

# Sistem Monitoring Kebisingan dan Polusi Udara Pada Ruang Mesin CNC Router Berbasis *Internet of Things*

Gigih Priyandoko<sup>1,2 \*</sup>, Mahmud Habibi<sup>1</sup>, Romadhon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Elektro, Universitas Widya Gama Malang

<sup>2</sup>Program Profesi Insinyur, Universitas Muhammadiyah Malang

\*Koresponden email: gigih@widyagama.ac.id

Diterima: 8 Januari 2026

Disetujui: 17 Januari 2026

## Abstract

CNC machine rooms are industrial work environments with high levels of noise and potential air pollution originating from high-speed spindle motor operations, mechanical friction, and metal-cutting processes. Currently, monitoring these conditions is largely done manually. This study aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based system that can continuously and in real time monitor the work environment for noise and air pollution. This study employed a research and development approach integrating noise and air quality sensors controlled by an ESP32 microcontroller and connected to a cloud platform for data acquisition and visualization. The system's accuracy and performance were evaluated by taking direct measurements of various CNC router cutting materials and comparing the sensor results with those of standard measuring instruments. Results showed that the system reliably monitored noise and dust concentration, with average measurement errors of 2.9% and 1.3%, respectively. Implementing this system effectively provides an early warning when workplace parameters exceed safety thresholds, thereby supporting rapid, data-driven occupational safety and health (OSH) risk mitigation decisions.

**Keywords:** IoT, noise pollution, air pollution, CNC machines

## Abstrak

Ruang mesin CNC merupakan lingkungan kerja industri yang memiliki tingkat kebisingan dan potensi polusi udara yang tinggi, yang bersumber dari operasi motor spindle berkecepatan tinggi, gesekan mekanis, dan proses pemotongan material logam. Dalam praktiknya, pemantauan kondisi lingkungan kerja ini masih banyak dilakukan secara manual. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring kebisingan dan polusi udara berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mampu melakukan pemantauan lingkungan kerja secara real-time dan berkelanjutan. Metode penelitian menggunakan pendekatan rancang bangun (*Research and Development*) dengan integrasi sensor kebisingan dan sensor kualitas udara yang dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 serta terhubung ke platform cloud untuk akuisisi dan visualisasi data. Pengujian dilakukan melalui pengukuran langsung pada berbagai material pemotongan CNC Router dan membandingkan hasil sensor dengan alat ukur standar untuk mengevaluasi akurasi serta kinerja sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu memantau kebisingan dan konsentrasi debu secara andal dengan rata-rata kesalahan pengukuran sebesar 2,9% untuk kebisingan dan 1,3% untuk kualitas udara. Implementasi sistem ini efektif sebagai peringatan dini ketika parameter lingkungan kerja melampaui ambang batas keselamatan, sehingga mendukung pengambilan keputusan mitigasi risiko K3 secara cepat dan berbasis data.

**Kata Kunci:** IoT, kebisingan, polusi udara, mesin CNC

## 1. Pendahuluan

Penelitian mengenai rancang bangun sistem monitoring kebisingan dan polusi udara pada ruangan mesin CNC Router berbasis Internet of Things (IoT) sangat krusial karena berkaitan langsung dengan aspek kesehatan dan keselamatan kerja (K3) yang berada di lingkungan pabrik mebel. Mesin CNC Router saat beroperasi menghasilkan debu kayu halus dan tingkat kebisingan frekuensi tinggi yang jika melampaui ambang batas secara terus-menerus yang dapat menyebabkan gangguan pendengaran serta penyakit saluran pernapasan kronis bagi operator [1], [2], [3]. Dengan adanya sistem berbasis IoT, pemantauan tidak lagi dilakukan periodik secara manual, melainkan dapat dilakukan secara *real-time* dan kontinu. Hal ini memungkinkan pihak manajemen dapat memperoleh data akurat mengenai fluktuasi polutan dan suara. Sehingga tindakan preventif seperti penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) yang lebih ketat dan tepat atau perbaikan sistem ventilasi dapat dilakukan segera sebelum terjadi dampak kesehatan fatal pada pekerja.

