

PENGUAT AUDIO KELAS D TANPA TAPIS LC DENGAN MODULASI TIGA ARAS

Suryo Santoso¹, F. Dalu Setiaji², Matias H.W. Budhianto³

Program Studi Teknik Elektro. Fakultas Teknik – UKSW

Jalan Diponegoro 52-60, Salatiga 50711

¹suryosantoso_90@yahoo.com, ²fdsetiaji@yahoo.com, ³mhwb@utexas.edu

INTISARI

Penguat audio kelas D pada umumnya menggunakan tapis LC pada bagian keluarannya. Tapis LC mempunyai ukuran yang relatif besar sehingga sulit digunakan pada perangkat portabel berukuran kecil, misalnya telepon selular. Oleh karena itu, dikembangkan penguat audio kelas D tanpa tapis LC dengan modulasi tiga aras keluaran. Teknik modulasi dengan tiga aras keluaran yang dipakai dalam perancangan ini adalah *noise-shaping coding*. *Noise-shaping coding* merupakan pengembangan dari teknik modulasi sigma delta. Bagian keluaran penguat kelas D ini diwujudkan dengan penguat jembatan penuh (*full-bridge*) dengan MOSFET yang keluarannya dapat langsung dihubungkan ke penyuar. Berdasarkan hasil pengukuran, penguat kelas D yang telah dibuat mempunyai spesifikasi: daya keluaran maksimum 7 Watt pada beban 4 Ohm, tanggapan frekuensi 20 Hz – 20 kHz dengan riak 0,5 dB, SNR = 28,88 dB, THD < 0,976%, efisiensi 65,03%, keduanya diukur pada saat daya keluaran maksimum (7W).

Kata Kunci : Penguat Kelas D, Tapis LC, Tiga Aras Keluaran, *Noise-Shaping*.

1. PENDAHULUAN

Penguat audio kelas D mempunyai efisiensi dayanya yang jauh lebih tinggi (dapat mencapai 90% - 95% [1]) jika dibandingkan linear (kelas A, B dan AB). Penguat audio kelas D mempunyai keunggulan yang signifikan misalnya produksi panas yang rendah sehingga mengurangi ukuran *heat-sink* yang dibutuhkan. Oleh karenanya penguat audio kelas D mempunyai ukuran lebih kecil dibandingkan penguat linear. Selain itu, pada

aplikasi yang portabel, penguat audio kelas D membuat umur pakai baterai lebih panjang karena efisiensi dayanya yang tinggi tersebut [2].

Penguat audio kelas D akan menghasilkan keluaran berupa isyarat audio masukan ditambah dengan isyarat frekuensi tinggi yang disebabkan oleh proses modulasi yang digunakan. Untuk menapis isyarat frekuensi tinggi ini, sehingga hanya didapatkan komponen frekuensi isyarat audio saja, penguat audio kelas D pada umumnya menggunakan tapis LC pada bagian keluarannya.

Pada aplikasi yang portabel seperti pada *cell phone*, *USB speaker*, *LCD TV* dan *notebook PC*, penguat kelas D dengan tapis LC sulit diterapkan karena memerlukan tempat yang relatif luas. Pada penguat kelas D yang umum, tapis LC menghabiskan sekitar 75% dari luas PCB yang dipakai. Selain itu, tapis LC menghabiskan sekitar 30% dari total biaya [3].

Oleh karena permasalahan tersebut, dikembangkan suatu penguat audio kelas D yang tidak menggunakan tapis LC pada bagian keluaran. Hal ini akan memberikan keuntungan terutama berkurangnya area PCB yang digunakan sehingga menurunkan biaya pembuatan penguat.

Penguat audio kelas D tanpa tapis LC dapat diwujudkan dengan menggunakan modulasi tiga aras keluaran yang akan menghasilkan arus ke penyuar hanya ketika dibutuhkan saja. Dengan menerapkan modulasi ini, ketika tidak ada isyarat masukan, tidak ada tegangan mau pun arus pada penyuar sehingga daya pada penyuar nol.

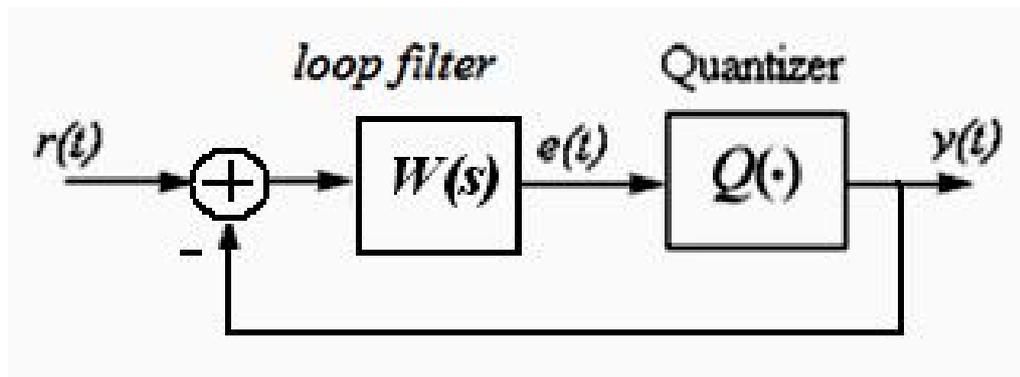
Tenik modulasi/penyandian yang digunakan untuk menghasilkan tiga aras keluaran adalah *noise-shaping coding* [4]. *Noise-shaping coding* merupakan pengembangan dari teknik modulasi sigma delta (*sigma delta modulation, SDM*). *Noise-shaping coding* memperbaiki permasalahan yang muncul pada modulasi sigma delta yaitu masalah kestabilan pada orde tinggi.

