

METODE DETEKSI KARAKTERISTIK FEEDBACK AKUSTIK BERBASIS ANALISIS POLA SPEKTRUM PADA AUDIO SPECTRUM ANALYZER BERBASIS ESP32

Vino Majid^{1*}, Budi Cahyo Wibowo²

^{1,2}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muria Kudus, Kudus, Indonesia

Keywords:

Feedback akustik;
Analisis spektrum;
ESP32;
Deteksi howling;
Sound system.

Correspondent Email:

vinomajid29@gmail.com

Abstrak. Feedback akustik merupakan masalah umum pada sistem penguatan suara (sound reinforcement), khususnya pada aplikasi outdoor dan sound system rental yang berpindah lokasi dengan kondisi akustik ruang yang berbeda-beda. Metode deteksi feedback konvensional seperti Adaptive Notch Filter (ANF) dan pendekatan deep learning umumnya membutuhkan komputasi tinggi sehingga sulit diimplementasikan pada mikrokontroler berdaya rendah. Penelitian ini mengusulkan metode deteksi karakteristik feedback akustik berbasis analisis pola spektrum yang ringan secara komputasi, dengan memanfaatkan tiga karakteristik utama sinyal feedback: (1) kecepatan kenaikan level sinyal pada suatu pita frekuensi, (2) durasi sinyal bertahan pada level puncak, dan (3) dominansi puncak pada satu frekuensi tertentu. Meskipun sistem yang dikembangkan secara keseluruhan mengimplementasikan mekanisme auto feedback suppression (deteksi dan peredaman otomatis), penelitian ini secara khusus difokuskan pada perancangan dan evaluasi metode deteksinya. Sistem diimplementasikan pada ESP32-S3 dengan arsitektur dual-core, Core 0 menangani akuisisi sinyal I2S dari ADC PCM1808, sementara Core 1 menjalankan analisis spektrum 120-band (1/12 oktaf), deteksi feedback, dan visualisasi pada TFT LCD. Pengujian tahap ini dilakukan pada skala bangku (bench test) untuk memvalidasi performa metode deteksi, sebagai tahap awal sebelum pengujian lapangan bersama mitra AUDI Sound System, Jepara, pada kondisi outdoor riil. Metode ini diharapkan mampu memberikan deteksi feedback yang cepat dan akurat tanpa membebani sumber daya komputasi mikrokontroler.



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. Acoustic feedback is a common problem in sound reinforcement systems, particularly in outdoor and rental sound system applications operating in varying room-acoustic conditions. Conventional detection methods such as Adaptive Notch Filters (ANF) and deep-learning approaches typically require high computational load, making them difficult to implement on low-power microcontrollers. This research proposes a computationally lightweight acoustic-feedback detection method based on spectral pattern analysis, exploiting three main signal characteristics: (1) the rate of level rise at a given frequency band, (2) the duration a signal remains at its peak level, and (3) the dominance of the peak at a single frequency. Although the overall system implements an automatic feedback suppression mechanism (detection and automatic attenuation), this research specifically focuses on the design and evaluation of the detection method. The system is implemented on an ESP32-S3 with a dual-core architecture, where Core 0 handles I2S signal acquisition from a PCM1808 ADC, while Core 1 performs 120-band (1/12 octave) spectrum analysis, feedback detection, and TFT LCD visualization. Testing at this stage was conducted as a bench test to validate the performance of the detection method, as a preliminary stage before field testing in

collaboration with industry partner AUDI Sound System, Jepara, under real outdoor conditions. This method is expected to provide fast and accurate feedback detection without overloading the microcontroller's computational resources.

1. PENDAHULUAN

Feedback akustik (howling) merupakan salah satu permasalahan klasik namun tetap krusial pada sistem penguatan suara (sound reinforcement), terutama pada aplikasi outdoor dan sound system rental yang berpindah lokasi dengan kondisi akustik ruang yang selalu berbeda. Ketika gain sistem melebihi margin kestabilan loop akustik antara mikrofon dan speaker, osilasi feedback muncul secara tiba-tiba dan dapat mengganggu kenyamanan pendengar maupun merusak peralatan. Permasalahan ini menjadi tantangan operasional nyata bagi mitra industri AUDI Sound System, Jepara, yang secara rutin menghadapi kondisi lapangan dengan variasi jarak mikrofon-speaker dan tata panggung yang tidak selalu ideal.

Berbagai pendekatan telah diusulkan untuk menekan feedback akustik, mulai dari Adaptive Notch Filter (ANF) berbasis pelacakan frekuensi dominan [1], perbandingan kriteria deteksi howling pada sistem berbasis notch filter [2], hingga pendekatan pembelajaran mendalam (deep learning) multichannel yang menjanjikan akurasi tinggi pada kondisi kompleks [3]. Tinjauan komprehensif oleh van Waterschoot dan Moonen [4] merangkum lima dekade perkembangan riset acoustic feedback control dan menyoroti bahwa keseimbangan antara akurasi deteksi dan beban komputasi masih menjadi tantangan terbuka, khususnya untuk implementasi pada perangkat keras berdaya rendah. Pendekatan berbasis sparsity measure [5] serta teori dasar pemrosesan sinyal ucapan [6] turut memberikan dasar penting terkait karakteristik spektral sinyal howling.

