

Aplikasi Tapis Digital Untuk Kendali *Subwoofer* Berbasis Mikrokontroler ATmega8

Arnold A. Tujuwale¹, Thomas Sri Widodo², Addin Suwastono³

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, FT UGM

²Dosen Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, FT UGM

Abstrak

Perkembangan teknologi Mikrokontroler kini memungkinkan penggunaannya untuk aplikasi yang dahulu hanya bisa diimplementasikan dengan pengolah isyarat digital (*Digital Signal Processor*). Contohnya adalah tapis digital untuk keperluan aplikasi audio. Makalah tugas akhir ini membahas tentang penggunaan mikrokontroler atmega8 sebagai implementasi bentuk digital dari tapis analog pengendali penguat suara frekuensi rendah (*subwoofer*). Hasil pengamatan menunjukkan tanggapan frekuensi tapis digital berbasis mikrokontroler bisa mendekati tapis analog ideal.

Kata kunci: tapis digital, mikrokontroler atmega8, aplikasi audio, *subwoofer*

1. Pendahuluan

Mikrokontroler adalah perangkat mikroprosesor yang telah dilengkapi dengan berbagai piranti pendukung sehingga membentuk sebuah komputer dalam satu keping [1]. Kegunaan utama mikrokontroler untuk mengendalikan operasi sebuah perangkat keras menggunakan perangkat lunak yang tersimpan dalam ROM [1]. Contoh umum sistem berbasis mikrokontroler misalnya papan kendali depan pemutar musik, kendali mesin cuci, mesin fotokopi, mainan anak-anak, dan berbagai perangkat yang melakukan beberapa operasi berurutan dengan satu tombol kendali [2].

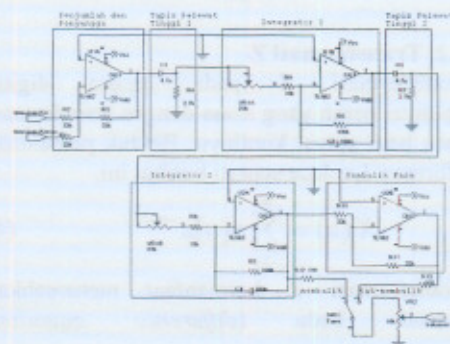
Jenis mikroprosesor selain mikrokontroler ada juga yang dikenal dengan Pemroses Isyarat Digital (*digital signal processor/DSP*). DSP berfungsi memanipulasi isyarat masukan dalam domain diskret dengan perangkat lunak operasi matematika. Dengan demikian arsitektur dalam DSP telah dioptimasi untuk operasi seperti penjumlahan, perkalian, dan akumulasi [3]. Peranti pendukung yang umum pada DSP adalah Pengubah analog ke digital (ADC) dan pengubah digital ke analog (DAC). Kedua perangkat ini penting karena DSP sering harus memanipulasi sinyal analog [3].

Perkembangan mikroprosesor dengan kemampuan yang terus meningkat sesuai hukum Moore juga berimbas pada mikrokontroler. Contohnya Mikrokontroler ATmega8, bagian dari keluarga AVR 8-bit produksi Atmel. ATmega8 mampu melakukan operasi perkalian dan penjumlahan secara *hardware* sampai enambelas juta kali operasi per detik. Keping ATmega8 sudah dilengkapi piranti ADC 10-bit dan

Modulator lebar pulsa (PWM) 10-bit [4]. PWM bisa digunakan sebagai DAC [5].

Kemampuan operasi matematika serta piranti pendukung ADC dan DAC pada ATmega8 bisa dikatakan mendekati sebuah DSP. Pada makalah skripsi ini penulis mencoba menggunakan mikrokontroler tersebut pada sebuah aplikasi yang biasanya diimplementasikan dengan DSP. Aplikasi tersebut adalah tapis digital untuk isyarat audio [3]. Mengingat keterbatasan komputasi ATmega8 maka dipilih tapis digital untuk frekuensi rendah yaitu Tapis Pengendali *Subwoofer*.

