



RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI POLUSI UDARA PM2.5 DAN PM10 MENGGUNAKAN KOMUNIKASI LORA

Raihan Angga Pratama¹⁾, Pradini Puspitaningayu²⁾

¹⁾Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Email: raihan.22092@mhs.unesa.ac.id

²⁾Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Email: pradinip@unesa.ac.id

Abstract

Air pollution caused by motor vehicle emissions and human activities can increase particulate matter concentrations, particularly PM2.5 and PM10. This study aims to design and build an air pollution detection system using the HM3301 sensor and LoRa communication. The system uses an Arduino Uno R4 WiFi as the main controller, an HM3301 sensor to measure particulate matter concentrations, and a LoRa module as the communication medium between the transmitter and receiver. The research employs a quantitative approach using the Research and Development (R&D) method, which includes the stages of system design, fabrication, integration, and testing. Testing was conducted in an outdoor environment with varying communication distances to evaluate the system's ability to measure and transmit PM2.5 and PM10 data. System performance was analyzed based on particulate matter measurement results and data transmission success rates. Test results showed that the system was capable of reading PM2.5 and PM10 levels and transmitting data at a distance of 52 meters with a success rate of 99.31%. The developed system can serve as an alternative for air quality monitoring capable of measuring PM2.5 and PM10 concentrations and transmitting data wirelessly.

Keywords: Air quality, PM2.5, PM10, HM3301, LoRa, Arduino Uno R4 WiFi.

Abstrak

Pencemaran udara akibat aktivitas kendaraan bermotor dan kegiatan manusia dapat meningkatkan konsentrasi partikulat, khususnya PM2.5 dan PM10. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem deteksi polusi udara menggunakan sensor HM3301 dan komunikasi LoRa. Sistem menggunakan Arduino Uno R4 WiFi sebagai pengendali utama, sensor HM3301 untuk mengukur konsentrasi partikulat, serta modul LoRa sebagai media komunikasi antara transmitter dan receiver. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode Research and Development (R&D) yang meliputi tahap perancangan, pembuatan, integrasi, dan pengujian sistem. Pengujian dilakukan pada lingkungan outdoor dengan variasi jarak komunikasi untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengukur dan mengirimkan data PM2.5 dan PM10. Kinerja sistem dianalisis berdasarkan hasil pengukuran partikulat dan keberhasilan pengiriman data. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu membaca PM 2.5 dan PM 10 serta mengirimkan data pada jarak 52 meter dengan tingkat keberhasilan sebesar 99,31%. Sistem yang dikembangkan dapat menjadi alternatif pemantauan kualitas udara yang mampu mengukur konsentrasi PM2.5 dan PM10 serta mengirimkan data secara nirkabel.

Kata Kunci: Kualitas udara, PM2.5, PM10, HM3301, LoRa, Arduino Uno R4 WiFi.



PENDAHULUAN

Dalam satu dekade terakhir, perkembangan Internet of Things (IoT) telah mengalami pertumbuhan yang pesat dan menjadi salah satu teknologi yang digunakan dalam pemantauan lingkungan. IoT memungkinkan perangkat saling terhubung untuk mengumpulkan, mengirimkan, dan mengolah data secara otomatis sehingga informasi dapat diperoleh secara real-time.

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang berdampak terhadap kesehatan manusia dan keberlanjutan lingkungan. Salah satu parameter utama dalam penilaian kualitas udara adalah Particulate Matter (PM), terutama PM2.5 dan PM10. PM2.5 memiliki diameter aerodinamis kurang dari atau sama dengan 2,5 μm , sedangkan PM10 kurang dari atau sama dengan 10 μm . Pemantauan kedua parameter tersebut secara berkelanjutan diperlukan untuk memperoleh informasi perubahan partikulat di lingkungan.

