

Implementasi MAF (*Moving Average Filter*) Pada Sistem Pemantau Kebisingan Berbasis *Multiple Sensor* Suara

Implementation of MAF (*Moving Average Filter*) on Noise Monitoring System Based on *Multiple Sound* Sensors

Winda Lasmaria Hutabarat¹, Daniel Sutopo Pamungkas²

^{1,2} Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Elektronika, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Batam
^{1,2} Jl. Ahmad Yani, Tlk. Tering, Kec. Batam Kota, Kota Batam, Kepulauan Riau 29461
email: ¹windahtbrt12@gmail.com , ²daniel@polibatam.ac.id

Informasi Artikel

Diajukan, 1 Juli 2025
Diterima, 6 Agustus 2025
Diterbitkan, 5 Desember 2025

Kata Kunci :

Sistem Monitoring Kebisingan,
Moving Average Filter (MAF),
Multiple Sensor Suara

Keyword :

Noise Monitoring System,
Moving Average Filter (MAF),
Multiple Sound Sensors

ABSTRAK

Kampus sebagai pusat pendidikan memerlukan ruang belajar yang nyaman untuk menunjang aktivitas akademik. Perpustakaan, sebagai ruang belajar utama, harus bebas dari gangguan suara yang dapat menurunkan konsentrasi. Penelitian ini mengembangkan sistem pemantau kebisingan nirkabel dengan arsitektur *multiple sound* sensor dan mengimplementasikan filter digital *Moving Average Filter (MAF)* untuk mereduksi noise dan meningkatkan stabilitas pembacaan data. Sistem ini diuji di perpustakaan Politeknik Negeri Batam dan mampu mendeteksi tingkat kebisingan dalam rentang 38 dB hingga 100 dB. Notifikasi aktif secara otomatis saat ambang batas 55 dB terlampaui. Hasil menunjukkan bahwa MAF berhasil meredam fluktuasi sinyal dan meningkatkan akurasi sistem secara signifikan. Implementasi sistem ini berpotensi menjadi model untuk menciptakan lingkungan belajar yang optimal di ruang publik lainnya.

ABSTRACT

A university campus, as an educational center, requires comfortable learning spaces to support academic activities. The library, serving as a primary study area, must be free from sound disturbances that reduce concentration. This research develops a wireless noise monitoring system using a multiple sound sensor architecture and implements the *Moving Average Filter (MAF)* to reduce noise and enhance data reading stability. The system was tested at the State Polytechnic of Batam library and is capable of detecting noise levels ranging from 38 dB to 100 dB. Notification is automatically triggered when the threshold of 55 dB is exceeded. The results demonstrate that MAF successfully reduces signal fluctuations and significantly improves system accuracy. This implementation is a potential model for creating optimal learning environments in other public spaces.

1. PENDAHULUAN

Kampus merupakan pusat pendidikan yang terdiri dari berbagai fasilitas untuk mendukung proses belajar, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat. Untuk menunjang seluruh aktivitas tersebut, kenyamanan lingkungan, terutama di ruang-ruang belajar utama, menjadi faktor krusial. Salah satu ruang vital bagi kegiatan akademik mahasiswa adalah perpustakaan, yang berfungsi sebagai sumber utama informasi dan pengetahuan. Idealnya, perpustakaan harus menyediakan suasana yang tenang dan kondusif untuk mendukung konsentrasi tingkat tinggi[1].

Masalah utama yang sering mengganggu kenyamanan di perpustakaan adalah kebisingan. Berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Tahun 1996, standar baku tingkat kebisingan untuk lingkungan pendidikan seperti perpustakaan adalah 55 dB[2][3]. Namun, standar internasional yang dikeluarkan oleh WHO dan ANSI menyarankan tingkat kebisingan maksimum di ruang belajar berada pada rentang 35–40 dB(A) untuk menjaga fokus dan kenyamanan pengguna[4]. Relevansi masalah ini terus dikonfirmasi oleh berbagai penelitian modern yang secara konsisten menunjukkan dampak negatif kebisingan terhadap konsentrasi dan kinerja kognitif mahasiswa di lingkungan belajar[5]. Studi-studi terbaru juga menekankan pentingnya kenyamanan akustik sebagai salah satu elemen kunci dalam menciptakan lingkungan perpustakaan

yang efektif[6]. Kebisingan yang bersumber dari aktivitas pengunjung, seperti percakapan atau pergerakan, dapat secara signifikan menurunkan fokus belajar dan produktivitas mahasiswa[7].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan sebuah sistem pemantau kebisingan yang akan diimplementasikan di Perpustakaan Politeknik Negeri Batam. Sistem ini dirancang untuk mendeteksi tingkat kebisingan secara *real-time* menggunakan beberapa sensor suara yang terdistribusi dan memberikan peringatan ketika tingkat kebisingan melampaui ambang batas yang telah ditentukan[8].

Penelitian ini berkontribusi dengan menyajikan sebuah desain sistem pemantau kebisingan nirkabel berbiaya rendah yang terdistribusi[9], serta memberikan analisis kuantitatif mengenai efektivitas *Moving Average Filter (MAF)* dalam mereduksi noise pada lingkungan perpustakaan nyata[10]. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan tidak hanya mampu mengatasi masalah kebisingan secara efektif di lokasi studi, tetapi juga dapat menjadi model praktis yang mudah direplikasi bagi institusi pendidikan lain yang menghadapi tantangan serupa dalam upaya menciptakan lingkungan belajar yang optimal.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dan proses pengambilan data dilaksanakan di Perpustakaan Politeknik Negeri Batam, dengan penempatan sensor pada tiga titik strategis. Pemilihan ketiga lokasi ini tidak dilakukan secara acak, melainkan didasarkan pada serangkaian kriteria yang telah ditentukan secara cermat. Tujuan utama dari pemilihan berbasis kriteria ini adalah untuk memastikan data yang terkumpul bersifat representatif dan komprehensif, sehingga mampu mencerminkan kondisi kebisingan di seluruh area perpustakaan secara akurat.

Kriteria utama dalam penentuan lokasi meliputi tingkat aktivitas pengunjung, jarak dari sumber kebisingan eksternal, dan keterwakilan area. Berdasarkan tingkat aktivitas, titik pertama ditempatkan di dekat pintu masuk yang ramai, titik kedua di zona baca yang idealnya tenang, dan titik ketiga di area diskusi kelompok yang berpotensi lebih bising. Selain itu, pertimbangan juga diberikan pada jarak sensor dari sumber kebisingan potensial seperti pendingin ruangan (AC) atau jendela untuk memetakan distribusi suara dengan lebih baik. Penempatan di tiga titik yang berbeda ini menjamin bahwa sistem dapat memantau kondisi umum perpustakaan secara menyeluruh, tidak hanya terfokus pada satu bagian saja.

Dengan pemilihan lokasi yang strategis ini, sistem pemantauan dapat secara efektif mendeteksi berbagai jenis dan sumber kebisingan yang ada di dalam perpustakaan. Akibatnya, hasil pemantauan yang diperoleh menjadi lebih relevan dan dapat diandalkan untuk analisis lebih lanjut. Hal ini sangat penting untuk mencapai tujuan akhir penelitian, yaitu mengevaluasi dan membantu menciptakan lingkungan belajar yang nyaman dan kondusif bagi seluruh pengunjung perpustakaan.

2.1. MAF (Moving Average Filter)

Moving Average Filter (MAF) merupakan jenis filter digital yang diterapkan untuk menghaluskan sinyal data dari sensor dengan cara mengurangi noise. Tujuannya adalah menghasilkan *output* yang lebih stabil dan mudah diinterpretasikan. Filter ini sangat efektif untuk mengurangi fluktuasi acak pada data mentah hasil pembacaan sensor. [11].