Pada makalah ini dirancang dan direalisasikan suatu penguat audio kelas D tanpa tapis LC dengan menerapkan teknik modulasi/penyandian *noise-shaping coding* yang akan menghasilkan tiga aras keluaran.

2. DASAR TEORI

Sigma delta modulation (SDM) merupakan metode modulasi yang digunakan dalam modulator penguat kelas D untuk mengubah isyarat audio masukan menjadi isyarat *pulse density modulation* (PDM). Di dalam SDM terjadi proses pembentukan derau (*noise-shaping*) di dalamnya untuk menekan derau pada frekuensi pada pita tertentu.

Blok diagram SDM secara umum dapat dilihat pada Gambar

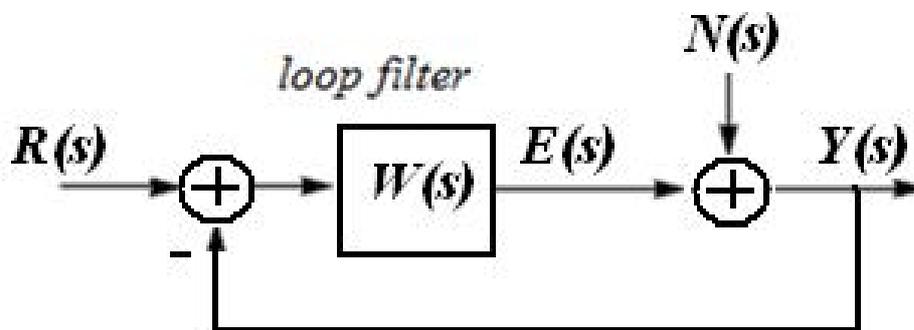


1.

Gambar 1. Blok Diagram SDM

Modulasi sigma delta (SDM) tersusun dari pengkuantisasi dan tapis $G(s)$ di depan pengkuantisasi dan keluaran isyarat hasil kuantisasi yang diumpan balik seperti yang terlihat pada Gambar 1. Pengkuantisasi pada SDM akan dikendalikan oleh sinyal *error* yang telah ditapis oleh $W(s)$.

Dalam melakukan analisis, pengkuantisasi dimodelkan secara linear dan direpresentasikan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Blok Diagram dari SDM Menggunakan Model Linear pada Bagian Pengkuantisasinya.

Pada Gambar 2, bagian pengkuantisasi $Q(\cdot)$ dimodelkan secara linear dengan derau kuantisasi dilambangkan dengan $N(s)$. Dari pemodelan Gambar 2, dapat dicari hubungan antara keluaran $Y(s)$ dengan derau $N(s)$ dan hubungan antara keluaran dengan isyarat masukan $R(s)$.

Hubungan antara keluaran dengan derau disebut sebagai *noise transfer function* ($NTF(s)$) yang dapat dituliskan sebagai berikut,

$$NTF(s) = \left. \frac{Y(s)}{N(s)} \right|_{R(s)=0} = \frac{1}{1+W(s)} \quad (1)$$

Hubungan antara keluaran dengan isyarat masukan disebut sebagai *signal transfer function* ($STF(s)$) yang dapat dituliskan sebagai berikut,

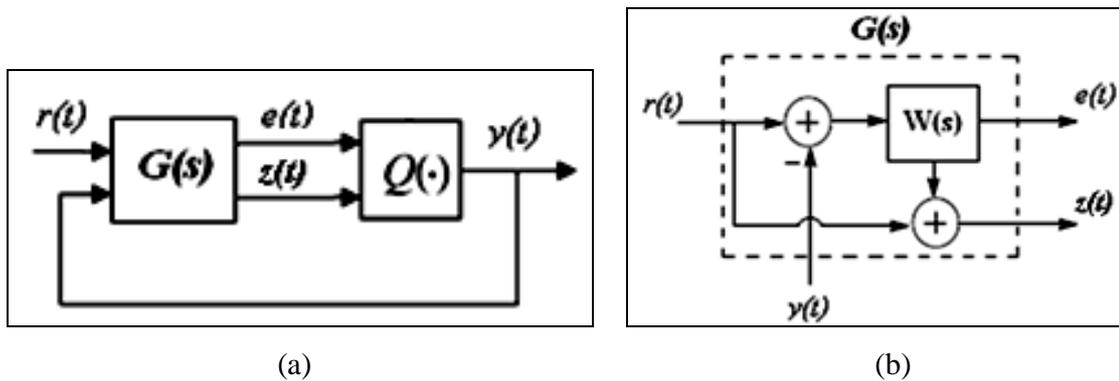
$$STF(s) = \left. \frac{Y(s)}{R(s)} \right|_{N(s)=0} = \frac{W(s)}{1+W(s)} \quad (2)$$

Dengan melakukan pendekatan linear, dapat dilihat efek dari tapis $W(s)$ terhadap isyarat baik masukan, keluaran dan derau. $NTF(s)$ akan berperan terhadap pembentukan derau pada keluaran $Y(s)$. Jika diinginkan derau pada keluaran ditekan pada pita frekuensi audio, maka $NTF(s)$ harus merupakan tapis lolos tinggi. Derau pengkuantisasi akan dilemahkan pada pita frekuensi audio dan diloloskan pada frekuensi tinggi. Oleh karena itu, SDM disebut melakukan pembentukan derau (*noise shaping*).

