

IMPLEMENTASI ADAPTIVE DIGITAL EQUALIZER UNTUK REDUKSI FEEDBACK AUDIO SECARA REAL-TIME BERBASIS NODEMCU ESP32

Ahmad Chozin Rofi'i¹, Budi Cahyo Wibowo²

^{1,2}Universitas Muria Kudus; Jl. Lingkar Utara UMK, Gondangmanis, Bae, Kudus – 59327

Keywords:

adaptive notch filter; audio feedback suppression; digital equalizer.

Correspondent Email:

ahmadchozin@gmail.com

Abstrak. *Feedback* audio merupakan salah satu permasalahan pada sistem tata suara yang terjadi akibat sinyal dari loudspeaker kembali ditangkap oleh mikrofon sehingga membentuk penguatan berulang dan menghasilkan suara dengung (*howling*) yang mengganggu kualitas audio. Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan adaptive digital equalizer berbasis NodeMCU ESP32 untuk mendeteksi dan mereduksi frekuensi Feedback secara otomatis dan real-time. Sistem bekerja dengan menganalisis spektrum frekuensi menggunakan *spectrum analyzer*, kemudian menerapkan parametric notch filter yang menyesuaikan frekuensi tengah, gain, dan bandwidth secara adaptif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi frekuensi Feedback dengan rata-rata error sebesar 28,5 Hz dan waktu deteksi 3–4 ms. Setelah Feedback terdeteksi, sistem secara otomatis memberikan reduksi Gain antara 8 dB hingga 17 dB sesuai karakteristik frekuensi yang mengalami Feedback. Validasi menggunakan perangkat lunak Smaart Live menunjukkan kesesuaian hasil deteksi dengan selisih frekuensi hanya 20 Hz (0,77%) antara hasil pengukuran dan hasil deteksi sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Adaptive Digital Equalizer berbasis ESP32 mampu mereduksi Feedback audio secara efektif, cepat, dan adaptif tanpa menurunkan kualitas audio secara signifikan.



Copyright © 2026 The Author(s),
Published by Jurnal Informatika
dan Teknik Elektro Terapan. This
is an open-access article
distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution-
NonCommercial 4.0 International
License (CC BY-NC 4.0).

Abstract. *Audio Feedback* is a common problem in sound systems caused by the sound from a loudspeaker being re-captured by a microphone, resulting in a continuous loop that produces howling noise and degrades audio quality. This study aims to implement an adaptive digital equalizer based on the NodeMCU ESP32 to automatically detect and suppress Feedback frequencies in real time. The system employs frequency spectrum analysis to identify dominant Feedback frequencies and applies a parametric notch filter with adaptive adjustment of center frequency, gain, and bandwidth. Testing results show that the system is capable of detecting Feedback frequencies with an average error of 28.5 Hz and a detection time of 3–4 ms. The adaptive equalizer automatically attenuates the detected Feedback frequency with Gain reduction ranging from 8 dB to 17 dB, while maintaining the quality of surrounding frequencies. Validation using Smaart Live demonstrates a close agreement between the detected frequency (2.58 kHz) and the measured frequency (2.60 kHz), with a difference of only 20 Hz (0.77%). These results indicate that the proposed system effectively suppresses audio Feedback in real time with good accuracy and minimal impact on overall audio quality.

1. PENDAHULUAN

Menurut T. Tur, *sound system* merupakan perangkat pengeras suara yang telah banyak dimanfaatkan oleh masyarakat untuk berbagai keperluan. Seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi, kebutuhan masyarakat terhadap perangkat ini terus mengalami peningkatan dari waktu ke waktu [1]. Menurut M. Gazali, pada umumnya masyarakat menginginkan perangkat pengeras suara yang mampu menghasilkan kualitas audio yang memuaskan sesuai dengan kebutuhan mereka. Namun demikian, tidak jarang perangkat yang digunakan justru menghasilkan suara yang kurang jernih atau disertai munculnya derau (*noise*) akibat kualitas *sound system* yang tidak optimal, sehingga berdampak pada menurunnya tingkat kepuasan pengguna atau konsumen.[2]. Kualitas suara yang jernih dan bebas gangguan menjadi standar utama yang harus dipenuhi oleh penyedia jasa sewa, agar pesan yang disampaikan dapat diterima dengan baik oleh pendengar. Namun, salah satu masalah teknis paling umum yang kerap dihadapi dalam operasional penyewaan *sound system* adalah *acoustic Feedback* atau *Feedback* audio, yaitu bunyi mendengung keras (*howling*) yang muncul tiba-tiba dari *loudspeaker* dan dapat menurunkan kepuasan pengguna jasa sewa[3].

Menurut J. Loviscach, fenomena *Feedback* terjadi ketika sinyal suara yang keluar dari *loudspeaker* kembali masuk ke mikrofon, dikuatkan oleh *amplifier*, lalu kembali ke *loudspeaker* dalam siklus yang berulang terus-menerus. Jika penguatan total dalam siklus ini cukup besar dan kondisi fasa terpenuhi pada suatu frekuensi tertentu, maka terjadilah osilasi yang tidak terkendali dan menghasilkan bunyi nyaring yang sangat mengganggu [4]. Frekuensi *Feedback* sangat bergantung pada karakteristik akustik ruangan, posisi relatif antara mikrofon dan *loudspeaker*, serta respons frekuensi dari seluruh komponen sistem.

Menurut T. Corbach, pendekatan konvensional yang umum dilakukan untuk mengatasi *Feedback* meliputi pengaturan manual posisi mikrofon, penggunaan *graphic equalizer* statis, dan pemasangan *parametric equalizer* yang disetel oleh teknisi audio berpengalaman [5]. Namun, metode-metode ini memiliki keterbatasan mendasar karena kondisi akustik ruangan bersifat dinamis—berubah

seiring pergerakan hadirin, perpindahan posisi mikrofon, maupun perubahan suhu dan kelembapan lingkungan. Akibatnya, penyetelan manual yang sudah dilakukan sebelum acara dapat menjadi tidak efektif saat acara berlangsung.