Cara kerja MAF yang paling dasar adalah dengan menghitung rata-rata dari sejumlah sampel terakhir. Contohnya, untuk window size sebanyak 10 sampel, rumusnya adalah sebagai berikut:

$$y[n] = \frac{x[n] + x[n - 1] + x[n - 2] + \dots + x[n - 9]}{10}$$

Namun, untuk implementasi *real-time* yang lebih efisien dari sisi komputasi, digunakan metode recursive moving average. Metode ini tidak perlu menjumlahkan seluruh sampel setiap kali ada data baru. Sebaliknya, rata-rata baru dihitung berdasarkan rata-rata sebelumnya, nilai data yang baru masuk, dan nilai data terlama yang keluar dari window. Rumus untuk implementasi efisien ini adalah:

$$y[n] = y[n] - \frac{x[n - m + 1]}{m} + \frac{x[n + 1]}{m}$$

Keterangan :

- y[n] : *Output* dari filter pada waktu n
- y[n - 1] : *Output* dari filter pada waktu n - 1 (output sebelumnya)
- x[n - 1] : Nilai *input* sinyal pada waktu n + 1 (nilai baru yang ditambahkan)
- x[n - m + 1] : Nilai *input* sinyal pada waktu n - m + 1 (nilai baru yang lama dikeluarkan)
- m : Ukuran window (jumlah sampel yang di rata-ratakan)

Dalam implementasi sistem ini, ukuran window (m) yang digunakan adalah 10 sampel. Penggunaan rumus rekursif ini memastikan pemrosesan sinyal yang cepat dan tidak membebani mikrokontroler.

Filter MAF dipilih untuk penelitian awal ini karena kesederhanaan implementasi dan efisiensinya dalam komputasi, yang sangat sesuai untuk mikrokontroler dengan sumber daya terbatas. Meskipun demikian, perlu dipahami bahwa metode lain seperti filter Kalman atau Butterworth menawarkan karakteristik performa yang berbeda yang dapat dieksplorasi di masa depan.

2.2. MSE (Mean Squared Error)

MSE (*Mean Squared Error*) merupakan metode perhitungan yang mengukur rata-rata kesalahan kuadrat antara data aktual dan rata-rata yang dihasilkan oleh MAF (*Moving Average Filter*) [12]. Analisis MSE (*Mean Squared Error*) ini akan digunakan untuk membandingkan nilai MSE pada data sensor sebelum menggunakan filter MAF (*Moving Average Filter*) dan sesudah menggunakan MAF (*Moving Average Filter*). Berikut merupakan rumusan untuk mendapat nilai MSE (*Mean Squared Error*).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2$$

Keterangan :

n : Jumlah data

Y_i : Nilai actual dari pengamatan ke-i

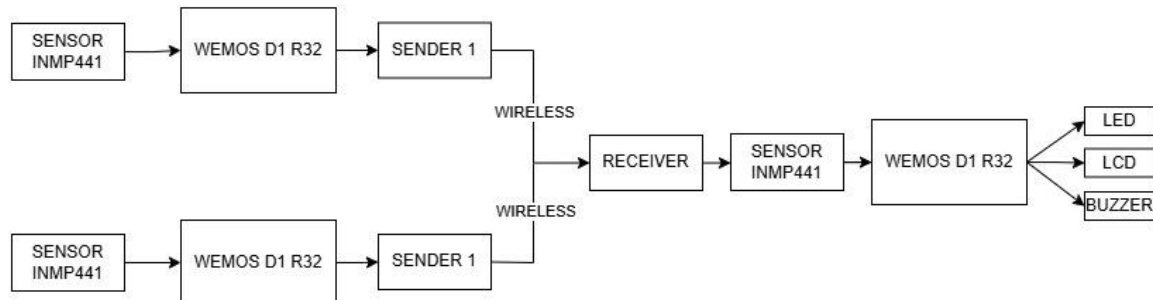
Y'_i : Nilai prediksi dari pengamatan ke-i

2.3. Perancangan Sistem

Pada perancangan sistem ini, akan dipaparkan mengenai diagram blok serta alur kerja dari alat yang dibuat. Tujuan dari perancangan ini adalah untuk memberikan gambaran yang jelas dan terstruktur mengenai bagaimana semua komponen saling berinteraksi untuk mencapai tujuan fungsional sistem, yaitu mendeteksi suara pada level kebisingan yang telah ditentukan lalu memberikan notifikasi.

2.3.1. Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem secara visual menggambarkan arsitektur perangkat keras dan hubungan antar komponen utama. Diagram ini berfungsi sebagai cetak biru untuk perakitan fisik alat. Berdasarkan gambar yang disajikan, sistem ini dirancang dengan arsitektur terdistribusi yang terdiri dari dua unit pengirim (sensor) dan satu unit penerima (pusat notifikasi). Diagram blok sistem dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah ini.

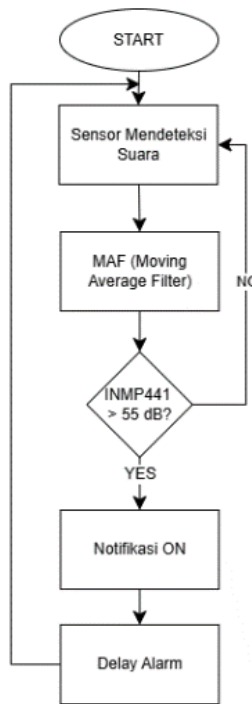


Gambar 1. Diagram Blok Sistem yang Menunjukkan Hubungan antara Pengirim (Sensor) dan Unit Penerima (Notifikasi)

Setiap unit pengirim bertugas mendeteksi suara menggunakan sensor INMP441, yang datanya diolah oleh mikrokontroler WEMOS D1 R32 sebelum dikirimkan secara nirkabel melalui modul *Sender*. Sinyal ini kemudian ditangkap oleh unit penerima, yang juga menggunakan WEMOS D1 R32, untuk memicu serangkaian output notifikasi secara simultan, meliputi indikator visual (LED), tampilan informasi (LCD), dan peringatan suara (*Buzzer*). Arsitektur ini memungkinkan pemantauan dari dua lokasi berbeda yang terhubung ke satu pusat alarm.

2.3.2. Flowchart

Diagram alir atau *flowchart* digunakan untuk menjelaskan logika dan alur kerja perangkat lunak yang ditanamkan pada mikrokontroler WEMOS D1 R32 di setiap unit pengirim. *Flowchart* ini menggambarkan proses dari pembacaan sensor hingga pengambilan keputusan kerja alat. *Flowchart* logika kerja sistem dapat dilihat pada Gambar 2.



