



IMPLEMENTASI ALAT MONITORING KUALITAS UDARA BERBASIS INTERNET OF THINGS (IoT) DI WILAYAH INDUSTRI PERTAMBANGAN NIKEL

Asdar¹, Ana Mustika², Miranda³, Nurtani⁴, Triani^{5*}, & Bardan Bulaka⁶

^{1,2,3,4,5,&6}Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan,
Universitas Sembilanbelas November Kolaka, Jalan Pemuda Nomor 339, Kolaka,
Sulawesi Tenggara 93561, Indonesia

*Email: trianiusnkolaka@gmail.com

Submit: 28-11-2025; Revised: 05-12-2025; Accepted: 08-12-2025; Published: 04-01-2026

ABSTRAK: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kualitas udara pada wilayah yang terdampak aktivitas industri dan pertambangan nikel dengan menggunakan alat monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT). Penelitian menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan studi lapangan yang dilaksanakan di dua lokasi dengan karakteristik berbeda, yaitu Kantor Desa Tambea sebagai wilayah yang jauh dari area pertambangan, dan Stasiun Meteorologi Sangia Nibandera Kolaka (BMKG Kolaka) yang berada dekat kawasan industri tambang nikel. Sistem monitoring dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor MQ-135 untuk mendeteksi gas pencemar, sensor DHT11 untuk mengukur suhu dan kelembapan, serta dilengkapi *buzzer* dan *OLED display*. Data dikirim secara *real-time* melalui aplikasi *Blynk*. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kualitas udara di Desa Tambea sebagian besar berada pada kategori “baik”, sedangkan BMKG Kolaka menunjukkan nilai yang lebih bervariasi, terutama pada siang hingga sore hari yang masuk kategori “sedang” hingga “buruk”. Temuan ini menunjukkan bahwa kedekatan lokasi terhadap aktivitas pertambangan secara signifikan memengaruhi konsentrasi polutan di udara. Sistem monitoring berbasis IoT terbukti efektif sebagai perangkat pemantauan kualitas udara secara *real-time* di wilayah yang berpotensi mengalami pencemaran.

Kata Kunci: ESP32, *Internet of Things* (IoT), Kualitas Udara, Monitoring Lingkungan, MQ-135, Pertambangan Nikel.

ABSTRACT: This study aims to analyze air quality in areas affected by industrial and nickel mining activities using *Internet of Things* (IoT)-based monitoring tools. The research used a quantitative descriptive method with a field study approach, which was carried out in two locations with different characteristics, namely the Tambea Village Office as an area far from the mining area and the Sangia Nibandera Kolaka Meteorological Station (BMKG Kolaka) which is located near the nickel mining industrial area. The monitoring system is designed using an ESP32 microcontroller integrated with an MQ-135 sensor to detect polluting gases, a DHT11 sensor to measure temperature and humidity, and is equipped with a *buzzer* and *OLED display*. Data is sent in *real-time* through the *Blynk* app. The measurement results showed that the air quality in Tambea Village was mostly in the “Good” category, while BMKG Kolaka showed more varied values, especially from noon to evening, which were in the “Moderate” to “Poor” category. These findings suggest that proximity to mining activities significantly affects the concentration of pollutants in the air. IoT-based monitoring systems have proven to be effective as *real-time* air quality monitoring devices in areas with potential for pollution.

Keywords: ESP32, *Internet of Things* (IoT), Air Quality, Environmental Monitoring, MQ-135, Nickel Mining.

How to Cite: Asdar, A., Mustika, A., Miranda, M., Nurtani, N., Triani, T., & Bulaka, B. (2026). Implementasi Alat Monitoring Kualitas Udara Berbasis *Internet of Things* (IoT) di Wilayah Industri Pertambangan Nikel. *Panthera : Jurnal Ilmiah Pendidikan Sains dan Terapan*, 6(1), 188-198. <https://doi.org/10.36312/panthera.v6i1.852>



PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki perkembangan yang pesat pada sektor industri, hal tersebut tentunya berpengaruh pada lingkungan hidup termasuk kualitas udara. Polusi udara yang dikeluarkan dari cerobong asap kawasan industri, apabila tidak dikelola dengan baik akan berdampak buruk pada kesehatan manusia. Oleh karena itu, monitoring tingkat polusi udara menjadi suatu hal yang *urgent* dilakukan (Arya *et al.*, 2018).