Namun demikian, metode-metode tersebut umumnya dirancang untuk platform komputasi menengah-tinggi, sehingga sulit diimplementasikan secara langsung pada mikrokontroler kelas rendah biaya seperti ESP32 tanpa modifikasi signifikan. Model berbasis deep learning [3] misalnya, membutuhkan sumber daya komputasi dan memori yang jauh melampaui kapasitas ESP32, sementara metode ANF konvensional [1], [2]

memerlukan adaptasi filter yang cukup intensif secara komputasi apabila diterapkan pada banyak pita frekuensi secara simultan. Kesenjangan (gap) inilah yang mendasari penelitian ini: dibutuhkan metode deteksi feedback akustik yang ringan secara komputasi namun tetap mampu membedakan feedback dari sinyal musik/vokal yang kompleks, sehingga dapat dijalankan secara real-time pada mikrokontroler ESP32-S3 tanpa mengorbankan proses audio real-time lain (equalizer, RMS, dan sebagainya).

Penelitian ini mengusulkan metode deteksi karakteristik feedback akustik berbasis analisis pola spektrum, yang memanfaatkan tiga karakteristik: (1) kecepatan kenaikan level sinyal pada suatu pita frekuensi, (2) durasi sinyal bertahan pada level puncak, dan (3) dominansi puncak pada satu frekuensi tertentu. Tujuan penelitian ini adalah merancang dan mengimplementasikan algoritma deteksi tersebut pada sistem audio spectrum analyzer berbasis ESP32-S3, serta mengevaluasi performanya melalui pengujian skala bangku (bench test) sebagai tahap awal sebelum pengujian lapangan bersama mitra AUDI Sound System pada kondisi outdoor riil. Perlu ditegaskan bahwa sistem yang dikembangkan secara keseluruhan mengimplementasikan mekanisme auto feedback suppression, yaitu deteksi feedback yang diikuti peredaman otomatis melalui notch filter adaptif; namun demikian, kontribusi dan pembahasan pada artikel ini dibatasi secara khusus pada perancangan dan evaluasi metode deteksinya, sementara mekanisme peredaman hanya dibahas secara garis besar sebagai bagian pendukung.

2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Feedback Akustik dan Metode Deteksinya

Feedback akustik terjadi ketika loop tertutup antara mikrofon dan speaker mencapai gain total di atas 0 dB pada frekuensi tertentu, menghasilkan osilasi berkelanjutan [4]. Metode klasik penekanannya mencakup Adaptive

Notch Filter (ANF) yang secara adaptif melacak dan meredam frekuensi dominan feedback [1], serta model-based postfilter yang menekan sisa feedback pasca-kanselasi [7]. Studi [2] membandingkan berbagai kriteria deteksi howling pada sistem berbasis notch filter dan menemukan bahwa kombinasi beberapa indikator (level, durasi, dan lebar pita) memberikan hasil deteksi yang lebih andal dibanding indikator tunggal, prinsip yang mendasari penggabungan tiga karakteristik pada penelitian ini. Karakteristik durasi sinyal pada level puncak juga ditegaskan sebagai indikator penting pada detektor howling temporal untuk sistem penguatan suara [8]. Pendekatan lain memanfaatkan ukuran sparsity sinyal untuk deteksi dini howling [5], sementara arsitektur deep learning multichannel [3] menunjukkan potensi akurasi tinggi namun dengan kebutuhan komputasi yang besar.

B. Analisis Spektrum Berbasis FFT

Analisis spektrum sinyal audio umumnya menggunakan Fast Fourier Transform (FFT) untuk mengubah representasi sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi [9]. Pembagian pita frekuensi logaritmik (oktaf atau pecahannya, misalnya 1/12 oktaf) lazim digunakan pada spectrum analyzer profesional agar resolusi tampilan sesuai dengan persepsi pendengaran manusia yang juga bersifat logaritmik [10]. Prinsip pemrosesan sinyal digital dasar, termasuk windowing dan estimasi magnitudo spektral, mengacu pada teori pemrosesan sinyal digital standar [11], [12]. Penerapan FFT pada mikrokontroler untuk ekstraksi spektrum dan klasifikasi kondisi berbasis ambang telah ditunjukkan pada domain non-akustik, misalnya deteksi kerusakan pompa sentrifugal berbasis spektrum getaran [13], yang menegaskan kelayakan pendekatan FFT-plus-threshold pada perangkat embedded berdaya rendah.

