyal modulasi atau *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) dan setiap perubahan frekuensi sinyal masukan, SPWM tidak ikut berubah frekuensinya, melainkan hanya *duty cycle* yang berubah.

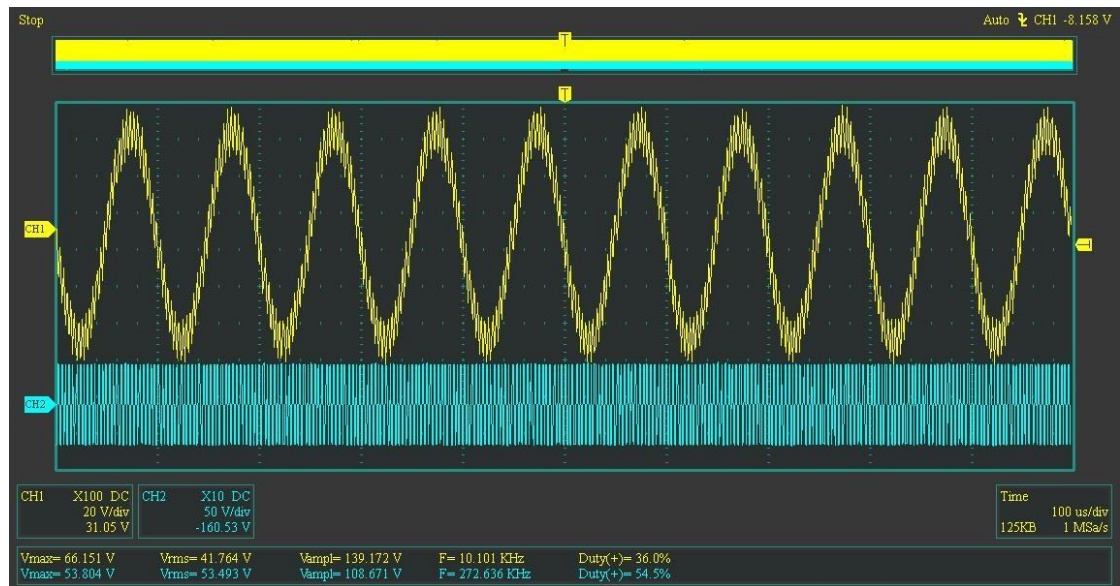


Gambar 10. Total Harmonic Distortion (THD) dan Signal to Noise Ratio yang Dihasilkan pada Frekuensi 1Khz.

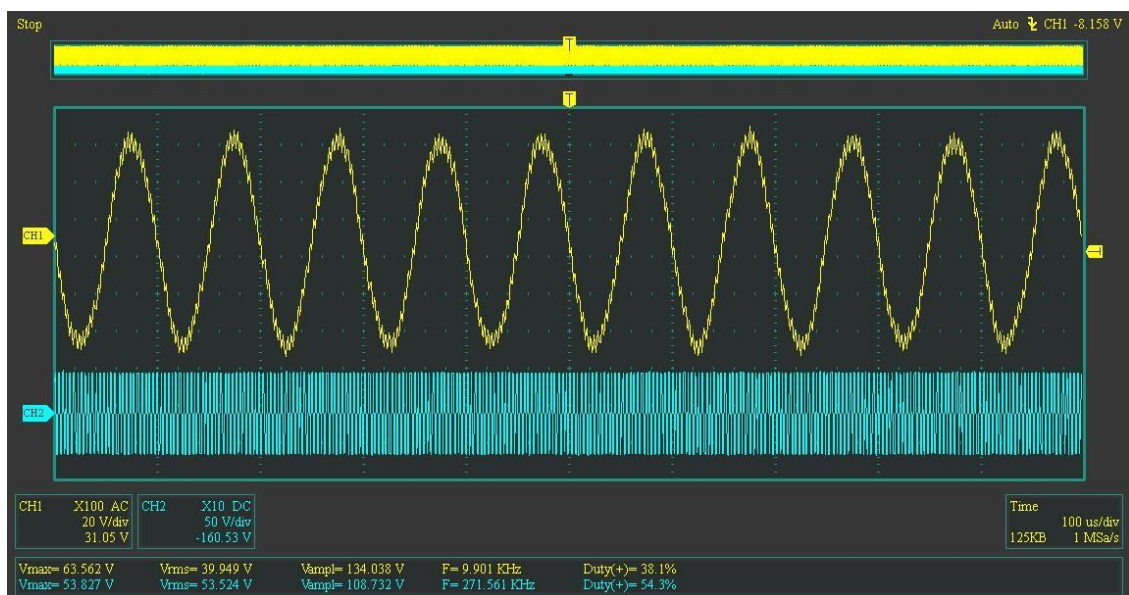


Gambar 11. Total Harmonic Distortion (THD) dan Signal to Noise Ratio yang Dihasilkan pada Frekuensi 10Khz.

Gambar 10 menunjukkan bahwa THD yang dihasilkan sebesar 0,47% saat frekuensi 1KHz, sedangkan Gambar 11 menunjukkan bahwa THD yang dihasilkan sampai 1.30% pada frekuensi 10Khz.



