



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 10055-10061

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Analisis Komparatif Spektrum Frekuensi Karakteristik Sinyal Audio Air Menggunakan Fourier dan Spektrogram

Kenanga Bingah Tara Wardani¹, Nayla Tazkia Putri², Zaskia Amanda Ahmad³, Fifin Dewi Ratnasari⁴

¹⁻⁴Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang

kenangabingah15@students.unnes.ac.id, naylatazkia08@students.unnes.ac.id, zaskiaamanda508@students.unnes.ac.id, fifin_fisika@mail.unnes.ac.id

Abstrak

Penelitian ini menyajikan analisis komparatif karakteristik akustik sinyal audio dari dua sumber bunyi air yaitu hujan alami (gerimis, hujan sedang, hujan besar) dan shower buatan (shower kecil, shower sedang, shower besar), menggunakan metode pemrosesan sinyal digital berbasis Google Colaboratory (Python). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi parameter unik yang membedakan suara alami dan buatan. Tiga domain analisis diterapkan secara sistematis: (1) domain waktu untuk mengamati amplitudo dan distribusi temporal; (2) Fast Fourier Transform (FFT) untuk mengkaji distribusi energi spektral; dan (3) spektrogram waktu-frekuensi untuk memvisualisasikan dinamika energi sepanjang waktu. Hasil domain waktu menunjukkan korelasi positif antara intensitas sumber air dengan rentang amplitudo dan kerapatan sinyal. Analisis FFT mengungkap bahwa hujan besar memiliki distribusi energi paling merata hingga ± 15.000 Hz, sementara gerimis cenderung memusatkan energi di bawah 500 Hz. Fenomena unik ditemukan pada shower besar berupa puncak energi sekunder di sekitar 1.200–1.400 Hz yang diduga berasal dari resonansi mekanis kepala shower. Spektrogram mempertegas temuan FFT melalui representasi dua dimensi waktu-frekuensi. Pada intensitas kecil hingga sedang, profil spektral hujan dan shower hampir identik, sedangkan perbedaan signifikan muncul pada intensitas tertinggi. Temuan ini memberikan kontribusi ilmiah yang penting bagi pengembangan sistem klasifikasi sumber bunyi air otomatis berbasis machine learning dan teknologi penginderaan jauh.

Kata Kunci: Analisis Akustik, Hujan, Shower, Pemrosesan Sinyal Audio, Spektrogram

1. Latar Belakang

Bunyi air merupakan fenomena akustik yang umum dijumpai dalam keseharian, di mana hujan alami dan shower memiliki karakteristik fisik berbeda namun secara auditori kerap terdengar serupa. Kemampuan membedakan dan mengklasifikasikan keduanya secara otomatis membuka peluang penerapan luas, mulai dari pemantauan cuaca berbasis akustik, deteksi kebocoran pipa, pengenalan lingkungan cerdas, hingga pengembangan asisten virtual yang peka terhadap konteks lingkungan [1], [2], [3].

Digital Signal Processing (DSP) menyediakan kerangka analitik yang andal untuk mengekstraksi informasi dari sinyal audio, dengan Fast Fourier Transform (FFT) dan spektrogram sebagai dua metode paling fundamental dalam analisis akustik [4], [5], [6]. FFT mengonversi sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi untuk mengidentifikasi komponen frekuensi secara tepat [7], sedangkan spektrogram sebagai ekstensi dua dimensi FFT mampu merepresentasikan dinamika distribusi energi spektral sepanjang waktu [8].

Karakteristik akustik tetesan hujan bergantung pada ukuran dan kecepatan jatuhnya, yang berkorelasi dengan intensitas hujan [9]. Estimasi curah hujan berbasis sensor mikrofon [10] dan analisis akustik shower untuk pengenalan aktivitas penghuni [11] telah dikembangkan, namun studi komparatif spektral FFT dan spektrogram antara hujan alami dan shower buatan masih terbatas. Mengingat representasi waktu-frekuensi terbukti meningkatkan akurasi klasifikasi suara lingkungan berbasis machine learning [12], [13], [14], [15], peneliti merancang studi "Analisis Komparatif Spektrum Frekuensi dan Karakteristik Temporal Sinyal Audio Air Menggunakan Transformasi Fourier dan Spektrogram Berbasis Colab".

Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik sinyal audio hujan dan shower dalam tiga domain, yaitu domain waktu, frekuensi (FFT), dan waktu-frekuensi (spektrogram), sekaligus membandingkan profil spektral keenam

kategori intensitas untuk mengidentifikasi fitur akustik pembeda yang berpotensi dimanfaatkan dalam sistem klasifikasi otomatis berbasis machine learning ([2], [16],[15]). Seluruh proses analisis dilakukan menggunakan Google Colaboratory dengan dukungan pustaka Python.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan enam sampel rekaman suara air, terdiri atas tiga tingkat intensitas hujan alami (gerimis, sedang, lebat) dan tiga kategori shower buatan (kecil, sedang, besar). Seluruh rekaman diambil menggunakan mikrofon kondenser dengan frekuensi sampling 44.100 Hz dan resolusi 16-bit dalam format WAV. Analisis domain waktu dilakukan pada segmen sinyal sebanyak $N = 1.450$ sampel, sedangkan

analisis spektrogram menggunakan rekaman berdurasi ± 30 detik. Tahap preprocessing mencakup normalisasi amplitudo guna memudahkan perbandingan karakteristik sinyal antarkategori.

Seluruh proses pengolahan dan analisis data pada penelitian ini diimplementasikan menggunakan Google Colaboratory berbasis Python 3. Analisis numerik dan transformasi Fourier dilakukan menggunakan pustaka NumPy dan SciPy [17], sedangkan pemrosesan sinyal audio dan spektrogram berbasis Short-Time Fourier Transform (STFT) dilakukan menggunakan Librosa. Visualisasi data dilakukan menggunakan pustaka Matplotlib. Penggunaan Google Colaboratory dipilih karena mendukung komputasi berbasis cloud tanpa memerlukan instalasi perangkat lunak tambahan pada perangkat lokal.

Analisis domain waktu dilakukan dengan memvisualisasikan amplitudo sinyal $x(n)$ terhadap indeks sampel n . Parameter yang dianalisis meliputi amplitudo maksimum dan nilai efektif sinyal atau Root Mean Square (RMS). Nilai RMS dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)^2} \quad (1)$$

Dengan N menyatakan jumlah total sampel sinyal. Nilai RMS digunakan untuk mempresentasikan ukuran energi rata-rata sinyal yang lebih representatif dibandingkan amplitudo puncak.

Analisis Fast Fourier Transform (FFT) digunakan untuk mengubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi sehingga distribusi energi frekuensi dapat diamati. Dasar matematis FFT berasal dari Transformasi Fourier Diskrit (DFT) yang dinyatakan sebagai:

$$X(k) = \sum x(n) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (2)$$

Dengan $X(k)$ merupakan koefisien DFT pada indeks frekuensi k , dan j adalah bilangan imajiner. FFT mengimplementasikan DFT dengan kompleksitas komputasi $O(N \log N)$ [18]. Magnitudo spektrum frekuensi diperoleh melalui persamaan:

$$|X(k)| = \sqrt{\text{Re}(X(k))^2 + \text{Im}(X(k))^2} \quad (3)$$

Resolusi frekuensi ditentukan oleh:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (4)$$

Dengan f_s sebagai frekuensi sampling. Untuk mempermudah perbandingan antar kategori suara, magnitudo spektrum dinormalisasi menggunakan persamaan berikut:

$$|X_{norm}(k)| = \frac{|X(k)|}{\max(|X(k)|)} \quad (5)$$

Analisis spektrogram dilakukan menggunakan metode Short-Time Fourier Transform (STFT) untuk mengamati perubahan distribusi frekuensi terhadap waktu. Persamaan STFT dinyatakan sebagai berikut:

$$S(m, k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)w(n - mH) e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (6)$$