Tapis pengendali *subwoofer* adalah perangkat elektronik yang berfungsi memanipulasi isyarat audio yang akan dikirim ke *subwoofer* [6]. Tujuannya mengkompensasi tanggapan sistem *subwoofer* dalam kotak kedap yang menurun 12dB/oktaf dibawah frekuensi resonansi [7]. Secara umum ini berarti tapis mempunyai tanggapan yang membesar seiring penurunan frekuensi. Gambar rangkaiannya seperti berikut.



Gbr.1 – Tapis pengendali *subwoofer* analog

Tapis pengendali mempunyai bagian utama berupa dua buah integrator. Dua tapis pelewat tinggi disertakan agar penguatan dari integrator tidak berlanjut sampai DC. Bagian terdepan adalah penjumlahan berpenguatan satu.

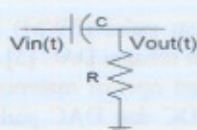
1.1. Transformasi Laplace

Transformasi Laplace adalah perangkat matematika yang bisa dipakai untuk mendapatkan fungsi alih suatu sistem analog. Dengan transformasi laplace maka operasi konvolusi pada ranah waktu bisa diganti dengan aljabar biasa. Bentuk persamaan transformasi Laplace seperti berikut ini.

$$X(s) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-st} dt \quad (1)$$

Dengan Transformasi Laplace bisa didapatkan fungsi alih beberapa rangkaian yang merupakan bagian dari tapis pengendali *subwoofer*.

- a. Tapis Pelewat Tinggi yang dibangun dengan komponen pasif



Gbr.2 – Tapis pelewat tinggi

mempunyai fungsi alih:

$$A_{HP}(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{sRC}{sRC + 1} \quad (2)$$

- b. Integrator berbasis penguat operasi



Gbr.3 – Integrator

mempunyai fungsi alih:

$$A_{INT}(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\left(\frac{1}{RC}\right)\frac{1}{s} \quad (3)$$

1.2. Transformasi Z

Transformasi Z pada isyarat digital mempunyai peran yang sama dengan transformasi Laplace bagi sinyal kontinyu. Bentuk persamaan transformasi Laplace seperti berikut ini.

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]z^{-n} \quad (4)$$

Transformasi Z bermanfaat memecahkan persamaan beda (*difference equation*)

berkoefisien konstan dengan memanfaatkan sifat pergeseran waktu dimana:

$$Z\{x[n-k]\} = z^{-k} X(z) \quad (5)$$

Persamaan beda muncul pada perancangan tapis digital, terutama tapis digital IIR hasil konversi tapis analog yang setara.

1.3. Transformasi Bilinier

Transformasi Bilinier menyediakan metode pemetaan satu-satu dari titik-titik frekuensi pada sumbu maya ($j\omega$) bidang s ke titik-titik frekuensi sepanjang lingkaran satuan pada bidang z . Dengan demikian memungkinkan konversi tapis analog ke bentuk digital yang setara [8].

Transformasi tapis analog ke digital dilakukan dengan mengganti parameter s pada fungsi alih dengan persamaan berikut ini

$$s \cong \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \quad (6)$$

dimana T adalah perioda pencuplikan tapis digital.

Hubungan antara sudut fase domain $s(\Omega)$ dan sudut fase domain $z(\omega)$ berbentuk $\Omega = \frac{2}{T} \tan\left(\frac{\omega}{2}\right)$. Untuk frekuensi bernilai kecil,

hubungan ini bisa didekati menjadi

$$\Omega = \frac{\omega}{T} \quad (7)$$

Hasil ini mengindikasikan bahwa pemetaan ke domain z mendekati linier untuk Ω dan ω bernilai kecil. Pada frekuensi tinggi, ketidaklinieran mengakibatkan cacat saat konversi.

Masalah ketidaklinieran pemetaan diatasi dengan proses *prewarping*. Efek kompresi yang tidak linier dari Ω ke ω dikompensasi dengan cara penskalaan (*prescaling*) nilai Ω melalui persamaan

$$\Omega^* = \frac{2}{T} \tan\left(\frac{\Omega T}{2}\right) \quad (8)$$

Setelah itu transformasi ke domain z bisa dilaksanakan dengan menggunakan nilai frekuensi terskala Ω^* .