Sektor pertambangan Indonesia yang kaya akan sumber daya seperti batu bara, nikel, dan tembaga, menyumbang besar pada ekonomi nasional, namun eksploitasi tambang sering menyebabkan deforestasi, pencemaran air, dan degradasi lahan yang berdampak pada masyarakat sekitar. Dampak jangka panjangnya mengancam keberlanjutan ekosistem dan stabilitas ekonomi. Ketimpangan sosial dan ekonomi di Indonesia juga semakin melebar, dimana sebagian besar kekayaan terkonsentrasi di tangan sedikit orang, sementara masyarakat yang terkena dampak industri, hidup dalam kondisi kurang sejahtera (Lo *et al.*, 2024; Prasetyo *et al.*, 2025; Werner *et al.*, 2024).

Resiko lingkungan merujuk pada ancaman terhadap kesehatan manusia yang disebabkan oleh faktor-faktor lingkungan, termasuk aspek fisik, biologis, dan sosial ekonomi. Salah satu ancaman yang dapat berdampak pada kesehatan manusia serta lingkungan adalah bahaya kimia dalam bentuk polutan di udara (Israr *et al.*, 2025; Rosdiana *et al.*, 2023; Sundas *et al.*, 2024). Dampak tersebut dirasakan oleh pekerja di lingkungan kerja, warga di pemukiman sekitar operasional tambang, maupun penurunan kualitas lingkungan.

Salah satu penurunan kualitas lingkungan yang terjadi, yaitu penurunan kualitas udara. Penurunan kualitas udara tersebut dapat diakibatkan karena adanya udara emisi. Udara emisi merupakan udara yang dihasilkan dari emisi kendaraan bermotor dan cerobong asap yang ada di industri. Penurunan kualitas udara juga dapat diakibatkan dari partikulat debu yang tersuspensi ke udara selama proses penambangan terjadi. Partikulat debu dapat berasal dari penggalian dan pemuatan material selama proses penambangan, kemudian dari ceceran material selama pengangkutan menggunakan *dump truck* dan debu di *hauling road* yang tersuspensi ke udara karena adanya aktivitas di jalan tersebut (Fithri *et al.*, 2016).

Pencemaran udara adalah masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan komponen lain ke dalam udara dan atau berubahnya tatanan (komposisi) udara oleh kegiatan manusia atau oleh proses alam, sehingga kualitas udara menjadi kurang atau tidak dapat berfungsi lagi sesuai dengan peruntukannya (Sompotan & Sinaga, 2022). Pencemaran udara terjadi ketika zat-zat atau energi dari berbagai sumber manusia masuk ke dalam udara, menyebabkan penurunan kualitas udara hingga mencapai tingkat dimana udara tidak lagi mampu memenuhi fungsinya dengan baik. Hal itu dikarenakan keberadaan sejumlah besar substansi fisik, biologis, atau kimia di atmosfer bumi yang berpotensi membahayakan kesehatan manusia serta organisme hidup



lainnya. Dengan meningkatnya polusi udara, prakiraan kualitas udara dan sistem peringatan dini dapat dikembangkan untuk memantau dan mengendalikan kualitas pencemaran udara (Firdaus *et al.*, 2024).

Wilayah Pomalaa, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara adalah daerah yang sebagian wilayahnya merupakan lokasi pertambangan nikel. Kegiatan pertambangan dilakukan di sepanjang wilayah pesisir Kecamatan Pomalaa dan berdampingan dengan aktivitas kenelayanan masyarakat. Proses peleburan nikel di area pabrik, aktivitas eksploitasi lahan padat, dan aktivitas-aktivitas lain yang dilakukan oleh masyarakat di sekitar tambang menghasilkan beberapa jenis limbah cair dan limbah padat. Salah satu dampak yang dapat dilihat sebagai akibat dari aktivitas pertambangan adalah meningkatnya kekeruhan perairan pesisir dan masuknya bahan pencemar di perairan (Dar *et al.*, 2018; Safnowandi, 2019).

Menurut para tetua di Desa Tambea, Desa Tambea telah ada terlebih dahulu sebelum kehadiran PT. Aneka Tambang di wilayah Pomalaa. Perbedaan pandangan antara masyarakat dan perusahaan muncul terkait wilayah konsesi. Konsesi merupakan suatu penetapan administrasi negara yang secara yuridis bersifat kompleks karena mencakup seperangkat dispensasi, izin, dan lisensi, serta pemberian kewenangan tertentu kepada pihak konsesionaris (Hamzah, 2017).