Karena pengoperasian mesin CNC Router pada industri mebel kayu secara kontinu dapat menghasilkan intensitas kebisingan tinggi dan akumulasi partikulat debu kayu halus yang berisiko buruk bagi kesehatan operator. Masalah utama terletak pada kurangnya pengawasan real-time yang melewati ambang batas aman tanpa disadari. Sebagai rencana pemecahan masalah, penelitian ini akan mengintegrasikan sensor suara dan sensor kualitas udara ke dalam mikrokontroler berbasis IoT (ESP32) untuk mengakuisisi data secara presisi. Data tersebut kemudian ditransmisikan ke *platform cloud* agar dapat dipantau melalui dashboard digital, serta dilengkapi dengan sistem notifikasi peringatan dini jika kadar polusi dan kebisingan yang melampaui standar baku mutu yang ditetapkan.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang dan mengimplementasikan sebuah sistem monitoring berbasis IoT yang mampu mengukur tingkat kebisingan dan polusi udara di area kerja mesin CNC Router secara akurat dan berkelanjutan. Sehingga dengan adanya perangkat ini dapat membantu pengambilan keputusan bagi manajemen pabrik dalam upaya mitigasi risiko keselamatan dan kesehatan kerja (K3) bagi para pekerja mebel secara dini.

Kajian pustaka dari berbagai riset serupa menekankan bahwa penggunaan mikrokontroler seperti ESP32 atau NodeMCU memiliki keunggulan dalam stabilitas transmisi data dibandingkan sistem konvensional, terutama saat menghadapi interferensi sinyal di area pabrik yang penuh dengan mesin bermotor listrik. Para peneliti sebelumnya juga menyimpulkan bahwa akurasi data sensor polusi udara sangat dipengaruhi oleh posisi alat terhadap sumber debu pada Mesin CNC Router, sehingga kalibrasi perangkat lunak menjadi aspek krusial dalam rancang bangun sistem agar data yang dihasilkan valid dan dapat dipertanggungjawabkan [4], [5], [6].



Gambar 1. Mesin CNC Router Omni 1325

Selain aspek teknis hardware, fokus kajian teoritik pada penelitian-penelitian sebelumnya juga menyoroti pentingnya visualisasi data melalui dashboard interaktif yang dapat diakses melalui smartphone. Riset terdahulu membuktikan bahwa pemberian notifikasi secara *real-time* (seperti melalui aplikasi Blynk atau Telegram Bot) terbukti meningkatkan kesadaran pekerja dan manajemen pabrik terhadap bahaya kebisingan [7], [8], [9]. Teori mengenai efektivitas sistem peringatan dini (*early warning system*) ini menjadi landasan bahwa sistem monitoring tidak hanya berfungsi sebagai pengumpul data, tetapi juga sebagai alat bantu pengambilan keputusan untuk mewajibkan penggunaan APD tambahan saat parameter lingkungan melewati batas aman.

Secara spesifik pada konteks mesin CNC Router, kajian teoritik dari penelitian terkait mengidentifikasi bahwa frekuensi suara yang dihasilkan oleh mata bor saat memotong kayu memiliki karakteristik frekuensi tinggi yang lebih merusak pendengaran dibandingkan mesin bubut manual. Penelitian terdahulu juga mencatat bahwa polusi debu kayu bersifat karsinogenik (zat yang dapat memicu pertumbuhan sel penyakit) dan memiliki laju penyebaran yang cepat di ruang tertutup tanpa ventilasi yang memadai. Oleh karena itu, penggabungan monitoring kebisingan dan polusi udara dalam satu sistem terintegrasi dianggap sebagai solusi paling efisien secara biaya dan operasional untuk industri menengah

ke bawah, karena mampu mencakup dua parameter risiko utama sekaligus dalam satu infrastruktur jaringan IoT.

