DESAIN SISTEM PENDETEKSI NOISE SIGNAL BERBASIS MIKROKONTROLER DENGAN INTEGRASI IOT DAN LOGGING DATA UNTUK PEMANTAUAN KEBISINGAN DI RUANG PUBLIK

Cornelius Dolfiano Legang*, Nixson Jeheskial Meok, Risal Mantofani Arpin, Nur Hijriah Zubaedah Narang

Program Studi Pendidikan Teknik Elektro, Universitas Nusa Cendana, Kupang, Indonesia
Email: *corneliuslegang@gmail,com, nixson.meok@staf.undana.ac.id, risal.arpin@staf.undana.ac.id, nur_narang@staf.undana.ac.id

Histori Artikel:
Diterima Jul 20, 2026
Direvisi Okt 02, 2026
Disetujui Okt 29, 2026

ABSTRACT

This study aims to design and develop a microcontroller-based noise signal detection system integrated with the Internet of Things (IoT) and a data logging feature for real-time noise level monitoring in public spaces. The problem addressed is that noise monitoring is still commonly performed manually using conventional measuring instruments, making it inefficient for continuous data collection and difficult to conduct remote monitoring. The research employed the Research and Development (R&D) method, consisting of hardware design, software development, IoT system integration, system testing, and data analysis. The proposed system utilizes an ESP32 microcontroller, a MAX4466 sound sensor, Blynk and ThingSpeak as monitoring platforms, and Firebase as the cloud database for data storage, with a website serving as the monitoring interface. The results indicate that the developed system is capable of detecting changes in sound signal amplitude, converting them into noise level values expressed in decibels (dB), transmitting data in real time, and periodically storing measurement data through the data logging feature.

Keywords: *Noise Signal; ESP32; MAX4466; IoT; Data Logging*

This is an open access article under the CC BY-SA License

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem pendeteksi noise signal berbasis mikrokontroler dengan integrasi Internet of Things (IoT) dan fitur logging data untuk pemantauan tingkat kebisingan di ruang publik secara real-time. Permasalahan yang dihadapi adalah proses pemantauan kebisingan yang masih dilakukan secara manual menggunakan alat ukur konvensional, sehingga kurang efisien dalam memperoleh data secara berkelanjutan dan sulit untuk melakukan pemantauan jarak jauh. Metode yang digunakan adalah Research and Development (R&D) dengan tahapan perancangan perangkat keras, pengembangan perangkat lunak, integrasi sistem IoT, pengujian, dan analisis data. Sistem yang dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor suara MAX4466, Blynk dan ThingSpeak sebagai media tampilan lokal, serta Firebase sebagai media penyimpanan data dan website sebagai antarmuka pemantauan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi perubahan amplitudo sinyal suara, mengonversinya menjadi nilai kebisingan dalam satuan desibel (dB), mengirimkan data secara real-time, serta menyimpan data pengukuran secara berkala melalui fitur logging.

Kata Kunci*: Kebisingan; ESP32; MAX4466; IoT; Logging Data*

Penulis Korespondensi:
Cornelius Dolfiano Legang,
Prodi Pendidikan Teknik Elektro,
Universitas Nusa Cendana,
Jl. Adisucipto Penfui, Kupang.
Email: corneliuslegang@gmail.com

PENDAHULUAN

Perkembangan pesat teknologi informasi dan laju urbanisasi modern membawa perubahan signifikan terhadap kualitas hidup masyarakat perkotaan, salah satunya terkait intensitas kebisingan di ruang publik [1]. Aktivitas komersial di area terbuka seperti taman kota, jalan arteri, area transportasi publik, hingga kawasan institusi pendidikan kian meningkat seiring dengan mobilitas kendaraan bermotor dan pertumbuhan populasi yang masif. Kebisingan lingkungan yang berlebihan atau *noise pollution* kini disepakati sebagai salah satu ancaman serius bagi kesehatan masyarakat. Secara medis, pemaparan noise signal yang melebihi ambang batas secara terus-menerus dapat memicu gangguan fungsi pendengaran, peningkatan kadar stres psikologis, gangguan pola tidur, hingga penurunan konsentrasi belajar yang kronis [1, 2].