Perkembangan teknologi mikrokontroler, khususnya ESP32 yang memiliki kemampuan pemrosesan sinyal digital cukup kuat dengan harga yang terjangkau, membuka peluang untuk mengembangkan sistem penanganan *Feedback* yang bersifat adaptif dan otomatis. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sebuah *adaptive digital equalizer* berbasis ESP32 yang mampu mendeteksi frekuensi *Feedback* secara otomatis dan menekan Gain pada frekuensi tersebut dalam waktu nyata (*real-time*), tanpa memerlukan intervensi manual dari operator

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Feedback Audio

Feedback pada sistem audio adalah fenomena akustik yang terjadi ketika suara dari *loudspeaker* masuk ke mikrofon, kemudian diperkuat kembali oleh sistem *amplifier* secara terus-menerus sehingga mengakibatkan *Feedback loop* dan menghasilkan suara dengin [6]. *Feedback* timbul karena adanya loop tertutup antara mikrofon, sistem penguat, dan *loudspeaker* yang tidak dikendalikan dengan baik. suara *Feedback* umumnya terjadi pada frekuensi tinggi yang sangat mengganggu dan



bisa merusak kualitas audio secara keseluruhan.

Gambar 1: *Feedback* Pada Sistem Audio

Menurut K. Kasanang, Sistem audio dapat dipandang sebagai sebuah sistem kontrol yang juga memiliki parameter-parameter seperti gain, *frequency response*, dan lain-lain. Pada sistem audio, terdapat fenomena natural *Feedback* dimana sinyal suara yang dikeluarkan dari speaker akan masuk kembali ke dalam sistem dan mempengaruhi karakteristik dan

performa dari sistem tersebut Audio Feedback terjadi ketika sinyal suara dari speaker tertangkap kembali oleh mikrofon kemudian diperkuat secara siklus, menghasilkan nada tidak nyaman dan dapat merusak perangkat [7]. Di lapangan, banyak *sound system* yang masih mengoperasikan sistem analog sederhana: mikrofon langsung ke amplifier tanpa mixing atau *equalization*, sehingga mudah mengalami Feedback, distorsi, dan kerusakan perangkat (*speaker atau amplifier*) akibat *overload*.

2.2. Konsep Feedback Audio

Menurut S. Kim, secara prinsip, Feedback terjadi apabila sinyal yang kembali ke mikrofon memiliki amplitudo yang cukup besar dan fase yang mendukung terjadinya penguatan pada frekuensi tertentu. Ketika penguatan total dalam loop mencapai atau melebihi (0 dB), sistem menjadi tidak stabil dan menghasilkan osilasi pada frekuensi tersebut. Frekuensi yang mengalami Feedback umumnya dipengaruhi oleh karakteristik akustik ruangan, respons frekuensi mikrofon dan speaker, serta jarak dan arah penempatannya [8].

Menurut F. Ahmad, ada beberapa faktor yang dapat menyebabkan Feedback antara lain adalah pengaturan Gain yang berlebihan, jarak mikrofon yang terlalu dekat dengan speaker, penggunaan mikrofon omnidirectional yang menangkap suara dari segala arah, serta adanya pantulan suara dari dinding atau permukaan keras di dalam ruangan. Selain menimbulkan gangguan pendengaran, Feedback yang tidak terkendali dapat menyebabkan distorsi audio dan berpotensi merusak speaker maupun amplifier akibat sinyal berlebih [9].

Menurut J. Agnew, untuk mengurangi atau menghilangkan Feedback, berbagai teknik dapat digunakan, seperti pengaturan posisi mikrofon dan speaker yang tepat, penggunaan mikrofon directional, pengurangan Gain sistem, serta penerapan equalizer untuk meredam frekuensi yang sering mengalami Feedback [10]. Pada sistem audio modern, metode yang lebih canggih seperti *adaptive equalization*, *Feedback suppression*, dan *digital signal processing* (DSP) digunakan untuk mendeteksi dan mengurangi frekuensi Feedback secara otomatis tanpa mengurangi kualitas suara secara signifikan.

2.3. NodeMCU ESP32

Menurut R. Alamsyah, NodeMCU ESP32 merupakan mikrokontroler yang dikembangkan oleh Espressif Systems sebagai pengembangan dari seri ESP8266. Dibandingkan pendahulunya, ESP32 menawarkan peningkatan pada jumlah pin Input/Output (I/O), kanal *Analog-to-Digital Converter* (ADC), kapasitas memori, serta telah dilengkapi dengan fitur Wi-Fi dan *Bluetooth Low Energy* (BLE). Fitur-fitur tersebut menjadikan ESP32 banyak digunakan dalam berbagai aplikasi sistem tertanam (*embedded system*) dan *Internet of Things* (IoT)[11]

Pada penelitian ini, NodeMCU ESP32 dipilih sebagai unit pemrosesan utama karena memiliki kemampuan yang memadai untuk menjalankan algoritma Digital Signal Processing (DSP) secara *real-time*. Kecepatan pemrosesan yang tinggi memungkinkan ESP32 melakukan analisis spektrum untuk mendeteksi frekuensi Feedback secara cepat. Selain itu, antarmuka I²S (*Inter-IC Sound*) yang dimiliki ESP32 mendukung komunikasi dengan modul ADC PCM1808 dan DAC PCM5102, sehingga proses akuisisi, pengolahan, dan keluaran sinyal audio digital dapat berlangsung secara efisien. Dengan kemampuan tersebut, ESP32 menjadi platform yang sesuai untuk mengimplementasikan sistem *Adaptive Digital Equalizer* yang mampu mendeteksi dan mereduksi *Feedback* audio secara otomatis.

2.4. Equalizer Digital Parametrik Adaptif

Equalizer digital berfungsi mengatur tingkat penguatan sinyal pada frekuensi-frekuensi tertentu melalui pemrosesan sinyal secara digital. Di antara berbagai jenis equalizer digital, *parametric equalizer* merupakan pilihan yang paling sesuai untuk aplikasi penekanan Feedback karena menawarkan kendali penuh atas tiga parameter utama secara independen: frekuensi pusat (*center frequency* f_0), besar penguatan (Gain G), dan lebar pita (*bandwidth* BW) atau faktor kualitas Q [12].