Pemantauan kualitas udara konvensional masih memiliki biaya pengadaan, kalibrasi, dan operasional yang relatif tinggi sehingga jumlah titik pemantauan dapat terbatas. Perkembangan sensor berbiaya rendah seperti HM3301 memungkinkan pembangunan sistem pemantauan yang lebih terjangkau serta dapat diintegrasikan dengan mikrokontroler untuk melakukan akuisisi dan pengiriman data secara otomatis.

Dalam sistem pemantauan berbasis IoT, teknologi komunikasi menentukan jangkauan pengiriman dan keandalan transmisi data. LoRa merupakan salah satu teknologi komunikasi jarak jauh berdaya rendah yang dapat digunakan untuk sistem pemantauan lingkungan. Karakteristik tersebut mendukung penerapan LoRa sebagai media transmisi data pengukuran dari node pengirim menuju node penerima.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem deteksi polusi udara PM2.5 dan PM10 menggunakan sensor HM3301 dan komunikasi LoRa. Sistem dikembangkan untuk mengukur partikulat serta mengirimkan data hasil pengukuran secara nirkabel. Kinerja sistem dievaluasi melalui pengujian sensor dan pengujian komunikasi LoRa selama monitoring 3×24 jam.

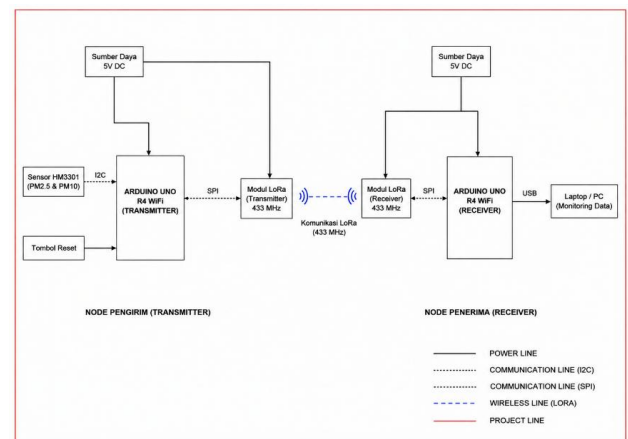
METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan jenis penelitian terapan dengan pendekatan kuantitatif dan metode Research and Development (R&D). Tahapan penelitian meliputi studi literatur, analisis kebutuhan, perancangan perangkat keras

dan perangkat lunak, integrasi sensor HM3301 dengan Arduino Uno R4 WiFi dan modul LoRa, pengujian sistem, pengambilan data, serta analisis hasil pengujian. Parameter yang diamati meliputi nilai PM2.5 dan PM10, keberhasilan pengiriman data, Packet Delivery Ratio (PDR), Packet Loss, dan RSSI.

3.1. Perancangan Sistem

Sistem terdiri atas node transmitter dan node receiver. Node transmitter menggunakan Arduino Uno R4 WiFi, sensor HM3301, dan modul LoRa. Sensor HM3301 membaca PM2.5 dan PM10 melalui antarmuka I²C, sedangkan modul LoRa mengirimkan data melalui SPI. Node receiver menggunakan Arduino Uno R4 WiFi dan modul LoRa untuk menerima paket dan menampilkan hasil pengukuran pada Serial Monitor.



Gambar 1. Blok Diagram Sistem

3.2. Pengujian Sensor

Pengujian sensor HM3301 dilakukan menggunakan sampel tepung yang telah disaring menggunakan saringan berukuran 2,5 μm dan 10 μm . Pengujian dilakukan selama tiga hari dengan satu kali percobaan per hari dan 150 data pembacaan pada setiap percobaan sehingga diperoleh 450 data. Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif berupa nilai minimum, maksimum, dan rata-rata.