Tingkat kebisingan di Indonesia secara hukum telah diatur melalui Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 48 Tahun 1996, yang menggariskan batasan maksimum kebisingan sesuai peruntukan kawasan, seperti 55 dBA untuk area pemukiman dan sekolah, serta 60 dBA untuk area rekreasi dan ruang terbuka hijau[3]. Kendati peraturan ini telah lama diterbitkan, penegakan serta pemantauannya di lapangan masih sangat lemah. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan logistik dan metode pengukuran kebisingan konvensional yang ada di dinas-dinas lingkungan hidup daerah. Pengukuran kebisingan umum masih dilakukan secara manual menggunakan alat ukur *Sound Level Meter* (SLM) genggam portabel [4]. Petugas penguji harus datangi lokasi, melakukan pengukuran langsung dalam rentang waktu singkat, lalu merekam hasilnya secara manual. Prosedur semacam ini sangat tidak efisien, berbiaya tinggi, rentan terhadap bias penguji, dan tidak mampu menghasilkan data historis (logging) yang berkesinambungan serta tidak mendukung pemantauan jarak jauh (*remote monitoring*) secara real-time [4, 5].

Guna mengatasi keterbatasan monitoring fisik tersebut, riset-riset mutakhir mulai memanfaatkan konsep jaringan sensor akustik nirkabel atau *Wireless Acoustic Sensor Networks* (WASN) terintegrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) [6], [7]. WASN berbasis mikrokontroler berbiaya rendah (*low-cost microcontroller*) mampu diletakkan di berbagai sudut ruang publik perkotaan untuk merekam telemetri suara secara berkelanjutan dan mengirimkannya ke pangkalan data awan (*cloud platform*) [8]. Beberapa penelitian terdahulu telah menjajaki pemanfaatan mikrokontroler seperti Arduino maupun modul Wi-Fi ESP8266 untuk mengirimkan data sensor suara ke antarmuka pengguna [9, 10]. Namun demikian, sebagian besar purwarupa pemantau kebisingan tersebut masih terbatas pada visualisasi data instan (*real-time stream)* saja, tanpa didukung oleh sistem logging database yang terstruktur serta pengolahan signal analitik yang andal pada tingkat node sensor [11]. Node pemantau sering kali menghasilkan penyimpangan pembacaan (*error rate*) yang tinggi karena tidak melewati proses kalibrasi matematis bertahap terhadap standar industri SLM [12].

Kebaruan yang ditawarkan penelitian ini terletak pada pengembangan desain sistem pendeteksi noise signal berbasis mikrokontroler ESP32-WROOM-32 yang diintegrasikan secara komprehensif pada *multi-platform IoT* (Blynk dan ThingSpeak) serta dilengkapi arsitektur logging data ganda (*dual-logging*) lokal menggunakan kartu SD dan *cloud database Firebase* [12, 13]. Melalui pengintegrasian sensor suara analog ultra-sensitif MAX4466 dan pemanfaatan algoritma konversi Root Mean Square (RMS) sinyal amplitudo terkalibrasi, sistem ini tidak hanya mampu menyajikan visualisasi data secara real-time, tetapi juga menjamin akurasi dan ketersediaan data historis jangka panjang untuk analisis tren akustik perkotaan [13-15]. Tujuan utama penelitian ini adalah merancang, mengkalibrasi, serta menguji keandalan fungsional dan akurasi sistem pendeteksi kebisingan ini pada tiga lokasi ruang publik riil dengan karakteristik kebisingan bervariasi di Kota Kupang, Nusa Tenggara Timur, yaitu Taman Nostalgia, area edukasi (Lingkungan Pendidikan**)** di SMK Negeri 2 Kupang, dan lingkungan terkontrol Laboratorium Pendidikan Teknik Elektro Universitas Nusa Cendana.