Penelitian ini dikembangkan sebuah *adaptive parametric equalizer* yang mampu menyesuaikan ketiga parameternya secara otomatis dan real-time berdasarkan deteksi kondisi *Feedback* yang sedang terjadi. Mekanisme adaptif ini bekerja dalam dua tahap yang saling melengkapi.

2.5. Metode-Metode *Feedback Suppression*

Tiga kategori utama metode *Feedback suppression* telah dikembangkan dan diteliti selama beberapa dekade terakhir. Pertama, metode penggeseran frekuensi (*frequency shifting*) yang menggeser frekuensi seluruh sinyal audio sebesar 2-5 Hz untuk mengganggu kondisi fasa yang diperlukan osilasi. Metode ini sederhana namun dapat menurunkan kejernihan suara jika pergeseran terlalu besar. Kedua, metode notch filtering yang menerapkan filter pita sempit pada frekuensi Feedback spesifik untuk mengurangi Gain hanya di titik tersebut, sehingga dampak terhadap kualitas audio di frekuensi lain sangat minimal. Ketiga, metode *adaptive filtering* yang menggunakan algoritma adaptif seperti *Least Mean Squares* (LMS) untuk memodelkan dan menghilangkan jalur akustik Feedback secara dinamis—metode paling canggih namun paling besar kebutuhan komputasinya [13].

Penelitian ini mengadopsi pendekatan adaptive notch filtering karena menawarkan keseimbangan terbaik antara efektivitas reduksi Feedback dan kompleksitas komputasi yang sesuai dengan kemampuan mikrokontroler ESP32. Pendekatan ini juga terbukti memberikan perubahan minimal pada kualitas suara di luar frekuensi yang ditargetkan.

2.6. Adaptive notch filter IIR

Menurut V. Välimäki and J. D. Reiss, notch filter adalah jenis filter yang dirancang untuk meredam sinyal pada satu frekuensi tertentu sambil membiarkan frekuensi lainnya lewat dengan normal. Dalam implementasi digital, filter IIR (*Infinite Impulse Response*) orde kedua digunakan karena efisien secara komputasi dan mampu menghasilkan karakteristik notch yang tajam dan sempit [14]. Ketajaman notch dikendalikan oleh parameter yang disebut faktor radius (r), di mana nilai r yang mendekati angka satu menghasilkan notch yang lebih sempit sehingga hanya memengaruhi pita frekuensi yang sangat kecil di sekitar frekuensi target. Nilai $r = 0,95$ digunakan dalam penelitian ini.

Aspek "*adaptive*" dari filter ini berarti parameter frekuensi notch dapat diperbarui secara otomatis berdasarkan frekuensi Feedback yang baru saja terdeteksi. Sistem mampu mengelola hingga delapan notch filter secara bersamaan, memungkinkan penanganan

beberapa frekuensi *Feedback* yang berbeda secara simultan. Untuk mencegah artefak audio berupa bunyi klik atau pop saat koefisien filter diperbarui, proses transisi dilakukan secara gradual selama 32 sampel menggunakan interpolasi linear [15].

2.7. Analisis Spektrum Frekuensi dalam Domain Digital

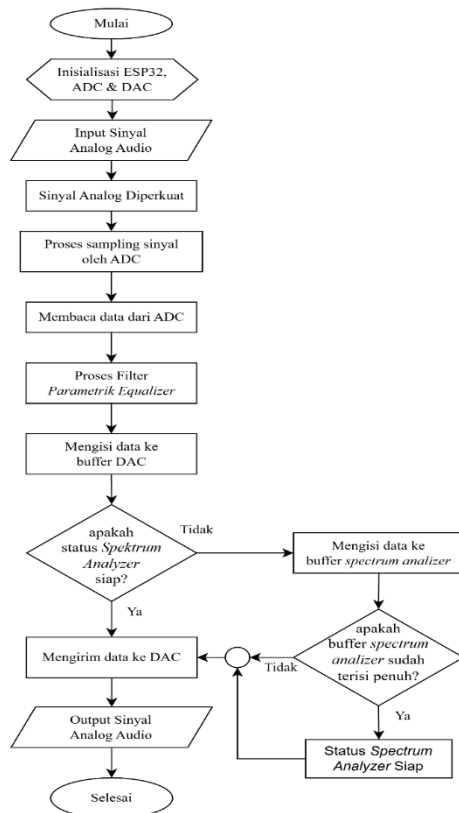
Untuk mendeteksi frekuensi Feedback secara akurat, sinyal audio perlu dianalisis dalam domain frekuensi. Teknik analisis spektrum frekuensi mengubah representasi sinyal dari domain waktu—yaitu deretan nilai amplitudo dari waktu ke waktu—ke dalam domain frekuensi, yaitu informasi tentang seberapa kuat setiap komponen frekuensi hadir di dalam sinyal tersebut. Proses ini dilakukan secara periodik pada blok-blok data audio yang disebut frame [9].

Dalam sistem yang dirancang, analisis spektrum dilakukan menggunakan blok data sebesar 1024 sampel audio dengan laju sampling 44.100 Hz. Sebelum dianalisis, setiap frame data dikalikan dengan fungsi Hanning window untuk mengurangi efek spectral leakage—yaitu kebocoran energi antar komponen frekuensi yang dapat menurunkan akurasi deteksi. Resolusi frekuensi yang dihasilkan dari konfigurasi ini adalah sekitar 43 Hz per bin analisis, yang sudah memadai untuk mendeteksi dan menargetkan frekuensi Feedback dengan presisi yang cukup.

3. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian ini difokuskan pada perancangan dan pengujian sistem adaptive digital equalizer yang bekerja secara otomatis dalam mereduksi frekuensi penyebab Feedback. Proses yang dilakukan meliputi perancangan algoritma deteksi frekuensi, perancangan filter parametric digital, serta pengujian performa sistem secara real-time.