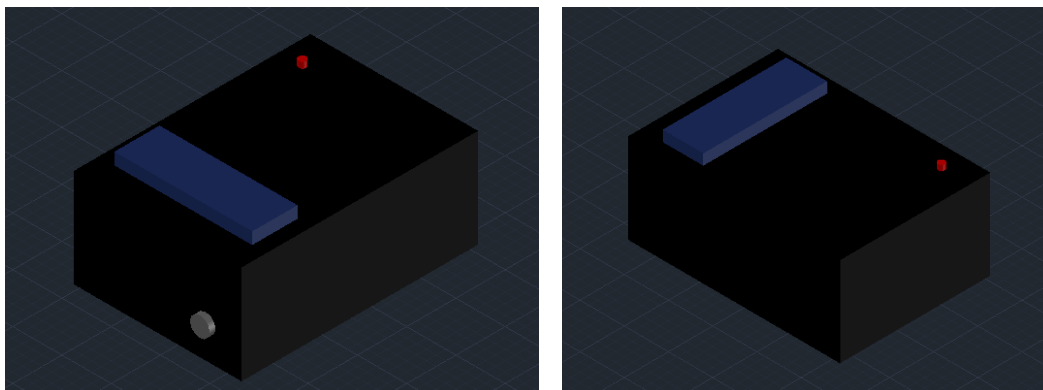
Gambar 2. Diagram Alir (*Flowchart*) Logika Kerja Sistem pada Mikrokontroler untuk Mendeteksi Kebisingan dan Mengaktifkan Notifikasi

Alur dimulai dengan akuisisi data suara dari sensor INMP441 secara terus-menerus. Untuk memastikan stabilitas pembacaan, data mentah ini disaring terlebih dahulu menggunakan *Moving Average Filter (MAF)*. Selanjutnya, sistem melakukan pengecekan kondisional: jika level suara yang telah difilter melebihi ambang batas 55 dB, maka perintah untuk mengaktifkan notifikasi akan dikirim. Setelah itu, sistem akan memasuki periode jeda (*delay*) untuk menghindari alarm beruntun, sebelum akhirnya kembali ke awal siklus untuk melanjutkan pemantauan. Jika level suara tidak melampaui ambang batas, sistem akan langsung kembali ke proses pemantauan awal.

Selanjutnya, sistem melakukan pengecekan kondisional: jika level suara yang telah difilter melebihi ambang batas 55 dB, maka perintah untuk mengaktifkan notifikasi akan dikirim. Setelah itu, sistem akan memasuki periode jeda (*delay*) selama 10 detik untuk menghindari alarm beruntun sebelum akhirnya kembali ke awal siklus untuk melanjutkan pemantauan. Durasi jeda ini dipilih untuk mencegah aktivasi alarm yang berulang-ulang akibat fluktuasi kebisingan sesaat yang tidak signifikan. Jika level suara tidak melampaui ambang batas, sistem akan langsung kembali ke proses pemantauan awal.

2.4. Desain Mekanikal

Rancang bangun desain alat pemantau kebisingan dirancang dengan dimensi lebar box 8,5 cm dengan panjang 12,5 cm dan tinggi 5 cm. Desain ini dirancang sesuai dengan kebutuhan dan telah disesuaikan dengan lingkungan Perpustakaan Politeknik Negeri Batam. Desain 3D dari alat ini dapat dilihat pada Gambar 3.

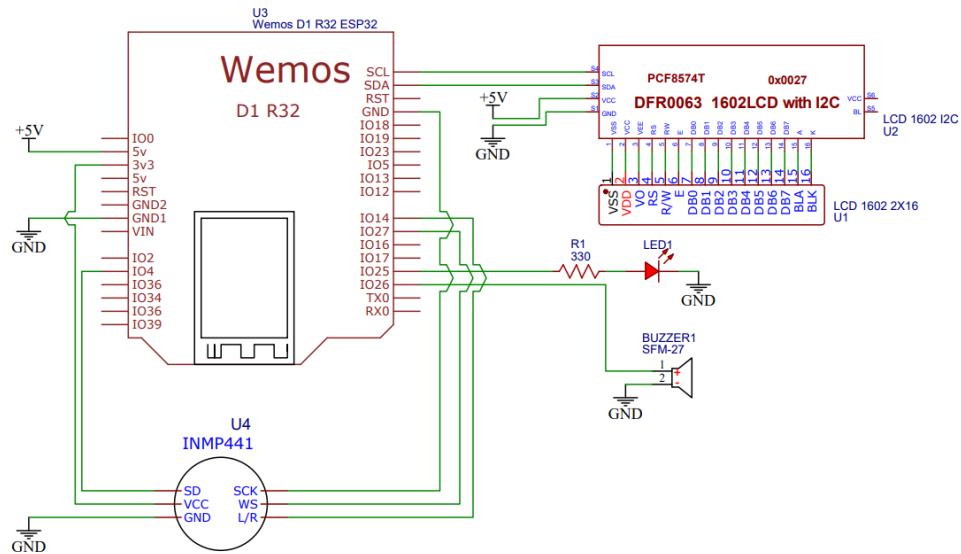


Gambar 3. Desain Mekanikal Prototipe Alat Pemantau Kebisingan dalam Tampilan 3D

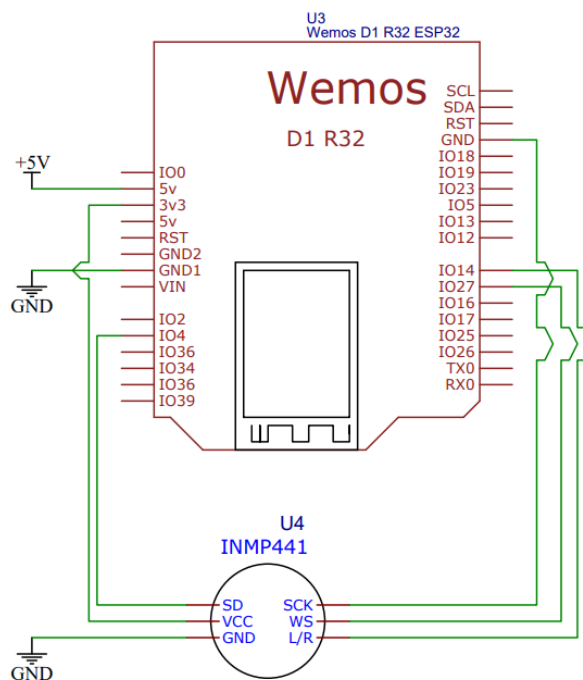
Pada Gambar 3 di atas, desain 3D menunjukkan adanya LCD, LED, dan Buzzer sebagai pengingat atau *output* dari respon alat yang telah dibuat. Alat akan bekerja sesuai dengan yang telah dirancang. Untuk sensor terdapat bawa sisi bawah box, guna untuk menangkap kebisingan di sekitar Perpustakaan Politeknik Negeri Batam.

2.5. Desain Elektrikal

Pada desain elektrikal, alat ini menggunakan sistem ESP-NOW. ESP-NOW merupakan protokol komunikasi nirkabel yang dikembangkan oleh perusahaan ESP32 dan ESP8266. Protokol komunikasi ini menciptakan komunikasi langsung, cepat dan hemat daya antara perangkat ESP tanpa menggunakan router atau akses Wi-Fi. ESP Now berkomunikasi langsung antar perangkat menggunakan alamat MAC. ESP-NOW mendukung komunikasi satu arah dan dua arah dan dapat mengirim data sampai 250 byte. Protokol ini sangat efisien untuk pengaplikasian yang memerlukan transmisi data yang kecil dan cepat seperti pembacaan sensor atau perintah kontrol [13], [14]. Desain elektrikal dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Rangkaian Elektrikal Receiver



Gambar 5. Rangkaian Elektrikal Sender

Terdapat dua rangkaian elektrikal pada alat ini, rangkaian elektrikal *Receiver* digunakan sebagai Box penerima data kebisingan. Pada *box receiver* ini terdapat 3 *output* yang akan merespon kebisingan tersebut, yaitu LED, *Buzzer*, dan LCD. Sedangkan rangkaian elektrikal *Sender* digunakan sebagai Box penangkap sumber kebisingan, hasil data kebisingan dari Box *Receiver* nanti akan dikirimkan dengan sistem ESP-NOW ke *Box Receiver*.