1.4. Efek Ketelitian Terbatas pada Tapis Digital

Misalkan tapis digital disusun berbentuk persamaan beda seperti berikut ini

$$y[n] = b_1 y[n-1] + a_0 x[n] + a_1 x[n-1] \quad (9)$$

Jika tapis akan diimplementasikan dengan sistem mikrokontroler 8-bit maka koefisien tapis a_0 , a_1 , dan b_1 tidak bisa dinyatakan dengan tepat, hanya bisa didekati menggunakan angka diskrit berketelitian terbatas. Akibatnya posisi **Nol** dan **Kutub** turut berubah yang selanjutnya mengubah

tanggapan frekuensi. Kemungkinan terburuk adalah ketidakstabilan filter [9].

2. Metodologi Penelitian

Perancangan tapis digital pengendali subwoofer berbasis mikrokontroler ATmega dilakukan melalui beberapa tahap. Langkah pertama adalah menurunkan fungsi alih tapis analog pada gambar 1. Fungsi alih tapis analog kemudian diubah ke bentuk digital dengan transformasi bilinear. Hasil transformasi diimplementasikan dengan sistem mikrokontroler berbasis ATmega8.

2.1 Fungsi Alih Tapis Analog

Tapis analog pada gambar 1 dapat digambarkan dalam bentuk blok seperti berikut



Gbr. 4 – Diagram blok pengendali subwoofer analog

Dari gambar diatas terlihat ada dua keluaran yang berbeda fase 180°. Fungsi alih tapis secara keseluruhan adalah kaskada dari setiap bagian. Dengan memanfaatkan persamaan (2) dan (3) didapatkan fungsi alih tapis

$$H(j\omega) = G \times \left(\left(\frac{0.01269\omega}{\sqrt{(0.01269\omega)^2 + 1}} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{(0.01\omega)^2 + 1}} \right) \right)^2 \angle \left(2 \tan^{-1} \frac{1}{0.01269\omega} - 2 \tan^{-1} 0.01\omega \right) \quad (10)$$

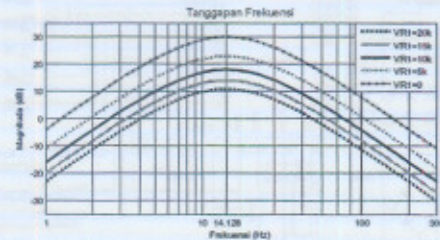
untuk keluaran tak membalik dan

$$H(j\omega) = G \times \left(\left(\frac{0.01269\omega}{\sqrt{(0.01269\omega)^2 + 1}} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{(0.01\omega)^2 + 1}} \right) \right)^2 \angle \left(2 \tan^{-1} \frac{1}{0.01269\omega} - 2 \tan^{-1} 0.01\omega - 180^\circ \right) \quad (11)$$

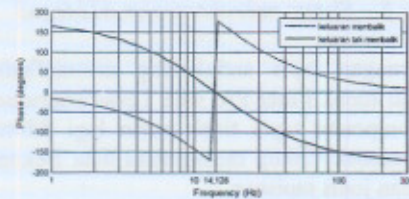
untuk keluaran membalik, dimana

$$G = \left(\frac{-10^5}{10^4 + VR_{14}} \right) \left(\frac{-10^5}{10^4 + VR_{18}} \right) \quad (12)$$

Gambar tanggapan frekuensi tapis analog seperti berikut ini.



Gbr. 5 – Tanggapan magnituda tapis analog



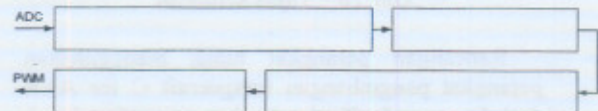
Gbr. 6 – Tanggapan fase tapis analog

2.2 Pengubahan tapis analog ke digital

Perangkat lunak MATLAB digunakan untuk konversi fungsi alih tapis analog ke bentuk digital yang setara. Format perintah MATLAB untuk transformasi bilinear seperti berikut

[num_z,den_z]=bilinear(num_s,den_s,frek_cuplik,frek_prewarp).