3.1 Flowchart Sistem Equalizer adaptif



Gambar 2: Flowchart Sistem Equalizer

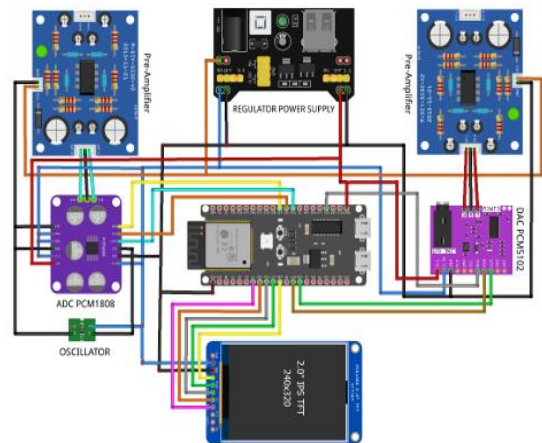
Pada flowchart prinsip kerja sistem equalizer yang diawali dengan proses inisialisasi ESP32 beserta modul ADC dan DAC sebagai tahap persiapan perangkat keras. Selanjutnya, sinyal audio analog dimasukkan ke sistem dan diperkuat menggunakan rangkaian operational amplifier (Op-Amp) sebelum dilakukan proses sampling oleh ADC. Data hasil konversi ADC kemudian dibaca oleh ESP32 dan diproses menggunakan filter parametric equalizer.

Hasil pemrosesan tersebut selanjutnya dimasukkan ke dalam buffer DAC. Pada tahap ini, sistem melakukan pengecekan status spectrum analyzer. Apabila spectrum analyzer dalam kondisi siap, data audio langsung dikirim ke DAC untuk dikonversi kembali menjadi sinyal analog. Namun, apabila *spectrum analyzer* belum siap, data audio terlebih dahulu dimasukkan ke dalam buffer spectrum analyzer.

Setelah itu, sistem memeriksa apakah *buffer spectrum analyzer* telah terisi penuh. Jika *buffer* belum terisi penuh, maka sistem tetap melanjutkan proses pengiriman data audio ke DAC sehingga aliran audio tidak terhenti.

Sebaliknya, jika *buffer* telah terisi penuh, maka status *spectrum analyzer* dinyatakan siap. Selanjutnya, data audio dikirim ke DAC sehingga dihasilkan sinyal audio keluaran yang telah diproses, dan siklus sistem berlanjut secara real-time dan berulang.

3.2 Wiring System



Gambar 1: Wiring Diagram

Wiring diagram sistem yang dirancang menggunakan NodeMCU ESP32 sebagai pemrosesan data. Sinyal audio analog terlebih dahulu diperkuat menggunakan rangkaian preamplifier sebelum diteruskan ke modul ADC PCM1808. Modul ADC tersebut dilengkapi dengan osilator eksternal sebagai sumber clock untuk proses konversi. Hasil konversi sinyal analog menjadi digital dibaca oleh ESP32 melalui antarmuka I2S untuk diproses oleh sistem equalizer dan analyzer.

Setelah proses pengolahan sinyal digital pada ESP32, data audio dikirim ke modul DAC PCM5102 melalui jalur I2S untuk dikonversi kembali menjadi sinyal analog. Sinyal analog keluaran DAC kemudian diperkuat menggunakan rangkaian preamplifier output sebelum menjadi sinyal audio keluaran sistem.

Selain jalur audio, sistem juga dilengkapi dengan modul layar TFT yang terhubung ke ESP32 sebagai media tampilan spectrum analyzer. Seluruh rangkaian ditenagai oleh modul regulator *power supply* yang mendistribusikan tegangan ke masing-masing modul, sehingga sistem dapat beroperasi dengan stabil.

3.3 Arsitektur Sistem Secara Keseluruhan

Sistem adaptive digital equalizer yang dirancang bekerja melalui tujuh tahap pemrosesan yang berlangsung secara berurutan dan terus-menerus selama sistem aktif. Tahap pertama adalah akuisisi sinyal: mikrofon elektret menangkap sinyal suara dari lingkungan, yang kemudian dikondisikan oleh rangkaian pre-amplifier sebelum masuk ke konverter ADC ESP32. Tahap kedua adalah digitalisasi sinyal: ADC 12-bit ESP32 mengambil sampel sinyal audio sebanyak 44.100 kali per detik, menghasilkan representasi digital dari sinyal audio tersebut.

Tahap ketiga adalah pengumpulan data: sampel audio dikumpulkan dalam buffer melingkar (circular buffer) hingga terkumpul 1024 sampel yang membentuk satu frame analisis. Tahap keempat adalah analisis spektrum frekuensi menggunakan teknik transformasi domain frekuensi untuk menghasilkan gambaran distribusi energi sinyal di setiap komponen frekuensi. Tahap kelima adalah deteksi Feedback: algoritma secara otomatis mengidentifikasi komponen frekuensi yang amplitudonya melonjak secara mencurigakan sebagai kandidat frekuensi Feedback. Tahap keenam adalah pembaruan filter: koefisien notch filter diperbarui secara adaptif sesuai frekuensi yang terdeteksi. Tahap ketujuh adalah keluaran audio: sinyal yang telah difilter dikirimkan melalui antarmuka I2S menuju DAC dan selanjutnya ke loudspeaker.

3.4 Konsep Parametric Equalizer Adaptif

Sistem equalizer dirancang berbasis pemrosesan sinyal digital menggunakan ESP32 sebagai unit pemroses utama. Data sinyal audio digital yang telah melalui proses sampling kemudian diolah untuk memperoleh informasi spektrum frekuensi.

Equalizer yang digunakan adalah tipe parametric equalizer digital, karena memiliki fleksibilitas dalam pengaturan tiga parameter utama, yaitu:

Frekuensi pusat (*Center Frequency*, f_c): Menentukan frekuensi spesifik yang akan dikontrol.