METODE PENELITIAN

Metodologi yang diterapkan dalam penelitian ini adalah metode Penelitian dan Pengembangan atau Research and Development (R&D) dengan

memodifikasi model prosedural pengembangan sistem tertanam. Alur penelitian secara sistematis terdiri dari lima tahapan utama: analisis potensi masalah dan kebutuhan sistem, perancangan perangkat keras (hardware) dan lunak (software), integrasi fungsional IoT dan logging data, validasi ahli desain, serta uji coba pemakaian lapangan terkalibrasi.

2.1 Perancangan Perangkat Keras

Arsitektur perangkat keras sistem berpusat pada SoC (System on Chip) ESP32-WROOM-32 yang memiliki modul Wi-Fi terintegrasi dan unit ADC (Analog to Digital Converter) 12-bit untuk memproses sinyal analog dari sensor suara. Sensor akustik yang dipilih adalah modul mikrofon elektret MAX4466 yang telah dilengkapi penguat operasional (op-amp) internal dengan performa tinggi untuk menekan derau sirkuit (power supply noise rejection). Sensor MAX4466 ini dihubungkan langsung ke pin analog ADC ESP32. Sistem ini juga dilengkapi dengan modul kartu SD SPI untuk fungsi logging data lokal secara offline apabila jaringan internet tidak stabil, serta unit catu daya teregulasi 5VDC.

2.2 Pengembangan Perangkat Lunak dan Kalibrasi

Pemrograman mikrokontroler dilakukan menggunakan lingkungan Arduino IDE. Logika program didesain untuk melakukan pencuplikan (sampling) sinyal analog suara pada frekuensi tinggi selama jendela waktu 50 ms. Nilai pembacaan mentah ADC dikonversi menjadi tegangan puncak-ke-puncak (voltage peak-to-peak, Vpp) untuk menghitung nilai Root Mean Square (RMS) tegangan akustik menggunakan persamaan (1):

$$V_RMS = (V_pp / 2) \times 0.707 \quad (1)$$

Selanjutnya, nilai Sound Pressure Level (SPL) dalam satuan desibel (dB) dihitung secara matematis menggunakan pendekatan logaritmik terhadap tegangan referensi sensor yang telah dikalibrasi dengan persamaan (2):

$$SPL\ (dB) = 20 \times \log10(V_RMS / V_ref) + Kalibrasi \quad (2)$$

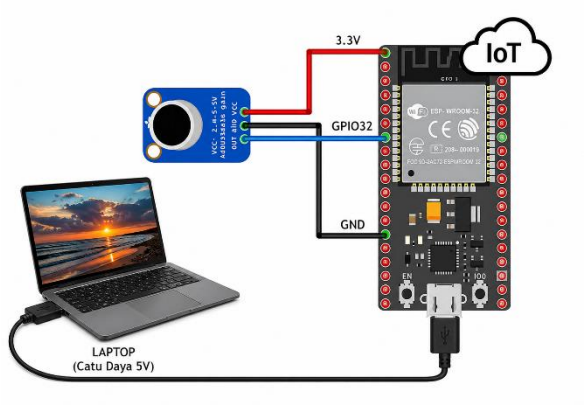
Nilai V_ref dan parameter kalibrasi diperoleh secara empiris melalui proses regresi linier bertahap yang membandingkan keluaran sensor MAX4466 dengan Sound Level Meter standar industri (tipe UNI-T UT353) pada rentang kebisingan 40 dB hingga 90 dB.

2.3 Integrasi IoT dan Logging Data

Untuk memastikan keandalan transmisi telemetri, sistem mengintegrasikan tiga jalur data. Pertama, platform IoT Blynk digunakan untuk menampilkan grafik tren kebisingan langsung pada aplikasi ponsel cerdas dan memicu notifikasi peringatan dini (push notification) ketika ambang kebisingan terlampaui. Kedua, platform ThingSpeak digunakan untuk melakukan analisis visual statistik secara publik di web. Ketiga, basis data real-time Firebase digunakan sebagai media penyimpanan cloud terstruktur untuk logging data jangka panjang, yang kemudian disinkronkan ke dasbor website monitoring buatan sendiri.