Gambar 12. Keluaran Kelas D Sebelum Diberi Beban *Loudspeaker* (Kuning) dan PWM MOSFET (Biru)



Gambar 12. Keluaran Kelas D Setelah Diberi Beban *Loudspeaker* (Kuning) dan PWM MOSFET (Biru)

Gambar 11 dan Gambar 12, merupakan keluaran kelas D sebelum dan setelah ada beban *Loudspeaker* dengan hambatan (DCR) sebesar 5,6Ohm menghasilkan amplitudo 66V sebelum pembebanan dan 63V setelah pembebanan. Apabila dihitung, maka daya keluaran yang dihasilkan adalah:

$$P = V^2/R$$

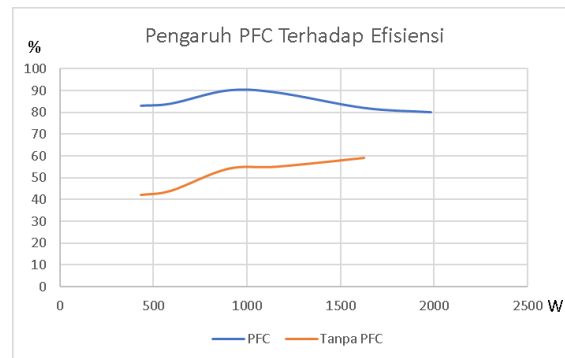
$$P = 63 \cdot 63 / 5,6$$

$$P = 708 \text{ Watt per channel}$$

Untuk pembuatan alat ini ada 2 channel, sehingga $P \cdot 2 = 1416 \text{ Watt}$

Apabila Gambar 11 dan Gambar 12 dibandingkan maka sinyal keluaran yang dihasilkan setelah pembebanan lebih rendah ripple atau bisa dikatakan *loudspeaker* berfungsi sebagai filter LCR.

Penambahan teknologi PFC dalam sistem kelasD sangat berpengaruh, ini dapat dilihat dari grafik pada Gambar 13.



Gambar 13. Grafik Pengaruh PFC Terhadap Efisiensi

Berdasarkan grafik pada Gambar 13, saat beban ± 896 Watt, efisiensi keluaran mencapai 90% dan sedangkan tanpa PFC, saat beban 877Watt, efisiensi keluarannya berkisar 45%. Dapat diketahui bahwa dengan penggunaan PFC daya keluaran yang dihasilkan lebih tinggi dibanding tanpa PFC.

4. Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan yang di peroleh dari penelitian ini yaitu:

1. Semakin besar frekuensi yang diolah (frekuensi masukan) *power amplifier* kelas D, maka semakin besar pula harmonika sinyal sinus yang dihasilkan atau semakin besar THD yang dihasilkan.
2. *Power amplifier* kelas D ini memiliki efisiensi keluaran sebesar 70,8% pada 708Watt x 2 (total 1416 Watt).
3. Penggunaan PFC mampu memperbaiki efisiensi keluaran dari 45% menjadi 90% pada beban 877Watt

Berdasarkan kesimpulan yang diperoleh, saran yang membangun untuk penelitian selanjutnya yaitu menaikkan frekuensi *carier* kelas bisa menjadi ± 500 Khz (frekuensi umum kelas D pada pabrik) dengan harapan THD yang dihasilkan bisa lebih rendah dan efisiensi menjadi lebih tinggi.

References

- [1] H. Alam and A. S. Hutagalung, "Merancang Penguat Audio 500 Watt Menggunakan Transformator Daya A1216," *J. Electr. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 18–26, 2019.
- [2] H. D. Surjono, "Elektronika Analog," 2nd ed., Yogyakarta: CERDAS ULET KREATIF, 2011, p. 100.
- [3] S. Munz, "What are the Different Types of Audio Amplifier Classes?," *AUDIOHOLICS*, 2014.
- [4] S. Santoso, F. D. Setiaji, and ..., "Penguat Audio Kelas D tanpa Tapis LC dengan Modulasi Tiga Aras," *Techné J. Ilm.* ..., pp. 61–74, 2013, [Online]. Available: <http://ojs.jurnaltechne.org/index.php/techne/article/view/84>.
- [5] H. J. Zhang, "Application Note 140 October 2013 Basic Concepts of Linear Regulator and Switching Mode Power Supplies AN140-1 Application Note 140 AN140-2," no. October, pp. 1–16, 2013.
- [6] I. M. Fitriani, "Kinerja topologi flyback pada SMPS (Switch Mode Power Supply)," *J. Pendidik. Tek. Elektro*, vol. 05, no. 02, pp. 31–43, 2020.
- [7] N. Zlatanov, "DC Power Supplies , Applications and Measurements," no. January, p. pp 1-5, 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.27236.17288.
- [8] F. Ahmad, M. Yanuar Hariyawan, and S. Novita Posma, "Perancangan Dan Implementasi Passive Emi Filter Pada Switching Mode Power Supply (SMPS)," *J. Elektro dan Mesin Terap.*, vol. 5, no. 1, pp. 29–37, 2019, doi: 10.35143/elementer.v5i1.2519.
- [9] S. C. Rajappan, K. Sarabose, N. John, and S. Shakthi, "An Efficient AC/DC Converter with Power Factor Correction," 2013.
- [10] S.-Y. Tseng and J.-H. Fan, "Bridgeless Boost Converter with an Interleaving Manner for PFC Applications," *Electronics*, vol. 10, no. 3, 2021, doi: 10.3390/electronics10030296.
- [11] S. S. Supratno, "REALISASI PENGHEMATAN BIAYA PENGANTIAN KABEL INTI ALUMINIUM DI PT. CIPTA ABADI CAKUNG," *JREC (Journal Electr. Electron.*, vol. 1, pp. 1–8, 2013, [Online]. Available: <http://jurnal.unismabekasi.ac.id/index.php/jrec/article/view/948/824>.