C. ESP32 sebagai Platform Embedded DSP

ESP32 dan varian ESP32-S3 merupakan mikrokontroler dual-core dengan kemampuan pemrosesan sinyal yang memadai untuk aplikasi akuisisi data dan DSP ringan [14], [15]. Penelitian terdahulu telah menunjukkan implementasi spectrum analyzer audio real-time berbasis ESP32 dengan pemrosesan terdistribusi antar-core dan visualisasi web [16],

yang menjadi salah satu acuan arsitektur dual-core pada penelitian ini.

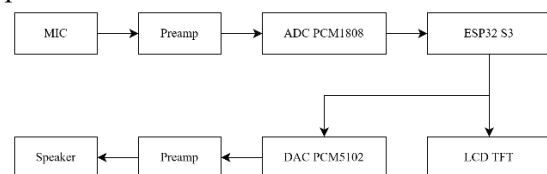
D. Posisi Penelitian

Berdasarkan tinjauan di atas, posisi penelitian ini dapat dipetakan terhadap studi-studi terdahulu sebagai berikut. Studi [16] telah membangun spectrum analyzer audio real-time berbasis ESP32, namun belum menyertakan fungsi deteksi feedback; sebaliknya, metode-metode deteksi howling yang mapan [2], [5], [8] dikembangkan dan dievaluasi pada platform komputasi menengah-tinggi, bukan pada mikrokontroler. Sementara itu, kelayakan pendekatan FFT-plus-threshold pada perangkat embedded berdaya rendah baru ditunjukkan pada domain non-akustik [13]. Dengan demikian, kebaruan penelitian ini terletak pada pertemuan ketiganya: implementasi metode deteksi feedback akustik multi-kriteria yang ringan secara komputasi dan berjalan secara real-time pada audio spectrum analyzer berbasis ESP32-S3, mengisi celah yang belum ditangani oleh studi-studi terdahulu tersebut.

3. METODE PENELITIAN

A. Arsitektur Sistem

Sistem terdiri atas rantai sinyal: mikrofon, preamp, ADC PCM1808, ESP32-S3, DAC PCM5102, preamp keluaran, dengan visualisasi pada TFT LCD ILI9341.



Gambar 3. 1 Diagram Blok Sistem

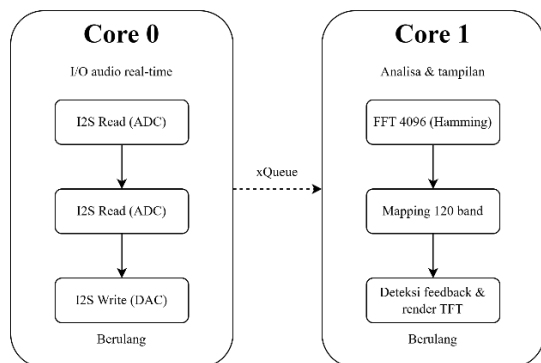


Gambar 3. 2 Implementasi Sistem

B. Implementasi Perangkat Lunak - Arsitektur Dual-Core

Pemrosesan dibagi pada dua core ESP32-S3 menggunakan FreeRTOS. Core 0 menangani I/O audio real-time melalui I2S (pembacaan

ADC dan penulisan DAC) dengan buffer 128 sampel pada sample rate 48 kHz, menjaga latensi rendah tanpa gangguan dari proses analisis. Core 1 menjalankan analisis spektrum FFT 4096-titik (window Hamming), pemetaan ke 120 band dengan spasi 1/12 oktaf (rasio antar-band 1,05946), algoritma deteksi feedback, serta rendering tampilan RTA dan kurva EQ pada TFT. Pemisahan ini menjaga jalur audio bebas dari beban komputasi analisis, sekaligus memungkinkan deteksi feedback berjalan tanpa mengganggu output suara.



Gambar 3. 3 Diagram alir task Core 0 / Core 1

C. Algoritma Deteksi Karakteristik Feedback Akustik

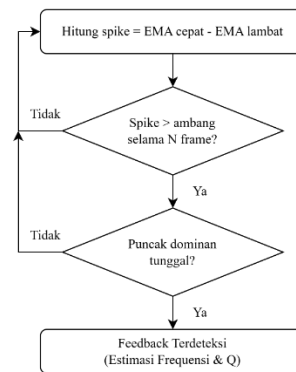
Deteksi feedback diusulkan berdasarkan tiga karakteristik spektral yang diamati pada setiap band frekuensi. Pertama, kecepatan kenaikan level sinyal: setiap band memiliki dua estimasi rata-rata bergerak eksponensial (Exponential Moving Average, EMA), yaitu EMA cepat (koefisien FB_ALPHA_FAST) dan EMA lambat (koefisien FB_ALPHA_SLOW). Selisih keduanya (disebut spike) merepresentasikan laju kenaikan level relatif terhadap tren jangka panjang, tanpa memerlukan komputasi turunan atau FFT tambahan.