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Validasi Desain dan Pengujian Akurasi Sensor



Gambar 1. Rancangan Deteksi Noise

Desain sistem yang dikembangkan terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu sensor suara MAX4466 sebagai input pendeteksi sinyal suara, ESP32 WROOM sebagai pusat pengendali sistem, jaringan WiFi sebagai media komunikasi data, serta platform Blynk dan ThingSpeak sebagai media monitoring dan logging data. Sensor MAX4466 berfungsi menangkap perubahan intensitas suara di lingkungan sekitar dalam bentuk sinyal analog, kemudian sinyal tersebut diproses oleh ESP32 untuk dikonversi

menjadi nilai estimasi tingkat kebisingan dalam satuan desibel (dB).

Sebelum diuji coba pada lingkungan publik riil, purwarupa sistem pendeteksi noise signal ini diuji validitas fungsionalnya melalui penilaian dua ahli instrumentasi elektronika dan sistem kontrol. Berdasarkan hasil validasi tahap pertama dan kedua, diperoleh persentase kelayakan sistem sebesar 88.5% (kategori sangat layak) dengan beberapa revisi kecil pada penguatan saringan lolos-rendah (low-pass filter) sumber tegangan sirkuit analog sensor untuk meminimalkan fluktuasi pembacaan ADC akibat riak daya ESP32.

Uji akurasi sensor MAX4466 terkalibrasi dilakukan di laboratorium dengan membandingkan pembacaannya secara langsung dengan alat ukur referensi Sound Level Meter (SLM) UNI-T UT353 pada tingkat kebisingan terkontrol 45 dB sampai 85 dB. Hasil pengujian akurasi ini dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Pengukuran Sensor MAX4466 Terhadap SLM UT353

No.	SLM Referensi (dB)	Sensor Terkalibrasi (dB)	Error Rate (%)
1	45.0	44.6	0.88
2	55.0	54.2	1.45
3	65.0	64.1	1.38
4	75.0	76.3	1.73
5	85.0	84.1	1.05

Berdasarkan hasil kalibrasi pada Tabel 1, rata-rata tingkat kesalahan (average error rate) sistem pendeteksi noise signal hanya sebesar 1.30%, dengan nilai kesalahan maksimal sebesar 1.73% pada level kebisingan tinggi. Rendahnya tingkat error rate ini menunjukkan bahwa kalibrasi perangkat keras dan pemrosesan algoritma konversi berbasis RMS yang diterapkan pada firmware ESP32 sangat sukses mendekati keandalan alat ukur kebisingan komersial.

3.2 Pengujian Tingkat Kebisingan pada Ruang Publik Terbuka

Pengujian tingkat kebisingan pada ruang publik terbuka dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mendeteksi dan memantau variasi intensitas suara pada lingkungan dengan aktivitas masyarakat yang beragam. Pengujian dilaksanakan di kawasan Taman Nostalgia, Kota Kupang, yang merepresentasikan ruang publik terbuka dengan sumber kebisingan yang berasal dari aktivitas pengunjung, kegiatan perdagangan, dan lalu lintas kendaraan bermotor di sekitarnya. Pengambilan data dilakukan pada tiga periode waktu, yaitu pagi (08.15–08.30 WITA), siang (13.15–13.30 WITA), dan sore (16.15–16.30 WITA), untuk mengidentifikasi perubahan tingkat kebisingan berdasarkan waktu pengamatan. Parameter pengujian meliputi tingkat kebisingan minimum, maksimum, dan rata-rata yang diperoleh melalui sistem pemantauan berbasis IoT. Hasil pengukuran tingkat kebisingan pada ruang publik terbuka disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Pengukuran Kebisingan di Taman Nostalgia Kupang

Waktu Pengukuran	Tingkat Minimum (dB)	Tingkat Maksimum (dB)	Rata-rata (dB)
Pagi (08:15 – 08:30)	54.2	66.8	59.4
Siang (13:15 – 13:30)	67.1	78.4	73.2
Sore (16:15 – 16:30)	59.8	71.2	64.7

Merujuk pada Baku Tingkat Kebisingan Kepmen LH No. 48 Tahun 1996, batas kebisingan maksimum untuk kawasan rekreasi dan taman publik adalah 60 dBA. Analisis data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa kebisingan rata-rata pada siang hari (73.2 dB) dan sore hari (64.7 dB) di Taman Nostalgia telah melampaui batas aman lingkungan yang diperkenankan. Lonjakan kebisingan ini dipicu oleh aktivitas kendaraan pada jam sibuk kerja dan kepadatan pengunjung taman.