Dengan $w(n)$ sebagai fungsi jendela Hann, H adalah hop size, dan m menyatakan indeks frame. Pada penelitian ini menggunakan parameter NFFT = 2.048 sampel dan hop size sebesar 512 sampel, sehingga menghasilkan overlap sebesar 75%. Energi spektrogram kemudian dikonversi ke dalam skala desibel menggunakan persamaan:

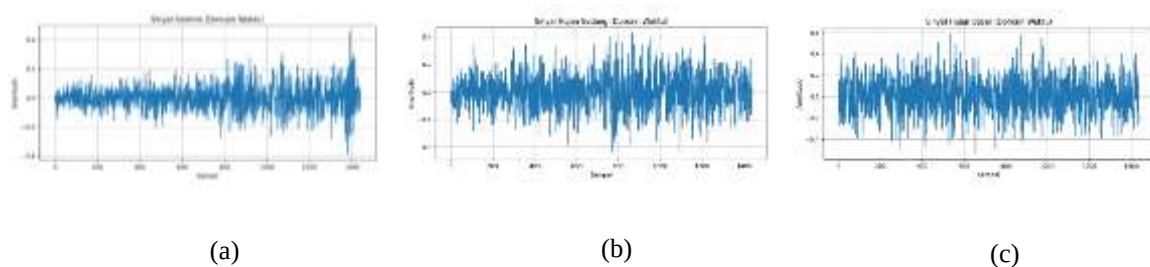
$$S_{dB}(m, k) = 10 \log_{10}(|S(m, k)|^2 + \varepsilon) \quad (7)$$

Dengan ε merupakan konstanta kecil untuk menghindari nilai logaritma nol. Rentang dinamis yang ditampilkan berada pada interval -80 dB hingga 0 dB, yang telah dinormalisasi terhadap nilai amplitudo maksimum.

3. Hasil dan Diskusi

Analisis Sinyal Hujan — Domain Waktu

Gambar 1 menampilkan sinyal audio domain waktu ketiga kategori hujan, memperlihatkan hubungan antara amplitudo sinyal dengan jumlah sampel.



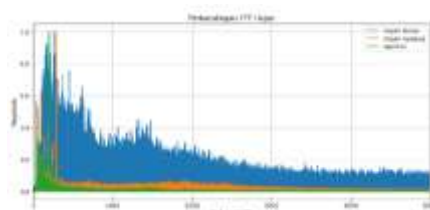
Gambar 1. Sinyal audio domain waktu hujan (a) gerimis, (b) hujan sedang, dan (c) hujan besar.

Gambar 1 menampilkan sinyal audio domain waktu ketiga kategori hujan. Gerimis (Gambar 1a) memperlihatkan amplitudo -0,4 hingga +0,45 dengan pola sporadis dan tidak merata, mencerminkan tetesan kecil yang jatuh tidak teratur. Hujan sedang (Gambar 1b) menunjukkan rentang -0,45 hingga +0,4 dengan pola lebih rapat dan konsisten akibat frekuensi tetesan yang lebih tinggi dan distribusi ukuran lebih beragam, sejalan dengan temuan [9] dan [19]. Hujan besar (Gambar 1c) memiliki rentang amplitudo terlebar (-0,5 hingga +0,6) dengan sinyal sangat padat dan kontinu, mengindikasikan tumpang tindih temporal dampak tetesan berukuran 1–5 mm yang mendukung hasil [10].

Tabel 1. Parameter Statistik Domain Waktu Sinyal Hujan

Kategori	$A_{\max}(+)$	$A_{\max}(-)$	Pola Temporal
Gerimis	+0,45	-0,40	Sporadis, tidak merata
Hujan Sedang	+0,40	-0,45	Merata dan konsisten
Hujan Besar	+0,60	-0,50	Sangat padat (kontinu)