INMP441 mikrofon MEMS *omnidirectional* yang dikembangkan oleh Inven Sense, digunakan sebagai sensor untuk merekam suara [15]. INMP441 digunakan sebagai sensor yang akan menangkap kebisingan. INMP411 adalah jenis *Micro Electromechanical System* (MEMS) atau mikrofon omni-directional. Mikrofon omni-directional adalah mikrofon yang menerima gelombang suara dari segala arah dan suara yang diterima secara merata, hal ini menunjukkan sensitivitas yang sama dengan suara terhadap sumber suara disetiap posisi yang berbeda [16].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses pengujian dan pengambilan data untuk sistem pemantau kebisingan ini dilaksanakan secara komprehensif selama periode satu minggu penuh (7 hari) di lingkungan Perpustakaan Politeknik Negeri Batam. Durasi ini dipilih untuk memastikan sistem dapat diuji dalam berbagai kondisi operasional yang realistis, mencakup hari-hari dengan aktivitas pengunjung yang tinggi (hari kerja) maupun rendah (akhir pekan), serta pada waktu-waktu yang bervariasi dari pagi hingga sore hari. Pengujian jangka panjang ini bertujuan untuk memvalidasi keandalan, stabilitas, dan responsivitas sistem secara berkelanjutan, sekaligus untuk mengumpulkan data yang cukup representatif mengenai pola kebisingan di perpustakaan.

3.1. Kalibrasi Alat

Kalibrasi alat merupakan tahapan krusial untuk memastikan akurasi dan keandalan data yang dihasilkan oleh sistem pemantau kebisingan. Pada penelitian ini, proses kalibrasi dilakukan dengan metode interpolasi linier yang membandingkan hasil pengukuran sensor INMP441 dengan perangkat referensi standar, yaitu *Sound Level Meter* (SLM) yang telah terkalibrasi. Prosedur kalibrasi yang detail adalah sebagai berikut.

3.1.1. Persiapan Lingkungan dan Alat

Proses kalibrasi dilakukan di dalam ruangan yang relatif tenang untuk meminimalkan interferensi dari suara eksternal yang tidak diinginkan, di mana sensor INMP441 sebagai alat yang diuji dan *Sound Level Meter* sebagai alat referensi diletakkan berdampingan dengan jarak sangat dekat (± 10 cm) guna memastikan keduanya menangkap sumber suara yang sama. Selanjutnya, sumber suara dengan berbagai tingkat intensitas, misalnya dari 40 dB hingga 80 dB, dihasilkan secara konsisten menggunakan generator nada atau sumber suara stabil lainnya untuk pengujian.

3.1.2. Pengambilan Data Paralel

Untuk setiap tingkat intensitas suara yang dihasilkan, data pembacaan dari sensor INMP441 (dalam nilai mentah atau nilai dB awal) dan nilai desibel (dBA) dari *Sound Level Meter* (SLM) dicatat secara bersamaan. Proses pengambilan data ini kemudian diulang beberapa kali, misalnya sebanyak 10 kali untuk setiap tingkat intensitas, guna mendapatkan nilai rata-rata yang lebih akurat dan mengurangi potensi kesalahan acak dalam pengukuran.

3.1.3. Implementasi Interpolasi Linier

Data yang telah terkumpul kemudian dipetakan untuk menemukan hubungan matematis antara pembacaan sensor INMP441 (nilai x) dan pembacaan SLM (*Sound Level Meter*) (nilai y). Metode interpolasi linier digunakan dengan rumus:

$$y = y_1 + \frac{(x - x_1)(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}$$

Rumus ini diimplementasikan dalam program Arduino IDE. Selama operasional, setiap nilai mentah x dari sensor akan dikonversi menjadi nilai desibel y yang terkoreksi dan lebih akurat, sesuai dengan hasil pemetaan dari SLM (*Sound Level Meter*).

3.1.4. Verifikasi dan Penyesuaian

Setelah implementasi rumus kalibrasi, dilakukan pengujian verifikasi dengan menghasilkan kembali beberapa level suara acak. Hasil dari sensor yang telah dikalibrasi dibandingkan kembali dengan SLM untuk memastikan bahwa tingkat kesalahan (*error*) berada dalam batas yang dapat diterima yaitu di bawah 5%.

Dengan prosedur ini, setiap data kebisingan yang dibaca oleh sensor telah disesuaikan untuk mendekati nilai standar, sehingga meningkatkan validitas pengukuran sistem secara keseluruhan.

3.2. Pengujian Sensor INMP441

Pengujian Sensor INMP441 dilakukan dengan membandingkan antara hasil sensor INMP441 dengan *Sound Level Meter*. Dari pengukuran ini dapat dilihat hasil *error* pada hasil pembacaan sensor pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Uji Akurasi *Box Receiver* dengan Membandingkan Pembacaan Sensor Suara dan *Sound Level Meter* (SLM) serta Nilai MSE

<i>Box Receiver</i>		
Sensor Suara	<i>Sound Level Meter</i>	MSE
50	52	0.4
59	60	0.1
48	50	0.4
57	56	0.1
69	69	0
64	62	0.4
70	71	0.1
56	55	0.1
50	47	0.9
55	54	0.1
Total MSE <i>Box Receiver</i>		2.6

Berdasarkan hasil pengujian *box receiver* dapat dilihat pada Tabel 1, nilai MSE (*Mean Squared Error*) dihitung sebagai selisih kuadrat rata-rata antara data sensor suara (nilai prediksi) dengan nilai dari *Sound Level Meter* (nilai aktual) dengan total MSE (*Mean Squared Error*) sebesar 2.6 dB. Hasil tersebut menunjukkan tingkat akurasi yang baik karena sebagian besar hasil dari data memiliki nilai MSE (*Mean Squared Error*) yang rendah yaitu 0.1 dB dan nilai MSE (*Mean Squared Error*) tertinggi yaitu 0.4 dB. Hal ini menunjukkan bahwa sensor suara mampu mereplikasi data dari nilai dengan sangat baik. Alat ini juga menunjukkan bahwa sensor telah dikalibrasi dengan baik. Hasil dari sensor menunjukkan bahwa *Box Receiver* memiliki keandalan yang tinggi dengan nilai *Error* 2.6 dB.

Tabel 2. Hasil Uji Akurasi *Box Sender 1* dengan Membandingkan Pembacaan Sensor Suara dan *Sound Level Meter* (SLM) serta Nilai MSE

<i>Box Sender 1</i>		
Sensor Suara	<i>Sound Level Meter</i>	MSE
60	59	0.1
58	55	0.9
62	61	0.1
67	69	0.4
67	70	0.9
70	71	0.1
65	63	0.4
59	58	0.1
57	54	0.9
54	51	0.9
Total MSE <i>Box Sender 1</i>		4.8

Berdasarkan hasil pengujian *box sender 1* dapat dilihat pada Tabel 2, dengan total MSE (*Mean Squared Error*) sebesar 4,8 dB, dan menunjukkan adanya peningkatan kesalahan dibandingkan *Box Receiver*. Rata-rata sensor suara adalah 63,8 sementara rata-rata *Sound Level Meter* adalah 62,5, menghasilkan selisih rata-rata sebesar 1,3 dB. Perbedaan ini menandakan bahwa data dari sensor kurang presisi dibandingkan data aktual, dengan deviasi (nilai rata-rata kuadrat) yang lebih besar dibandingkan *box receiver*.

Distribusi MSE yang lebih beragam pada *Box Sender 1* kemungkinan disebabkan oleh faktor teknis seperti penurunan kualitas kalibrasi sensor maupun gangguan lingkungan. Sebagai contoh, perbedaan ini

mungkin disebabkan oleh posisi *Sender 1* yang lebih dekat dengan area lalu lintas pengunjung atau pintu, sehingga menangkap lebih banyak fluktuasi suara sekitar yang tidak tertangkap oleh *Sound Level Meter* pada titik pengukuran yang sama.