Semakin tinggi orde dari $NTF(s)$ atau tapis $W(s)$, modulasi sigma delta akan memberikan keuntungan pada kenaikan *signal-to-noise ratio* (SNR). Hal ini dikarenakan terjadinya proses *noise-shaping* dimana derau akan dipindahkan pada pita frekuensi yang jauh lebih tinggi dari pita audio.

Namun, SDM dengan orde tinggi (lebih dari dua) mempunyai masalah pada kestabilannya, yaitu tidak stabil. Permasalahan ini tidak dapat dijelaskan dengan model linear karena adanya umpan balik dari pengkuantisasi yang bersifat tidak linear.

Sigma Delta Modulation (SDM) kemudian dikembangkan menjadi *noise-shaping coding* seperti yang telah dikerjakan pada [5] untuk mengatasi masalah ketidakstabilan orde tinggi pada SDM. Blok diagram *noise-shaping coding* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. (a). Diagram Kotak *Noise-Shaping Coding* [13]. (b) Tapis $G(s)$ pada *Noise-Shaping Coding*.

Gambar 3 menunjukkan diagram kotak dari teknik penyandian *noise-shaping* dimana $r(t)$ adalah isyarat audio analog masukan, $e(t)$ dan $z(t)$ merupakan keluaran dari tapis $G(s)$. Isyarat $e(t)$ merupakan isyarat error antara masukan $r(t)$ dan keluaran $y(t)$ yang telah ditapis oleh tapis $G(s)$.

Tapis $G(s)$ pada *noise-shaping coding* merupakan tapis dengan dua masukan ($r(t)$ dan $y(t)$) dan dua keluaran ($e(t)$ dan $z(t)$). Oleh karenanya tapis $G(s)$ ini ditulis dalam bentuk *state-variable* karena bentuk *state variable* dapat memperlihatkan hubungan dari suatu sistem yang memiliki banyak input dan banyak output.

Tapis $G(s)$ dalam *state-variable* ditulis sebagai berikut [4],

$$G : \begin{cases} \dot{x} = Ax + B(r - y) \\ e = Cx \\ z = (CB)^{-1}CAx + r \end{cases} \quad (3)$$

dengan

- x = *state vector* ($n \times 1$) untuk sistem orde n ,
- A = matriks sistem ($n \times n$),
- B = matriks masukan ($n \times 1$),
- C = matriks keluaran ($1 \times n$).

Perbedaan antara *noise-shaping coding* dengan SDM terletak pada *loop filter* $G(s)$. Tapis $G(s)$ merupakan tapis $W(s)$ yang ditambah dengan satu buah keluaran isyarat $z(t)$ yang memenuhi persamaan berikut,

$$z = (CB)^{-1}CAx + r \quad (4)$$

Isyarat $z(t)$ ini menjamin kestabilan dari penyandi *noise-shaping* yang dibuat [4]. Dengan adanya isyarat $z(t)$ yang mengendalikan pengkuantisasi menyebabkan terbatasnya amplitudo isyarat $e(t)$ [4]. Sebuah modulator dikatakan stabil jika masukan ke pengkuantisasi terbatas atau dapat dikatakan *error* sinyal dibatasi. Oleh karenanya, *noise-shaping coding* menjamin kestabilan dari *coder* atau modulator.

Keterbatasan amplitudo isyarat $e(t)$ akan memenuhi persamaan berikut [6],

$$|e| < CB\tau \quad (5)$$

dimana τ adalah periode dari frekuensi sampling.

Ada dua syarat yang harus dipenuhi agar modulator stabil, yang pertama adalah isyarat z tidak boleh *overload* atau tidak melebihi dari tegangan catu daya yang digunakan. Syarat yang kedua adalah *zero* dari tapis $W(s)$ harus ada di sebelah kiri sumbu imajiner [5].

