SISTEM MONITORING KUALITAS UDARA BERBASIS INTERNET OF THINGS MENGGUNAKAN ESP32 DAN SENSOR PPD42 UNTUK MENDUKUNG KESELAMATAN KERJA PADA AREA CRUSHER ROOM

Muhammad Habibi*[1], Henny[2], Ilin Sukma[2]
[1]Program Studi Sistem Komputer, [2]Program Studi Sistem Informasi, STMIK Catur Sakti, Kendari, Indonesia
Penulis korespondensi: Muhammad Habibi (muhammadhabibi060504@gmail.com)

Pemantauan kualitas udara merupakan aspek penting dalam mendukung keselamatan dan kesehatan kerja (K3), terutama pada area industri yang memiliki potensi paparan debu partikulat seperti Crusher Room. Penelitian ini memonitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan sensor PPD42 dan ESP32. Sistem membaca parameter PM1.0 dan PM2.5, mengirim data melalui jaringan WiFi ke server, menyimpan histori pengukuran, dan menampilkan informasi melalui dashboard web. Pengujian dilakukan terhadap fungsi sensor, komunikasi IoT, database, dashboard, dan monitoring lapangan. Hasil menunjukkan sistem mampu menyimpan 774 data histori monitoring dengan rata-rata PM2.5 sebesar 22,70 µg/m³ dan nilai maksimum 150,89 µg/m³. Sistem dapat digunakan sebagai prototype monitoring partikulat udara real-time untuk mendukung evaluasi kondisi lingkungan kerja.

Kata Kunci - Internet of Things, ESP32, PPD42, PM2.5, Kualitas Udara, Monitoring.

I. PENDAHULUAN

Keselamatan dan kesehatan kerja (K3) merupakan aspek penting dalam lingkungan industri, terutama pada area kerja yang memiliki potensi risiko terhadap kesehatan pekerja akibat kondisi lingkungan kerja yang tidak aman [1], [2]. Salah satu faktor lingkungan yang perlu diperhatikan adalah kualitas udara, karena paparan debu dan partikulat dalam jangka panjang dapat menyebabkan gangguan kesehatan, khususnya pada sistem pernapasan pekerja[3]. Pada lingkungan industri tertentu, aktivitas produksi seperti penghancuran dan pengolahan material dapat meningkatkan konsentrasi partikulat di udara sehingga diperlukan pemantauan kondisi udara secara berkelanjutan [4].

Pemantauan kualitas udara secara manual memiliki keterbatasan karena pengukuran hanya dilakukan pada waktu tertentu sehingga perubahan kondisi udara yang terjadi secara cepat sulit diketahui. Selain itu, data hasil pengukuran manual sering tidak terdokumentasi secara sistematis sehingga kurang optimal untuk digunakan sebagai bahan evaluasi kondisi lingkungan kerja [5]. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem monitoring yang mampu melakukan pengukuran secara *real-time*, menyimpan data historis, dan menyediakan informasi yang mudah dipahami oleh pengguna [6].

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan perangkat sensor dapat terhubung dengan jaringan komunikasi untuk melakukan pengumpulan, pengiriman, penyimpanan, dan pengolahan data secara otomatis [7]. Implementasi IoT pada sistem monitoring lingkungan telah banyak digunakan karena mampu mengintegrasikan perangkat keras, komunikasi jaringan, *database*, dan aplikasi visualisasi dalam satu sistem terpadu [8]. Salah satu mikrokontroler yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem IoT adalah ESP32 karena memiliki kemampuan pemrosesan data serta modul komunikasi *WiFi* yang telah terintegrasi [9], [10].

Sensor PPD42 merupakan sensor partikulat berbasis optik yang bekerja menggunakan prinsip hamburan cahaya (*light scattering*) untuk mendeteksi keberadaan partikel di udara [11]. Evaluasi laboratorium menunjukkan bahwa sensor PPD42 mampu memberikan respon terhadap perubahan konsentrasi partikulat dan dapat digunakan sebagai perangkat monitoring partikulat berbiaya rendah, meskipun karakteristik respons sensor perlu diperhatikan sebelum diterapkan pada lingkungan tertentu [12], [13].

Parameter PM2.5 menjadi perhatian dalam pemantauan kualitas udara karena partikulat berukuran kecil dapat masuk lebih dalam ke sistem pernapasan dan memiliki risiko terhadap kesehatan manusia [14]–[16].