Metode yang diusulkan dalam penelitian ini menggunakan pendekatan rancang bangun yang mengintegrasikan sensor fisik dengan arsitektur IoT berbasis mikrokontroler (ESP32) untuk melakukan akuisisi data secara simultan. Nilai keterbaruan penelitian ini terletak pada spesifikasi objek pantauannya, yaitu mesin CNC Router di industri mebel kayu, mendeteksi partikulat debu kayu dan kebisingan frekuensi tinggi. Selain itu, keterbaruan juga mencakup penerapan mekanisme peringatan dini yang terhubung langsung ke perangkat telepon genggam pekerja atau supervisor, memberikan respons preventif saat ambang batas kesehatan lingkungan kerja terlampaui, yang dikombinasikan dengan penyimpanan data historis berbasis *cloud* untuk analisis tren dampak jangka panjang penggunaan mesin terhadap kualitas ruang pabrik.

Standar Ambang Batas yang diizinkan berdasarkan Peraturan Menteri Ketenagakerjaan No. 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja, berikut adalah nilai ambang batas yang harus dipatuhi. Berdasarkan Peraturan Menteri Ketenagakerjaan (Permenaker) No. 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja, berikut adalah rincian Nilai Ambang Batas yang diizinkan [10].

**Tabel 1.** Ambang Batas Kebisingan dan Polusi Udara

| Parameter         | Ambang Batas        | Keterangan Standar  |
|-------------------|---------------------|---|
| Kebisingan        | 85 dB               | Batas maksimal paparan untuk durasi kerja 8 jam per hari. Setiap kenaikan 3 dB, waktu paparan harus dipotong setengahnya. |
| Debu Kayu (Keras) | 1 mg/m <sup>3</sup> | Berlaku untuk jenis kayu keras (hardwoods) yang partikelnya lebih berisiko bagi pernapasan.                               |
| Debu Kayu (Lunak) | 5 mg/m <sup>3</sup> | Berlaku untuk jenis kayu lunak (softwoods).   |

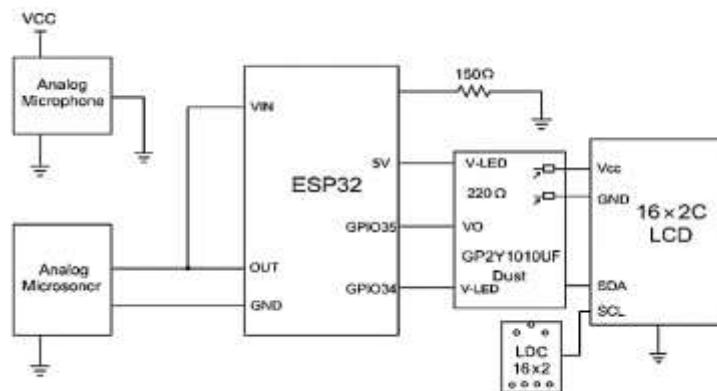
- Ambang Batas Kebisingan Intensitas kebisingan ditentukan berdasarkan durasi paparan per hari. Untuk waktu kerja standar 8 jam sehari, batas maksimal adalah 85 decibel (dB). Jika kebisingan meningkat, waktu paparan harus dikurangi secara signifikan (misalnya, pada 88 dB hanya diizinkan selama 4 jam).
- Ambang Batas Polusi Udara (Debu Kayu) Dalam konteks pabrik mebel, polusi udara diukur berdasarkan konsentrasi partikel debu di udara:
  - Kadar Debu Total: Umumnya tidak boleh melebihi 10 mg/m<sup>3</sup>.
  - Debu Kayu (Karsinogenik): Mengingat sifatnya yang berbahaya, beberapa standar spesifik (seperti ACGIH) menyarankan ambang batas yang lebih ketat, yakni sekitar 1 mg/m<sup>3</sup> hingga 5 mg/m<sup>3</sup> tergantung pada jenis kayu (kayu keras atau lunak).