Kedua, durasi sinyal bertahan pada level puncak: sebuah band dinyatakan sebagai kandidat feedback hanya jika nilai spike melampaui ambang $FB_THRESHOLD_DB$ secara konsisten selama sejumlah minimal frame (FB_HOLD_FRAMES), dihitung menggunakan pewaktuan berbasis fungsi `millis()` agar tidak bergantung pada laju pemanggilan fungsi deteksi.

Ketiga, dominansi puncak pada satu frekuensi: kandidat dengan spike tertinggi diverifikasi lebih lanjut melalui analisis

berbasis lembah (valley-based prominence). Band lain dianggap sebagai puncak terpisah hanya jika dipisahkan oleh penurunan level minimal $PEAK_VALLEY_DROP_DB$ dan memiliki level yang sepadan (dalam $DOMINANCE_MARGIN_DB$) terhadap puncak utama. Jika jumlah puncak saingan (rival) melebihi toleransi ($RIVAL_TOLERANCE$), sinyal dianggap bukan feedback, melainkan kemungkinan musik atau vokal multi-nada, sehingga meminimalkan false positive.

Feedback dinyatakan terdeteksi hanya jika ketiga kriteria di atas terpenuhi secara bersamaan melalui logika AND.



Gambar 3. 4 Flowchart algoritma deteksi feedback

Tabel 3. 1 Parameter deteksi feedback

Parameter	Nilai Awal	Nilai Hasil	Satuan
$FB_THRESHOLD_DB$	5	10	dB
FB_HOLD_FRAMES	5	4	-
FB_ALPHA_SLOW	0,008	0,008	-
FB_ALPHA_FAST	0,2	0,2	-
$DOMINANCE_MARGIN_DB$	6	10	dB
$PEAK_VALLEY_DROP_DB$	6	2	dB
$RIVAL_TOLERANCE$	1	1	-

D. Mitigasi Feedback

Setelah feedback terkonfirmasi, frekuensi puncak dan estimasi faktor Q dihitung untuk diteruskan ke mekanisme peredaman otomatis berbasis notch filter adaptif sebagai bagian dari sistem yang lebih luas. Perancangan dan evaluasi mekanisme peredaman tersebut berada di luar cakupan pembahasan artikel ini, yang

secara khusus difokuskan pada metode deteksinya.

E. Pengujian

Pengujian sistem pada tahap ini dilakukan pada skala bangku (bench test) untuk memvalidasi karakteristik dan performa algoritma deteksi; pengujian lapangan bersama mitra AUDI Sound System, Jepara, pada kondisi outdoor riil direncanakan sebagai tahap berikutnya guna mengevaluasi performa deteksi pada lingkungan akustik yang bervariasi (perbedaan jarak mikrofon-speaker, tingkat kebisingan latar, dan konfigurasi panggung). Pengujian mencakup: (1) kemampuan sistem mendeteksi feedback secara dini sebelum terdengar oleh operator atau penonton; (2) tingkat kesalahan deteksi (false positive) terhadap sinyal musik/vokal ber-nada banyak; dan (3) waktu respons dari kemunculan gejala feedback hingga notch filter aktif meredam.



Gambar 3. 5 Dokumentasi Setup

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Validasi Akurasi Pembacaan Frekuensi

Untuk memvalidasi keandalan instrumen pengukuran sebelum digunakan pada pengujian selanjutnya, dilakukan uji akurasi pembacaan frekuensi menggunakan signal generator pada 10 titik frekuensi yang tersebar logaritmik dari 31 Hz hingga 16 kHz, disambungkan langsung ke input sistem tanpa mikrofon dan speaker. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil uji akurasi pembacaan frekuensi menggunakan signal generator

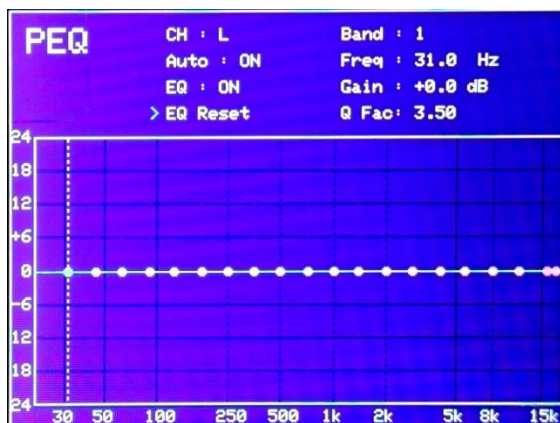
Frekuensi Input (Hz)	Frekuensi Terbaca (Hz)	Selisih (Hz)	Error (%)
31	35	4	12,90%
62	64	2	3,23%
125	128	3	2,40%