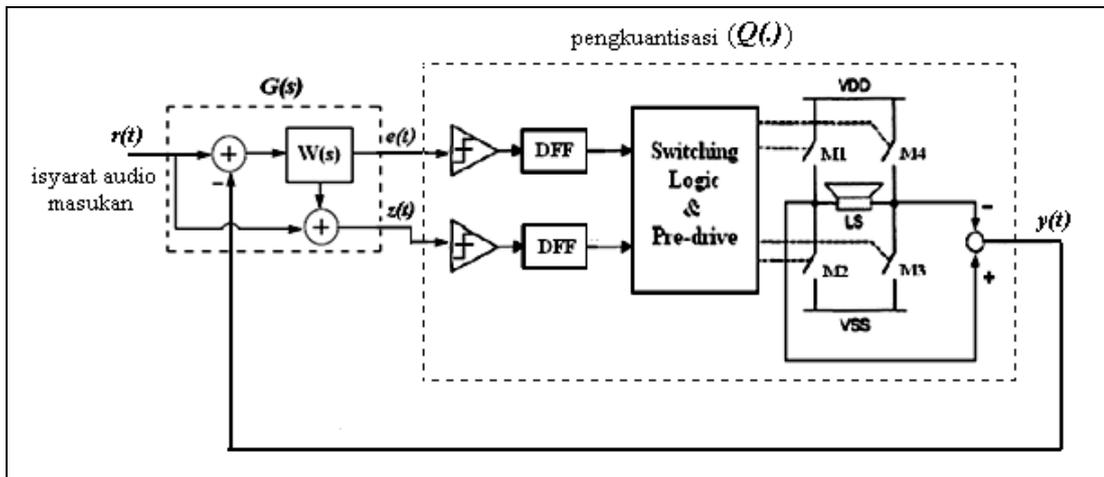
Bagian pengkuantisasi akan melakukan kuantisasi dengan syarat kuantisasi adalah isyarat $z(t)$ ke aras terdekat dengan aras kuantisasi yang ada bergantung pada isyarat $e(t)$. Penguat kelas D yang dirancang akan menghasilkan tiga aras kuantisasi yaitu $\{+1, 0, -1\}$. Pada tabel 1 dapat dilihat kondisi isyarat e , z dan kondisi aras keluarannya.

Tabel 1. Kondisi Isyarat e , z dan Kondisi Keluarannya [4].

Kondisi isyarat e dan z	Kondisi keluaran
$e > 0, z > 0$	$y = +1$
$e < 0, z < 0$	$y = -1$
$ez < 0$	$y = 0$

3. PERANCANGAN

Perancangan terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu perancangan *loop filter* ($G(s)$) dan perancangan bagian pengkuantisasi. Blok diagram dari penguat audio kelas D yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Blok Diagram Penguat Kelas D Tanpa Tapis LC dengan Menggunakan Modulasi Tiga Aras Keluaran [4].

Pada referensi utama [4] tidak dijelaskan mengenai perancangan pada bagian *loop filter*. Di sini penulis akan menjelaskan mengenai perancangan *loop filter* yang telah dilakukan oleh penulis menggunakan dasar teori yang telah disebutkan pada Bab II. Berikut akan dijelaskan mengenai perancangan *loop filter* yang telah dilakukan.

Perancangan *loop filter* ($G(s)$) akan dimulai dengan merancang fungsi alihrogram derau (*noise transfer function* $NTF(s)$). $NTF(s)$ didesain sebagai tapis lolos tinggi orde 5 dengan tanggapan Butterworth dan frekuensi penggal ada pada 40 kHz (> 20 kHz). Dengan bantuan perangkat lunak MATLAB didapatkan tanggapan frekuensi dari $NTF(s)$ adalah,

$$NTF(s) = \frac{s^5}{s^5 + 8,133 \cdot 10^3 s^4 + 3,307 \cdot 10^{11} s^3 + 8,312 \cdot 10^{18} s^2 + 1,291 \cdot 10^{21} s + 1,003 \cdot 10^{26}} \quad (6)$$

Dari tanggapan $NTF(s)$ ini akan didapatkan tapis $W(s)$ yaitu,

$$W(s) = \frac{8,133 \cdot 10^3 s^4 + 3,307 \cdot 10^{11} s^3 + 8,312 \cdot 10^{18} s^2 + 1,291 \cdot 10^{21} s + 1,003 \cdot 10^{26}}{s^5} \quad (7)$$

Tapis $W(s)$ dapat dituliskan ke dalam bentuk *state variable* sebagai berikut,

$$W(s): \begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10^5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10^6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 8,133 \cdot 10^5 \\ 3,307 \cdot 10^6 \\ 8,312 \cdot 10^5 \\ 1,291 \cdot 10^6 \\ 1,003 \cdot 10^5 \end{bmatrix} u \\ e = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] x. \end{cases} \dots\dots\dots(8)$$

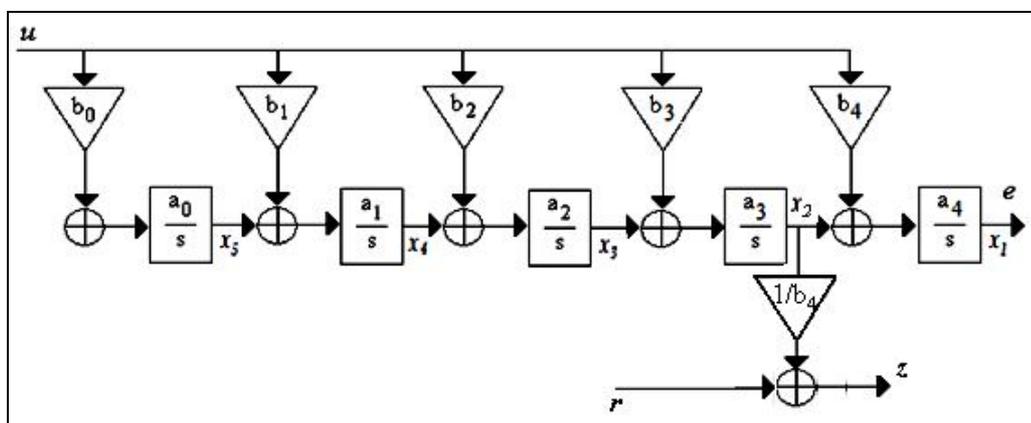
Setelah dirancang tapis $W(s)$ kemudian akan dirancang tapis $G(s)$ yang akan dihitung berdasarkan dari perancangan tapis $W(s)$. Tapis $G(s)$ dalam bentuk *state variable* dapat dilihat pada persamaan (3). Pada tapis $G(s)$ akan ditambahkan satu buah keluaran yaitu isyarat z yang memenuhi persamaan (3).