3.3. Pengujian Komunikasi LoRa

Pengujian komunikasi dilakukan selama 3×24 jam dengan interval pengiriman satu menit. Node transmitter ditempatkan di rumah tetangga dan node receiver di rumah peneliti dengan posisi perangkat tetap. Jarak pengujian tercatat 52 m. Jumlah paket yang dikirim sebanyak 1.440 paket per hari atau 4.320 paket selama tiga hari. Parameter utama yang digunakan adalah PDR, Packet Loss, dan RSSI.



$$PDR = (N_diterima / N_dikirim) \times 100\%$$

$$\text{Packet Loss} = ((N_dikirim - N_diterima) / N_dikirim) \times 100\%$$

Monitoring lingkungan dilakukan selama 3×24 jam dengan pembacaan PM2.5 dan PM10 setiap satu menit. Data hasil pembacaan diterima oleh node receiver dan dicatat untuk dianalisis berdasarkan pola perubahan harian serta nilai rata-rata selama periode pengujian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

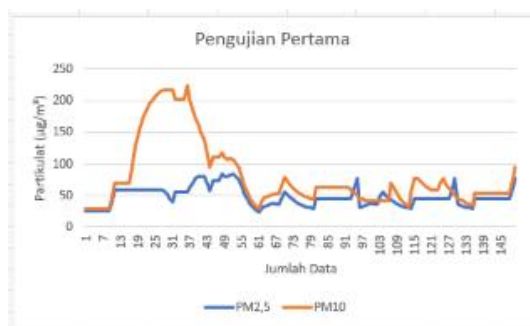
Hasil penelitian meliputi pengujian respons sensor HM3301 menggunakan sampel tepung, pengujian komunikasi LoRa, dan monitoring lingkungan selama tiga hari. Hasil tersebut digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mendeteksi PM2.5 dan PM10 serta mengirimkan data secara nirkabel.

4.1. Hasil Pengujian Sensor

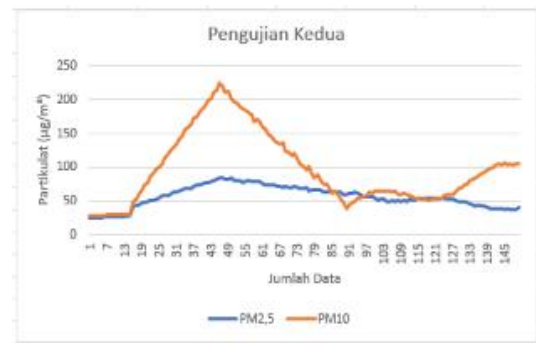
Tabel 1. Hasil Pengujian Sensor HM3301

Hari/Parameter	Minimum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Maksimum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Rata-rata ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1 / PM2.5	23,93	83,03	47,55
1 / PM10	45,77	224,32	70,51
2 / PM2.5	24,96	84,74	56,42
2 / PM10	27,93	223,83	97,10
3 / PM2.5	24,98	109,91	55,35
3 / PM10	27,73	238,40	107,18

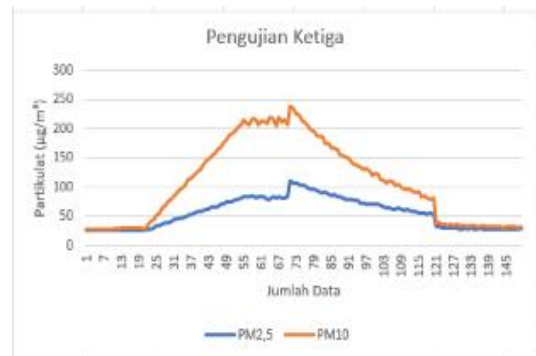
Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor HM3301 dapat merespons perubahan partikulat pada setiap hari pengujian. Rata-rata PM2.5 berturut-turut sebesar 47,55; 56,42; dan 55,35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan PM10 sebesar 70,51; 97,10; dan 107,18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pada ketiga hari, nilai rata-rata PM10 lebih tinggi dibandingkan PM2.5.