250	263	13	5,20%
500	503	3	0,60%
1.000	996	-4	0,40%
2.000	2.000	0	0,00%
4.000	4.000	0	0,00%
8.000	8.060	60	0,75%
16.000	16.200	200	1,25%

Rata-rata error pembacaan frekuensi adalah 2,67%, namun distribusinya tidak merata: error jauh lebih besar pada frekuensi rendah (12,90% pada 31 Hz) dibanding frekuensi menengah (kurang dari 1% pada rentang 500 Hz-4 kHz). Hal ini disebabkan oleh resolusi FFT sistem yang tetap secara absolut (kurang lebih 11,7 Hz, dihitung dari sample rate 48 kHz dibagi ukuran FFT 4096 titik), sementara lebar pita 1/12 oktaf pada frekuensi rendah jauh lebih sempit dari resolusi tersebut (misalnya hanya sekitar 1,8 Hz pada 31 Hz), sehingga beberapa pita logis tidak dapat dibedakan oleh satu bin FFT yang sama. Pada frekuensi di atas sekitar 200 Hz, lebar pita 1/12 oktaf telah melampaui resolusi bin FFT, sehingga akurasi pembacaan meningkat signifikan. Sedikit peningkatan error pada 16 kHz (1,25%) kemungkinan terkait karakteristik roll-off filter anti-aliasing mendekati frekuensi Nyquist. Secara keseluruhan, akurasi pembacaan sistem berada pada tingkat yang memadai untuk mendukung keandalan data deteksi feedback pada pengujian selanjutnya, khususnya karena mayoritas kejadian feedback pada pengujian ini terdeteksi di rentang frekuensi menengah-tinggi (di atas 150 Hz) yang justru memiliki akurasi terbaik.

B. Karakteristik Umum Pola Spektrum pada Berbagai Kondisi Sinyal

Sebelum masuk ke hasil pengujian kuantitatif, diamati terlebih dahulu bentuk umum pola spektrum pada beberapa kondisi sinyal untuk memberikan gambaran visual atas tiga karakteristik yang mendasari algoritma deteksi.



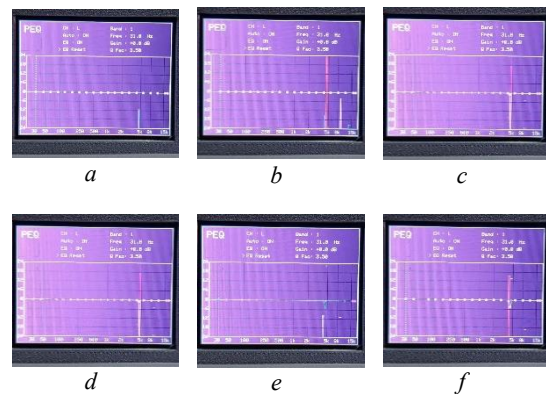
Gambar 4. 1 Spectrum Analyzer Kondisi Diam

Pada kondisi diam (mikrofon aktif tanpa sumber suara), spektrum menunjukkan garis datar pada seluruh rentang frekuensi, merepresentasikan noise floor sistem tanpa adanya puncak signifikan.



Gambar 4. 2 Kondisi Spectrum Analyzer Diputar Musik

Pada kondisi musik diputar secara normal, energi tersebar pada banyak band sekaligus di beberapa area frekuensi (sekitar 50-100 Hz, 250 Hz-2 kHz, dan 5-10 kHz), dengan beberapa puncak berdekatan yang tingginya bervariasi namun tidak ada satu puncak yang menonjol ekstrem sendirian dibanding puncak-puncak di sekitarnya.



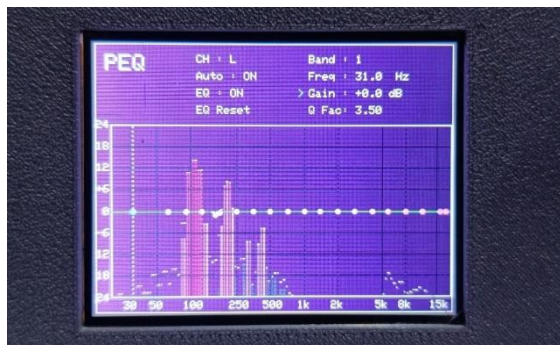
Gambar 4. 3 Rangkaian 6 Foto Progresi Kemunculan Feedback

Progresi kemunculan feedback dari waktu ke waktu turut diamati pada satu rangkaian kejadian. Feedback mulai muncul sebagai satu puncak kecil pada sekitar 5 kHz, yang kemudian tumbuh dengan cepat menjadi puncak tunggal yang tajam dan tinggi, jauh terisolasi dari band-band di sekitarnya yang tetap berada pada level dasar. Pola pertumbuhan inilah yang menjadi dasar dua dari tiga karakteristik yang digunakan algoritma deteksi: kecepatan kenaikan level pada satu band tertentu, serta terbentuknya satu puncak yang dominan dan terisolasi dari band tetangganya.