## 2. Metode Penelitian

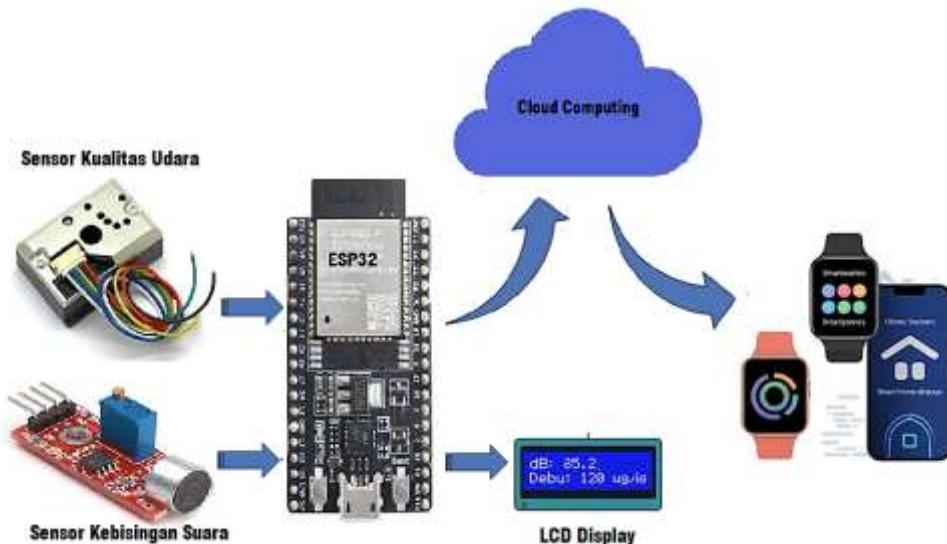
Berikut adalah penjelasan detail mengenai metodologi penelitian untuk rancang bangun sistem monitoring kebisingan dan polusi udara pada mesin CNC Router berbasis Internet of Things (IoT) [7], [9], [11], [12], [13], [14].

- Rancangan Penelitian. Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) dengan model pengembangan sistem yang terstruktur, guna menghasilkan produk berupa perangkat keras dan lunak yang digunakan untuk monitoring. Rancangan ini dimulai dari tahap analisis kebutuhan sistem, perancangan skema elektronik dan arsitektur IoT, implementasi kode program pada mikrokontroler, hingga tahap pengujian alat. Fokus utama perancangan sistem ini adalah mengintegrasikan sensor kebisingan (GP2Y1010A0F) dan kualitas udara (PS-2.5) yang dapat mengirimkan data secara kontinu ke *platform cloud* untuk lingkungan pabrik mebel. Alat ukur kebisingan suara menggunakan sensor mikrofon dan untuk mengetahui polusi udara pada ruang Mesin CNC Router menggunakan Air Quality Detector yang terhubung dengan mikrokontroler ESP32. Hasilnya di tampilkan pada LCD 16x2 dan hand-phone seperti pada **Gambar 2** dan **Gambar 3**.
- Populasi dan Sampel (Sasaran Penelitian). Populasi dalam penelitian ini adalah secara spesifik ditetapkan pada ruangan unit mesin CNC Router yang sedang beroperasi aktif. Pemilihan sampel dilakukan pada mitra bahwa mesin CNC Router merupakan sumber utama polusi suara dari putaran spindel dan polusi udara dari serbuk kayu halus hasil pemotongan. Titik pengambilan data (sasaran sensor) diletakkan pada radius tertentu di sekitar area kerja operator untuk memastikan bahwa data yang diperoleh merepresentasikan paparan nyata yang diterima oleh pekerja dan lingkungan sekitar mesin.

- c. Teknik Pengumpulan Data dan Pengembangan Instrumen. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui observasi eksperimental dan pengukuran langsung menggunakan instrumen yang digunakan, yaitu perangkat monitoring berbasis IoT yang telah dikalibrasi dengan sensor lain yang biasa digunakan untuk mengukur kebisingan dan sensor polusi udara.
- d. Teknik Analisis Data. Teknik analisis data yang digunakan adalah analisis deskriptif kuantitatif untuk mengolah angka-angka hasil pemantauan intensitas kebisingan dan konsentrasi polusi udara yang tersimpan dalam basis data. Data yang terkumpul akan dikategorikan berdasarkan waktu operasional mesin dan dibandingkan dengan Nilai Ambang Batas sesuai peraturan kesehatan kerja (K3) untuk menentukan tingkat bahaya lingkungan. Selanjutnya, dilakukan analisis kinerja sistem untuk mengevaluasi akurasi sensor, sehingga dapat ditarik kesimpulan mengenai efektivitas sistem dalam memberikan peringatan dini dan laporannya sebagai dasar mitigasi risiko di pabrik mebel.