Beberapa penelitian telah mengembangkan sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT. Zulkarnain dkk [1]. mengembangkan sistem keselamatan pekerja berbasis AIoT dengan komunikasi LoRa, sedangkan Ikhwanudin

dan Oktanuriawan [5] mengembangkan monitoring kualitas udara berbasis ESP32 untuk mendukung K3. Namun penelitian tersebut belum berfokus pada monitoring partikulat debu menggunakan sensor PPD42 pada area industri *Crusher Room*.

Penelitian ini mengembangkan sistem monitoring kualitas udara berbasis *Internet of Things* menggunakan sensor PPD42 dan ESP32 pada area *Crusher Room*. Sistem yang dirancang mampu membaca data partikulat, mengirimkan data melalui jaringan *WiFi*, menyimpan *history* pengukuran, serta menampilkan informasi melalui *dashboard* berbasis web sebagai pendukung evaluasi kondisi lingkungan kerja.

II. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, sensor PPD42 digunakan sebagai perangkat pengumpulan data untuk mendeteksi kondisi debu/partikulat di udara, sedangkan ESP32 berperan dalam membaca, mengolah, dan mengirimkan data melalui jaringan *WiFi*. Data hasil pengukuran kemudian disimpan dan ditampilkan melalui *dashboard* monitoring sehingga kondisi kualitas udara dapat dipantau secara *real-time*. Pendekatan arsitektur IoT berbasis *client–server* dipilih karena mampu mendukung proses pengiriman data, penyimpanan histori, dan penyajian informasi secara terpusat untuk membantu pemantauan keselamatan dan kesehatan kerja (K3).

A. Analisis Kebutuhan

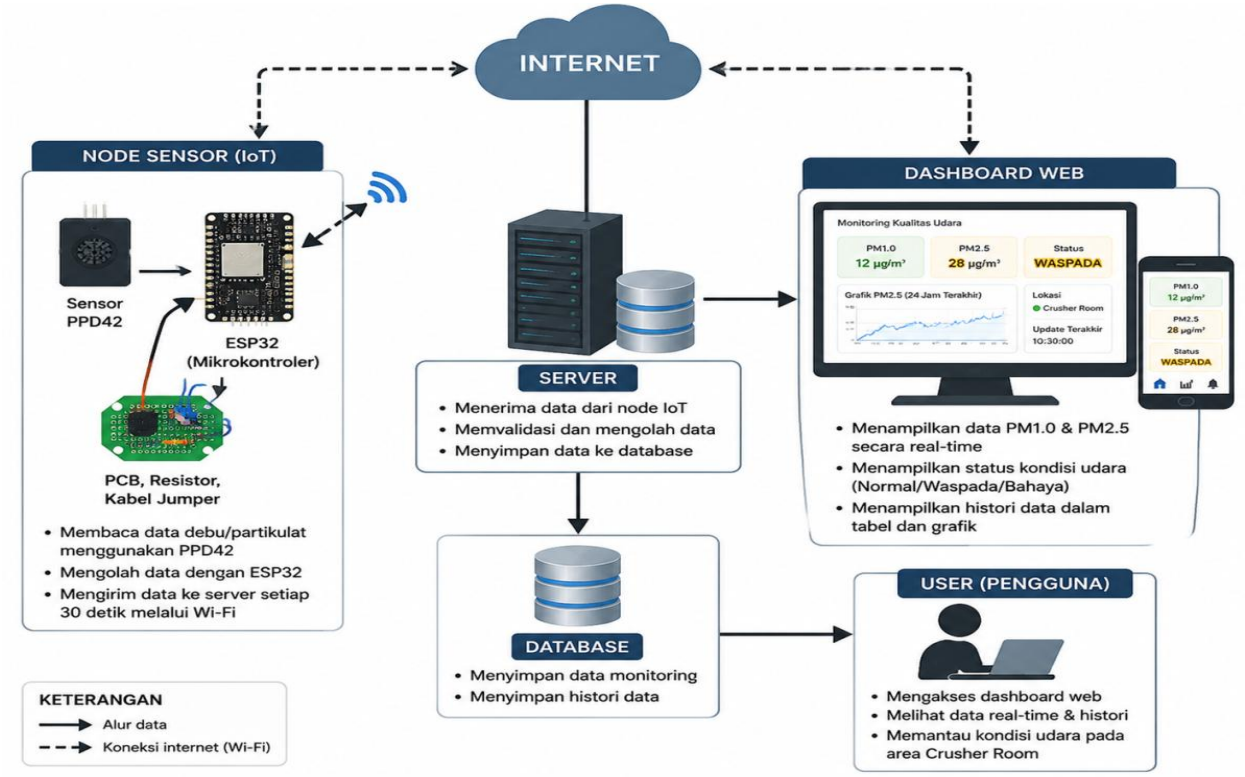
Tahap analisis kebutuhan ini bertujuan untuk merumuskan kapabilitas yang diharapkan dari sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT pada area *Crusher Room*.