Tabel 3. Hasil Uji Akurasi *Box Sender 2* dengan Membandingkan Pembacaan Sensor Suara dan *Sound Level Meter* (SLM) serta Nilai MSE

<i>Box Sender 2</i>		
Sensor Suara	<i>Sound Level Meter</i>	MSE
60	62	0.4
60	58	0.4
69	69	0
54	52	0.4
63	60	0.9
70	70	0
63	61	0.4
50	52	0.4
71	71	0
53	52	0.1
Total MSE <i>Box Sender 2</i>		3

Berdasarkan hasil pengujian *box sender 2* dapat dilihat pada Tabel 3, menunjukkan bahwa sensor suara memiliki akurasi yang cukup baik dengan total MSE (*Mean Squared Error*) sebesar 3 dB. Sebagian besar pengukuran memiliki nilai kesalahan yang kecil (0 – 0,4) dan beberapa juga menunjukkan hasil yang sama dengan *Sound Level Meter*. Hal tersebut menunjukkan kemampuan sensor dalam mengukur tingkat kebisingan dengan keandalan yang tinggi.

Meskipun terdapat deviasi tertinggi sebesar 0,9 pada pengukuran ke-4, nilai ini masih dalam batas yang dapat diterima untuk aplikasi yang standar. Secara umum, performa sensor ini sudah cukup stabil dan menunjukkan potensi untuk digunakan pada sistem yang membutuhkan pengukuran tingkat kebisingan

3.2.1. Analisis Faktor yang Mempengaruhi Variasi MSE Antar Lokasi

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3 terlihat adanya variasi nilai total MSE di antara unit-unit sensor: *Box Receiver* (2.6 dB), *Box Sender 1* (4.8 dB), dan *Box Sender 2* (3.0 dB). Perbedaan ini menunjukkan bahwa meskipun semua sensor telah dikalibrasi, performanya tidak identik di setiap lokasi. Beberapa faktor yang berpotensi mempengaruhi variasi MSE ini antara lain:

- Toleransi Manufaktur Sensor**
Meskipun menggunakan model sensor yang sama (INMP441), setiap unit sensor secara inheren memiliki sedikit perbedaan sensitivitas dan respons frekuensi akibat proses manufaktur. Variasi mikro ini dapat menyebabkan perbedaan kecil dalam pembacaan data mentah, yang kemudian diperkuat saat menghitung MSE.
- Kondisi Lingkungan Mikro Lokal**
Setiap titik penempatan sensor (*Receiver*, *Sender 1*, *Sender 2*) memiliki karakteristik akustik yang unik. Faktor-faktor seperti kedekatan dengan sumber getaran (misalnya, langkah kaki), aliran udara dari pendingin ruangan, atau pantulan suara dari dinding dan perabotan dapat mengenalkan noise spesifik pada satu sensor tetapi tidak pada sensor lainnya. *Box Sender 1*, yang menunjukkan MSE tertinggi, kemungkinan ditempatkan di lokasi dengan gangguan lingkungan yang lebih kompleks dibandingkan dua unit lainnya.
- Stabilitas Catu Daya dan Interferensi Elektromagnetik**
Kualitas catu daya ke mikrokontroler dan sensor dapat mempengaruhi stabilitas pembacaan. Fluktuasi tegangan atau noise pada jalur catu daya salah satu unit dapat menyebabkan pembacaan yang kurang stabil dan MSE yang lebih tinggi. Selain itu, interferensi dari perangkat elektronik lain di sekitar dapat mempengaruhi sirkuit, terutama pada komunikasi nirkabel ESP-NOW.
- Proses Kalibrasi**
Meskipun prosedur kalibrasi linier telah diterapkan, akurasi proses ini sangat bergantung pada kondisi saat kalibrasi dilakukan. Adanya suara latar yang tidak terduga selama kalibrasi salah satu unit dapat sedikit menggeser kurva kalibrasi dan mengakibatkan kesalahan sistematis yang lebih tinggi (MSE) selama pengujian.

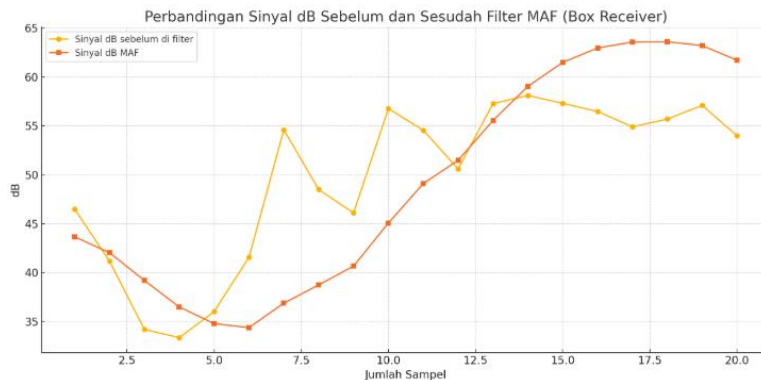
Memahami faktor-faktor ini penting untuk penempatan sistem di masa depan, di mana pemilihan lokasi yang terlindung dari gangguan fisik dan elektronik menjadi krusial untuk mencapai akurasi maksimal.

3.3. Pengujian Sinyal

Data dan perhitungan pengujian sinyal pada produk penelitian dapat kita lihat di bawah ini.

Tabel 4. Perbandingan Sinyal dB Sebelum dan Sesudah Aplikasi Filter MAF pada *Box Receiver* Beserta Nilai MSE

Box Receiver		
Sinyal dB sebelum di filter	Sinyal dB MAF	MSE
46.49	43.66	0.400445
41.16	42.03	0.037845
34.18	39.19	1.255005
33.34	36.48	0.49298
36.01	34.78	0.075645
41.55	34.36	2.584805
54.6	36.87	15.717645
48.49	38.73	4.76288
46.1	40.66	1.47968
56.77	45.06	6.856205
54.56	49.1	1.49058
50.6	51.48	0.03872
57.28	55.55	0.149645
58.11	59.04	0.043245
57.31	61.49	0.87362
56.48	62.97	2.106005
54.9	63.58	3.76712
55.7	63.61	3.128405
57.1	63.22	1.87272
54	61.72	2.97992



Gambar 6. Grafik Perbandingan Fluktuasi Sinyal Mentah (Sebelum Filter) dengan Sinyal yang Telah Dihaluskan oleh MAF (Sesudah Filter) pada *Box Receiver*

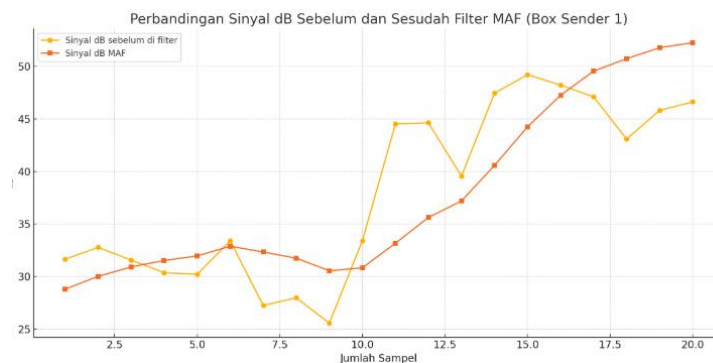
Data pengujian dari *Box Receiver*, yang disajikan pada Tabel 4 dan grafiknya, menampilkan sinyal mentah dengan tingkat volatilitas dan noise kejut yang paling ekstrem di antara semua unit yang diuji. Garis biru ("Sinyal dB sebelum di filter") menunjukkan fluktuasi yang sangat liar, dengan puncak-puncak yang tajam dan lembah yang dalam silih berganti secara cepat. Pola ini mencerminkan lingkungan akustik yang sangat tidak stabil, di mana suara-suara mendadak dan keras sering terjadi. Sinyal seperti ini merupakan tantangan terbesar bagi sistem pemantauan, karena tanpa pemrosesan yang tepat, data ini hampir tidak dapat diandalkan untuk analisis tren kebisingan.