Setelah sistem merespons kemunculan feedback tersebut, teramati bahwa feedback baru muncul kembali pada frekuensi yang berdekatan dengan frekuensi feedback sebelumnya. Kejadian ini menunjukkan bahwa algoritma deteksi mampu mengenali kemunculan puncak dominan baru secara independen, meskipun berada berdekatan dengan frekuensi yang sebelumnya sudah tertangani, karena kriteria deteksi bekerja berdasarkan analisis pola pada tiap band secara individual.

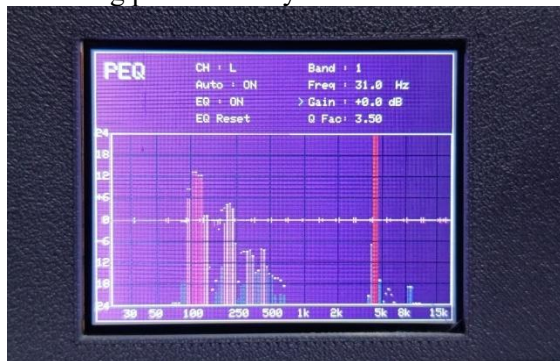
C. Diskriminasi Pola Spektrum: Vokal Normal vs Feedback

Untuk memvalidasi kriteria dominansi puncak tunggal pada algoritma deteksi, dibandingkan tampilan spektrum saat vokal dinyanyikan tanpa feedback dan saat feedback muncul bersamaan dengan vokal.



Gambar 4. 4 Spektrum Vokal Tanpa Feedback

Pada kondisi tanpa feedback, spektrum menampilkan pola khas sinyal vokal: energi terdistribusi pada beberapa puncak formant di rentang frekuensi rendah-menengah (sekitar 90-250 Hz) dengan level yang bervariasi, tanpa ada satu puncak yang secara ekstrem mendominasi dibanding puncak lainnya.



Gambar 4. 5 Spektrum Vokal Dengan Feedback

Pada kondisi dengan feedback, pola energi pada rentang formant vokal tetap tampak serupa, namun muncul satu puncak tunggal yang tajam dan dominan di sekitar 5 kHz, dengan level yang jauh melampaui seluruh puncak vokal di sekitarnya.

Perbandingan ini secara visual mengonfirmasi prinsip kriteria ketiga pada algoritma deteksi: sinyal vokal normal, meski mengandung banyak komponen frekuensi, tidak menghasilkan satu puncak yang menonjol ekstrem dari puncak di sekitarnya, sedangkan feedback menghasilkan puncak tunggal yang jelas terisolasi dan jauh lebih tinggi. Karakteristik pembeda inilah yang memungkinkan sistem menghindari kesalahan deteksi pada sinyal vokal kompleks.

D. Hasil Pengujian Deteksi Berdasarkan Jarak Mic-Speaker

Pengujian dilakukan pada skala bangku (bench test) dengan menghadapkan mikrofon langsung ke speaker pada beberapa jarak (130 cm, 100 cm, 60 cm, dan 30 cm) pada gain tetap 0 dB, sambil merekam log deteksi sistem. Ringkasan frekuensi dan kekuatan feedback yang berhasil terdeteksi ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Frekuensi dan kekuatan feedback yang terdeteksi pada berbagai jarak mic-speaker (Gain 0 dB)

Jarak	Frekuensi Terdeteksi (Hz)	Spike (dB)
130 cm	175,8	5,2
100 cm	4289,1 / 4089,8	24,5 / 5,5
100 cm	210,9	6,4
60 cm	3820,3 / 3796,9	29,9
60 cm	11543,0	25,5
30 cm	4312,5	31,9
30 cm	12222,7	42,9 (tertinggi)
30 cm	9609,4 / 9665,3	11,8 / 14,2

Data menunjukkan korelasi yang jelas antara jarak mic-speaker dan kekuatan feedback yang terdeteksi: spike level meningkat dari 5,2 dB pada jarak 130 cm menjadi 42,9 dB pada jarak 30 cm. Hal ini konsisten dengan teori bahwa loop gain akustik antara mikrofon dan speaker membesar seiring mengecilnya jarak, sehingga osilasi feedback tumbuh lebih cepat dan lebih kuat, dan algoritma berhasil mendeteksinya secara konsisten pada seluruh rentang kekuatan tersebut, dari yang sangat lemah (5,2 dB) hingga sangat kuat (42,9 dB).