Gambar 2. Grafik Pengujian Sensor Hari Pertama



Gambar 3. Grafik Pengujian Sensor Hari Kedua



Gambar 4. Grafik Pengujian Sensor Hari Ketiga

Rata-rata hasil pengujian selama tiga hari diperoleh sebesar 53,11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk PM2.5 dan 91,60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk PM10. Nilai tersebut digunakan sebagai nilai acuan hasil pengujian sampel tepung.

4.2. Hasil Pengujian Komunikasi LoRa

Tabel 2. Pengujian Komunikasi LoRa

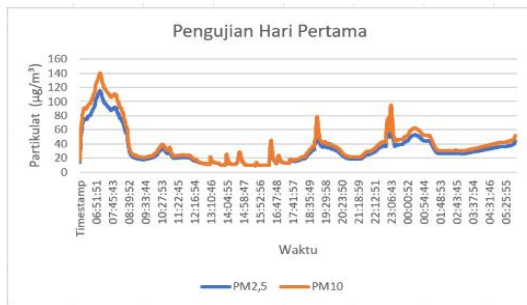
Hari	Paket Dikirim	Paket Diterima	Paket Hilang	Packet Loss
1	1.440	1.436	4	0,28%
2	1.440	1.435	5	0,35%
3	1.440	1.433	7	0,49%
Total	4.320	4.303	16	0,37%

Selama tiga hari, Packet Loss berada pada 0,28%–0,49% dengan rata-rata 0,37%. Nilai RSSI berada pada kisaran –72,07 hingga –72,67 dBm. Berdasarkan nilai Packet Loss, sebagian besar paket data berhasil diterima oleh node receiver. Nilai PDR yang digunakan dalam analisis adalah 99,63%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa komunikasi LoRa dapat digunakan untuk mendukung transmisi data hasil pengukuran pada jarak pengujian 52 m.



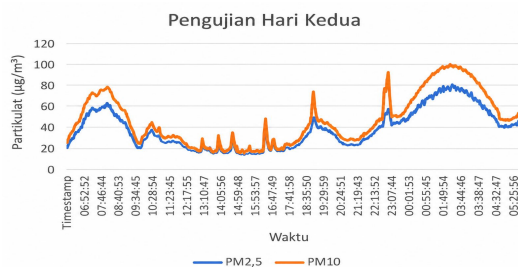
4.3. Hasil Monitoring 3×24 Jam

Monitoring selama tiga hari menunjukkan bahwa sistem dapat melakukan pembacaan dan pengiriman data secara kontinu. Pola PM2.5 dan PM10 mengalami fluktuasi sepanjang periode pengamatan, dengan nilai PM10 secara umum berada di atas PM2.5. Perubahan tersebut mengikuti kondisi lingkungan selama pengujian.



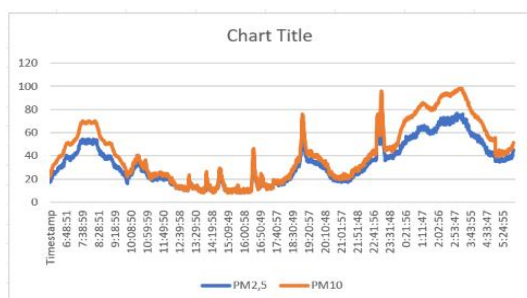
Gambar 5. Grafik Monitoring Hari Pertama

Pada hari pertama, rata-rata PM2.5 sebesar 32,59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan PM10 sebesar 37,98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Grafik menunjukkan beberapa peningkatan partikulat pada waktu tertentu, kemudian menurun kembali.



Gambar 6. Grafik Monitoring Hari Kedua

Pada hari kedua, rata-rata PM2.5 sebesar 34,72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan PM10 sebesar 43,18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Fluktuasi kembali terlihat selama 24 jam pengamatan, termasuk peningkatan pada periode malam hingga dini hari.



Gambar 7. Grafik Monitoring Hari Ketiga

Pada hari ketiga, rata-rata PM2.5 sebesar 33,92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan PM10 sebesar 42,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nilai PM10 tetap lebih tinggi daripada PM2.5 dan pola perubahan kedua parameter relatif serupa.