3.3 Pengujian Tingkat Kebisingan pada Lingkungan Pendidikan

Pengujian tingkat kebisingan pada lingkungan pendidikan dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mendeteksi dan memantau perubahan tingkat kebisingan akibat perbedaan aktivitas di lingkungan pembelajaran. Pengujian dilaksanakan di ruang kelas XI Teknik Elektronika

Industri SMK Negeri 2 Kupang sebagai representasi lingkungan pendidikan dalam ruangan (indoor), dengan karakteristik kebisingan yang dipengaruhi oleh aktivitas pembelajaran dan interaksi peserta didik. Pengambilan data dilakukan pada dua periode waktu, yaitu pagi (08.15–08.30 WITA) saat kegiatan pembelajaran berlangsung dan siang (13.15–13.30 WITA) pada periode istirahat. Parameter pengujian meliputi tingkat kebisingan minimum, maksimum, dan rata-rata untuk mengidentifikasi variasi tingkat kebisingan berdasarkan aktivitas pada masing-masing periode pengamatan. Hasil pengukuran tingkat kebisingan pada lingkungan pendidikan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Pengukuran Kebisingan di SMK Negeri 2 Kupang

Waktu Pengukuran	Tingkat Minimum (dB)	Tingkat Maksimum (dB)	Rata-rata (dB)
Pagi (08:15 – 08:30)	42.1	56.4	48.3
Siang (13:15 – 13:30)	61.3	74.8	68.1

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 3, tingkat kebisingan pada lingkungan pendidikan menunjukkan variasi yang dipengaruhi oleh perbedaan aktivitas selama periode pengamatan. Pada pagi hari, tingkat kebisingan tercatat berkisar antara 42,1–56,4 dB dengan nilai rata-rata sebesar 48,3 dB. Sementara itu, pada siang hari terjadi peningkatan tingkat kebisingan dengan nilai minimum sebesar 61,3 dB, maksimum 74,8 dB, dan rata-rata 68,1 dB. Perbedaan nilai rata-rata sebesar 19,8 dB antara kedua periode tersebut menunjukkan adanya peningkatan tingkat kebisingan pada saat aktivitas peserta didik lebih tinggi. Mengacu pada Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 48 Tahun 1996, baku tingkat kebisingan untuk lingkungan sekolah ditetapkan sebesar 55 dBA. Hasil pengukuran ini mengindikasikan bahwa tingkat kebisingan pada periode siang lebih tinggi dibandingkan periode pagi. Temuan tersebut juga menunjukkan kemampuan sistem dalam merekam perubahan tingkat kebisingan berdasarkan variasi aktivitas di lingkungan pendidikan.

3.4 Analisis Pengaruh Jarak terhadap Tingkat Kebisingan pada Lingkungan Terkontrol

Pengujian pengaruh jarak terhadap tingkat kebisingan dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mendeteksi perubahan tingkat suara berdasarkan variasi jarak antara sumber suara dan sensor. Pengujian dilaksanakan pada lingkungan terkontrol di Laboratorium Pendidikan Teknik Elektro Universitas Nusa Cendana dengan menggunakan sound generator sebagai sumber suara konstan. Pengukuran dilakukan pada tiga rentang jarak, yaitu 1–2 meter, 2–3 meter, dan 3–5 meter dari sumber suara. Parameter yang diamati meliputi tingkat kebisingan minimum, maksimum, dan rata-rata pada setiap rentang jarak pengukuran. Pengujian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kecenderungan perubahan tingkat kebisingan seiring bertambahnya jarak sensor dari sumber suara. Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Kebisingan Berdasarkan Redaman Jarak di Lab