Lokasi Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Pomalaa yang berada sangat dekat dengan kawasan industri PT. Antam, menjadikan wilayah ini memiliki potensi tinggi mengalami perubahan kualitas udara akibat aktivitas industri pertambangan dan pengolahan nikel. Aktivitas penambangan, khususnya proses *hauling*, menghasilkan partikel debu dalam jumlah besar yang berpotensi menurunkan kualitas udara ambien (Kasongo *et al.*, 2024; Nurfatimah, 2023; Rauf *et al.*, 2021).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat pencemaran udara pada wilayah yang terdampak aktivitas industri dan pertambangan, khususnya di kawasan Pomalaa, Kabupaten Kolaka; mengidentifikasi sumber utama polusi udara, meliputi emisi cerobong industri, aktivitas penambangan, angkutan material, serta debu dari *hauling road*; mengukur dampak pencemaran udara terhadap kesehatan masyarakat dan pekerja di sekitar wilayah tambang; mengkaji hubungan antara aktivitas industri dan pertambangan dengan penurunan kualitas lingkungan, termasuk kualitas udara dan lingkungan pesisir; serta memberikan rekomendasi strategi pengendalian dan pemantauan polusi udara yang lebih efektif untuk meminimalkan risiko lingkungan dan kesehatan.

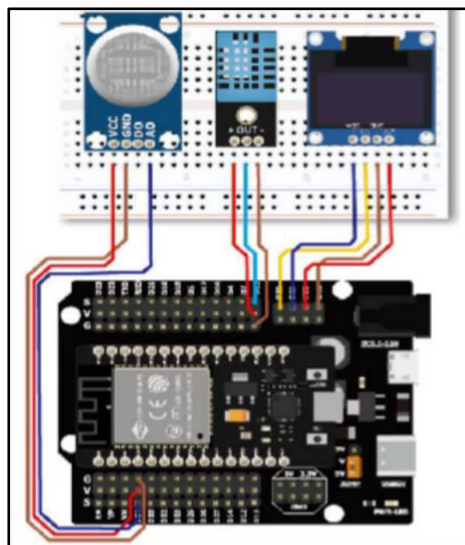
METODE

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan studi lapangan. Pendekatan ini digunakan untuk memperoleh gambaran nyata mengenai kualitas udara pada wilayah yang memiliki tingkat kedekatan berbeda terhadap aktivitas pertambangan nikel. Pengukuran dilakukan di dua lokasi utama, yaitu Kantor Desa Tambea Kabupaten Kolaka yang berjarak relatif jauh dari area pertambangan, dan Stasiun Meteorologi Sangia Nibandera Kolaka (BMKG Kolaka) yang berada dekat kawasan industri dan aktivitas pertambangan.

Tabel 1. Alat dan Bahan Penelitian.

Nama Alat dan Bahan	Jumlah
ESP32 Devkit	1
ESP32 Devkit Expansion Board	1
MQ-135	1
DHT11	1
Buzzer	1
OLED LCD	1

Rangkaian Alat



Gambar 1. Rangkaian Alat Monitoring Kualitas Udara.

ESP32 Devkit merupakan mikrokontroler berbasis *System-on-Chip* (SoC) yang terintegrasi dengan modul *Wi-Fi* dan *Bluetooth*. Alat ini berfungsi sebagai pusat kendali sistem, mengolah *input* dari sensor, serta mengirimkan data secara nirkabel. ESP32 memiliki kemampuan komputasi tinggi dan konsumsi daya rendah, sehingga banyak digunakan pada sistem *Internet of Things* (IoT) (El-Kalamaras *et al.*, 2025; Khozondar *et al.*, 2024; Vakaliuk *et al.*, 2024). Fungsi dalam penelitian adalah mengolah data dari sensor kualitas udara dan mentransmisikannya ke *platform* monitoring.

ESP32 Devkit Expansion Board adalah papan tambahan yang berfungsi memperluas *port input-output* ESP32, sehingga proses koneksi sensor menjadi lebih mudah, aman, dan stabil. Board ini juga meminimalkan risiko kesalahan sambungan kabel serta mempercepat proses *prototyping* pada penelitian berbasis IoT (Hercog *et al.*, 2023; Pramuditya *et al.*, 2023). Fungsi dalam penelitian, mempermudah integrasi ESP32 dengan sensor MQ-135, DHT11, buzzer, dan LCD.