Gain (G): Menentukan besar penguatan atau pelemahan sinyal pada frekuensi tersebut.

Bandwidth (Q factor): Menentukan lebar pita frekuensi yang terpengaruh oleh proses

penguatan atau pelemahan. Mekanisme adaptif ini bekerja dalam dua tahap yang saling melengkapi.

Tahap Pertama — Penurunan Gain Bertahap (Gain Stepping). Ketika sistem mendeteksi indikasi awal Feedback pada frekuensi f_0 tertentu, algoritma adaptive equalizer segera mengaktifkan filter parametrik pada frekuensi tersebut dan melakukan penurunan Gain secara bertahap sebesar 1 dB per siklus evaluasi. Proses penurunan berlanjut selama kondisi Feedback masih terdeteksi, dengan batas penurunan maksimum yang dapat dikonfigurasi (misalnya hingga -24 dB) sebagai pengaman agar sinyal audio pada frekuensi tersebut tidak teredam berlebihan. Penurunan Gain dihentikan segera setelah indikator Feedback menunjukkan bahwa osilasi telah berhasil diredam — yaitu ketika magnitudo spektrum pada f_0 turun ke bawah ambang batas yang telah ditentukan.

Tahap Kedua — Pelebaran Bandwidth Adaptif (Adaptive Bandwidth Widening). Sistem dilengkapi dengan mekanisme memori frekuensi (frequency history) yang mencatat setiap frekuensi yang pernah mengalami Feedback beserta jumlah kejadiannya. Apabila pada waktu selanjutnya terdeteksi Feedback pada frekuensi yang sama, sistem mengenali kondisi ini sebagai indikasi bahwa penurunan Gain semata tidak cukup efektif — kemungkinan karena frekuensi Feedback sesungguhnya telah bergeser sedikit akibat perubahan kondisi akustik ruangan, namun masih berada dalam vicinity frekuensi yang sama. Dalam kondisi demikian, algoritma beralih strategi: sistem secara adaptif memperlebar bandwidth filter parametrik pada frekuensi tersebut. Pelebaran bandwidth dilakukan secara bertahap, misalnya dengan menurunkan nilai faktor Q sebesar ΔQ per siklus, sehingga filter mencakup cakupan frekuensi yang lebih luas di sekitar f_0 . Pendekatan ini efektif menangkap frekuensi Feedback yang bergeser dalam batas tertentu tanpa memerlukan deteksi ulang frekuensi dari awal.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil pengujian dan analisis performa sistem adaptive digital equalizer yang telah dirancang dan

diimplementasikan pada platform NodeMCU ESP32. Pengujian dilakukan secara sistematis meliputi: (1) verifikasi spesifikasi perangkat keras, (2) pengujian akurasi deteksi frekuensi Feedback, (3) pengujian efektivitas reduksi Gain oleh *notch filter adaptif*, (4) pengujian kualitas audio keluaran.

4.1. Spesifikasi dan Realisasi Perangkat Keras

Sistem yang direalisasikan terdiri dari enam modul utama yang terintegrasi sebagaimana ditampilkan pada Tabel I. NodeMCU ESP32 dengan kecepatan clock 240 MHz dipilih sebagai unit pemroses utama karena mampu melakukan komputasi FFT 1024 titik dalam waktu kurang dari 2 ms, sehingga memenuhi syarat pemrosesan sinyal secara real-time pada laju sampling 44.100 Hz.

Tabel I

Spesifikasi Komponen Perangkat Keras Sistem

Komponen	Spesifikasi	Keterangan
NodeMCU ESP32	Dual-core 240 MHz, RAM 520 KB	Unit pemroses utama
ADC PCM1808	24-bit, fs 44.100 Hz	Konversi sinyal analog ke digital
DAC PCM5102	24-bit, SNR 112 dB	Konversi sinyal digital ke analog
TFT Display	240×320 px, SPI interface	Tampilan spectrum analyzer

Pemilihan ADC PCM1808 dengan resolusi 24-bit pada laju sampling 44.100 Hz memberikan jangkauan frekuensi yang mencakup seluruh spektrum audio yang dapat didengar manusia (20 Hz – 22.050 Hz) sesuai teorema Nyquist. Penggunaan antarmuka I2S antara ESP32, ADC, dan DAC memungkinkan transfer data audio dengan latensi yang sangat rendah dan bebas dari degradasi sinyal yang umum terjadi pada antarmuka analog.

4.2. Pengujian Akurasi Deteksi Frekuensi Feedback

Pengujian akurasi deteksi dilakukan dengan membangkitkan sinyal sinusoidal pada

frekuensi yang telah ditentukan menggunakan function generator, kemudian menginjeksikannya ke sistem audio untuk mensimulasikan kondisi Feedback. Sistem kemudian diuji kemampuannya mendeteksi frekuensi tersebut. Pengujian dilakukan pada delapan titik frekuensi yang tersebar merata pada spektrum audio (200 Hz – 20.000 Hz) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel II

Tabel II

Hasil Pengujian Akurasi Deteksi Frekuensi Feedback

Uji ke-	Freq. Feedback Aktual (Hz)	Freq. Terdeteksi (Hz)	Error (Hz)	Waktu Deteksi (ms)
1	205.1	215.1	10,0	4
2	937.5	950.0	12,5	3
3	2.58 k	2.50 k	80,0	4
4	1.79 k	1.80 k	10,0	4
5	1.23 k	1.26 k	30,0	3

$$\text{Rata-rata Error: } \frac{10.0+12.5+80.0+10.0+30.0}{5} = 28.5$$

Rata-rata error deteksi = 28,5 Hz.