B. Perancangan Sistem

Pada tahap desain, sistem dijabarkan menjadi komponen-komponen yang lebih rinci agar kebutuhan yang ditetapkan dapat diwujudkan secara terstruktur.

1. Arsitektur Sistem

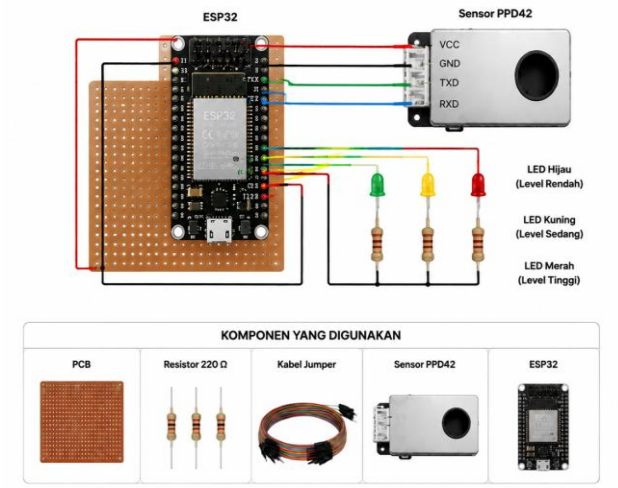
Pada gambar 1, Arsitektur sistem menggambarkan hubungan antar komponen dalam sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT pada area *Crusher Room*. Sistem menggunakan sensor PPD42 untuk membaca kondisi debu/partikulat, kemudian data diproses oleh ESP32 dan dikirim melalui jaringan *WiFi* ke *server*.



Gambar 1 Arsitektur Sistem

2. Desain Perangkat Keras

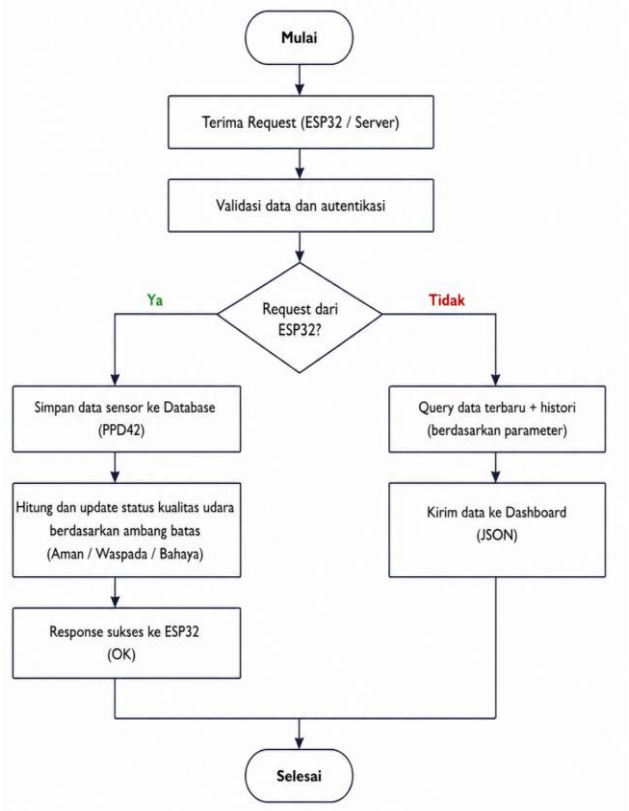
Pada Gambar 2, Desain perangkat keras menjelaskan komponen fisik sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT yang terdiri dari sensor PPD42 sebagai pendeteksi partikulat, ESP32 sebagai pengolah data, serta PCB, resistor, dan kabel jumper sebagai pendukung rangkaian perangkat.