Meskipun dihadapkan pada sinyal yang sangat bergejolak, penerapan *Moving Average Filter* (MAF) secara dramatis menunjukkan kemampuannya dalam menghaluskan data. Kurva oranye ("Sinyal dB MAF") berhasil mengubah garis sinyal yang kacau menjadi sebuah tren naik yang jelas dan dapat diinterpretasikan. Filter ini secara efektif meredam semua gangguan impulsif dan menampilkan gambaran tingkat kebisingan rata-rata yang mendasarinya. Bukti visual yang sangat kontras ini memberikan dukungan terkuat untuk menolak Hipotesis Nol (H_0) dan dengan yakin menerima Hipotesis Alternatif (H_1), yang menyatakan bahwa filter MAF secara signifikan mengurangi variabilitas dan error sinyal.

Analisis kuantitatif pada kolom *Mean Squared Error* (MSE) di Tabel 4 memperkuat kesimpulan ini. Terdapat beberapa nilai MSE yang sangat tinggi, seperti 15.71765 dan 6.856205. Nilai-nilai ekstrem ini tidak menandakan kegagalan filter, melainkan justru menunjukkan besarnya deviasi antara sinyal mentah yang liar dan sinyal halus yang dihasilkan. Ini membuktikan seberapa keras filter bekerja untuk meredam noise kejut yang masif. Meskipun menghadapi tantangan terberat, filter tetap berhasil mengekstrak tren yang bermakna, menegaskan bahwa MAF adalah komponen krusial untuk membuat sistem pemantauan menjadi andal dan cerdas, mampu membedakan antara gangguan sesaat yang ekstrem dan pola kebisingan yang sebenarnya.

Tabel 5. Perbandingan Sinyal dB Sebelum dan Sesudah Aplikasi Filter MAF pada *Box Sender 1* Beserta Nilai MSE

<i>Box Sender 1</i>		
Sinyal dB sebelum di filter	Sinyal dB MAF	MSE
31.65	28.79	0.40898
32.77	30.01	0.38088
31.56	30.91	0.021125
30.36	31.52	0.06728
30.21	31.96	0.153125
33.39	32.88	0.013005
27.24	32.33	1.295405
27.97	31.74	0.710645
25.56	30.54	1.24002
33.4	30.83	0.330245
44.52	33.16	6.45248
44.63	35.62	4.059005
39.55	37.19	0.27848
47.45	40.57	2.36672
49.21	44.24	1.235045
48.22	47.25	0.047045
47.1	49.55	0.300125
43.08	50.73	2.926125
45.81	51.78	1.782045
46.62	52.25	1.584845



Gambar 7. Grafik Perbandingan Fluktuasi Sinyal Mentah (Sebelum Filter) dengan Sinyal yang Telah Dihaluskan oleh MAF (Sesudah Filter) pada *Box Sender 1*

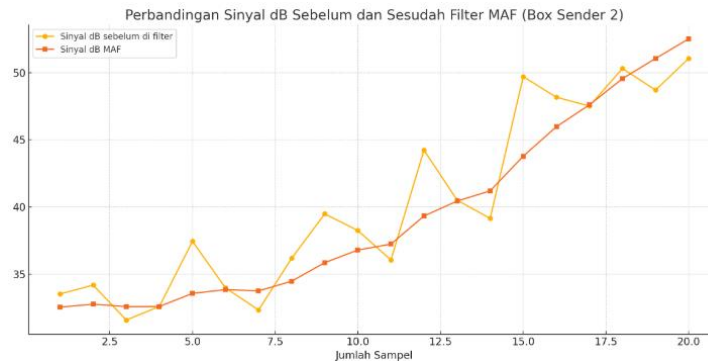
Data pengujian dari *Box Sender 1*, yang disajikan pada Tabel 5 dan Gambar 7, menunjukkan sinyal mentah dengan tingkat volatilitas yang sangat tinggi. Garis biru ("Sinyal dB sebelum di filter") menampilkan fluktuasi yang ekstrem, dengan beberapa puncak yang tajam dan lembah yang dalam, seperti yang terlihat jelas pada titik data ke-9 dan ke-11. Dalam konteks perpustakaan, fluktuasi drastis ini dapat diartikan sebagai cerminan dari suara kejut atau *impulsive noise*, misalnya suara buku yang jatuh, batuk yang keras, atau pergeseran kursi secara tiba-tiba, yang sangat kontras dengan kebisingan ambien yang lebih stabil. Volatilitas tinggi semacam ini merupakan tantangan terbesar bagi sistem pemantauan karena dapat memicu alarm palsu atau interpretasi data yang salah.

Penerapan *Moving Average Filter (MAF)* menunjukkan efektivitas yang signifikan dalam mengatasi sinyal yang tidak stabil ini. Seperti yang digambarkan oleh kurva oranye ("Sinyal dB MAF"), filter berhasil meredam puncak dan lembah yang ekstrem, menghasilkan garis tren yang jauh lebih halus dan representatif terhadap kondisi kebisingan rata-rata. Bukti visual ini dengan kuat mendukung penolakan Hipotesis Nol (H_0) dan penerimaan Hipotesis Alternatif (H_1), yang menegaskan bahwa MAF secara statistik signifikan dalam mengurangi variabilitas sinyal dan mereduksi noise.

Secara kuantitatif, analisis kolom *Mean Squared Error (MSE)* pada Tabel 5 memberikan wawasan tambahan. Terdapat beberapa nilai MSE yang relatif tinggi (misalnya, 6.45248, 4.059005, 2.926125). Nilai-nilai ini bertepatan dengan titik-titik di mana sinyal mentah mengalami fluktuasi paling ekstrem. Tingginya nilai MSE di titik-titik ini justru menunjukkan seberapa besar kerja filter dalam meredam noise kejut. Meskipun ada deviasi besar, secara keseluruhan filter tetap berhasil menjaga akurasi tren data. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa MAF secara efektif membuat sistem menjadi lebih andal, memungkinkannya membedakan antara gangguan sesaat yang drastis dan tingkat kebisingan ambien yang sebenarnya.

Tabel 6. Perbandingan Sinyal dB Sebelum dan Sesudah Aplikasi Filter MAF pada *Box Sender 2* Beserta Nilai MSE

<i>Box Sender 2</i>		
Sinyal dB sebelum di filter	Sinyal dB MAF	MSE
33.53	32.55	0.04802
34.19	32.77	0.10082
31.59	32.59	0.05
32.6	32.6	0
37.45	33.57	0.75272
33.98	33.85	0.000845
32.34	33.76	0.10082
36.19	34.48	0.146205
39.49	35.86	0.658845
38.25	36.8	0.105125
36.06	37.24	0.06962
44.23	39.33	1.2005
40.52	40.44	0.00032
39.15	41.2	0.210125
49.7	43.78	1.75232
48.17	45.97	0.242
47.51	47.6	0.000405
50.31	49.55	0.02888
48.7	51.05	0.276125
51.05	52.51	0.10658



Gambar 8. Grafik Perbandingan Fluktuasi Sinyal Mentah (Sebelum Filter) dengan Sinyal yang Telah Dihaluskan oleh MAF (Sesudah Filter) pada *Box Sender 2*

Data pengujian dari *Box Sender 2*, yang disajikan pada Tabel 6 dan grafiknya, menunjukkan pola sinyal mentah yang lebih konsisten dibandingkan unit lain, namun tetap memiliki fluktuasi yang signifikan. Garis biru ("Sinyal dB sebelum di filter") menampilkan serangkaian puncak dan lembah yang tidak terlalu ekstrem. Dalam konteks perpustakaan, fluktuasi ini dapat diasosiasikan dengan suara ambien yang umum terjadi, seperti gumaman percakapan dari kejauhan, suara langkah kaki, atau helaan halaman buku. Meskipun gangguan ini tidak seekstrem suara kejut, volatilitasnya tetap berpotensi menyebabkan ketidakstabilan pada sistem pemantauan jika tidak ditangani.