Sensor MQ-135 memiliki kemampuan untuk mendeteksi berbagai jenis gas, namun pada pengujian ini difokuskan untuk mendeteksi karbon dioksida (CO₂) yang merupakan indikator penting dalam kualitas udara dalam ruangan maupun di luar ruangan. Kadar CO₂ yang tinggi dapat menyebabkan ketidaknyamanan, penurunan konsentrasi, bahkan gangguan kesehatan apabila

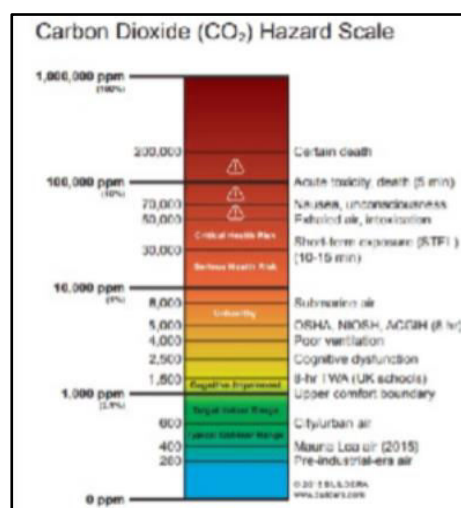
dibiarkan. Sensor MQ135 bekerja dengan prinsip resistansi gas yang berubah terpapar gas tertentu (Gessal *et al.*, 2019). Sensor ini umum digunakan dalam sistem pemantauan kualitas udara, khususnya pada lingkungan ruang tertutup maupun ruang terbuka, karena kemampuannya dalam mengenali sejumlah polutan udara yang berpotensi membahayakan manusia (Susilawati *et al.*, 2020).

Sensor DHT 11 adalah salah satu sensor yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan (*humidity*) (Hardianti *et al.*, 2019). Sifat-sifat benda yang bisa berubah akibat adanya perubahan suhu disebut sifat termometrik (Howells, 2015; Huang *et al.*, 2015; Suo *et al.*, 2015). *Buzzer* merupakan audio yang menghasilkan sinyal bunyi diberi tegangan tertentu. Dalam sistem monitoring, *buzzer* berfungsi sebagai alat peringatan (*alert system*) apabila parameter udara melebihi ambang batas aman (Azemi *et al.*, 2021; Hasyim & Suharjo, 2024; Lestari & Pangaribuan, 2025). Fungsi dalam penelitian, memberikan peringatan suara ketika kualitas udara masuk kategori berbahaya.

Layar OLED (*Organic Light Emitting Diode*) merupakan modul tampilan berukuran kecil yang efisien dan memiliki tingkat kontras tinggi. Modul ini mampu menampilkan teks, angka, maupun grafik dengan konsumsi daya rendah, sehingga ideal digunakan pada perangkat (Naik, 2023; Nayak & Choudhary, 2023; Yang *et al.*, 2024). Fungsi dalam penelitian, menampilkan data sensor secara *real-time*, seperti konsentrasi gas, suhu, kelembapan, dan status kualitas udara.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil pengukuran kualitas udara menggunakan sensor MQ-135 pada dua lokasi penelitian, yaitu Desa Tambea dan Stasiun Meteorologi Sangia Nibandera Kolaka (BMKG Kolaka) menunjukkan adanya variasi nilai konsentrasi gas (PPM) yang dipengaruhi oleh perbedaan waktu pengukuran dan karakteristik lingkungan masing-masing lokasi.



Gambar 2. Nilai Ambang CO₂ di Luar Ruangan.

Gambar 2 menunjukkan nilai ambang konsentrasi CO₂ yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini, yaitu kategori “baik” untuk nilai di bawah 450



PPM, kategori “sedang” untuk rentang 451-650 PPM, dan kategori “buruk” untuk nilai di atas 650 PPM. Penggunaan nilai ambang tersebut memberikan dasar klasifikasi yang jelas terhadap data pengukuran kualitas udara di kedua lokasi penelitian.

Tabel 2. Pengujian Sensor MQ-135 di Tambea.