Pada jarak yang lebih dekat (60 cm dan 30 cm), sistem juga mampu mendeteksi lebih dari satu frekuensi feedback secara simultan dan independen, misalnya kombinasi sekitar 3,8 kHz dan 11,5 kHz pada jarak 60 cm, serta tiga frekuensi berbeda (sekitar 4,3 kHz, 12,2 kHz, dan 9,6 kHz) pada jarak 30 cm. Ini menunjukkan bahwa algoritma deteksi bekerja secara independen per band frekuensi, sehingga mampu mengenali beberapa kejadian feedback yang muncul bersamaan pada frekuensi berbeda.

E. Pengaruh Reduksi Gain terhadap Kemunculan Feedback

Untuk menguji sensitivitas sistem terhadap margin gain akustik, pengujian pada jarak 100 cm, 60 cm, dan 30 cm diulang dengan gain

diturunkan sebesar 5 dB. Hasilnya ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil deteksi dengan reduksi gain - 5 dB

Jarak	Gain	Hasil
100 cm	-5 dB	Bersih, tidak ada feedback terdeteksi
60 cm	-5 dB	Bersih, tidak ada feedback terdeteksi
30 cm	-5 dB	Feedback tetap terdeteksi di 4,0-4,3 kHz (spike hingga 27,3 dB)

Reduksi gain sebesar 5 dB terbukti cukup untuk mencegah feedback terdeteksi pada jarak 100 cm dan 60 cm, yang sebelumnya memicu deteksi signifikan pada gain 0 dB. Namun pada jarak yang sangat dekat (30 cm), feedback tetap muncul dan terdeteksi dengan spike yang masih tinggi (27,3 dB), menunjukkan bahwa algoritma deteksi tetap bekerja konsisten mendeteksi feedback bahkan ketika margin gain akustik sudah diperkecil, selama loop gain akustik pada jarak tersebut masih melampaui ambang kestabilan.

F. Waktu Respons Deteksi

Waktu respons deteksi diukur dari rekaman video pengujian (30 fps, resolusi antar-frame kurang lebih 33,3 ms), dengan mencatat saat feedback mulai muncul hingga saat sistem menandai feedback terdeteksi. Hasil dari lima kali percobaan ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Waktu respons deteksi feedback (5 percobaan, dari rekaman video 30 fps)

Percobaan	Feedback Muncul (s)	Terdeteksi (s)	Waktu Respons
1	59,400	60,000	600 ms
2	9,667	10,000	333 ms
3	14,667	15,167	500 ms
4	59,667	60,333	667 ms
5	60,000	60,667	667 ms

Rata-rata waktu respons dari lima percobaan adalah sekitar 553 ms, dengan rentang 333-667 ms. Perlu dicatat bahwa pengukuran ini memiliki presisi setingkat frame video dan turut mencakup jeda antara kemunculan feedback secara akustik dengan kemunculannya pada layar RTA, sehingga angka ini merupakan estimasi batas atas (upper bound) dari waktu respons algoritma deteksi itu sendiri. Pengukuran yang lebih presisi memerlukan pencatatan log bertimestamp langsung dari firmware.

G. Catatan dan Keterbatasan Pengujian

Pengujian pada bagian ini masih berupa uji skala bangku (bench test) untuk memvalidasi karakteristik dan performa algoritma deteksi secara fungsional. Beberapa hal masih perlu dilengkapi untuk evaluasi yang lebih menyeluruh, yaitu: (1) hasil uji false positive secara kuantitatif menggunakan berbagai jenis sinyal musik dan vokal (jumlah percobaan dan tingkat kesalahan deteksi), melengkapi perbandingan pola spektrum kualitatif yang telah ditampilkan pada bagian C; (2) replikasi pengujian pada kondisi lapangan riil bersama mitra AUDI Sound System untuk mengevaluasi performa pada variasi akustik venue outdoor yang lebih kompleks; serta (3) pengukuran waktu respons berbasis log timestamp langsung dari firmware untuk validasi yang lebih presisi dibanding metode berbasis rekaman video yang digunakan pada bagian F.

5. KESIMPULAN

- Penelitian ini berhasil merancang metode deteksi feedback akustik berbasis tiga karakteristik pola spektrum, yaitu kecepatan kenaikan level, durasi bertahan di puncak, dan dominansi puncak tunggal, yang ringan secara komputasi dan dapat dijalankan secara real-time pada ESP32-S3.
- Pengujian menunjukkan algoritma mampu mendeteksi feedback secara konsisten pada rentang kekuatan sinyal yang luas (spike 5,2-42,9 dB) dan pada berbagai jarak mic-speaker, termasuk mendeteksi beberapa frekuensi feedback yang muncul bersamaan secara independen. Perbandingan pola spektrum secara visual antara sinyal vokal/musik normal dan sinyal feedback mengonfirmasi validitas kriteria dominansi puncak tunggal sebagai pembeda utama. Akurasi pembacaan frekuensi sistem tergolong baik pada rentang menengah-tinggi (di atas 200 Hz, error kurang dari 1%), yang merupakan rentang tempat mayoritas kejadian feedback pada pengujian ini terdeteksi. Waktu respons rata-rata terukur sekitar 553 ms.
- Keterbatasan penelitian ini meliputi: akurasi pembacaan frekuensi yang menurun pada rentang frekuensi rendah (di bawah kurang lebih 200 Hz) akibat resolusi FFT yang tetap secara absolut, pengujian yang masih berskala bangku (bench test) dan belum dilakukan di lapangan riil, uji

false positive yang masih bersifat kualitatif (perbandingan pola spektrum) dan belum diukur secara kuantitatif dengan berbagai sampel musik/vokal, serta pengukuran waktu respons yang masih berbasis rekaman video, bukan log timestamp presisi dari firmware.