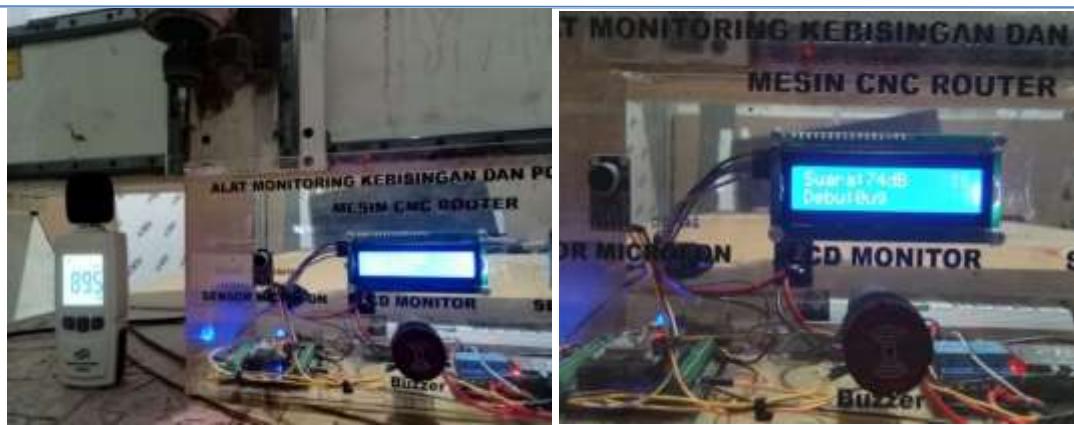
**Gambar 2.** Blok Diagram Sistem



**Gambar 3.** Rangkaian Skematic Sistem

### 3. Hasil dan Pembahasan

Prototipe perangkat monitoring dapat dilihat pada **Gambar 4**. Pengujian untuk masing-masing sensor yang digunakan akan dilakukan perbandingan dengan perangkat yang biasa digunakan. Sensor kebisingan (GP2Y1010A0F) dibandingkan dengan sensor Sound Level. Sedangkan sensor kualitas udara (PS-2.5) dibandingkan dengan Air Quality Detector. Hasil masing-masing pengukuran dapat dilihat pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**. Rata-rata kesalahan (error) sensor debu sebesar 1,3% dan sensor kebisingan sebesar 2,9%. Bacaan masing-masing sensor dikirim ke ESP32 dan diolah di *cloud server*. Kemudian hasilnya akan ditampilkan pada android secara *real-time* seperti pada **Gambar 5** dan **6**.



**Gambar 4.** Prototipe Perangkat Monitoring

**Tabel 2.** Kualitas Udara

| No                  | Material                     | Air Quality Detector ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Sensor Debu ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Selisih | Error |
|---------------------|------------------------------|---|--|---------|-------|
| 1                   | Pemotongan MDF 5 mm          | 180   | 182                                      | 2       | 1.1   |
| 2                   | Pemotongan MDF 10 mm         | 170   | 173                                      | 3       | 1.8   |
| 3                   | Pemotongan Plywood 10 mm     | 180   | 183                                      | 3       | 1.7   |
| 4                   | Pemotongan Plywood 5 mm      | 175   | 177                                      | 2       | 1.1   |
| 5                   | Pemotongan Acrilic 3 mm      | 178   | 180                                      | 2       | 1.1   |
| 6                   | Pemotongan Acrilic 5 mm      | 179   | 181                                      | 2       | 1.1   |
| 7                   | Pemotongan PVC 5 mm          | 190   | 192                                      | 2       | 1.1   |
| 8                   | Pemotongan PVC 10 mm         | 195   | 198                                      | 3       | 1.5   |
| 9                   | Pemotongan Kayu Jati 5 mm    | 192   | 194                                      | 2       | 1.0   |
| 10                  | Pemotongan kayu Nangka 10 mm | 180   | 183                                      | 3       | 1.7   |
| Rata-rata Kesalahan |                              |   |  |         | 1.3   |