Gambar 2 Desain Perangkat Keras

3. *Flowchart* Perangkat Lunak Server

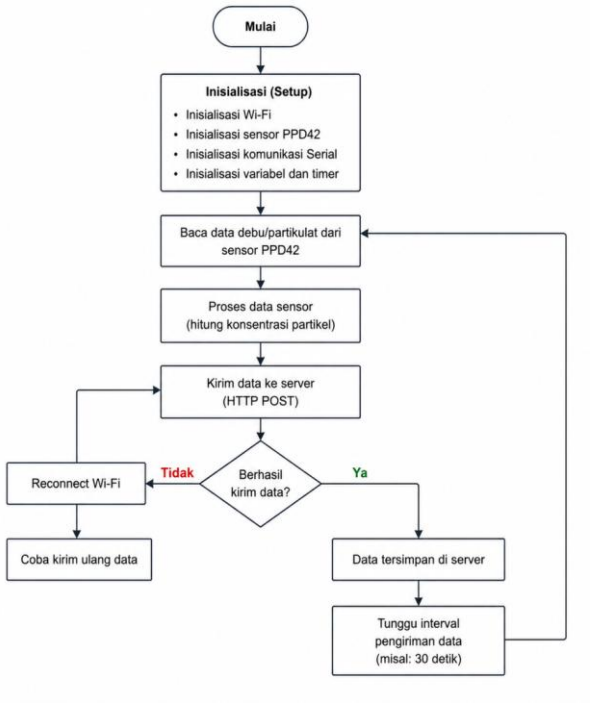
Pada Gambar 3 menggambarkan proses utama *server* dalam melayani *request* dari node ESP32 dan dashboard web.



Gambar 3 *Flowchart* Perangkat Lunak Server

4. *Flowchart* Alur Sistem ESP32

Pada Gambar 4 Alur program ESP32 terdiri dari proses *setup* dan *loop*. Pada tahap setup, ESP32 melakukan inisialisasi koneksi *Wi-Fi*, sensor PPD42, serta konfigurasi komunikasi data dengan perangkat pendukung.



Gambar 4 *Flowchart* Alur Sistem ESP32

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Monitoring Kualitas Udara

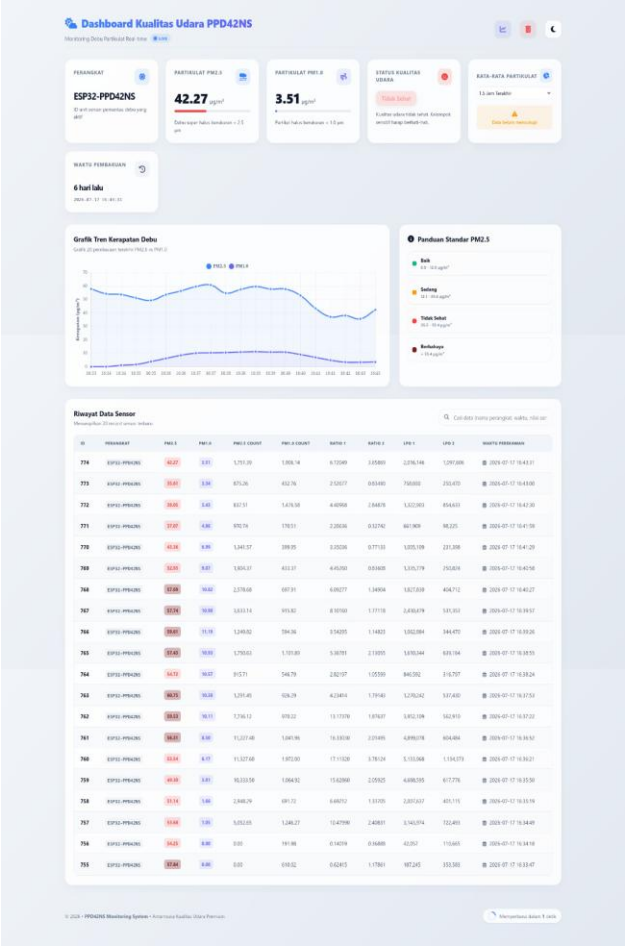
Pada Penelitian ini pengambilan data pada area *Crusher Room* PT. Jaga Aman Sejahtera, di Jalan Boenaga, Kec. Lasolo, Kabupaten Konawe Utara, Sulawesi Tenggara dan Pengukuran dilakukan dengan menjalankan perangkat monitoring yang terdiri dari sensor PPD42 dan ESP32 pada area *Crusher Room* saat aktivitas kerja berlangsung. Sensor PPD42 digunakan untuk membaca kondisi debu/partikulat di udara secara berkala setiap 30 detik dan data hasil pembacaan sensor dikirim ke server untuk disimpan ke dalam *database*. Data yang dikumpulkan meliputi nilai PM2.5, PM1.0, PM2.5 *Count*, PM1.0 *Count*, rasio pembacaan, nilai *Low Pulse Occupancy* (LPO), waktu perekaman, serta status kualitas udara. Pada tabel 1 menunjukkan Hasil Monitoring Kualitas Udara.