- d. Pengembangan lanjutan disarankan mencakup: pengujian lapangan bersama mitra AUDI Sound System pada kondisi outdoor riil, pengujian false positive kuantitatif dengan variasi sampel musik dan vokal yang lebih luas, peningkatan resolusi analisis pada frekuensi rendah, serta implementasi pencatatan log bertimestamp langsung dari firmware untuk pengukuran waktu respons yang lebih presisi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada AUDI Sound System, Jepara, atas kerja sama dan dukungan data lapangan selama proses pengujian sistem, serta kepada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muria Kudus atas dukungan fasilitas penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Gil-Cacho, T. Van Waterschoot, M. Moonen, and S. H. Jensen, "Regularized adaptive notch filters for acoustic howling suppression," *European Signal Processing Conference*, pp. 2574–2578, 2009.
- [2] T. Van Waterschoot and M. Moonen, "Comparative Evaluation of Howling Detection Criteria in Notch-Filter-Based Howling Suppression," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 58, no. 11, pp. 923–940, 2010.
- [3] Y. K. Wu *et al.*, "A Novel Deep Learning Framework for Efficient Multichannel Acoustic Feedback Control," *Proceedings of the Annual Conference of the International Speech Communication Association, INTERSPEECH*, no. August, pp. 788–792, 2025, doi: 10.21437/Interspeech.2025-605.
- [4] T. van Waterschoot and M. Moonen, "Fifty Years of Acoustic Feedback Control: State of the Art and Future Challenges," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 2, pp. 288–327, 2011, doi: 10.1109/JPROC.2010.2090998.
- [5] M. Mounir, G. Bernardi, and T. van Waterschoot, "Robust and early howling detection based on a sparsity measure," *EURASIP J. Audio Speech Music Process.*, vol. 2025, no. 1, pp. 1–19, 2025, doi: 10.1186/s13636-025-00399-1.
- [6] J. Benesty, M. Sondhi, and Y. Huang, "Springer Handbook of Speech Processing," 2007, pp. 1–4. doi: 10.1007/978-3-540-49127-9_1.
- [7] M. Gimm, P. Bulling, and G. Schmidt, "Residual feedback suppression with extended model-based postfilters," *EURASIP J. Audio Speech Music Process.*, vol. 2021, no. 1, 2021, doi: 10.1186/s13636-021-00205-8.
- [8] Y. Alkaher and I. Cohen, "Temporal Howling Detector for Speech Reinforcement Systems," 2022. doi: 10.3390/acoustics4040060.
- [9] P. Heckbert, "Fourier transforms and the fast Fourier transform (FFT) algorithm," *Comput. Graph. (ACM)*, vol. 2, no. 1995, 1995.
- [10] B. Peterson, "Spectrum Analyzer Basics," *Agilent*, pp. 1–86, 2002.
- [11] A. Quinquis, *Digital signal processing using MATLAB®*. 2013. doi: 10.1002/9780470610992.
- [12] O. Gazi, *Understanding digital signal processing*, vol. 13. 2018. doi: 10.1007/978-981-10-4962-0_1.
- [13] S. Syarif, "Model Alat Uji Kerusakan Pada Pompa Sentrifugal Menggunakan Sensor Accelerometer Untuk Predictive Maintenance," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 11, no. 3s1, pp. 1157–1166, 2023, doi: 10.23960/jitet.v11i3s1.13560.
- [14] V. K. Tran, B. T. Thai, H. Pham, V. K. Nguyen, and V. K. Nguyen, "A Proposed Approach to Utilizing Esp32 Microcontroller for Data Acquisition," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 56, no. 4, pp. 474–488, 2024, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.4.4.
- [15] Espressif systems, "ESP32-S3 Series Datasheet," vol. 5, 2022.
- [16] P. Delgado, D. Gómez, P. Sumba, A. Chuqui, R. Garcia-Velez, and L. Serpa-Andrade, "Design and Implementation of a Real-Time Audio Spectrum Analyzer Based on ESP32 with Distributed Processing and Web Visualization," K. Arai, Ed., Cham: Springer Nature Switzerland, 2026, pp. 18–34.