**Tabel 3.** Kebisingan

| No                  | Material                     | Sound Level (dB) | Sensor Kebisingan (dB) | Selisih | Error |
|---------------------|------------------------------|------------------|------------------------|---------|-------|
| 1                   | Pemotongan MDF 5 mm          | 89.7             | 92.1                   | 2.4     | 2.7   |
| 2                   | Pemotongan MDF 10 mm         | 78.6             | 79.9                   | 1.3     | 1.7   |
| 3                   | Pemotongan Plywood 10 mm     | 86               | 88.3                   | 2.3     | 2.7   |
| 4                   | Pemotongan Plywood 5 mm      | 90.6             | 93.2                   | 2.6     | 2.9   |
| 5                   | Pemotongan Acrilic 3 mm      | 85.8             | 88.1                   | 2.3     | 2.7   |
| 6                   | Pemotongan Acrilic 5 mm      | 80.6             | 82.2                   | 1.6     | 2.0   |
| 7                   | Pemotongan PVC 5 mm          | 87.0             | 89.4                   | 2.4     | 2.8   |
| 8                   | Pemotongan PVC 10 mm         | 83.0             | 85.1                   | 2.1     | 2.5   |
| 9                   | Pemotongan Kayu Jati 5 mm    | 75.0             | 79.2                   | 4.2     | 5.6   |
| 10                  | Pemotongan Kayu Nangka 10 mm | 70.0             | 72.6                   | 2.6     | 3.7   |
| Rata-rata Kesalahan |                              |                  |                        |         | 2.9   |



**Gambar 5.** Bacaan pada Android dengan Status di Bawah Ambang Batas



**Gambar 6.** Bacaan pada Android dengan Status di Atas Ambang Batas

Analisis kinerja sensor kualitas udara (debu). Hasil pengujian sensor kualitas udara menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis IoT memiliki tingkat akurasi yang cukup tinggi jika dibandingkan dengan alat ukur standar *Air Quality Detector*. Berdasarkan data pengujian pada berbagai material pemotongan, diperoleh rata-rata kesalahan pengukuran sebesar 1,3%, yang menandakan bahwa selisih pembacaan sensor relatif kecil. Konsistensi ini menunjukkan bahwa sensor mampu merepresentasikan konsentrasi debu kayu secara akurat pada kondisi operasi mesin CNC *Router* yang bervariasi, sehingga layak digunakan sebagai alat pemantauan kualitas udara di lingkungan industri mebel.

Analisis dampak hasil pengukuran debu terhadap keselamatan kerja. Nilai konsentrasi debu yang terukur pada seluruh skenario pemotongan menunjukkan adanya potensi paparan debu kayu halus yang cukup tinggi, khususnya pada material berbasis MDF (*Medium Density Fiberboard*). MDF adalah papan olahan dari serat kayu halus yang dipadatkan dengan tekanan dan suhu tinggi bersama perekat (resin), menghasilkan material yang padat dan halus. Kondisi ini mengindikasikan bahwa tanpa sistem ventilasi dan pengendalian debu yang memadai, operator berisiko terpapar partikulat dalam jangka waktu lama. Dengan kemampuan sistem untuk memantau konsentrasi debu secara *real-time*, data yang dihasilkan dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam penerapan Alat Pelindung Diri (APD) dan evaluasi efektivitas sistem pengendalian debu di area kerja.