Tabel 1 Ringkasan Hasil Monitoring Kualitas Udara

No	Parameter	Nilai
1	Max PM2.5	150,89 µg/m³
2	Min PM2.5	1,49 µg/m³
3	Rata-rata PM2.5	22,70 µg/m³
4	Max PM1.0	27,93 µg/m³
5	Min PM1.0	0,00 µg/m³
6	Rata-rata PM1.0	2,62 µg/m³
7	Total data tersimpan	774 baris
8	Durasi pengiriman	7,1 jam

B. Dashboard Monitoring Kualitas Udara

Dashboard web pada gambar 5 digunakan sebagai media monitoring kualitas udara. Dashboard menampilkan informasi perangkat, nilai PM2.5, nilai PM1.0, status kualitas udara, rata-rata partikulat, waktu pembaruan data, grafik tren kerapatan debu, panduan standar PM2.5, dan riwayat data sensor.



Gambar 5. Dashboard Monitoring Kualitas Udara

C. Analisis Data

Gambar 6 Fitur analisis data digunakan untuk melihat ringkasan hasil pengukuran berdasarkan data yang tersimpan. Fitur ini menampilkan nilai maksimum, minimum, rata-rata, total data tersimpan, durasi pengiriman, rata-rata berdasarkan waktu, serta rata-rata per tanggal.



Gambar 6. Analisis data ringkasan keseluruhan

Pada Gambar 7 ditampilkan hasil rata-rata berdasarkan waktu. Rata-rata PM2.5 pada pagi hari adalah 16,29 µg/m³, siang hari 13,86 µg/m³, sore hari 44,84 µg/m³, dan malam hari 0,00 µg/m³. Sementara itu, rata-rata PM1.0 pada pagi hari adalah 0,14 µg/m³, siang hari 1,05 µg/m³, sore hari 7,97 µg/m³, dan malam hari N/A.



Gambar 7. Analisis data ringkasan berdasarkan waktu

D. Rata-rata Partikulat Berdasarkan Waktu

Berdasarkan hasil monitoring kualitas udara pada area *Crusher Room*, diperoleh sebanyak 774 data pengukuran yang tersimpan dalam *database* selama periode pengamatan. Analisis konsentrasi partikulat dilakukan dengan mengelompokkan data berdasarkan waktu pengukuran, yaitu pagi, siang, sore, dan malam. Setiap kelompok dianalisis berdasarkan jumlah data valid yang tersedia. Hasil analisis pada tabel 2 menunjukkan bahwa rata-rata konsentrasi PM2.5 tertinggi terjadi pada sore hari sebesar 44,84 µg/m³, diikuti pagi hari sebesar 16,29 µg/m³ dan siang hari sebesar 13,86 µg/m³. Sementara itu, pada kelompok malam hari tidak tersedia data pengukuran sehingga nilai rata-rata konsentrasi partikulat tidak dapat dihitung. Hal ini menunjukkan bahwa pada rentang waktu sore terdapat peningkatan konsentrasi partikulat dibandingkan waktu pagi dan siang. Peningkatan tersebut dapat disebabkan oleh aktivitas kerja, pergerakan material, atau akumulasi debu pada area *Crusher Room*.