Berdasarkan Tabel 4.xx, sistem Adaptive Digital Equalizer mampu mendeteksi frekuensi Feedback dengan error antara 10 Hz hingga 80 Hz dan rata-rata error sebesar 28,5 Hz. Error terkecil diperoleh pada pengujian pertama dan keempat, yaitu 10 Hz, sedangkan error terbesar terjadi pada frekuensi 2,58 kHz, yaitu 80 Hz. Meskipun demikian, besarnya error tersebut masih tergolong kecil jika dibandingkan dengan frekuensi yang dideteksi, sehingga filter parametrik tetap mampu mereduksi Feedback pada frekuensi yang tepat. Selain itu, waktu deteksi berada pada rentang 3–4 ms, menunjukkan bahwa sistem memiliki respons yang cepat dalam mengenali Feedback dan mengaktifkan filter secara real-time. Hasil ini menunjukkan bahwa algoritma deteksi yang diterapkan pada NodeMCU ESP32 memiliki akurasi yang baik dan cukup responsif untuk aplikasi reduksi Feedback audio secara real-time.

4.3. Penentuan Bandwidth Filter

Pada sistem Adaptive Digital Equalizer, bandwidth filter ditentukan secara otomatis

berdasarkan karakteristik frekuensi Feedback yang terdeteksi. Setelah sistem menemukan frekuensi dengan amplitudo tertinggi yang diindikasikan sebagai Feedback, sistem menganalisis lebar spektrum sinyal pada titik penurunan sebesar -3 dB di sisi kiri dan kanan frekuensi tersebut. Selisih antara kedua titik tersebut digunakan sebagai nilai bandwidth. Selanjutnya, bandwidth tersebut digunakan untuk menghitung nilai Q Factor, yaitu perbandingan antara frekuensi tengah dengan bandwidth. Selanjutnya nilai Q Factor dihitung menggunakan persamaan:

$$Q = \frac{BW}{fc}$$

dengan fc merupakan frekuensi tengah (center frequency) dan Bw adalah bandwidth hasil pengukuran. Nilai Q yang diperoleh kemudian digunakan sebagai parameter filter notch sehingga bandwidth filter akan menyesuaikan karakteristik Feedback yang sebenarnya. Feedback dengan spektrum yang sempit akan menghasilkan nilai Q yang besar (bandwidth sempit), sedangkan Feedback yang lebih lebar menghasilkan nilai Q yang lebih kecil (bandwidth lebih lebar).

4.4. Penanganan Feedback pada Area yang Sudah Pernah Mengalami Feedback

Apabila Feedback kembali muncul pada frekuensi yang telah mengalami peredaman sebelumnya, sistem tidak langsung membuat filter baru. Sistem terlebih dahulu membandingkan frekuensi Feedback yang baru dengan frekuensi tengah filter yang telah aktif. Jika frekuensi tersebut masih berada dalam rentang bandwidth filter yang sudah ada, maka sistem hanya meningkatkan tingkat peredaman dengan menurunkan nilai Gain secara bertahap hingga batas maksimum (-24 dB). Pendekatan ini bertujuan agar proses reduksi Feedback menjadi lebih efektif tanpa menambah jumlah filter yang aktif.

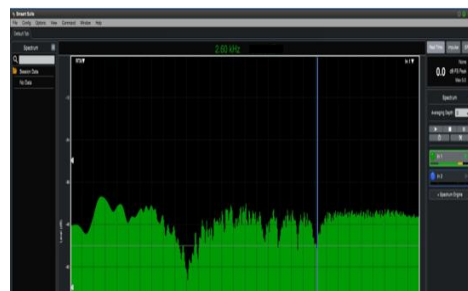
Sebaliknya, apabila Feedback muncul pada frekuensi yang berdekatan tetapi berada di luar rentang bandwidth filter yang telah ada, sistem akan memperlebar bandwidth filter dengan menurunkan nilai Q Factor. Dengan bandwidth yang lebih lebar, filter mampu mencakup frekuensi Feedback yang baru tanpa harus membentuk notch filter tambahan.

Mekanisme ini membuat sistem bekerja secara adaptif, mampu mengikuti perubahan posisi frekuensi Feedback, serta menjaga kualitas suara karena hanya frekuensi yang benar-benar mengalami Feedback yang mengalami peredaman.

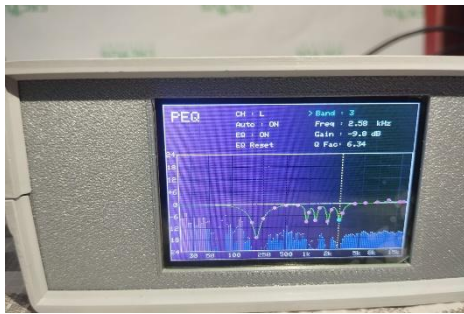
4.5. Perbandingan Hasil Adaptive Digital Equalizer dengan Pengukuran Menggunakan Smart Live

Setelah dilakukan pengujian terhadap kinerja Adaptive Digital Equalizer berbasis NodeMCU ESP32, diperlukan proses validasi untuk memastikan bahwa frekuensi Feedback yang dideteksi dan direduksi oleh sistem telah sesuai dengan kondisi sebenarnya. Validasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Smaart Live sebagai alat analisis spektrum audio (Real Time Analyzer) yang mampu menampilkan distribusi frekuensi dan perubahan level sinyal secara real-time.

Penggunaan Smaart Live bertujuan untuk memperoleh data pembandingan yang akurat terhadap hasil deteksi yang dilakukan oleh sistem. Selama proses pengujian, perubahan spektrum frekuensi diamati sebelum dan sesudah proses reduksi Feedback, kemudian hasil pengukuran tersebut dibandingkan dengan parameter yang ditampilkan pada antarmuka Adaptive Digital Equalizer, seperti frekuensi Feedback, nilai gain, dan karakteristik filter yang diterapkan. Melalui proses perbandingan ini dapat diketahui tingkat kesesuaian antara hasil deteksi sistem dengan hasil pengukuran menggunakan perangkat lunak referensi, sehingga akurasi pendeteksian frekuensi Feedback dan efektivitas filter equalizer dalam mereduksi Feedback audio secara otomatis dapat dievaluasi secara menyeluruh. Selain itu, hasil validasi ini juga digunakan untuk mengetahui apakah sistem mampu bekerja secara konsisten dan responsif dalam kondisi pengujian nyata.