Analisis kinerja sensor kebisingan. Hasil pengujian sensor kebisingan menunjukkan bahwa sistem mampu mengukur tingkat intensitas suara dengan tingkat kesalahan rata-rata sebesar 2,9% dibandingkan dengan *Sound Level Meter* standar. Selisih pengukuran yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa sensor memiliki sensitivitas yang memadai terhadap variasi kebisingan yang dihasilkan mesin CNC Router. Meskipun terdapat beberapa perbedaan pembacaan pada material tertentu, secara umum sensor mampu memberikan estimasi tingkat kebisingan yang representatif terhadap kondisi aktual di area kerja mesin.

Analisis keterkaitan kebisingan dengan Nilai Ambang Batas (NAB). Data hasil pengukuran kebisingan menunjukkan bahwa pada beberapa kondisi pemotongan, tingkat kebisingan mesin CNC Router melebihi Nilai Ambang Batas sebesar 85 dB untuk paparan kerja selama 8 jam. Hal ini mengindikasikan adanya potensi risiko gangguan pendengaran bagi operator apabila paparan terjadi secara terus-menerus tanpa perlindungan yang memadai. Oleh karena itu, keberadaan sistem monitoring kebisingan berbasis IoT menjadi penting sebagai alat peringatan dini untuk membantu pengelolaan durasi kerja dan penerapan perlindungan pendengaran sesuai standar K3.

Analisis performa sistem IoT secara keseluruhan. Integrasi sensor kualitas udara dan kebisingan dengan mikrokontroler ESP32 serta platform cloud menunjukkan performa sistem yang andal dalam mengirim dan menampilkan data secara real-time. Data hasil pengukuran dapat dipantau langsung melalui perangkat Android, sehingga memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan kerja secara kontinu tanpa keterbatasan jarak. Keandalan sistem ini memperlihatkan bahwa arsitektur IoT yang digunakan efektif untuk aplikasi monitoring lingkungan industri.

Analisis fungsi sistem sebagai peringatan dini. Sistem monitoring yang dikembangkan tidak hanya berfungsi sebagai alat pengukuran, tetapi juga sebagai sistem peringatan dini yang mampu menginformasikan kondisi lingkungan kerja ketika parameter kebisingan dan polusi udara melampaui ambang batas aman. Informasi status yang ditampilkan secara visual pada aplikasi Android memberikan respon cepat kepada operator maupun manajemen untuk melakukan tindakan mitigasi, seperti penghentian sementara mesin atau penggunaan APD kesehatan berupa masker dan lain-lain, sehingga dapat mengurangi risiko kecelakaan dan gangguan kesehatan kerja.

Analisis kontribusi dan keterbaruan penelitian. Berdasarkan hasil pengujian dan implementasi sistem, penelitian ini memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan sistem monitoring lingkungan kerja berbasis IoT yang terintegrasi antara parameter kebisingan dan polusi udara. Tingkat akurasi sensor yang relatif tinggi serta kemampuan pemantauan dan notifikasi real-time menunjukkan bahwa sistem ini memiliki penerapan pada mesin CNC Router di industri mebel, khususnya sebagai solusi praktis untuk mendukung penerapan Keselamatan Dan Kesehatan Kerja (K3).

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen, sistem monitoring kebisingan dan polusi udara berbasis Internet of Things (IoT) yang dikembangkan terbukti mampu bekerja secara akurat, andal, dan real-time dalam memantau kondisi lingkungan kerja mesin CNC Router, dengan rata-rata kesalahan pengukuran sebesar 1,3% untuk sensor debu dan 2,9% untuk sensor kebisingan. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pada beberapa kondisi pemotongan, tingkat kebisingan dan konsentrasi debu berpotensi melampaui Nilai Ambang Batas yang direkomendasikan untuk keselamatan dan kesehatan kerja, sehingga sistem ini efektif digunakan sebagai peringatan dini untuk mendukung pengambilan keputusan mitigasi risiko K3. Integrasi sensor dengan mikrokontroler ESP32 dan platform cloud memungkinkan pemantauan kontinu serta visualisasi data melalui perangkat Android, yang meningkatkan responsivitas operator dan manajemen terhadap kondisi kerja berbahaya. Ke depan, sistem ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan penambahan jenis sensor partikulat yang lebih spesifik, penerapan kalibrasi otomatis berbasis machine learning untuk meningkatkan akurasi jangka panjang, integrasi aktuator pengendali ventilasi secara otomatis, serta analisis data historis untuk prediksi tren paparan lingkungan kerja dan perencanaan preventif yang lebih komprehensif.