Saat perancangan belum diketahui secara pasti kemampuan komputasi ATmega8. Frekuensi pencuplikan ditetapkan secara acak sebesar 4kHz. Hasil transformasi kemudian disusun berbentuk diagram blok seperti berikut ini.



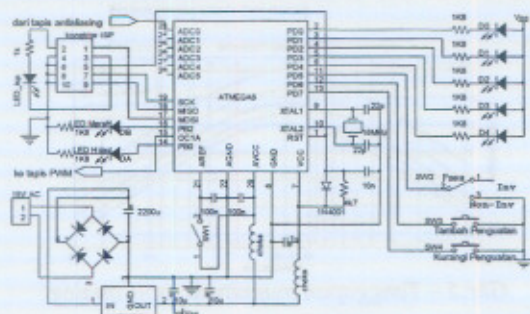
Gbr. 7 – Tanggapan fase tapis analog

Besar num_z0 sama dengan num_z1 dan bervariasi dari 0,04115 sampai 0,12286 bergantung pada posisi potensiometer VR1.

2.3 Sistem Mikrokontroler ATmega8

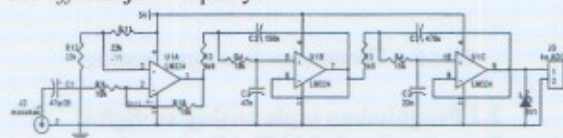
Perancangan sistem mikrokontroler dibagi atas perancangan perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras berupa sistem mikrokontroler itu sendiri ditambah perangkat tapis antialiasing dan tapis keluaran PWM.

Berikut adalah skema sistem mikrokontroler



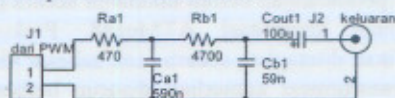
Gbr. 8 – Sistem mikrokontroler ATmega8

Rancangan tapis antialiasing memanfaatkan perangkat lunak Filter Pro dari Texas Instrument. Nilai komponen tapis tidak perlu lagi dihitung secara manual. Cukup memasukkan data frekuensi *cut-off* dan jenis tapisnya.



Gbr. 9 – Tapis Antialiasing

Rancangan tapis keluaran relatif mudah dengan dua pasang tapis RC pelewat rendah. Nilai komponen didapatkan dengan melihat tanggapan frekuensi pada simulasi SPICE.



Gbr. 10 – Tapis keluaran

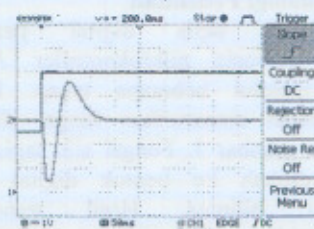
Rancangan perangkat lunak menggunakan perangkat pengembangan Imagecraft C for AVR dari Imagecraft. Bagian-bagian perangkat lunak terdiri dari

- subrutin eksekusi tapis digital yang dijalankan 4000-kali per detik.
- program utama berupa pengecekan tombol yang dijalankan terus-menerus.
- Inisialisasi perangkat pendukung seperti ADC, PWM, dan *Timer*.
- Subrutin pendukung seperti pendeteksi kejenuhan tapis, perubahan fase keluaran, perubahan besar penguatan, tampilan besar penguatan, dan penyimpanan informasi ke EEPROM

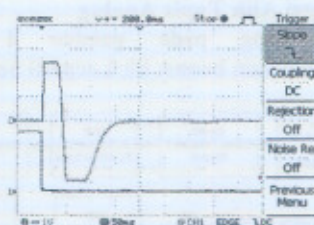
3. Hasil Pengukuran dan Pembahasan

Parameter-parameter yang penting pada tapis digital pengendali *subwoofer* adalah kestabilan, tanggapan magnituda, dan tanggapan fase. Kestabilan harus menjadi yang pertama. Cara mencoba kestabilan tapis digital yaitu dengan

memasukan isyarat *step* langsung ke ADC tanpa melalui tapis *antialiasing*. Untuk tapis yang stabil maka berlaku masukan terbatas menghasilkan keluaran yang terbatas. Hasilnya seperti berikut.