Dengan memasukkan nilai dari matriks tapis $W(s)$ akan didapatkan keluaran dari isyarat z adalah,

$$z = \frac{x_2}{b_4} + 1, \tag{9}$$

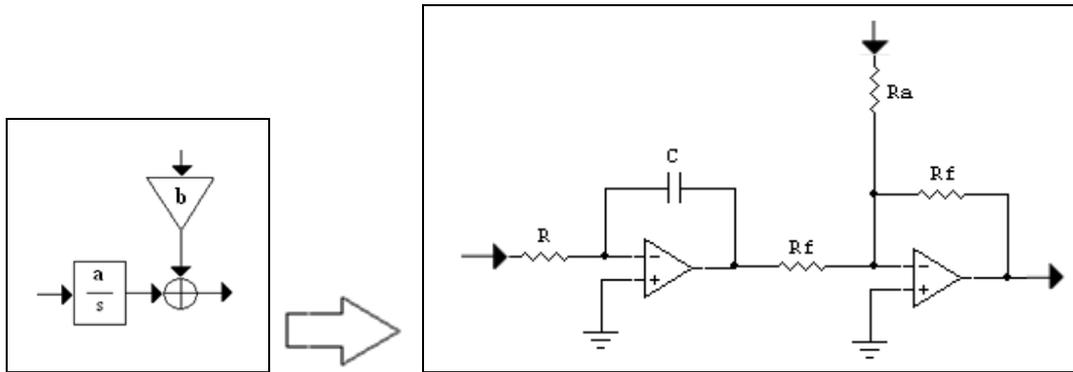
$$z = \frac{x_2}{8,133} + 1$$

Blok diagram keseluruhan tapis $G(s)$ dalam bentuk *observer canonical* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Kotak Tapis $G(s)$.

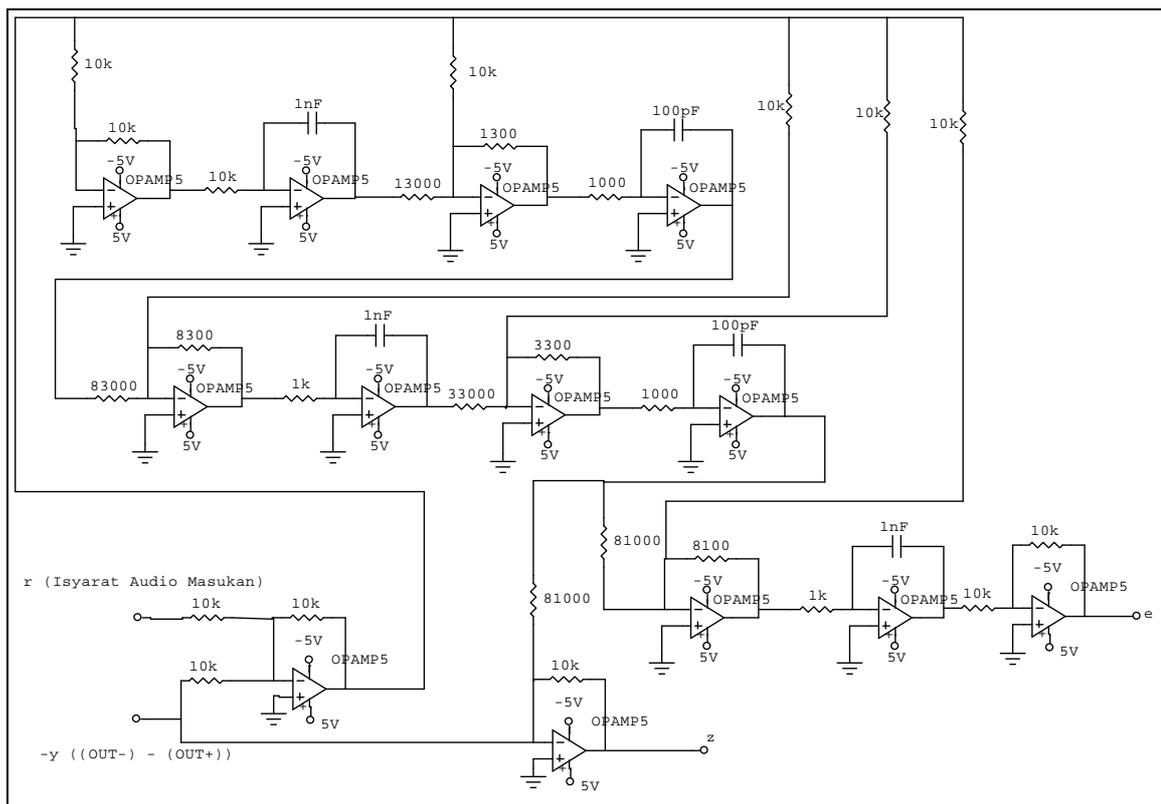
Blok diagram pada Gambar 5 ini akan direalisasikan dengan rangkaian RC-Opamp. Gambar 6 menunjukkan contoh hubungan bentuk observer canonical dengan rangkaian RC-Opamp.