Percobaan	PPM	Klasifikasi Kualitas Udara
Sore	469	Baik
Malam	373	Baik
Pagi	150	Baik
Siang	439	Baik
Sore	503	Sedang
Malam	283	Baik
Pagi	157	Baik
Siang	536	Sedang

Berdasarkan data pada Tabel 2 mengenai pengujian sensor MQ-135 di lokasi Tambea, kualitas udara menunjukkan variasi konsentrasi PPM pada setiap waktu pengukuran. Secara umum, sebagian besar hasil menunjukkan kategori “baik”, terutama pada waktu malam dan pagi hari yang memiliki nilai PPM relatif lebih rendah, seperti 373 PPM (malam) dan 150 PPM (pagi). Rendahnya nilai PPM pada waktu tersebut dapat disebabkan oleh minimnya aktivitas penduduk maupun aktivitas industri pada malam dan pagi hari. Hal ini sesuai dengan karakteristik sensor MQ-135 yang sensitif terhadap senyawa berbahaya (amonia, NO_x, benzena, CO₂), sehingga ketika aktivitas lingkungan menurun, konsentrasi polutan juga ikut berkurang.

Pada waktu siang dan sore hari, nilai PPM cenderung meningkat hingga mencapai kategori “sedang”, seperti 503 PPM dan 536 PPM. Peningkatan ini dapat dipengaruhi oleh aktivitas manusia yang lebih tinggi pada siang hari, termasuk aktivitas transportasi dan pergerakan angin yang membawa debu serta polutan dari area sekitar. Mengingat Tambea berada dekat kawasan tambang dan jalur transportasi, lonjakan nilai PPM pada siang sampai sore dapat dihubungkan dengan aktivitas operasional kendaraan angkut dan mesin yang menghasilkan emisi.

Tabel 3. Pengujian Sensor MQ-135 di BMKG.

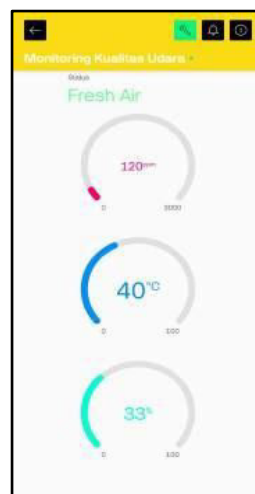
Percobaan	PPM	Klasifikasi Kualitas Udara
Siang	335	Baik
Sore	488	Sedang
Pagi	357	Baik
Siang	560	Sedang
Sore	605	Buruk
Pagi	405	Baik

Sementara itu, pada Tabel 3 yang menampilkan hasil pengujian sensor MQ-135 di BMKG, pola perubahan kualitas udara juga menunjukkan variasi yang konsisten dengan aktivitas harian. Pada siang hari, nilai PPM sebesar 335 PPM masih termasuk kategori “baik”, namun hasil pada sore hari mencapai 488 PPM dengan kategori “sedang”, kemudian meningkat menjadi 605 PPM pada

pengukuran berikutnya yang masuk kategori “buruk”. Kenaikan ini menunjukkan bahwa area BMKG memiliki potensi paparan polutan yang lebih tinggi pada jam-jam tertentu, diduga akibat faktor lingkungan seperti kepadatan kendaraan, perubahan suhu udara, atau adanya aktivitas urban yang lebih intensif dibandingkan Tambea. Pada waktu pagi nilai PPM kembali berada pada kategori “baik”, misalnya 357 PPM dan 405 PPM. Pola ini menegaskan bahwa kondisi udara pada pagi hari umumnya lebih bersih, karena polutan telah mengendap pada malam hari dan aktivitas manusia belum terlalu tinggi.

Jika kedua lokasi dibandingkan, Tambea cenderung memiliki nilai PPM yang lebih baik, sementara BMKG memiliki rentang nilai yang lebih tinggi pada sore hari. Perbedaan ini dipengaruhi oleh kondisi geografis, aktivitas industri, dan lalu lintas di sekitar masing-masing lokasi. BMKG yang berada dekat area pertambangan berpotensi menerima paparan debu atau gas dari aktivitas alat berat serta dipengaruhi oleh aktivitas perkotaan padat. Kedua data menunjukkan bahwa pola kualitas udara sangat dipengaruhi oleh waktu pengukuran, dengan kualitas terbaik umumnya terjadi pada pagi hari, dan kualitas terburuk muncul pada sore hari. Sensor MQ-135 berhasil memberikan gambaran yang jelas mengenai perubahan kualitas udara harian, sehingga dapat digunakan untuk monitoring lingkungan secara efektif.