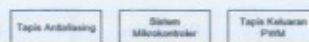
Gbr. 11a – Ujicoba kestabilan dengan step positif



Gbr. 11b – Ujicoba kestabilan dengan step negatif

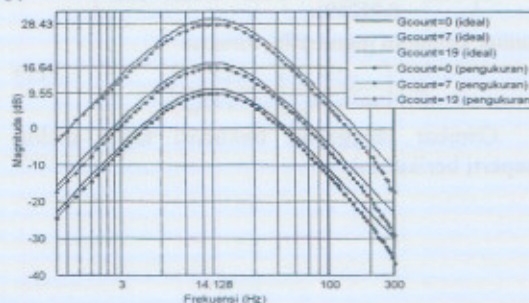
Terlihat keluaran tapis (gelombang hijau) berupa osilasi teredam. Ini menandakan tapis bersifat stabil.

Pengukuran tanggapan frekuensi dilakukan dengan prosedur berikut ini.



Gbr. 12 – Pengukuran tanggapan frekuensi

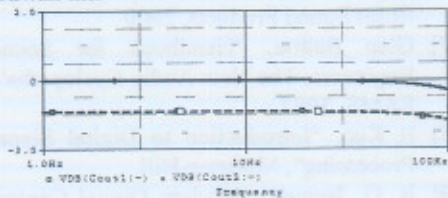
Kartu suara komputer membangkitkan gelombang dengan frekuensi dari 1Hz sampai 300Hz. Pengukuran dilaksanakan dengan membandingkan besar keluaran terhadap masukan. Hasilnya dibandingkan dengan gambar 5.



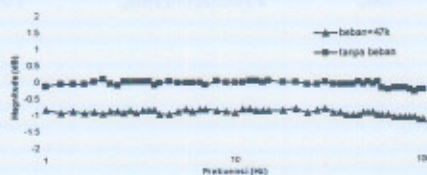
Gbr. 13 – Pengukuran tanggapan frekuensi

Dari gambar diatas terlihat ada penyimpangan antara tanggapan ideal (garis lurus) dan hasil pengukuran (garis dengan titik-titik).

Penyimpangan pertama adalah besar tanggapan hasil pengukuran yang lebih rendah secara merata pada frekuensi dibawah 100Hz. Ini ternyata disebabkan oleh beban pada tapis keluaran. Pembuktiannya bisa dilihat pada gambar hasil simulasi SPICE dan pengukuran aktual dibawah ini.



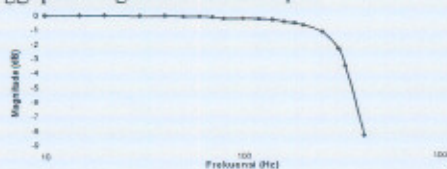
Gbr.14 – Simulasi SPICE untuk tapis keluaran tanpa beban (garis lurus) dan dengan beban 47k (garis putus-putus)



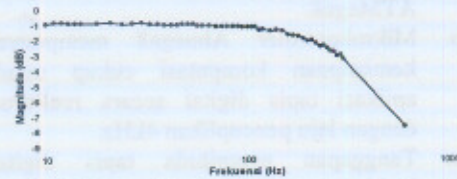
Gbr.15 – Pengukuran pengaruh beban pada tapis keluaran

Penyimpangan seperti ini tidak terhindarkan untuk tapis pasif berbasis RC. Jika digunakan tapis aktif maka diperlukan penguat operasi kecepatan tinggi untuk meredam frekuensi dasar PWM sebesar 15,625kHz beserta larasan-larasannya.

Penyimpangan kedua pada gambar 12 adalah penurunan tanggapan hasil pengukuran yang semakin besar seiring kenaikan frekuensi setelah 100Hz. Penyimpangan ini juga diakibatkan tapis antialiasing dan tapis keluaran. Berikut adalah tanggapan magnituda kedua tapis.