Gambar 2: Equ Smart Live



Gambar 3: Equ Alat

Hasil pengujian menunjukkan bahwa frekuensi Feedback yang dideteksi oleh alat (2,58 kHz) hampir sama dengan hasil pengukuran menggunakan Smaart Live (2,60 kHz). Selisih yang sangat kecil tersebut membuktikan bahwa algoritma deteksi frekuensi pada sistem Adaptive Digital Equalizer memiliki tingkat akurasi yang baik. Selain itu, penerapan Gain -9 dB dengan Q Factor 6,34 mampu menghasilkan reduksi yang terlihat pada hasil pengukuran Smaart Live berupa penurunan energi pada frekuensi tersebut.

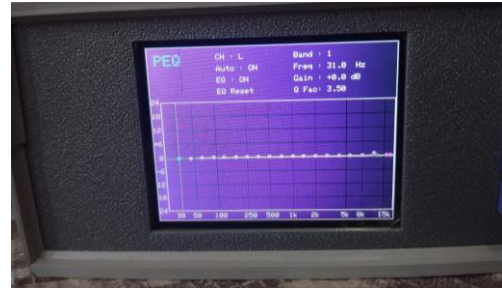
Dengan demikian, hasil pengujian membuktikan bahwa *Adaptive Digital Equalizer* berbasis ESP32 mampu mendeteksi dan mereduksi frekuensi Feedback secara otomatis dengan hasil yang konsisten terhadap pengukuran menggunakan perangkat lunak Smaart Live. Kesesuaian frekuensi yang dideteksi menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan telah bekerja sesuai dengan rancangan dan efektif dalam mengurangi gejala Feedback audio tanpa memberikan pengaruh yang signifikan terhadap frekuensi di sekitarnya.

4.6. Pengujian Sistem Sebelum dan Sesudah Terjadi Feedback

Pengujian ini bertujuan untuk mengamati respons Adaptive Digital Equalizer sebelum dan sesudah terjadi Feedback audio. Pengamatan dilakukan melalui tampilan antarmuka pada LCD alat yang menampilkan parameter frekuensi, nilai gain, serta karakteristik filter parametrik (PEQ). Pada kondisi awal sistem belum mendeteksi adanya Feedback sehingga tidak dilakukan proses peredaman. Selanjutnya, ketika Feedback sengaja dibangkitkan dengan mendekatkan mikrofon ke loudspeaker, sistem secara otomatis mendeteksi frekuensi penyebab

Feedback dan mengaktifkan filter notch untuk mereduksi amplitudo pada frekuensi tersebut

4.6.1. Kondisi Sebelum Terjadi Feedback



Gambar 4: Sebelum Terjadinya Feedback

Nilai Gain sebesar 0,0 dB menunjukkan bahwa sistem belum melakukan proses attenuasi (pemotongan) maupun penguatan sinyal pada frekuensi tertentu. Dengan kata lain, respons equalizer masih berada pada kondisi datar (*flat response*), sehingga seluruh spektrum audio dilewatkan tanpa perubahan amplitudo. Kurva PEQ pada layar juga terlihat datar tanpa adanya notch filter, menandakan bahwa algoritma deteksi belum menemukan frekuensi yang berpotensi menyebabkan Feedback.

4.6.2. Pengujian Alat



Gambar 5: Pengujian Alat

Proses pengujian Adaptive Digital Equalizer. sebuah mikrofon diarahkan dan didekatkan ke loudspeaker sebagai sumber terjadinya Feedback audio. Sinyal dari mikrofon diproses oleh sistem Adaptive Digital Equalizer yang berada di antara mikrofon dan loudspeaker. Ketika Feedback mulai muncul, sistem secara otomatis menganalisis spektrum frekuensi, mengidentifikasi frekuensi dominan penyebab Feedback, kemudian mengaktifkan filter notch pada frekuensi tersebut untuk menurunkan level sinyal. Dengan mekanisme ini, suara dengung (*howling*) dapat dikurangi tanpa memengaruhi kualitas audio secara keseluruhan.

4.6.3. Kondisi Setelah Terjadi Feedback

Gambar 6: Setelah Terjadinya Feedback



Mikrofon telah menangkap kembali suara dari loudspeaker sehingga terjadi Feedback audio Sistem kemudian mendeteksi frekuensi-frekuensi yang berpotensi menimbulkan Feedback dan menyimpannya ke dalam memori sebagai daftar frekuensi rawan Feedback. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel III

Tabel III
Hasil Pengujian Akurasi Deteksi Frekuensi Feedback

Uji ke-	Freq. (Hz)	Gain Sebelum (dBFS)	Gain Sesudah (dBFS)	Reduksi (dB)
1	205.1	0	-17.0	-17.0
2	937.5	0	-9.0	-9.0
3	2.58 k	0	-9.0	-9.0
4	1.79 k	0	-10.0	-10.0
5	1.23 k	0	-8.0	-8.0

Hasil pada Tabel III sebelum terjadi Feedback seluruh pengujian menunjukkan nilai Gain sebesar 0 dBFS, yang menandakan filter equalizer belum aktif. Setelah Feedback terdeteksi, sistem secara otomatis mengaktifkan *Parametric Equalizer* (PEQ) dengan memberikan Gain negatif pada frekuensi yang terdeteksi. Besar reduksi yang dihasilkan bervariasi antara -8 dB hingga -17 dB, dengan reduksi terbesar terjadi pada frekuensi 205,1 Hz sebesar -17 dB, sedangkan reduksi terkecil terjadi pada frekuensi 1,23 kHz sebesar -8 dB. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem mampu menyesuaikan besarnya reduksi secara adaptif sesuai dengan karakteristik Feedback pada setiap frekuensi, sehingga Feedback dapat diredam tanpa memengaruhi kualitas audio secara

keseluruhan. Jika dibandingkan, terdapat selisih frekuensi sebesar:

$$2,60 \text{ kHz} - 2,58 \text{ kHz} = 0,02 \text{ kHz} = 20 \text{ Hz}$$

Selisih 20 Hz tersebut sangat kecil atau hanya sekitar 0,77%, sehingga dapat dianggap masih berada dalam batas toleransi pengukuran.