Tabel 2 Rata-Rata Partikulat berdasarkan Waktu

Waktu	Rentang Waktu	Jumlah Data (n)	Rata-rata PM2.5	Rata-rata PM1.0
Pagi	06.00-11.00	250	16,29 µg/m³	0,14 µg/m³
Siang	12.00-14.00	200	13,86 µg/m³	1,05 µg/m³
Sore	15.00-17.00	324	44,84 µg/m³	7,97 µg/m³
Malam	18.00-05.00	0	N/A	N/A

Keterangan: N/A menunjukkan bahwa tidak tersedia data pengukuran valid pada rentang waktu tersebut sehingga nilai rata-rata tidak dapat dihitung

Analisis rata-rata konsentrasi partikulat berdasarkan waktu dilakukan dengan mengelompokkan data hasil pembacaan sensor ke dalam empat kategori, yaitu pagi (06.00–11.00), siang (12.00–14.00), sore (15.00–17.00), dan malam (18.00–05.00). Jumlah data pengukuran (n) pada setiap kelompok ditentukan berdasarkan data historis yang tersimpan dalam *database*. Validitas data diperiksa berdasarkan ketersediaan *timestamp*, kelengkapan nilai pembacaan sensor, serta kesesuaian hasil pengukuran dengan kondisi operasional perangkat. Nilai rata-rata PM2.5 dan PM1.0 dihitung hanya menggunakan data pengukuran yang dinyatakan *valid*. Kelompok waktu yang tidak memiliki data pengukuran valid dinyatakan sebagai data tidak tersedia (N/A), bukan sebagai konsentrasi partikulat sebesar 0,00 µg/m³.

E. Pengujian Sistem

1. Pengujian Sensor PPD42

Tabel 3 menunjukkan pengujian sensor PPD42 dilakukan untuk mengetahui apakah sensor dapat membaca keberadaan debu atau partikulat di udara. Sensor diuji dengan cara mengaktifkan perangkat pada area pengujian, kemudian melihat apakah nilai PM1.0 dan PM2.5 muncul pada *dashboard.*

Tabel 3 Pengujian Respons Sensor terhadap Perubahan Kondisi Udara

No	Skenario Pengujian	Kondisi Sebelum Pengujian	Perlakuan/Proses Pengujian	Hasil dan Keterangan
1	Paparan cairan/gas berbau menyengat	PM2.5 = 31,96 µg/m³; PM1.0 = 10,21 µg/m³; status Sedang	Cairan/gas berbau menyengat dihembuskan ke area sensor PPD42	PM2.5 meningkat menjadi 44,25 µg/m³; PM1.0 menjadi 10,95 µg/m³; status berubah menjadi Tidak Sehat. Sensor berhasil membaca peningkatan partikulat.
2	Paparan asap kertas	PM2.5 = 33,84 µg/m³; PM1.0 = 5,31 µg/m³; status Sedang	Asap dari kertas yang dibakar diarahkan ke sensor PPD42	PM2.5 meningkat menjadi 38,67 µg/m³; PM1.0 menjadi 5,85 µg/m³; status berubah menjadi Tidak Sehat. Sensor berhasil merespons perubahan kualitas udara.
3	Pengujian luar ruangan	Alat ditempatkan pada area terbuka untuk membaca kondisi udara sekitar.	Sensor dibiarkan membaca kualitas udara luar ruangan dan hasilnya dipantau melalui dashboard.	*Dashboard* menampilkan PM2.5 = 38,14 µg/m³ dan PM1.0 = 6,74 µg/m³ dengan status Tidak Sehat. Sistem tetap dapat berjalan dan memperbarui data secara *real-time*.
4	Pengujian dalam ruangan	Alat dipindahkan dari area luar ruangan ke dalam ruangan.	Sensor membaca kondisi udara dalam ruangan dan hasilnya ditampilkan pada *dashboard*.	*Dashboard* menampilkan PM2.5 = 29,56 µg/m³ dan PM1.0 = 4,35 µg/m³ dengan status Sedang. Sistem tetap membaca dan menampilkan data secara *real-time.*

2. Pengujian Komunikasi IoT

Tabel 4 Pengujian *server* dan *database* dilakukan untuk memastikan data yang dikirim oleh ESP32 dapat diterima, disimpan, dan ditampilkan kembali pada *dashboard*. Data yang masuk dari perangkat IoT disimpan ke dalam *database* sebagai histori pengukuran.