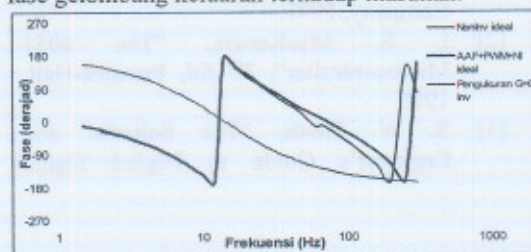
Gbr.16 – Tanggapan magnituda tapis antialiasing



Gbr.17 – Tanggapan magnituda tapis keluaran

Terlihat kedua tapis sudah mulai mengalami penurunan magnituda yang berarti setelah frekuensi 100Hz. Pada frekuensi 200Hz masing-masing tapis menyumbang pelemahan sekitar 1dB.

Prosedur pengukuran fase tapis digital tetap seperti gambar 12. Pengukuran dilakukan pada fase gelombang keluaran terhadap masukan.



Gbr.18 – Pengukuran tanggapan fase tapis digital

Garis hijau adalah tanggapan fase ideal untuk keluaran tidak membalik (*non inverting*). Garis Merah adalah gabungan tanggapan ideal tak membalik dengan tanggapan fase tapis membalik dengan tanggapan fase tapis antialiasing dan tapis keluaran. Terlihat ada dua penyimpangan hasil pengukuran. Pertama, hasil pengukuran keluaran membalik (garis biru) justru mirip dengan tanggapan ideal tak membalik. Ternyata ini akibat pembalikan fase oleh penguat penyangga pada tapis antialiasing. Pada gambar 9 terlihat penyangga U1A dalam konfigurasi penguat membalik.

Penyimpangan kedua pada gambar 18 adalah selisih fase yang terus membesar antara pengukuran dan tanggapan ideal seiring kenaikan frekuensi. Ini adalah konsekuensi penggunaan transformasi bilinear yang memetakan bidang s berjangkahan $-\infty$ sampai ∞ ke bidang z yang berjangkahan $-\pi$ sampai π [10].

4. Kesimpulan

Dari hasil perancangan, pengujian, dan pengukuran tapis digital pengendali *subwoofer* berbasis mikrokontroler ATmega8 dapat ditarik kesimpulan seperti berikut ini.

- Tidak ada masalah kestabilan pada implementasi tapis digital IIR dengan

sistem mikrokontroler 8-bit berbasis ATmega8.

- b. Mikrokontroler Atmega8 mempunyai kemampuan komputasi cukup untuk aplikasi tapis digital secara real-time dengan laju pencuplikan 4kHz.
- c. Tanggapan magnituda tapis digital berbasis ATmega8 cukup baik. Penyimpangan justru disebabkan oleh tapis antialiasing dan tapis keluaran.
- d. Penyimpangan tanggapan fase lebih dikarenakan oleh efek bawaan transformasi bilinear.

5. Referensi

[1] K. J. Ayala, "The 8051 Microcontroller, Architecture, Programming, and Application", West Publishing Company, 1991.
[2] I. S. MacKenzie, "The 8051 Microcontroller", 3rd Ed, Prentice-Hall, 1995
[3] S. W. Smith, "The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal

Processing", 2nd Ed, California Technical Publishing, California, 1999.

[4] "ATmega8-ATmega8L 8-bit AVR with 8K bytes In-System Programmable Flash", Datasheet, Atmel Corporation, 2003
[5] "Using PWM to Generate Analog Output", AN538, Application Note, Microchip, 2002
[6] Rod Elliot, Active Subwoofer and Controller
<http://sound.westhost.com/project48.htm>
Elliot Sound Products, 2000
[7] Glen Ballou, "Handbook for Sound Engineers, The New Audio Cyclopedia", SAMS, 1987.
[8] R Kuc, "Introduction to Digital Signal Processing", McGraw-Hill.
[9] R. G. Jacquot, "Modern Digital Control Systems", Marcel Dekker, 1981.
[10] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, "Discrete-Time Signal Processing", 2nd Ed, Prentice-Hall, 1999.