Jarak Dari Sumber	Tingkat Minimum (dB)	Tingkat Maksimum (dB)	Rata-rata (dB)
Jarak 1 – 2 meter	73.2	84.5	78.6
Jarak 2 – 3 meter	64.1	73.8	68.9
Jarak 3 – 5 meter	52.4	62.1	56.8

Data pada Tabel 4 memvalidasi hukum kuadrat terbalik (*inverse square law*) gelombang bunyi di dalam ruangan. Secara teoretis, hukum kuadrat terbalik menjelaskan bahwa intensitas bunyi berkurang sebanding dengan kuadrat jarak dari sumber suara pada kondisi perambatan medan bebas (*free field*). Setiap pertambahan jarak dari sumber suara memicu penurunan nilai desibel secara konsisten. Pada jarak 1–2 meter, nilai kebisingan rata-rata mencapai 78,6 dB dan mengalami penurunan hingga 56,8 dB pada jarak 3–5 meter, dengan selisih sebesar 21,8 dB. Penurunan tingkat kebisingan tersebut menunjukkan adanya hubungan antara jarak pengukuran dan pelemahan intensitas suara. Meskipun pengujian dilakukan di dalam ruangan yang memungkinkan terjadinya pantulan dan penyerapan gelombang bunyi, hasil pengukuran tetap memperlihatkan kecenderungan penurunan tingkat

kebisingan seiring bertambahnya jarak dari sumber suara. Keberhasilan alat dalam mendeteksi perubahan nilai akustik ini menunjukkan bahwa sensor MAX4466 yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32 mampu merespons variasi tingkat kebisingan pada jarak pengukuran yang berbeda.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan tingkat kebisingan berbasis mikrokontroler ESP32-WROOM-32 yang terintegrasi dengan teknologi Internet of Things (IoT) melalui platform Blynk, ThingSpeak, dan Firebase, serta dilengkapi fitur pencatatan data (data logging). Hasil validasi ahli menunjukkan tingkat kelayakan sistem sebesar 88,5%, sedangkan pengujian akurasi sensor MAX4466 terhadap Sound Level Meter (SLM) referensi menghasilkan rata-rata persentase kesalahan pengukuran sebesar 1,30%. Pengujian pada ruang publik terbuka menunjukkan tingkat kebisingan rata-rata tertinggi sebesar 73,2 dB pada siang hari, sedangkan pada lingkungan pendidikan diperoleh tingkat kebisingan rata-rata sebesar 68,1 dB selama periode istirahat. Pengujian pada lingkungan terkontrol menunjukkan adanya penurunan tingkat kebisingan seiring bertambahnya jarak dari sumber suara, yaitu dari 78,6 dB pada jarak 1–2 meter menjadi 56,8 dB pada jarak 3–5 meter. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi perubahan tingkat kebisingan pada berbagai karakteristik lingkungan, melakukan pemantauan secara *real-time*, serta mendukung penyimpanan data pengukuran secara berkala. Sistem yang dikembangkan berpotensi menjadi alternatif teknologi pemantauan kebisingan lingkungan berbasis IoT untuk mendukung pengelolaan kualitas lingkungan perkotaan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, khususnya Program Studi Pendidikan Teknik Elektro Universitas Nusa Cendana Kupang, atas dukungan sarana laboratorium yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Basner *et al.*, "Auditory and non-auditory effects of noise on health," *The lancet,* vol. 383, no. 9925, pp. 1325–1332, 2014, doi: https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)61613-X

[2] F. Alías and R. M. Alsina-Pagès, "Review of Wireless Acoustic Sensor Networks for Environmental Noise Monitoring in Smart Cities," *Journal of Sensors,* vol. 2019, no. 1, p. 7634860, 2019/01/01 2019, doi: https://doi.org/10.1155/2019/7634860.https://doi.org/10.1155/2019/7634860

[3] K. N. L. Hidup, "Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 48 Tahun 1996 Tentang: Baku Tingkat Kebisingan," *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup,* vol. 48, 1996.