Tabel 4 Pengujian Komunikasi IoT

No	Parameter Uji	Deskripsi Pengujian	Hasil Pengujian	Keterangan
1	Penerimaan data	*Server* menerima data dari ESP32.	Data diterima oleh *server*.	Berhasil
2	Penyimpanan data	*Server* menyimpan data ke *database*.	Data tersimpan sebagai histori.	Berhasil
3	Jumlah data	Sistem menghitung total data tersimpan.	*Dashboard* menampilkan 774 baris data.	Berhasil
4	Riwayat sensor	*Database* menampilkan data berdasarkan waktu.	Riwayat data tampil pada *dashboard.*	Berhasil
5	Pengambilan data	*Dashboard* mengambil data dari *database*.	Data terbaru dan histori tampil.	Berhasil

3. Pengujian Dashboard Web

Pada Tabel 5 Pengujian *dashboard web* dilakukan untuk mengetahui apakah tampilan sistem dapat menampilkan data monitoring secara jelas dan sesuai kebutuhan pengguna:

Tabel 5. Pengujian Sistem

No	Fitur yang Diuji	Deskripsi Pengujian	Hasil Pengujian	Keterangan
1	Nilai PM2.5	*Dashboard* menampilkan nilai PM2.5 terbaru.	Nilai PM2.5 tampil pada kartu *dashboard*.	Berhasil
2	Nilai PM1.0	*Dashboard* menampilkan nilai PM1.0 terbaru.	Nilai PM1.0 tampil pada kartu *dashboard*.	Berhasil
3	Status kualitas udara	Sistem menampilkan status berdasarkan nilai partikulat.	Status kualitas udara tampil pada *dashboard*.	Berhasil
4	Grafik tren	*Dashboard* menampilkan grafik PM2.5 dan PM1.0.	Grafik tren kerapatan debu tampil.	Berhasil
5	Riwayat data sensor	*Dashboard* menampilkan data historis.	Riwayat data sensor tampil dalam tabel.	Berhasil

No	Fitur yang Diuji	Deskripsi Pengujian	Hasil Pengujian	Keterangan
6	Analisis data	*Dashboard* menampilkan rata-rata, maksimum, minimum, dan total data.	Data analisis tampil sesuai hasil penyimpanan.	Berhasil
7	Filter tanggal	Pengguna memilih tanggal tertentu.	Data dapat difilter berdasarkan tanggal.	Berhasil

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT menggunakan sensor PPD42 dan ESP32 berhasil dirancang dan memonitoring, memantau kondisi debu atau partikulat pada area *Crusher Room*. Sensor PPD42 berfungsi membaca partikel debu di udara, sedangkan ESP32 mengolah data sensor dan mengirimkannya ke *server* melalui jaringan *Wi-Fi.*

Sistem berhasil menampilkan informasi kualitas udara melalui *dashboard* monitoring berupa nilai PM2.5, PM1.0, nilai rata-rata, nilai maksimum, nilai minimum, jumlah data tersimpan, grafik tren, serta riwayat data sensor. Data hasil pembacaan juga dapat disimpan ke dalam *database* sehingga dapat digunakan sebagai histori pengukuran dan bahan evaluasi kondisi udara pada area kerja. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat membantu pemantauan kualitas udara secara *real-time* pada area *Crusher Room* dimana sistem dapat menjadi media pendukung pemantauan kondisi kualitas udara sebagai bahan evaluasi keselamatan dan kesehatan kerja.

B. Saran

Untuk pengembangan selanjutnya, Sistem perlu dikembangkan dengan proses kalibrasi sensor menggunakan alat ukur kualitas udara standar agar hasil pembacaan PM2.5 dan PM1.0 menjadi lebih akurat.

Penelitian selanjutnya dapat menambahkan fitur peringatan otomatis seperti *buzzer*, lampu indikator, atau notifikasi pada *dashboard* ketika nilai partikulat melebihi batas yang telah ditentukan.