Analisis FFT Sinyal Hujan

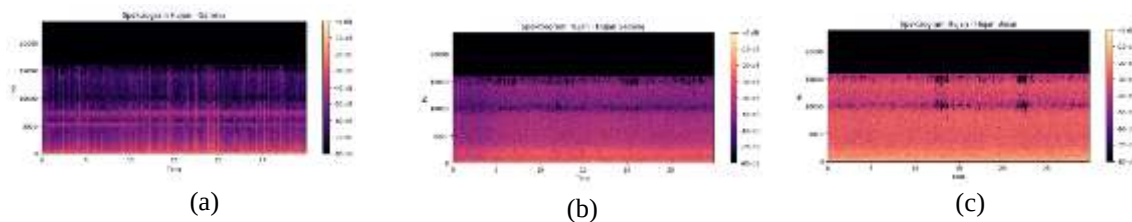


Gambar 2. Perbandingan FFT Hujan — Hujan Besar (biru) mempertahankan energi jauh lebih tinggi di seluruh rentang 0–5.000 Hz dibandingkan Hujan Sedang (oranye) dan Gerimis (hijau)

Gambar 2 menampilkan perbandingan FFT ternormalisasi. Setelah 500 Hz, hujan besar mempertahankan magnitudo 0,1–0,8 hingga 5.000 Hz, sementara hujan sedang dan gerimis turun mendekati nol mulai 1.000 Hz, mengonfirmasi bahwa distribusi energi di frekuensi menengah-tinggi merupakan fitur pembeda utama intensitas hujan.

Analisis Spektrogram Sinyal Hujan

Spektrogram menyajikan representasi dua dimensi waktu-frekuensi untuk mengamati dinamika spektral sepanjang rekaman. Gambar 4 menampilkan spektrogram ketiga kategori hujan dengan skala warna merah-oranye-ungu-hitam, di mana merah/oranye menunjukkan energi tinggi (~0 dB) dan hitam menunjukkan energi rendah (~-80 dB).

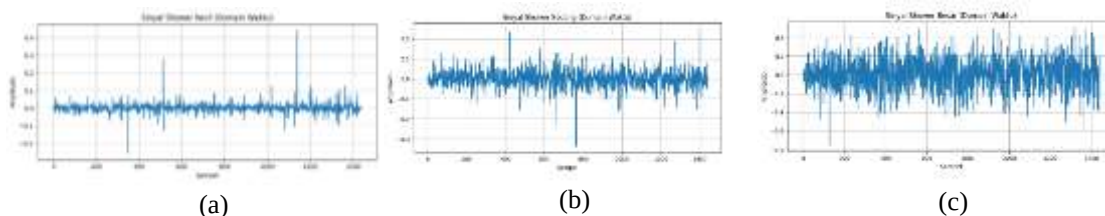


Gambar 3. Spektrogram sinyal hujan (a) gerimis, (b) hujan sedang, dan (c) hujan besar

Gambar 3 menampilkan spektrogram ketiga kategori hujan dengan skala warna merah-oranye-ungu-hitam, di mana merah menunjukkan energi tinggi dan hitam energi rendah. Gerimis (Gambar 4a) menunjukkan energi terkonsentrasi di 0–6.000 Hz dengan garis vertikal terang sporadis yang merepresentasikan tetesan individual. Hujan sedang (Gambar 4b) memperlihatkan distribusi energi lebih merata dengan intensitas di rentang 5.000–15.000 Hz yang lebih stabil. Hujan besar (Gambar 4c) menampilkan hampir seluruh area hingga 15.000 Hz berwarna merah-oranye terang dan merata, mengindikasikan sumber suara yang sangat intens dan kontinu.

Analisis Sinyal Shower — Domain Waktu

Gambar 4 menampilkan sinyal domain waktu ketiga kategori shower yang secara umum berpola serupa dengan sinyal hujan, namun dengan beberapa perbedaan karakteristik yang perlu diperhatikan.



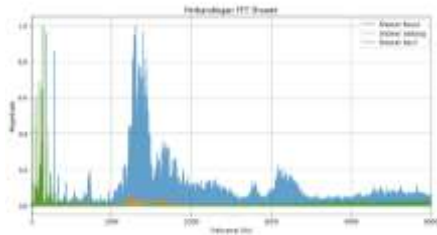
Gambar 4. Sinyal audio domain waktu shower (a) shower kecil, (b) shower sedang, dan (c) shower besar.