Gambar 6. Hubungan Bentuk *Observer Canonical* dengan Rangkaian RC-Opamp.

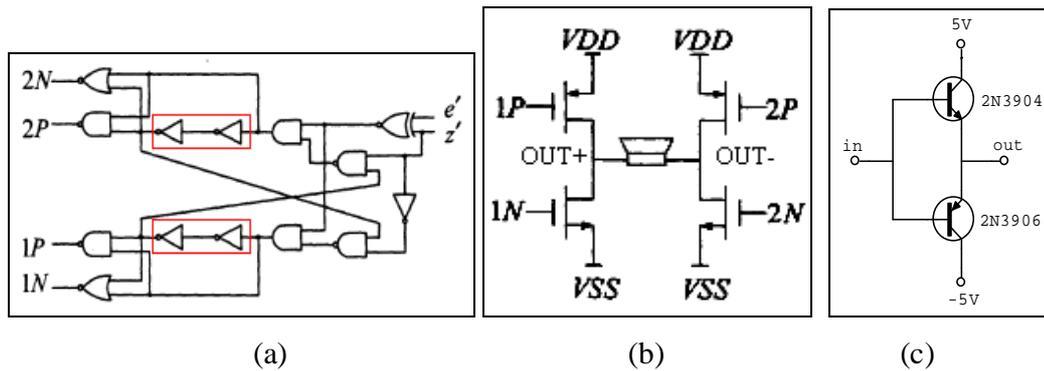
Berlaku hubungan **a (gain integrator) = $\frac{1}{RC}$** dan **$b = \frac{R_f}{R_a}$** .

Gambar 7 memperlihatkan rangkaian keseluruhan RC-Opamp untuk diagram kotak yang diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 7. Rangkaian Keseluruhan dari Tapis $G(s)$ dengan Menggunakan RC-Opamp.

Pada bagian keluaran akan digunakan 4 buah MOSFET yang dikonfigurasi ke dalam topologi *full-bridge*. Keempat buah MOSFET akan dikendalikan oleh rangkaian *switching logic*. Bagian pengkuantisasi akan mengikuti syarat kuantisasi seperti pada Tabel I. Gambar 8 memperlihatkan rangkaian dari *switching logic*, *pre-drive*, dan H-bridge dengan MOSFET [4].



Gambar 8. (a) Rangkaian *Switching Logic*, (b) H-bridge dengan MOSFET [4], (c). *Pre-Drive*.

Ketika MOSFET dioperasikan dalam kondisi *switching* dibutuhkan arus yang cukup besar untuk mengisi kapasitansi dari *gate* MOSFET dalam waktu yang singkat. Rangkaian *pre-drive* digunakan sebagai rangkaian penyangga antara rangkaian *switching logic* dan H-bridge dengan MOSFET untuk menyuplai arus yang cukup besar ke *gate* MOSFET.

Tabel 2 memperlihatkan tabel logika keluaran dari rangkaian *switching logic*.

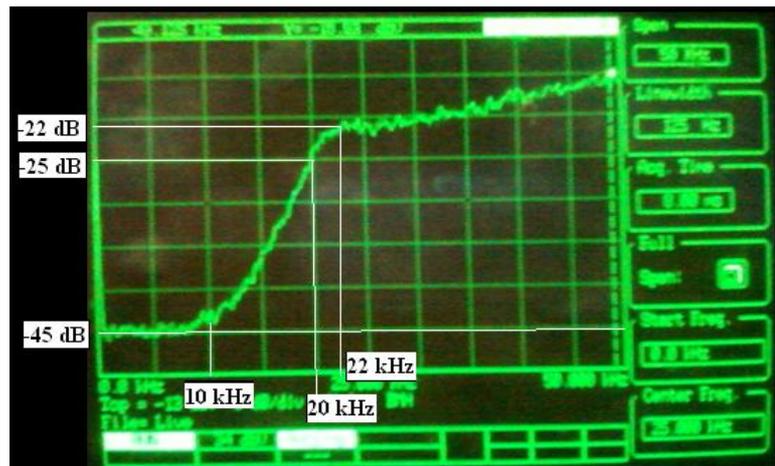
Tabel 2. Tabel Logika Keluaran Rangkaian *Switching Logic*

Kondisi masukan	Kondisi keluaran			
	1N	1P	2N	2P
$e' = '1', z' = '0'$ atau $e' = '0', z' = '1'$	'1'	'1'	'1'	'1'
$e' = '0', z' = '0'$	'1'	'1'	'0'	'0'
$e' = '1', z' = '1'$	'0'	'0'	'1'	'1'

4. HASIL DAN ANALISIS

Pada penguat kelas D yang dibuat, isyarat $e(t)$ mempunyai keterbatasan nilai pada 2 Volt. Keterbatasan isyarat $e(t)$ menunjukkan bahwa modulator yang dibuat stabil.

Gambar 8 menunjukkan spektral derau yang terbentuk pada keluaran penguat kelas D yang dibuat.



Gambar 9. Spektral Derau yang Terbentuk pada Keluaran Penguat Kelas D Tanpa Tapis LC yang Dirancang.