Software atau perangkat lunak yang digunakan pada rancang bangun sistem pemantauan udara ini adalah Arduino IDE sebagai *software* untuk membuat program pada mikrokontrol dan aplikasi *Blynk* IoT untuk menampilkan data untuk pengguna secara *realtime*. *Blynk* adalah *platform Internet of Things* (IoT) yang memungkinkan pengendalian perangkat fisik secara jarak jauh melalui aplikasi seluler. *Platform Blynk* digunakan untuk memantau (monitoring) kualitas udara dengan menautkan perangkat keras ke *platform Blynk* dan mengatur koneksi dengan protokol *Wi-Fi*. Aplikasi *Blynk* juga digunakan untuk menampilkan data melalui android, sehingga peneliti dapat dengan mudah melihat tampilan sistem. Pada aplikasi *Blynk*, peneliti menampilkan 3 buah pengukur yang menampilkan 3 besaran yang diukur, yaitu temperatur, kelembapan, dan CO₂ dalam satuan *part per million* (ppm).



Gambar 3. Tampilan Aplikasi *Blynk* di Android.



SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengembangan dan pengujian alat monitoring kualitas udara berbasis IoT menggunakan sensor MQ-135 dan ESP32, dapat disimpulkan bahwa alat yang dirancang mampu bekerja dengan baik dalam memantau perubahan kualitas udara di wilayah yang terdampak aktivitas industri dan pertambangan. Hasil pengukuran di Desa Tambea dan BMKG menunjukkan bahwa kualitas udara cenderung bervariasi berdasarkan waktu pengamatan. Pada pagi, siang, dan malam hari, kualitas udara umumnya berada pada kategori baik, sedangkan pada siang dan sore hari nilai PPM cenderung meningkat dan masuk kategori sedang hingga buruk. Hal ini menunjukkan bahwa aktivitas manusia, transportasi, serta kegiatan industri dan pertambangan memiliki pengaruh signifikan terhadap konsentrasi polutan udara di lingkungan sekitar. Dengan demikian, alat monitoring berbasis IoT ini dapat digunakan sebagai solusi efektif untuk melakukan pemantauan kualitas udara secara *real-time* serta mendukung upaya mitigasi risiko lingkungan dan kesehatan masyarakat.

SARAN

Penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan jenis sensor lain, seperti sensor partikulat PM2.5 dan PM10, agar pemantauan kualitas udara menjadi lebih komprehensif. Pengambilan data juga disarankan dilakukan dalam rentang waktu yang lebih panjang untuk memperoleh pola pencemaran udara harian maupun musiman. Variabel lingkungan seperti arah angin, suhu, dan kelembapan juga perlu dipertimbangkan karena dapat memengaruhi penyebaran polutan di area sekitar pertambangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kepada pihak Desa Tambea, BMKG Kabupaten Kolaka, serta seluruh masyarakat dan pihak-pihak yang terlibat dalam proses pengumpulan data dan pengujian alat. Terima kasih juga diberikan kepada semua rekan dan mitra yang telah membantu, baik secara teknis maupun *non-teknis*, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR RUJUKAN

- Arya, T. F., Faiqurahman, M., & Azhar, Y. (2018). Aplikasi *Wireless Sensor Network* untuk Sistem *Monitoring* dan Klasifikasi Kualitas Udara. *Jurnal Sistem Informasi*, 14(2), 74-82. <https://doi.org/10.32520/stmsi.v7i3.312>
- Azemi, S. N., Loon, K. W., Amir, A., & Kamalrudin, M. (2021). An IoT-Based Alarm Air Quality Monitoring System. *Journal of Physics : Conference Series*, 1755(1), 1-17. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1755/1/012035>
- Dar, M. A. R., Soliman, F. A., & Abdallah, I. M. (2018). The Contributions Offlashfloods on the Heavy Metalsincorporations Within the Coralskeletons at Gulfs of Suez and Aqaba, Egypt. *International Journal of Ecotoxicology and Ecobiology*, 3(1), 11-16. <https://doi.org/10.11648/j.jjee.20180301.13>
- El-Khozondar, H. J., Mtair, S. Y., Qoffa, K. O., Qasem, O. I., Munyarawi, A. H., Nassar, Y. F., Bayoumi, E. H. E., & El Halim, A. A. E. B. A. (2024). A