#### 5. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih diberikan para penulis kepada pihak-pihak terkait terutama Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Widya Gama, Malang dan Program Profesi Insinyur, Universitas Muhammadiyah Malang yang telah memberi dukungan secara penuh sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

#### 6. Referensi

- [1] I. Machdar, *Pengantar Pengendalian Pencemaran: Pencemaran Air, Pencemaran Udara, dan Kebisingan*. Deepublish Digital, 2018.
- [2] I. M. S. Graha and N. L. Widayarsi, "Monitoring Uji Kualitas Udara Dan Tingkat Kebisingan Di SMAN 1 Semarapura Kabupaten Klungkung," *Jurnal Ecocentrism*, vol. 3, no. 2, pp. 59–68, 2023.
- [3] S. Wardoyo, *Desain Pengembangan Fasilitas Sekolah di Era Revolusi Industri 4.0*. Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan Direktorat Jenderal Pendidikan Dasar dan Menengah Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, 2018.

- 
- [4] D. E. Putra *et al.*, *Konsep Dasar Internet Of Things (IoT) dengan Mikrokontroler Esp32*. Pustaka Galeri Mandiri, 2025.
  - [5] I. Widyatmika, N. P. A. W. Indrawati, I. Prastyo, I. K. Darminta, I. Sangka, and A. A. N. G. Sapteka, "Perbandingan Kinerja Arduino Uno dan ESP32 Terhadap Pengukuran Arus dan Tegangan," *Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, vol. 13, no. 1, pp. 35–47, 2021.
  - [6] S. A. Arrahma and R. Mukhaiyar, "Pengujian Esp32-Cam Berbasis Mikrokontroler ESP32," *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 4, no. 1, pp. 60–66, 2023.
  - [7] L. Hanum and E. Elfizon, "Rancang Bangun Pemantau Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbasis Internet Of Things," *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 4, no. 2, pp. 619–624, 2023.
  - [8] A. B. Prasetio and A. Solehudin, "Sistem Monitoring Kebisingan Berbasis Internet of Things," *Elkom: Jurnal Elektronika dan Komputer*, vol. 15, no. 1, pp. 118–122, 2022.
  - [9] A. Azis, A. Amaliah, and K. H. Rasyid, "Sistem Monitoring Kebisingan Berbasis Internet of Things (IoT)," *Jurnal Media Elektrik*, vol. 20, no. 3, pp. 12–18, 2023.
  - [10] N. A. Silviana, N. Siregar, M. Banjarnahor, and S. Munte, "Pengukuran dan pemetaan tingkat kebisingan pada area produksi," *Journal of Industrial and Manufacture Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 161–166, 2021.
  - [11] J. Pebralia, H. Akhsan, and I. Amri, "Implementasi Internet of Things (IoT) Dalam Monitoring Kualitas Udara Pada Ruang Terbuka," *Jurnal Kumparan Fisika*, vol. 7, no. 1, pp. 1–8, 2024.
  - [12] D. Santi and J. V. Morin, "Perancangan Sistem Monitoring Parameter Kualitas Udara (Suhu, CO, LPG dan Debu) berbasis IOT," *Jurnal Natural*, vol. 17, no. 2, pp. 120–130, 2021.
  - [13] Y. D. Siddik, A. M. H. Pardede, and H. Kahir, "Rancang Bangun Alat Deteksi Kebisingan Perpustakaan dengan Indikator Peringatan Berbasis Internet Of Things (IoT)," *Repeater: Publikasi Teknik Informatika dan Jaringan*, vol. 2, no. 4, pp. 254–265, 2024.
  - [14] A. A. Mashuri and N. Zulfa, "Sistem Monitoring dan Pendukung Keputusan Kualitas Udara di Kota Semarang Menggunakan IoT," *Jurnal Informatika Upgris*, vol. 8, no. 1, pp. 37–41, 2022.