Proses penurunan Gain berlangsung secara bertahap sebesar 1 dB per siklus evaluasi (Gain stepping) sebagaimana yang dirancang, sehingga tidak menimbulkan artefak audio berupa bunyi klik atau pop yang mengganggu. Koefisien filter diperbarui secara gradual selama 32 sampel menggunakan interpolasi linear, memastikan transisi yang halus antara kondisi sebelum dan sesudah filter aktif.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan *Adaptive Digital Equalizer* berbasis NodeMCU ESP32 yang mampu mendeteksi dan mereduksi Feedback audio secara otomatis dalam waktu nyata. Sistem memanfaatkan analisis spektrum frekuensi untuk mengidentifikasi frekuensi penyebab Feedback, kemudian menerapkan parametric notch filter dengan penyesuaian adaptif terhadap parameter frekuensi tengah, gain, dan bandwidth. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki rata-rata error deteksi sebesar 28,5 Hz dengan waktu deteksi 3–4 ms, sehingga mampu memberikan respons yang cepat terhadap munculnya Feedback. Reduksi Gain yang diterapkan secara otomatis berada pada rentang 8–17 dB, sesuai dengan karakteristik Feedback yang terdeteksi. Hasil validasi menggunakan Smart Live menunjukkan kesesuaian frekuensi deteksi dengan selisih hanya 20 Hz (0,77%), sehingga membuktikan bahwa sistem memiliki akurasi yang baik. Dengan demikian, Adaptive Digital Equalizer yang dikembangkan efektif dalam mengurangi Feedback audio secara real-time serta mampu mempertahankan kualitas suara pada frekuensi lain yang tidak mengalami gangguan.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muria Kudus, yang telah memberikan fasilitas laboratorium dan dukungan teknis selama pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada rekan-rekan sejawat yang telah memberikan masukan konstruktif dalam proses pengujian dan penulisan artikel ini. Penelitian ini dilaksanakan secara mandiri tanpa dukungan dana dari lembaga eksternal.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Tur, Arfittariah, Nur Imansyah, Abadi Nugroho, Rachmah Agus Putri, and Sulaiman, "PENERAPAN DLMS DAN EQUALIZER PADA AUDIO SOUND SYSTEMMASJID UNTUK MENINGKATKAN KUALITAS IBADAH JEMAAH MASJID BAITUL MUTTAQIN PISANGAN BONTANG," *Jurnal Pengabdian Indonesia (JPI)*, vol. 2, no. 1, pp. 48–55, Jan. 2026, doi: 10.62567/jpi.v2i1.1386.
- [2] M. Gazali, R. S. Alfita, and K. Aji Wibisono, "PENGEMBANGAN AUTOMATIC MIXING AUDIO SEBAGAI PEREDUKSI NOISE BERBASIS ARDUINO UNO," 2023.
- [3] J. Agnew, "Acoustic Feedback and other audible artifacts in hearing aids," *Trends Amplif.*, vol. 1, no. 2, pp. 45–82, 1996.
- [4] J. Loviscach, "Graphical Control of a Parametric Equalizer," 2024. [Online]. Available: www.aes.org.
- [5] T. Corbach, A. Von Dem Knesebeck, K. Dempwolf, M. Holters, P. Sorowka, and U. Zölzer, "AUTOMATED EQUALIZATION FOR ROOM RESONANCE SUPPRESSION," 2020.
- [6] Guo, *Aalborg Universitet Analysis, Design, and Evaluation of Acoustic Feedback Cancellation Systems for Hearing Aids-A Novel Approach to Unbiased Feedback Cancellation*. 2021.
- [7] K. Kasanang, "Optimalisasi Estetika Audio-Visual dalam Live Streaming Musik Gereja: Panduan Komprehensif Desain Sound Systemdan Multimedia untuk Pengalaman Audiens yang Imersif," *Copyright @ Kilat Kasanang INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research*, vol. 5, pp. 10809–10821, 2025.
- [8] S. Kim, G. Wakefield, and J. Nam, "Augmenting environmental interaction in audio Feedback systems," *Applied Sciences*, vol. 6, no. 5, 2024, doi: 10.3390/app6050125.
- [9] F. Ahmad, A. Margiantono, and S. Pinandita, "Pelatihan Instalasi dan Troubleshooting Sistem Audio untuk Pengurus Mushola Aljabbar Desa Tawangrejo Winong Kabupaten Pati," *Jurnal Pengabdian KOLABORATIF*, vol. 4, no. 1, pp. 33–43, 2026, doi: 10.26623/kolaboratif.v4i1.13262.
- [10] J. Agnew, "Acoustic Feedback and other audible artifacts in hearing aids," *Trends Amplif.*, vol. 1, no. 2, pp. 45–82, 2022.
- [11] R. Alamsyah, E. Ryansyah, A. Y. Permana, and R. Mufidah, "SISTEM PENYIRAMAN TANAMAN OTOMATIS MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY DENGAN TEKNOLOGI INTERNET OF THINGS BERBASIS ESP8266 DAN APLIKASI BLYNK," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 2, Apr. 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i2.4007.
- [12] S. Xu, "A high speed 8-tap digital adaptive equalizer design xlt," 2023.
- [13] L. T. T. Tran and S. E. Nordholm, "A switched algorithm for adaptive Feedback cancellation using pre-filters in hearing aids," *Audiol. Res.*, vol. 11, no. 3, pp. 389–409, Sep. 2021, doi: 10.3390/audiolres11030037.
- [14] V. Välimäki and J. D. Reiss, "All about audio equalization: Solutions and frontiers," 2023, *Balkan Society of Geometers*. doi: 10.3390/app6050129.
- [15] H. Wang, H. Sun, Y. Sun, M. Wu, and J. Yang, "A narrowband active noise control systemwith a frequency estimation algorithm based on parallel adaptive notch filter," *Signal Processing*, vol. 154, pp. 108–119, 2019.