Dapat dilihat dari Gambar 9 bahwa spektrum keluaran dari penguat kelas D yang penulis rancang dapat menekan derau hingga -45 dB pada frekuensi 20 Hz hingga frekuensi sekitar 10 kHz kemudian spektrum derau akan mulai meningkat hingga -25 dB pada frekuensi 20 kHz. Bentuk dari spektrum keluaran pada frekuensi 20 Hz – 40 kHz telah membentuk tanggapan tapis lolos tinggi dengan frekuensi penggal pada 22 kHz, tidak sesuai dengan perancangan (40 kHz). Hal ini disebabkan oleh keterbatasan dari GBW *Opamp* yang digunakan yang menyebabkan berubahnya frekuensi penggal dari tanggapan NTF. Pada perancangan, bagian integrator dari tapis yang dirancang mempunyai penguatan yang sangat besar (dapat mencapai 10^6) dan setelah diimplementasikan ke dalam rangkaian, tapis akan mengolah isyarat dengan frekuensi hingga 1 MHz, sehingga dibutuhkan *opamp* dengan GBW yang besar.

Penguat kelas D yang dibuat mempunyai daya keluaran maksimum sebesar 7 W atau amplitudo maksimum isyarat keluaran adalah sebesar 5,3 V. Teknik penyandian *noise-shaping* akan mempunyai keterbatasan rentang nilai masukan yang juga berarti akan

mempunyai keterbatasan rentang nilai keluaran pula. Keterbatasan nilai masukan dari teknik penyandian *noise-shaping* adalah [6],

$$L = 1 - (\beta_1 - \alpha_1)\tau, \tag{10}$$

dimana,

L = rentang nilai masukan penyandi *noise-shaping*

τ = periode dari frekuensi pencuplikan

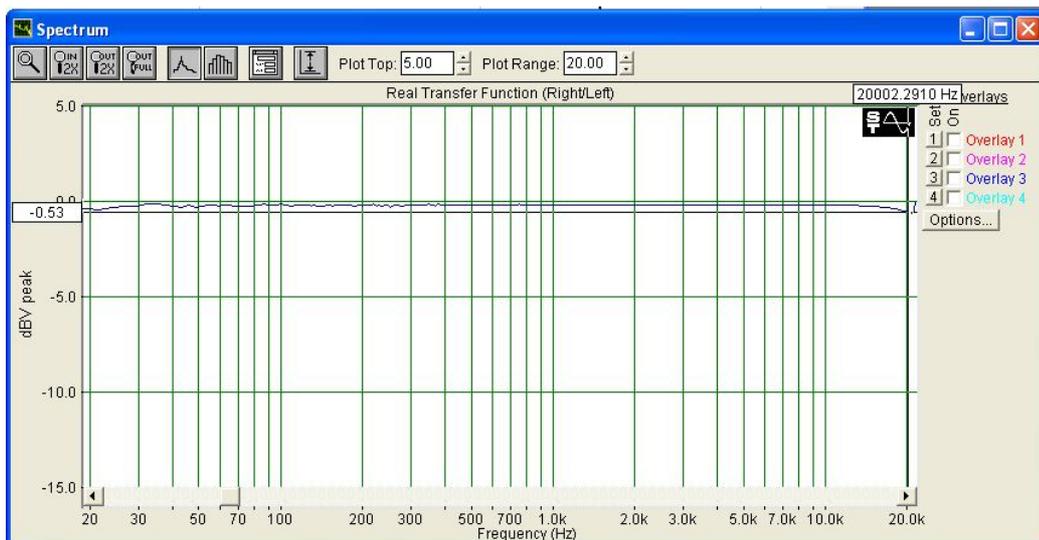
β_1 dan α_1 merupakan koefisien polinomial dari tapis $W(s)$ yang dirancang dimana,

$$W(s) = \frac{\eta(s^{n-1} + \beta_1 s^{n-2} + \beta_2 s^{n-3} + \dots + \beta_{n-1})}{s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \alpha_2 s^{n-2} + \dots + \alpha_n} \tag{11}$$

Sehingga, dari hasil perhitungan akan didapatkan rentang masukan adalah sebesar, $L = 0,59$.

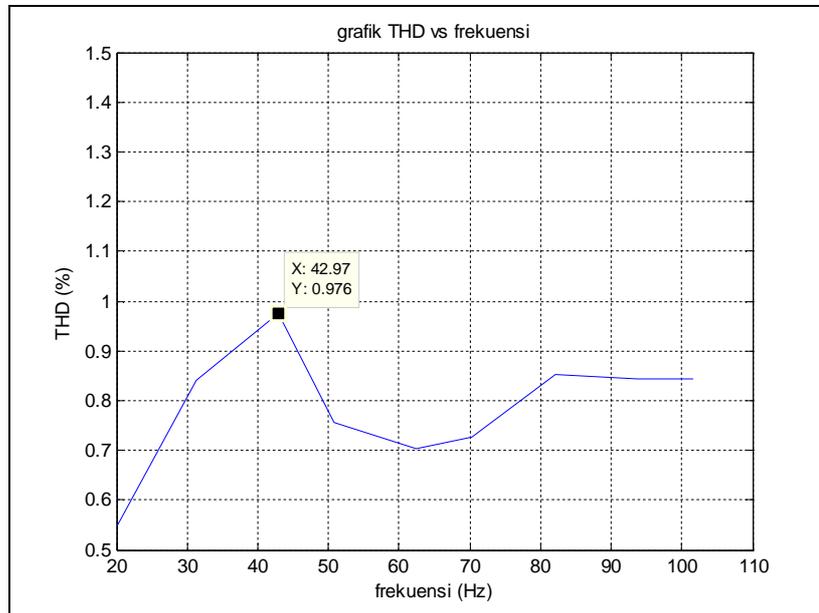
Pada penguat kelas D yang dirancang besarnya tingkat kuantisasi (Δ) adalah 10V. Sehingga keluaran maksimum dari penguat adalah sebesar $(0,59)(10 \text{ V}) = 5,9 \text{ V}$. Hasil yang didapat cukup mendekati dengan hasil perhitungan. Perbedaan hasil yang didapatkan disebabkan oleh realisasi dari tapis $W(s)$ tidak menghasilkan tanggapan frekuensi yang persis sama dengan tanggapan frekuensi yang ditetapkan pada perancangan.