Gambar 4 menampilkan sinyal domain waktu ketiga kategori shower, di mana peningkatan intensitas berbanding lurus dengan kenaikan amplitudo dan kepadatan sinyal. Shower kecil (Gambar 4a) memiliki amplitudo dominan $\pm 0,05$ dengan lonjakan sporadis hingga $+0,44$, shower sedang (Gambar 4b) menunjukkan rentang $-0,30$ hingga $+0,25$ dengan turbulensi lebih konsisten, dan shower besar (Gambar 4c) memiliki rentang terlebar ($-0,75$ hingga $+0,50$) dengan lonjakan ekstrem di sampel ~130 akibat interaksi aliran bertekanan tinggi dengan permukaan keras. Fluktuasi amplitudo shower secara keseluruhan lebih tajam dibandingkan hujan alami karena karakteristik aliran yang lebih terfokus dan bertekanan relatif konstan.

Tabel 2. Parameter Statistik Domain Waktu Sinyal Shower

Kategori	$A_{\max}(+)$	$A_{\max}(-)$	Pola Temporal
Shower Kecil	+0,44	-0,27	Sangat jarang, sporadis
Shower Sedang	+0,25	-0,30	Aktif, lonjakan teratur
Shower Besar	+0,50	-0,75	Sangat padat, ekstrem

Analisis FFT Sinyal Shower

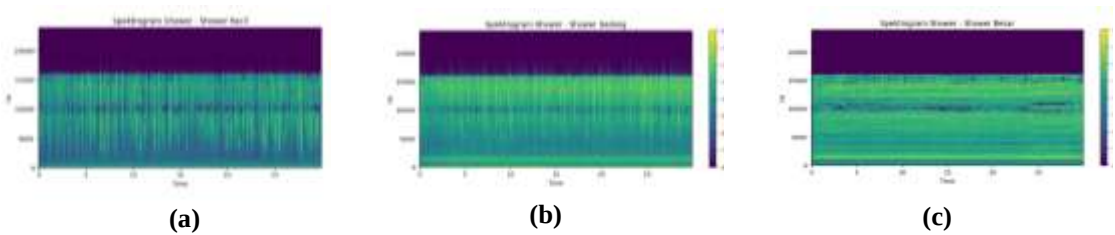


Gambar 5. Perbandingan FFT Shower — Shower Besar (biru) memiliki puncak energi kedua yang sangat tinggi di ~1.200–1.400 Hz; ciri khas yang tidak dimiliki kategori lain.

Gambar 5 menampilkan fitur paling khas dari shower besar: puncak energi sekunder yang sangat tinggi (magnitudo ternormalisasi mendekati 1,0) di sekitar 1.200–1.400 Hz. Puncak ini tidak dimiliki oleh kategori lain. Fenomena ini mengindikasikan kemungkinan adanya mekanisme resonansi akustik pada sistem perpipaan. Menurut [20], karakteristik geometri dan interaksi fluida dapat menghasilkan frekuensi resonansi tertentu yang muncul sebagai puncak energi dominan pada spektrum akustik.

Analisis Spektrogram Sinyal Shower

Spektrogram shower (Gambar 6) menggunakan skala warna hijau-biru-ungu-hitam, berbeda dari spektrogram hujan yang merah-oranye, di mana kuning-hijau terang menunjukkan energi tinggi (~0 dB) dan ungu-hitam menunjukkan energi rendah (~-80 dB).

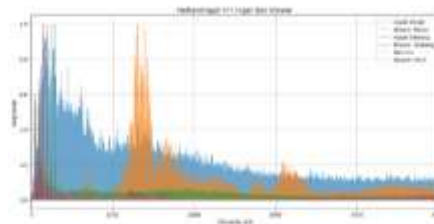


Gambar 6. Spektrogram shower (a) shower kecil, (b) shower sedang, dan (c) shower besar.