Tabel 3. Perbandingan Rata-rata Hasil Pengujian

Parameter	Sampel tepung	Monitoring 3×24 jam
PM2.5	53,11	33,74
PM10	91,60	41,05

Rata-rata monitoring selama tiga hari sebesar 33,74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk PM2.5 dan 41,05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk PM10. Dibandingkan dengan pengujian sampel tepung, terdapat selisih 19,37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada PM2.5 dan 50,55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada PM10. Perbedaan tersebut terjadi karena kedua pengujian dilakukan pada kondisi berbeda; pengujian sampel tepung menggunakan sumber partikulat yang lebih terkendali, sedangkan monitoring dilakukan pada kondisi lingkungan sebenarnya yang dipengaruhi aktivitas manusia, arah angin, kelembapan, dan kondisi lingkungan lainnya.

Secara keseluruhan, sistem mampu mendeteksi PM2.5 dan PM10 serta mengirimkan data menggunakan LoRa. Sensor HM3301 mengikuti perubahan partikulat selama pengamatan, sedangkan komunikasi LoRa mempertahankan proses transmisi dengan Packet Loss rata-rata 0,37%.

KESIMPULAN

Sistem deteksi polusi udara PM2.5 dan PM10 berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan sensor HM3301, Arduino Uno R4 WiFi, dan modul LoRa. Sensor mampu mendeteksi perubahan PM2.5 dan PM10 selama pengujian sampel maupun monitoring lingkungan. Pengujian komunikasi selama 3×24 jam pada jarak 52 m menghasilkan Packet Loss rata-rata 0,37% dan PDR 99,63%, dengan RSSI rata-rata sekitar -72,28 dBm. Monitoring lingkungan menghasilkan rata-rata PM2.5 sebesar 33,74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan PM10 sebesar 41,05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem dapat digunakan sebagai alternatif pemantauan partikulat berbasis komunikasi nirkabel.

Keterbatasan penelitian meliputi kondisi lingkungan yang tidak sepenuhnya dapat dikontrol, durasi monitoring yang terbatas selama 3×24 jam, pengujian komunikasi pada lokasi dan jarak tertentu, serta fokus pengukuran hanya pada PM2.5 dan PM10. Pengujian sampel tepung dan monitoring lingkungan juga dilakukan pada kondisi



yang berbeda sehingga nilai rata-ratanya digunakan untuk melihat perbedaan hasil pengukuran, bukan sebagai pembandingan mutlak.

Penelitian selanjutnya dapat memperluas lokasi dan durasi pengambilan data, melakukan kalibrasi sensor menggunakan perangkat standar, serta menambahkan parameter kualitas udara lain seperti CO, CO₂, NO₂, SO₂, O₃, suhu, dan kelembapan.