- Smart Energy Monitoring System using ESP32 Microcontroller. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 9(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100666>
- Firdaus, R., Habibie, H., & Rizki, Y. (2024). Implementasi Algoritma *Random Forest* untuk Klasifikasi Pencemaran Udara di Wilayah Jakarta Berdasarkan Jakarta Open Data. *Jurnal Fasilkom : Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 14(2), 520-525. <https://doi.org/10.37859/jf.v14i2.7669>
- Fithri, N. K., Handayani, P., & Vionalita, G. (2016). Faktor-faktor yang Berhubungan dengan Jumlah Mikroorganisme Udara dalam Ruang Kelas Lantai 8 Universitas Esa Unggul. *Jurnal Bunga Rampai*, 13(1), 21-26.
- Gessal, C. I. Y., Lumenta, A. S. M., & Arie, S. M. (2019). Kolaborasi Aplikasi Android dengan Sensor MQ-135 Melahirkan Detektor Polutan Udara. *Jurnal Teknik Informatika*, 14(1), 109-120. <https://doi.org/10.35793/jti.v14i1.23983>
- Hamzah, Y. A. (2017). Hubungan Hukum Antara Pemegang Izin Usaha Pertambangan dengan Pemegang Hak Atas Tanah di Atasnya. *Jurnal Hukum Al Hikam*, 1(1), 115-123.
- Hardianti, D., Rizki, M., & Yanti, F. (2019). Penggunaan DHT11 dan *Arduino Uno* sebagai Pendeteksi Suhu pada Laptop. *Relativitas : Jurnal Riset Inovasi Pembelajaran Fisika*, 1(2), 38-45. <https://doi.org/10.29103/relativitas.v1i2.1463>
- Hasyim, F., & Suharjo, I. (2024). Sistem Notifikasi *Monitoring* Kualitas Udara dalam Ruangan Produksi Berbasis *Internet of Things* (IOT) Menggunakan Esp8266. *Pixel : Jurnal Ilmiah Komputer Grafis*, 17(1), 149-158. <https://doi.org/10.51903/pixel.v17i1.1999>
- Hercog, D., Lerher, T., Truntič, M., & Težak, O. (2023). Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices. *Sensors*, 23(15), 1-20. <https://doi.org/10.3390/s23156739>
- Howells, E. B. (2015). Measuring Temperature. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, 16(7), 358-362. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2015.04.011>
- Huang, F., Gao, Y., Zhou, J., Xu, J., & Wang, Y. (2015). Yb³⁺/Er³⁺ Co-Doped CaMoO₄: A Promising Green Upconversion Phosphor for Optical Temperature Sensing. *Journal of Alloys and Compounds*, 639(1), 325-329. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.02.228>
- Israr, M., Jain, A., Adusumilli, S. B. K., & Sharma, A. (2025). Chapter 10 - Risk Assessment for Environmental Health and Public Health. *Developments in Environmental Science*, 18(1), 205-218. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-33530-3.00010-4>
- Kalamaras, S. D., Tsitsimpikou, M.-A., Tzenos, C. A., Lithourgidis, A. A., Pitsikoglou, D. S., & Kotsopoulos, T. A. (2025). A Low-Cost IoT System Based on the ESP32 Microcontroller for Efficient Monitoring of a Pilot Anaerobic Biogas Reactor. *Applied Sciences*, 15(1), 1-20. <https://doi.org/10.3390/app15010034>
- Kasongo, J., Alleman, L. Y., Kanda, J.-M., Kaniki, A., & Riffault, V. (2024). Metal-Bearing Airborne Particles from Mining Activities: A Review on