Gambar 6 menampilkan spektrogram ketiga kategori shower dengan skala warna hijau-biru-ungu-hitam. Shower kecil (Gambar 6a) menunjukkan distribusi energi merata di 0–16.000 Hz dengan garis vertikal periodik, shower sedang (Gambar 6b) menampilkan kecerahan lebih tinggi di rentang 10.000–16.000 Hz seiring peningkatan intensitas aliran, sedangkan shower besar (Gambar 6c) memiliki distribusi paling merata dengan pita horizontal gelap konsisten di ~10.000 Hz yang mengindikasikan penurunan energi sistematis sebagai karakteristik tetap sistem shower.

Analisis Komparatif Lintas Kategori

Gambar 7 menampilkan grafik perbandingan FFT ternormalisasi dari seluruh enam kategori secara bersamaan, memungkinkan perbandingan langsung antara sumber hujan dan shower.



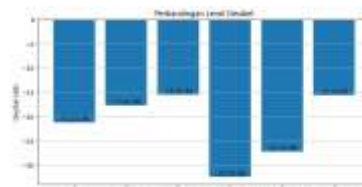
Gambar 7. Perbandingan FFT Hujan dan Shower — perbedaan spektral signifikan hanya terlihat pada Hujan Besar (biru) dan Shower Besar (oranye); keempat kategori intensitas rendah hampir identik.

Gambar 7 mengungkap tiga temuan utama perbandingan FFT: (1) keenam sinyal menunjukkan puncak energi seragam pada 0–300 Hz sebagai karakteristik universal bunyi air; (2) di atas 300 Hz hanya hujan besar dan shower besar yang mempertahankan energi signifikan; (3) hujan besar mempertahankan energi gradual di 0–5.000 Hz, sedangkan shower besar menampilkan pola bimodal dengan puncak sekunder di 1.200–1.400 Hz akibat resonansi mekanis perangkat shower [20]. Rentang frekuensi menengah (500–5.000 Hz) berpotensi sebagai fitur diskriminatif kuat melalui ekstraksi MFCC untuk model SVM, Random Forest, maupun CNN berbasis spektrogram [3], [15], didukung efektivitas integrasi waktu-frekuensi dengan deep learning dalam klasifikasi suara lingkungan [6].

Tabel 3. Rangkuman Fitur Spektral Kunci Seluruh Kategori

Kategori	Frekuensi Dom. (Hz)	Puncak Sekunder	Lebar Spektral	Energi >1kHz
Gerimis	<500	Tidak ada	Sempit	Sangat rendah
Hujan Sedang	<500	Tidak ada	Sempit	Rendah
Hujan Besar	0–5000+	Tidak ada	Sangat lebar	Tinggi (merata)
Shower Kecil	<300	Tidak ada	Sempit	Sangat rendah
Shower Sedang	<300	Tidak ada	Sempit	Rendah
Shower Besar	0–5000+	~1.200–1.400	Sangat lebar	Tinggi (bimodal)

Perbandingan Level Desibel Antar Kategori Suara Air



Gambar 8. Perbandingan Level Desibel (dB) pada Enam Kategori Suara Air.

Gambar 8 menampilkan perbandingan level desibel keenam kategori suara air dengan seluruh nilai negatif, menunjukkan intensitas di bawah referensi 0 dB. Kedua kelompok memperlihatkan pola menaik konsisten: gerimis

(-21,12 dB), hujan sedang (-17,62 dB), hujan besar (-15,39 dB), shower kecil (-32,30 dB), shower sedang (-27,12 dB), dan shower besar (-15,49 dB). Nilai hujan besar dan shower besar hampir identik dengan selisih hanya 0,10 dB, namun rentang variasi shower (16,81 dB) jauh lebih besar dibandingkan hujan (5,73 dB), menunjukkan perbedaan antarkategori shower yang lebih mencolok. Secara keseluruhan, hasil analisis domain waktu, FFT, spektrogram, dan level desibel mengonfirmasi bahwa parameter akustik yang diperoleh berpotensi besar sebagai fitur dalam sistem identifikasi dan klasifikasi sumber suara air secara otomatis.