DAFTAR PUSTAKA

- A. A. Al-Ali et al., "A Mobile GPRS-Sensors Array for Air Pollution Monitoring," *IEEE Sensors Journal*, 2021.
- A. Giordano et al., "Performance Evaluation of Low-Cost Air Quality Sensors: A Review," *Science of the Total Environment*, vol. 818, Art. no. 151769, 2022.
- D. deSouza, "Key Concerns and Drivers of Low-Cost Air Quality Sensor Use," *Sustainability*, vol. 14, no. 1, p. 584, 2022, doi: 10.3390/su14010584.
- D. Suriano and M. Prato, "An Investigation on the Possible Application Areas of Low-Cost PM Sensors for Air Quality Monitoring," *Sensors*, vol. 23, no. 8, p. 3976, 2023, doi: 10.3390/s23083976.
- D. Suriano and M. Prato, "An Investigation on the Possible Application Areas of Low-Cost PM Sensors for Air Quality Monitoring," *Sensors*, vol. 23, no. 8, p. 3976, 2023.
- D. Suriano and M. Prato, "An Investigation on the Possible Application Areas of Low-Cost PM Sensors for Air Quality Monitoring," *Sensors*, vol. 23, no. 8, p. 3976, 2023.
- H. W. Lim, M. A. Razzaque, and M. M. Hassan, "Internet of Things: Architecture, Technologies and Applications," *Electronics*, vol. 14, no. 20, 2025, doi: 10.3390/electronics14203972.
- J. Huang et al., "Field Evaluation and Calibration of Low-Cost Air Pollution Sensors for Environmental Exposure Research," *Sensors*, vol. 22, no. 6, p. 2381, 2022.
- J. Huang et al., "Field Evaluation and Calibration of Low-Cost Air Pollution Sensors for Environmental Exposure Research," *Sensors*, vol. 22, no. 6, p. 2381, 2022.
- J. Huang, M.-P. Kwan, J. Cai, W. Song, C. Yu, Z. Kan, and S. H.-L. Yim, "Field Evaluation and Calibration of Low-Cost Air Pollution Sensors for Environmental Exposure Research," *Sensors*, vol. 22, no. 6, p. 2381, 2022, doi: 10.3390/s22062381.
- J. P. Smith et al., "Calibration of Low-Cost LoRaWAN-Based IoT Air Quality Monitors," *Sensors*, vol. 25, no. 5, 2025.
- J. P. Smith et al., "Calibration of Low-Cost LoRaWAN-Based IoT Air Quality Monitors," *Sensors*, vol. 25, no. 5, 2025.
- L. R. Crilley et al., "Evaluation of Low-Cost Optical Particle Counters for Ambient Air Monitoring," *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021.
- M. A. Khan, M. S. Hossain, and A. Ghoneim, "Advancements in Air Quality Monitoring: A Systematic Review of IoT-Based Air Quality Monitoring and AI Technologies," *Artificial Intelligence Review*, vol. 58, 2025, doi: 10.1007/s10462-025-11277-9.
- M. Badura et al., "Evaluation of Low-Cost Sensors for Ambient PM_{2.5} Monitoring," *Journal of Sensors*, 2021.
- M. M. Munir et al., "Utilizing Low-Cost Mobile Monitoring to Estimate the PM_{2.5} Inhaled Dose in Urban Environment," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 22, Art. no. 220079, 2022.
- M. Munir et al., "Research Priorities of Applying Low-Cost PM_{2.5} Sensors in Southeast Asian Countries," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 3, p. 1522, 2022.
- M. Munir et al., "Utilizing Low-Cost Mobile Monitoring to Estimate the PM_{2.5} Inhaled Dose in Urban Environment," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 22, Art. no. 220079, 2022.
- M. S. Islam et al., "Arduino-Based IoT System for Environmental Monitoring: A Review," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 12, no. 8, pp. 564–572, 2021.
- M. V. N. Narayana, D. Jalihal, and S. M. S. Nagendra, "Establishing a Sustainable Low-Cost Air Quality Monitoring Setup: A Survey of the State-of-the-Art," *Sensors*, vol. 22, no. 1, p. 394, 2022, doi: 10.3390/s22010394.
- M. V. N. Narayana, D. Jalihal, and S. M. S. Nagendra, "Establishing a Sustainable Low-Cost Air Quality Monitoring Setup: A Survey of the State-of-the-Art," *Sensors*, vol. 22, no. 1, p. 394, 2022.
- M. V. N. Narayana, D. Jalihal, and S. M. S. Nagendra, "Establishing a Sustainable Low-Cost Air Quality Monitoring Setup: A Survey of the State-of-the-Art," *Sensors*, vol. 22, no. 1, p. 394, 2022.