Penerapan *Moving Average Filter (MAF)* sekali lagi membuktikan efektivitasnya dalam menstabilkan sinyal. Kurva oranye ("Sinyal dB MAF") tampak jauh lebih mulus, berhasil meratakan fluktuasi minor dan menghasilkan representasi tren kebisingan yang lebih stabil dan akurat. Bukti visual yang jelas ini memberikan landasan kuat untuk menolak Hipotesis Nol (H_0) yang menyatakan filter tidak efektif, dan menerima Hipotesis Alternatif (H_1) yang menegaskan bahwa MAF secara signifikan menghaluskan sinyal.

Dukungan kuantitatif untuk kesimpulan ini ditemukan pada kolom *Mean Squared Error (MSE)* di Tabel 6. Nilai MSE yang tercatat secara konsisten sangat rendah, dengan banyak di antaranya berada di bawah 0.2 dan bahkan satu titik mencapai nol. Nilai MSE yang rendah ini menandakan bahwa sinyal yang telah difilter mampu mengikuti data asli dengan akurasi yang sangat tinggi sambil meredam noise yang tidak relevan. Hasil ini menegaskan bahwa MAF secara efektif membuat sistem menjadi lebih "cerdas", memungkinkannya untuk membedakan antara kebisingan latar belakang yang normal dan gangguan suara yang benar-benar signifikan.

3.4. Pengujian Sistem

Untuk menguji seberapa baik alat ini bekerja, apakah sudah berfungsi sesuai dengan fungsinya atau tidak. Penulis menuji sistem dari sampel yang akan diuji. Berikut adalah tabel pengujiannya.

Tabel 7. Uji Fungsional Sistem dalam Merespons Berbagai Jenis Sumber Suara dengan *Output ON/OFF*

INPUT	Hasil Pengujian (dB)	OUTPUT (ON/OFF)		
		LED	LCD	BUZZER
Sepi/Tenang	38	OFF	OFF	OFF
Batuk/Berdehem	59	ON	ON	ON
Suara Tertawa (1 orang)	56	ON	ON	ON
Suara Tertawa (2 orang)	65	ON	ON	ON
Suara Tertawa (3 orang)	69	ON	ON	ON
Tepuk meja pelan	65	ON	ON	ON
Tepuk meja kuat	80	ON	ON	ON
Menggeser 1 kursi	46	OFF	OFF	OFF
Menggeser 2 kursi	51	OFF	OFF	OFF
Menggeser 3 kursi	61	ON	ON	ON
1 Buku terjatuh	75	ON	ON	ON
2 Buku terjatuh	84	ON	ON	ON
3 Buku terjatuh	100	ON	ON	ON
Mengobrol 2 orang	55	ON	ON	ON
Mengobrol 2 orang	58	ON	ON	ON

Sistem pada Tabel 7 menunjukkan bahwa alat ini telah berfungsi sesuai dengan fungsinya. Sistem dapat mendeteksi suara berdasarkan batas toleransi yang ditentukan, yaitu 55 dB. Suara yang memiliki intensitas di bawah batas tersebut tidak mengaktifkan ketiga output (LED, LCD, dan *buzzer*), sedangkan suara yang melebihi batas toleransi langsung mengaktifkan ketiganya. Hal ini menunjukkan bahwa pendeteksian suara yang diterapkan pada alat berjalan dengan baik dan responsif terhadap perubahan intensitas suara.

Pengujian ini juga membuktikan konsistensi sistem dalam membedakan kondisi suara yang relevan dan tidak relevan. Ketika intensitas suara melebihi ambang batas, ketiga *output* langsung aktif secara bersamaan, sesuai dengan desain sistem. Sebaliknya, pada suara dengan intensitas di bawah ambang batas, sistem menjaga *output* tetap tidak aktif. Dengan hasil pengujian ini, dapat disimpulkan bahwa alat telah memenuhi standar fungsionalnya, dan kinerjanya dapat diandalkan untuk mendeteksi dan merespons suara berdasarkan intensitas yang telah ditetapkan.

3.5. Analisis Konsumsi Daya

Analisis konsumsi daya merupakan faktor krusial dalam perancangan perangkat IoT nirkabel, terutama untuk unit yang potensial dioperasikan menggunakan sumber daya baterai. Oleh karena itu, dilakukan estimasi konsumsi daya pada unit *Sender* dan *Receiver*.

Unit Pengirim (*Sender*), yang terdiri dari mikrokontroler Wemos D1 R32 dan sensor INMP441, dirancang untuk selalu aktif melakukan akuisisi data suara dan mengirimkannya secara periodik menggunakan protokol ESP-NOW. Meskipun konsumsi daya mengalami puncak sesaat hingga 150-200 mA selama transmisi nirkabel, konsumsi daya rata-ratanya tetap sangat efisien. Efisiensi ini memastikan bahwa perangkat beroperasi dengan suhu yang stabil di dalam selungkupnya, yang krusial untuk menjaga keandalan komponen dalam jangka panjang, serta dapat dioperasikan dengan andal hanya menggunakan catu daya USB standar.

Unit Penerima (*Receiver*) berfungsi sebagai pusat notifikasi yang selalu siaga untuk menerima data. Dalam kondisi siaga, konsumsi daya utamanya berasal dari mikrokontroler dan lampu latar (*backlight*) pada modul LCD, yang secara keseluruhan diperkirakan di bawah 1 Watt. Konsumsi daya akan meningkat secara temporer hanya ketika level kebisingan melampaui ambang batas, yang memicu aktivasi output notifikasi seperti LED dan *Buzzer*. Dengan demikian, unit ini terbukti sangat efisien dari segi energi dan praktis untuk ditempatkan di lokasi mana pun yang memiliki akses ke stop kontak tanpa menjadi beban listrik yang signifikan.

Secara keseluruhan, arsitektur sistem ini terbukti sangat efisien dari segi energi. Dengan total konsumsi daya yang rendah untuk kedua unit, sistem ini tidak menjadi beban biaya listrik yang signifikan dan dapat dioperasikan dengan andal menggunakan adaptor daya USB standar (misalnya 5V, 1A). Efisiensi ini juga menegaskan bahwa desain perangkat praktis dan mudah untuk diimplementasikan di berbagai lokasi di dalam perpustakaan tanpa memerlukan catu daya khusus.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem pemantau kebisingan telah berhasil direalisasikan dan berfungsi sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Alat ini terbukti mampu mendeteksi tingkat kebisingan secara andal dalam rentang 38 dB hingga 100 dB. Sesuai dengan rancangan, sistem juga berhasil mengaktifkan output secara otomatis ketika intensitas suara melampaui ambang batas standar, yaitu 55 dB. Keberhasilan dan keandalan sistem ini didukung oleh dua faktor utama. Pertama, akurasi data yang tinggi berhasil dicapai berkat implementasi *Moving Average Filter (MAF)* yang efektif mereduksi noise dan fluktuasi sinyal yang tidak diinginkan. Kedua, penggunaan beberapa sensor suara yang ditempatkan di titik-titik strategis memungkinkan proses pemantauan menjadi lebih komprehensif dan akurat. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya relevan untuk perpustakaan, tetapi juga memiliki potensi besar untuk diadaptasi di lingkungan akademik lain yang sensitif terhadap suara, seperti ruang kelas dan laboratorium, guna menciptakan ekosistem belajar yang lebih optimal.