4. Kesimpulan

Analisis mengonfirmasi korelasi positif antara intensitas sumber air dengan rentang amplitudo dan kerapatan sinyal. Frekuensi rendah (<500 Hz) merupakan karakteristik umum bunyi air, sementara distribusi energi frekuensi menengah hingga tinggi menjadi pembeda utama antarkategori. Hujan besar menghasilkan spektrum lebih lebar dan merata, sedangkan shower besar memiliki puncak energi khas di 1.200–1.400 Hz. Fitur spektral pada rentang 500–5.000 Hz berpotensi dimanfaatkan dalam sistem klasifikasi suara air, dengan rekomendasi penerapan fitur MFCC dan penggunaan dataset yang lebih beragam pada penelitian selanjutnya.

Referensi

- [1] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2010.
- [2] J. Salamon, C. Jacoby, and J. P. Bello, "Environmental sound classification using deep learning techniques," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 8, p. 3567, 2021.
- [3] Z. Zhang, S. Xu, S. Zhang, T. Qiao, and S. Cao, "Learning attentive representations for environmental sound classification," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 8040–8049, 2022.
- [4] W. Mu, B. Yin, X. Huang, J. Xu, and Z. Du, "Environmental sound classification using temporal-frequency attention based convolutional neural network," *Scientific Reports*, vol. 11, p. 21552, 2021.
- [5] A. Ahmed, Y. Serrestou, K. Raoof, and J. F. Diouris, "Empirical mode decomposition based feature extraction for environmental sound classification," *Sensors*, vol. 22, no. 20, p. 7717, 2022.
- [6] S. Park and S. Han, "Multi-resolution time-frequency representation for environmental sound classification using deep neural networks," *Expert Systems with Applications*, vol. 213, p. 119162, 2023.
- [7] S. Mann and S. Haykin, "The chirplet transform: Physical considerations," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 43, no. 11, pp. 2745–2761, 1995.
- [8] L. R. Rabiner and R. W. Schaffer, *Theory and Applications of Digital Speech Processing*. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2011.
- [9] J. A. Nystuen, "Listening to raindrops from underwater: An acoustic disdrometer," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 18, no. 10, pp. 1640–1657, 2001.
- [10] E. Amitai, X. Llort, and D. Sempere-Torres, "Comparison of methods for estimating drop size distribution parameters," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 114, no. D23, 2009.
- [11] T. L. M. van Kasteren, G. Englebienne, and B. Kröse, "Activity recognition using semi-Markov models on real world smart home datasets," *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, vol. 2, no. 3, pp. 311–325, 2010.
- [12] X. Wang et al., "Rainfall observation using surveillance audio," *Applied Acoustics*, vol. 186, p. 108478, 2022.
- [13] H. Li, X. Chen, and Y. Zhao, "Acoustic monitoring of rainfall intensity using machine learning methods," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 16, pp. 1187–1201, 2023.
- [14] A. Ashurov et al., "Concatenation-based pre-trained convolutional neural networks using attention mechanism for environmental sound classification," *Applied Acoustics*, vol. 216, p. 109759, 2024.
- [15] X. Zhao, J. Li, L. Wang, and Y. Guo, "Spectrogram-based water sound classification using lightweight convolutional neural networks for smart home applications," *Applied Acoustics*, vol. 219, p. 109931, 2024.
- [16] B. Chen and J. Peng, "Environmental sound classification using two-stream deep neural network with interactive time-frequency attention," *Applied Acoustics*, vol. 238, p. 110794, 2025.
- [17] P. Virtanen et al., "SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python," *Nature Methods*, vol. 17, no. 3, pp. 261–272, 2020.
- [18] J. W. Cooley and J. W. Tukey, "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series," *Mathematics of Computation*, vol. 19, no. 90, pp. 297–301, 1965.
- [19] C. Caracciolo, M. Napoli, E. Adirosi, and L. Baldini, "Raindrop size distribution and spectral acoustic signature during rainfall events," *Atmospheric Research*, vol. 284, p. 106604, 2023.
- [20] T. G. Leighton, *The Acoustic Bubble*. London: Academic Press, 1994.