- their Characteristics, Impacts and Research Perspectives. *Science of the Total Environment*, 951(1), 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175426>
- Lestari, R. A., & Pangaribuan, H. (2025). Desain dan Implementasi Sistem Pemantauan Kualitas Udara dalam Ruangan Berbasis Arduino. *Computer and Science Industrial Engineering (COMASIE)*, 12(3), 118-127. <https://doi.org/10.33884/comasiejournal.v12i3.9812>
- Lo, M. G. Y., Morgans, C. L., Santika, T., Mumbunan, S., Winarni, N., Supriatna, J., Voigt, M., Davies, Z. G., & Struebig, M. J. (2024). Nickel Mining Reduced Forest Cover in Indonesia but Had Mixed Outcomes for Well-Being. *One Earth*, 7(11), 2019-2033. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.010>
- Naik, K. (2023). Organic Light Emitting Diode Display. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)*, 12(7), 10270-10275. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2023.1207198>
- Nayak, D., & Choudhary, R. B. (2023). A Survey of the Structure, Fabrication, and Characterization of Advanced Organic Light Emitting Diodes. *Microelectronics Reliability*, 144(1), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2023.114959>
- Nurfatimah, N. (2023). Potensi Pencemaran Lingkungan Akibat Aktivitas Pertambangan pada Kawasan Industri Kab. Bantaeng. *Plano Madani : Jurnal Perencanaan Wilayah dan Kota*, 12(1), 58-64. <https://doi.org/10.24252/jpm.v12i1.40888>
- Pramuditya, I. M. A., Agung, I. G. A. P. R., & Rahardjo, P. (2023). Rancang Bangun Alat Uji Periferal ESP32 DEVKIT V1-DOIT 30 Pin. *Jurnal Spektrum*, 10(4), 340-347. <https://doi.org/10.24843/SPEKTRUM.2023.v10.i04.p39>
- Prasetyo, M. H., Baderan, D. W. K., & Hamidu, M. S. (2025). Dampak Kerusakan Lingkungan Akibat Eksploitasi Sumber Daya Mineral dari Kegiatan Pertambangan. *Hidroponik : Jurnal Ilmu Pertanian dan Teknologi dalam Ilmu Tanaman*, 2(2), 1-11. <https://doi.org/10.62951/hidroponik.v2i2.328>
- Rauf, R., Amraeni, Y., & Ali, L. (2021). PM2.5 Exposure Risk Analysis Around Mining Area Wolo District. *Miracle Journal of Public Health*, 4(2), 144-151. <https://doi.org/10.36566/mjph/Vol4.Iss2/251>
- Rosdiana, D., Hastiaty, I. A., Hartomy, E., Kango, I., Simbolon, P. T., Pradapaningrum, P. G., Indriasih, M., & Paramasatya, A. (2023). Kontaminasi Kimia dan Biologi pada Air dan Udara dengan ARKM: Analisis Risiko Kesehatan Masyarakat. *Public Health Risk Assessment Journal*, 1(1), 1-20. <https://doi.org/10.61511/phraj.v1i1.2023.222>
- Safnowandi, S. (2019). Keanekaragaman Plankton di Pantai Jeranjang Kabupaten Lombok Barat untuk Penyusunan Modul Ekologi Hewan. *JUPE: Jurnal Pendidikan Mandala*, 4(5), 195-201. <http://dx.doi.org/10.58258/jupe.v4i5.860>
- Sompotan, D. D., & Sinaga, J. (2022). Pencegahan Pencemaran Lingkungan. *Saintekes : Jurnal Sains, Teknologi dan Kesehatan*, 1(1), 6-13. <https://doi.org/10.55681/saintekes.v1i1.2>



- Sundas, A., Contreras, I., Mujahid, O., Beneyto, A., & Vehi, J. (2024). The Effects of Environmental Factors on General Human Health: A Scoping Review. *Healthcare*, 12(21), 1-38. <https://doi.org/10.3390/healthcare12212123>
- Suo, H., Guo, C., Yang, Z., Zhou, S., Duan, C., & Yin, M. (2015). Thermometry and Optical Heating Bi-Functional Properties of Upconversion Phosphor Ba5Gd8Zn4O21:Yb3+/Tm3+. *Journal of Materials Chemistry C*, 28(1), 1-18. <https://doi.org/10.1039/C5TC01054C>
- Susilawati, H., Rukmana, A., & Apip, J., (2020). Rancang Bangun *Prototype Monitoring Kadar Gas CO, CO₂, CH₄ Berbasis Mikrokontroler Atmega328p di Ruangan Laboratorium Kimia. Jurnal Penelitian dan Pengembangan Teknik Elektro Telekomunikasi Indonesia*, 11(1), 16-21.
- Vakaliuk, T. A., Andreiev, O. V., Dubyna, O. F., Korenivska, O. L., & Andreieva, Y. O. (2024). Use of Wireless Technologies in IoT Projects. *Journal of Edge Computing*, 3(2), 147-167. <https://doi.org/10.55056/jec.750>
- Werner, T. T., Toumbourou, T., Maus, V., Lukas, M. C., Sonter, L. J., Muhdar, M., Runting, R. K., & Bebbington, A. (2024). Patterns of Infringement, Risk, and Impact Driven by Coal Mining Permits in Indonesia. *Ambio*, 53(1), 242-256. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01944-y>
- Yang, X., Mu, G., Weng, K., & Tang, X. (2024). Advances in High-Efficiency Blue OLED Materials. *Photonics*, 11(9), 1-27. <https://doi.org/10.3390/photonics11090864>