Tanggapan frekuensi dari penguat kelas D yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 10. Penguat kelas D mempunyai tanggapan frekuensi yang relatif rata pada frekuensi 20 – 20 kHz (toleransi 0,5 dB).



Gambar 10. Grafik Tanggapan Frekuensi Penguat Kelas D Tanpa Tapis LC yang Dirancang.

Penguat kelas D yang dibuat mempunyai THD < 0,976% yang diukur pada daya maksimumnya yaitu 7 W. Grafik pengukuran THD dapat dilihat pada Gambar 11 berikut.



Gambar 11. Grafik THD vs Frekuensi.

Dari hasil pengukuran, THD terbesar yang terukur adalah sebesar 0.976% pada frekuensi 40 Hz. THD dari penguat akan mempunyai nilai paling besar pada frekuensi rendah dikarenakan semakin banyaknya harmonik-harmonik yang terukur pada rentang frekuensi audio. Oleh karena itu, karakteristik THD dari penguat secara keseluruhan dapat dilihat dari karakteristik THD penguat pada frekuensi rendah.

SNR dari penguat sebesar 28,88 dB. Rendahnya SNR yang didapat dikarenakan penguat hanya dapat menekan derau maksimum sebesar -45 dB pada frekuensi (20 Hz – 10 kHz) dan meningkat hingga -25 dB pada 20 kHz.

Dilakukan pula pengukuran efisiensi penguat dan didapatkan efisiensi dari penguat sebesar 65,03% diukur pada daya keluaran maksimum penguat (7 W). Rendahnya efisiensi yang dicapai oleh penguat disebabkan oleh penggunaan MOSFET tipe P (tipe P mempunyai nilai $R_{DS(ON)}$ yang besar), sehingga terjadi disipasi daya yang cukup besar pada MOSFET tipe P. Berdasarkan hasil pengukuran $R_{DS(ON)}$ MOSFET tipe P yang dipakai bernilai $0,9 \Omega$, sedangkan tipe N $0,11 \Omega$.

5. KESIMPULAN

Penguat audio kelas D tanpa tapis LC dengan modulasi tiga aras telah berhasil direalisasikan menggunakan teknik penyandian *noise shaping coding*. Berdasarkan hasil pengujian, penguat daya mempunyai spesifikasi sebagai berikut ini.

1. Berdaya keluaran maksimum 7 W pada beban 4 Ohm.
2. Tanggapan frekuensi penguat adalah 20 Hz – 20 kHz dengan riak 0,5 dB.
3. Mempunyai THD < 0,976 % pada daya keluaran maksimum penguat (7 W).
4. *Signal to Noise Ratio* (SNR) sebesar 28,88 dB.
5. Efisiensi dari penguat sebesar 65,03 % diukur pada daya keluaran maksimum penguat (7 W).

Rendahnya SNR disebabkan karena penguat hanya dapat menekan derau dengan cukup besar (-45 dB) pada rentang frekuensi 20 Hz sampai 10 kHz saja, dan penekanan derau mulai berkurang menjadi hanya -25 dB pada 20kHz.

Rendahnya efisiensi yang dicapai disebabkan oleh penggunaan MOSFET tipe P yang mempunyai nilai $R_{DS(ON)}$ yang besar. Untuk meningkatkan efisiensi, konfigurasi *full-bridge* dapat diwujudkan dengan menggunakan empat buah MOSFET tipe N.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Honda, Jun dan Jonathan Adams, “*Class D Audio Amplifier Basic*”, International Rectifier, Application Note AN-1071, Agustus 2008.
- [2] Gaalaas, Eric, “*Class D Audio Amplifiers: What, Why, and How*”, Analog Dialogue 40-06, June (2006), <http://www.analog.com/analogdialogue>.
- [3] Ge, T. dan Chang J. S., “*Filterless class D amplifiers: power efficiency and power dissipation*”, IET Circuits Devices Syst., 2010, Vol. 4, Iss. 1, pp. 48-56.
- [4] Yu, S. H. dan Tseng, M. H., “*Modulation and Control of a Three-Level Class-D Audio Power Amplifier*”, IEEE, 2005.
- [5] Yu, S. H., “*Noise-Shaping Coding Through Bounding the Frequency-Weighted Reconstruction Error*”, IEEE Express Brief, Vol. 53, No. 1, Januari 2006.
- [6] Lin, Yu-Hsiu, Shiang-Hwua Yu, “*Novel Three Level Modulation Technique for A Class-D Audio Amplifier*”, September 2005.