Pengembangan lebih lanjut dari sistem ini dapat dilakukan melalui beberapa peningkatan strategis. Dari sisi algoritma, disarankan untuk melakukan eksplorasi dan perbandingan kinerja dengan menerapkan filter alternatif. Walaupun *Moving Average Filter (MAF)* efektif, ia memiliki kelemahan berupa *lag* (keterlambatan). Penerapan Filter Kalman yang bersifat prediktif berpotensi memberikan estimasi level suara yang lebih akurat dalam lingkungan dinamis, sementara Filter Butterworth dapat lebih unggul dalam menghilangkan kebisingan pada frekuensi konstan. Untuk membawa sistem ke tingkat kecerdasan yang lebih tinggi, sangat disarankan untuk mengimplementasikan algoritma klasifikasi jenis kebisingan menggunakan *Machine Learning (ML)*. Dengan melatih model pada dataset suara yang relevan (misalnya, suara percakapan, batuk, kursi bergeser), sistem akan mampu memberikan respons kontekstual, tidak hanya berdasarkan intensitas suara, tetapi juga berdasarkan sumbernya.

Sejalan dengan peningkatan algoritma, keandalan dan jangkauan sistem perlu diperluas. Validasi sistem perlu diuji secara komprehensif pada berbagai kondisi lingkungan nyata, tidak hanya di perpustakaan tetapi juga di domain lain seperti ruang kelas dan laboratorium. Pengujian ini harus mencakup lingkungan dengan kebisingan impulsif (seperti kafe atau lobi) untuk mengevaluasi kecepatan respons, serta lingkungan dengan kebisingan latar yang tinggi dan konstan (seperti ruang server) untuk menguji kemampuannya membedakan sinyal relevan dari ambient noise. Sebagai langkah final untuk mewujudkan sistem pemantauan yang terpadu, disarankan untuk mengintegrasikan perangkat ini dengan Sistem Manajemen Gedung (*Building Management System - BMS*) melalui protokol standar seperti MQTT atau API. Integrasi ini akan memungkinkan pemantauan terpusat pada satu dashboard dan memfasilitasi notifikasi atau tindakan otomatis yang lebih efisien di seluruh gedung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Tingkat, P. Kampus, S. Kuantitatif, and B. Pengukuran, "Evaluasi Tingkat Kebisingan di Perpustakaan Kampus: Studi Kuantitatif Berdasarkan Pengukuran dan Analisis Akustik," vol. 12, 2025.
- [2] N. Ximenes, W. Maubana, and H. Lipikun, "Pengukuran Tingkat Kebisingan di Lingkungan Dinas Kearsipan dan Perpustakaan Provinsi Nusa Tenggara Timur," *Magn. Res. J. Phys. It's Appl.*, vol. 2, no. 1, pp. 124–129, 2022.
- [3] A. Atina, J. Jumingin, W. Rahmadani, and I. Sukria, "Analisis Tingkat Kebisingan di Lingkungan Universitas PGRI Palembang," *Sainmatika J. Ilm. Mat. dan Ilmu Pengetah. Alam*, vol. 17, no. 2, p. 126, 2020, doi: 10.31851/sainmatika.v17i2.5052.
- [4] B. Berglund, T. Lindvall, and D. Schwela, "Guidelines for Community Noise. World Health Organization," 1995. [Online]. Available: <http://multi-science.metapress.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.1260/0957456001497535>
- [5] I. Komang Gede Agus Diva Wiguna, I. Gusti Ngurah Priambadi, and I. Made Dwi Budiana Penindra, "Pengaruh Kebisingan terhadap Konsentrasi Belajar dengan Penerapan Fitur Active Noise Cancelling pada Siswa Privat CV. Prima Aksara," *J. Compr. Sci.*, vol. 4, no. 2, pp. 765–779, 2025, doi: 10.59188/jcs.v4i2.3045.
- [6] I. Farhan, K. G. F. Silaban, M. H. P. A. Lubis, R. J. Tarigan, J. P. Sinaga, and H. O. Tampubolon, "Analisis Faktor Kebisingan Dalam Meningkatkan Kenyamanan Di Masjid At-Tawwabin," *GEWANG Gerbang Wacana dan Ranc. Arsit.*, vol. 7, no. 1, pp. 54–59, 2025, doi: 10.35508/gewang.v7i1.21341.
- [7] Budi, T. Kesuma Wardani, A. Sofiana Nasution, M. Ibnu, Y. Nur Diamsyah, and M. Harin Hanafi, "Analisis Kebisingan Pada Ruang Baca Badan Perpustakaan Di Smp It Al Hijrah 2," *J. Community Devation*, vol. 1, no. 2, pp. 256–264, 2024, [Online]. Available: <https://jurnal.asrypersadaquality.com/index.php/community>
- [8] Yourman Doni Siddik, Akim Manaor Hara Pardede, and Husnul Kahir, "Rancang Bangun Alat Deteksi Kebisingan Perpustakaan dengan Indikator Peringatan Berbasis Internet Of Things (IOT)," *Repeater Publ. Tek. Inform. dan Jar.*, vol. 2, no. 4, pp. 254–265, 2024, doi: 10.62951/repeater.v2i4.255.
- [9] M. Anachkova, S. Domazetovska, Z. Petreski, and V. Gavriloski, "Design of low-cost wireless noise monitoring sensor unit based on IoT concept," *J. Vibroengineering*, vol. 23, no. 4, pp. 1056–1064, 2021, doi: 10.21595/jve.2021.21709.
- [10] F. Baskoro, B. I. G. P. Asto, M. Rohman, F. D. A. Soeadyfa, and A. P. Nurdiansyah, "Impact of Sample Size Variation on Moving Average Filter Performance for Stability and Accuracy in Ultrasonic Sensor Measurements," *TEM J.*, vol. 14, no. 2, pp. 1681–1688, 2025, doi: 10.18421/TEM142-65.
- [11] D. R. Tisna and T. Maharani, "Penerapan Digital Moving Average Filter pada Sensor Dissolved Oksigen untuk Mengukur Kualitas Air," *J. Electr. Electron. Mech. Inform. Soc. Appl. Sci.*, vol. 1, no. 2, pp. 32–40, 2022, doi: 10.58991/eemisas.v1i2.13.
- [12] A. S. Fiddariani and B. Sumanto, "Studi Penerapan Filter Digital pada Sistem Pemantau Parameter di Kolam Ikan," *J. List. Instrumentasi, dan Elektron. Terap.*, vol. 5, no. 1, p. 30, 2024, doi: 10.22146/juliet.v5i1.87377.
- [13] S. B. Lenin, R. Priyadharshni, S. Mohanram, and S. A. Kumar, "Wireless Coal Mine Monitoring System based on ESP-NOW Protocol for Real-Time Data Acquisition and Analysis," *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, vol. 17, no. 2, pp. 16–22, 2024, doi: 10.25103/jestr.172.03.
- [14] R. Pasic, I. Kuzmanov, and K. Atanasovski, "ESP-NOW communication protocol with ESP32," *Izzivi prihodnost*, vol. 6, no. 1, pp. 53–60, 2021, doi: 10.37886/ip.2021.019.
- [15] W. Shin, "Implementation of Cough Detection System Using IoT Sensor in Respirator," *Int. J. Adv. Smart Converg.*, vol. 9, no. 4, pp. 132–138, 2020, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.7236/IJASC.2020.9.4.132>
- [16] M. A. Shah, I. A. Shah, D. G. Lee, and S. Hur, "Design approaches of MEMS microphones for enhanced performance," *J. Sensors*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/9294528.