- N. A. Z. M. Noor et al., "Development of an Arduino-Based Wireless Environmental Monitoring System," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2021.
- N. F. A. Rahman, M. R. Hassan, and N. A. Hamid, "IoT Based Air Quality Monitoring System Using LoRaWAN," *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 234–241, 2025.
- N. F. A. Rahman, M. R. Hassan, and N. A. Hamid, "IoT Based Air Quality Monitoring System Using LoRaWAN," *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 234–241, 2025.
- O. Temby, K. Sepielak, and colleagues, "A Review of Literature on the Usage of Low-Cost Sensors to Measure Particulate Matter," *Earth*, vol. 4, no. 1, pp. 168–186, 2023, doi: 10.3390/earth4010009.
- P. Orellano et al., "Long-Term Exposure to Particulate Matter and Mortality: An Update of the WHO Global Air Quality Guidelines Systematic Review and Meta-Analysis," *International Journal of Public Health*, vol. 69, Art. no. 1607683, 2024.
- P. Orellano, M.-I. Kasdagli, R. Pérez Velasco, and E. Samoli, "Long-Term Exposure to Particulate Matter and Mortality: An Update of the WHO Global Air Quality Guidelines Systematic Review and Meta-Analysis," *International Journal of Public Health*, vol. 69, Art. no. 1607683, 2024, doi: 10.3389/ijph.2024.1607683.
- R. M. R. Ibrahim, N. M. Noor, and M. N. M. Isa, "IoT Based Air Quality Monitoring System Utilizing OpenRemote," *Buletin Pos dan Telekomunikasi*, vol. 23, no. 1, 2025.
- R. M. R. Ibrahim, N. M. Noor, and M. N. M. Isa, "IoT Based Air Quality Monitoring System Utilizing OpenRemote," *Buletin Pos dan Telekomunikasi*, vol. 23, no. 1, 2025.
- S. Madakam et al., "Internet of Things (IoT): A Literature Review," *Journal of Computer and Communications*, 2021.
- S. R. Moosavi et al., "SEA: A Secure and Efficient Authentication and Authorization Architecture for IoT-Based Healthcare Using Arduino Platforms," *IEEE Access*, 2021.
- S. Srishti et al., "Multiple PM Low-Cost Sensors, Multiple Seasons' Data, and Multiple Calibration Models," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 23, 2023.
- S. Srishti et al., "Multiple PM Low-Cost Sensors, Multiple Seasons' Data, and Multiple Calibration Models," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 23, 2023.
- S. Srishti, P. Agrawal, P. Kulkarni, H. C. Gautam, M. Kushwaha, and V. Sreekanth, "Multiple PM Low-Cost Sensors, Multiple Seasons' Data, and Multiple Calibration Models," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 23, Art. no. 220428, 2023.
- T. Dinh et al., "A Case Study Evaluating the Performance of a Cost-Effective Optical Particle Counter Coupled with a Humidity Compensation Approach for Ambient Air Monitoring of Particulate Matter," *Asian Journal of Atmospheric Environment*, vol. 17, 2023.
- U. Schilt et al., "Low-Cost Sensor Node for Air Quality Monitoring: Field Tests and Validation of Particulate Matter Measurements," *Sensors*, vol. 23, no. 2, p. 794, 2023.
- U. Schilt, B. Barahona, R. Buck, P. Meyer, P. Kappani, Y. Möckli, M. Meyer, and P. Schuetz, "Low-Cost Sensor Node for Air Quality Monitoring: Field Tests and Validation of Particulate Matter Measurements," *Sensors*, vol. 23, no. 2, p. 794, 2023, doi: 10.3390/s23020794.
- Y. K. Chataut and Y. W. Akl, "Internet of Things-Based Smart Sensors for Air Quality Monitoring: A Review," *Sensors*, vol. 23, no. 16, p. 7194, 2023, doi: 10.3390/s23167194.
- Y. K. Chataut and Y. W. Akl, "Internet of Things-Based Smart Sensors for Air Quality Monitoring: A Review," *Sensors*, vol. 23, no. 16, p. 7194, 2023.
- Y. Sun, J. Lin, and S. Shen, "LoRa for the Internet of Things: A Review of Recent Advances and Future Trends," *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 18, no. 3, 2022.