Sistem dapat dikembangkan dengan penambahan sensor lain, seperti PM10, suhu, kelembaban, atau gas tertentu, serta dilakukan pengujian dalam durasi yang lebih lama agar data monitoring yang diperoleh lebih lengkap dan representatif.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. N. Zulkarnain, R. H. Dzakwan, and T. Arrahman, "Survivorbox: sistem pemantauan dan peringatan pekerja berbasis aiot dengan komunikasi lora untuk mencegah kecelakaan di industri pertambangan," in *Proceedings of the Indonesian Conference on Occupational Safety, Health, and Environment (INCOSHET)*, 2025, pp. 16–34.

[2] C. H. Prabowo, "Pengaruh kesehatan dan keselamatan kerja (K3) dan lingkungan kerja terhadap produktivitas kerja karyawan PT Rickstar Indonesia," *J. Manaj. Bisnis Krisnadwipayana*, vol. 6, no. 3, pp. 59–69, 2018.

[3] N. A. F. Rahmawati, M. Martono, S. Sugiharto, K. J. Setyono, and P. Parhadi, "Peningkatan Produktivitas Kerja Melalui Penerapan Program K3 Di Lingkungan Konstruksi," *Bangun Rekaprima*, vol. 5, no. 1, pp. 1–12, 2019.

[4] A. F. Hikmiyah, "Analysis of Dust and NO2 Level in the Ambient Air and Sweeper's Respiratory Complaints in Purabaya Bus Station Sidoarjo," 2018.

[5] A. H. Ikhwanudin and J. Oktanuriawan, "Rancang Bangun dan Uji Kinerja Monitoring Kualitas Udara Sebagai Salah Satu Perangkat Kesehatan dan Keselamatan Kerja Di Laboratorium Rekayasa Pangan: Design and Performance Test of Air Quality Monitoring as a Work Health and Safety Device in Food Engineering Laboratory," in *NaCIA (National Conference on Innovative Agriculture)*, 2025, pp. 169–184.

[6] F. Ardiansyah, M. Misbah, and P. S. Pressa, "Sistem Monitoring Debu Dan Karbon Monoksida Pada Lingkungan Kerja Boiler Di PT. Karunia Alam Segar," *IKRA-ITH Teknol. J. Sains dan Teknol.*, vol. 2, no. 3, pp. 62–71, 2018.

[7] L. A. Faturrahman, B. F. Tanjung, and Y. Saragih, "Sistem Monitoring Dan Deteksi Dini Kualitas Udara Berbasis Internet Of Things," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 3, 2025.

[8] D. Setiadi and M. N. A. Muhaemin, "Penerapan internet of things (IOT) pada sistem monitoring irigasi (Smart Irigasi)," *Infotronik J. Teknol. Inf. dan Elektron.*, vol. 3, no. 2, pp. 95–102, 2018.

[9] I. B. P. Widja, "Sistem IoT Berbasis Protokol MQTT Dengan Mikrokontroler ESP8266 dan ESP32," *SNATIF*, vol. 5, no. 1, 2018.

[10] A. Ansori, "Studi Pemanfaatan Internet of Things dan Data Mining untuk Pengawasan Bahan Bakar Minyak (Studi Kasus: Perusahaan Pelayaran Penumpang Nasional)," *Wave J. Ilm. Teknol. Marit.*, vol. 12, no. 1, pp. 31–42, 2018.

[11] E. Austin, I. Novosselov, E. Seto, and M. G. Yost, "Laboratory evaluation of the Shinyei PPD42NS low-cost particulate matter sensor," *PLoS One*, vol. 10, no. 9, p. e0137789, 2015.

[12] Y. Wang, J. Li, H. Jing, Q. Zhang, J. Jiang, and P. Biswas, "Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement," *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 49, no. 11, pp. 1063–1077, 2015.

[13] M. Ghamari, C. Soltanpur, P. Rangel, W. A. Groves, and V. Kecojevic, "Laboratory and field evaluation of three low-cost particulate matter sensors," *IET Wirel. Sens. Syst.*, vol. 12, no. 1, pp. 21–32, 2022.

[14] G. P. U. Sugiarti, "Pengaruhnya Bagi Kesehatan Manusia," *J. Chem.*, vol. 10, pp. 50–58, 2009.

[15] A. Hidayat, "Dampak Polusi Udara Pada Kesehatan," 2023, doi: https://doi.org/10.31219/osf.io/wam46.

[16] W. H. Organization, *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2. 5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide: executive summary*. World Health Organization, 2021.