[4] M. D. Rizqirobbi, N. N. Hasanah, S. F. Nurjihan, T. Supriyanto, A. A. F. Maulana, and Y. Rafsyam, "Sistem Pemantauan *Kebisingan* Real-Time Berbasis Website pada Lingkungan Industri Beton," *Spektral,* vol. 7, no. 1, pp. 369–374, 2026, doi: https://doi.org/10.32722/spektral.v7i1.8359

[5] S. Siregar, "Metode Penelitian: Kuantitatif, Kualitatif dan Penelitian Gabungan," *Jakarta: PT Fajar Interpratama Mandiri,* 2017.

[6] G. Fabregat, J. A. Belloch, J. M. Badía, and M. Cobos, "Design and implementation of acoustic source localization on a low-cost IoT edge platform," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs,* vol. 67, no. 12, pp. 3547–3551, 2020, doi: https://doi.org/10.1109/TCSII.2020.2986296

[7] S. Yarkan, "A Novel Acoustic Source Localization Technique for Edge AI Applications: A Lightweight Framework and Implementation for IoT and Smart Sensing Devices," *ELECTRICA,* vol. 25, pp. 1–9, 2025, doi: https://doi.org/10.5152/electrica.2025.25099

[8] R. Aafreen, S. Y. Neyaz, R. Shamim, and M. S. Beg, "An IoT based system for telemetry and control of Greenhouse environment," in *2019 International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, 2019: IEEE, pp. 1–6, doi: https://doi.org/10.1109/UPCON47278.2019.8980258.

[9] M. S. Bakare and K. Abubaker, "IoT-based indoor environmental monitoring system using multi-parameter sensing and ESP32-WROOM integration," *Discover Electronics,* vol. 3, no. 1, p. 6, 2026, doi: https://doi.org/10.1007/s44291-026-00157-3

[10] T. E. Sari and T. S. Syahputra, "Pemetaan Dan Monitoring Tingkat Kebisingan Berbasis IoT (Internet Of Things) Di Institut Teknologi Sumatera," *Journal of Science and Applicative Technology. Hal,* pp. 1–7. [Online]. Available: https://repo.itera.ac.id/assets/file_upload/SB2009090019/11116010_20_151701.pdf

[11] B. Maulana, "Perancangan Sistem Monitoring Kebisingan Ruang Kelas Menggunakan Metode Prototype Berbasis Arduino Uno," *Jurnal Perangkat Lunak,* vol. 8, no. 2, pp. 156–167, 2026, doi: https://doi.org/10.32520/jupel.v8i2.5079

[12] L.-J. Chen, S. Saraswat, F.-S. Ching, C.-Y. Su, H.-L. Huang, and W.-C. Pan, "Development and implementation of EcoDecibel: A low-cost and IoT-based device for noise measurement," *Ecological Informatics,* vol. 85, p. 102968, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102968

[13] A. F. Adziimaa, H. H. Rachmadi, and S. F. Mujiyanti, "An Integrated Virtual Platform for Comparative Evaluation of Sound and Light Sensors in Remote Educational Environments," in *2025 International Conference on Converging Technology in Electrical and Information Engineering (ICCTEIE)*, 2025: IEEE, pp. 165–170, doi: https://doi.org/10.1109/ICCTEIE66144.2025.11341884.

[14] B. E. P. Hendrinanto *et al.*, "Simulasi Anti-Tamper Berbasis Deteksi Akustik Menggunakan Modul Mic MAX 4466 pada Sistem Arduino Uno: Evaluasi Kuantitatif dan Analisis Komparatif," *Info Kripto,* vol. 20, no. 1, pp. 45–56, 2026, doi: https://doi.org/10.56706/ik.v20i1.140

[15] D. Wahjudi, K. Isra'Nuur Darmawan, and A. R. Fahmi, "Rancang Bangun Alat Pedeteksi Kebisingan Dengan Sound Sensor Mic Pada Perpustakaan Berbasis Arduino," *Design And Construction Of Noise Detection Device With Arduinobased,* 2024, doi: https://doi.org/10.58436/jeepa.v4i1.1830