

SKRIPSI

**AEGIS: SISTEM MONITORING POLUTAN UDARA
PORTABEL DENGAN TEKNOLOGI
INTERNET OF THINGS**



POLITEKNIK NEGERI BALI

Oleh:

Renaldy Chandra Setyo Beddri

NIM. 2115344032

**PROGRAM STUDI D4 TEKNIK OTOMASI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
POLITEKNIK NEGERI BALI
2025**

ABSTRAK

Kualitas udara menjadi isu penting seiring meningkatnya polusi di kawasan perkotaan maupun aktivitas industri. Penelitian ini mengembangkan sistem monitoring polutan udara portabel berbasis Internet of Things (IoT) yang dirancang untuk memantau kualitas udara secara waktu nyata. Perangkat ini dilengkapi sensor seperti suhu udara^{°C}, kelembapan(%), tekanan udara(mbar), PM_{2.5}, PM₁₀, PM₁, karbon monoksida (CO), amonia (NH₃), dan nitrogen dioksida (NO₂), serta modul GPS untuk pelacakan lokasi. Data dikirim melalui WiFi dengan integrasi Firebase dan divisualisasikan melalui aplikasi Flutter berbasis peta, serta dilengkapi fitur pencatatan ke Google Spreadsheet. Hasil pengujian selama tujuh hari pada rute yang sama menunjukkan perangkat mampu merekam dan mengirim data setiap 5 detik dengan total 3.074 titik pengamatan. PM_{2.5} teridentifikasi sebagai parameter dominan dengan konsentrasi maksimum 314,00 µg/m³ dan nilai ISPU tertinggi 65,74 (kategori Sedang), terutama pada area kemacetan. Konsentrasi cenderung lebih tinggi pada pagi dan sore hari seiring peningkatan volume lalu lintas, sedangkan parameter gas menunjukkan nilai rata-rata rendah dan tidak reaktif. Sistem terbukti efektif memberikan visualisasi spasial historis berupa titik berwarna pada jalur yang dilalui, dan dengan dukungan tampilan dashboard pada layar TFT, mampu meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap paparan polusi udara secara informatif, fleksibel, dan terjangkau.

Kata kunci: *Internet of Things*, GPS, Flutter, ESP32, Firebase, PM_{2.5}, PM₁₀, PM₁, (CO), amonia (NH₃), nitrogen dioksida (NO₂), portable, Peta

ABSTRACT

Air quality has become a critical issue in line with increasing pollution in urban areas and industrial activities. This study developed a portable air pollutant monitoring system based on the Internet of Things (IoT) designed to monitor air quality in real time. The device is equipped with sensors for air temperature ($^{\circ}\text{C}$), humidity (%), air pressure (mbar), $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , PM_1 , carbon monoxide (CO), ammonia (NH_3), nitrogen dioxide (NO_2), as well as a GPS module for location tracking. Data is transmitted via WiFi with Firebase integration and visualized through a Flutter-based application featuring maps, complemented by a logging feature to Google Spreadsheet. Testing over seven consecutive days along the same route showed that the device was capable of recording and transmitting data every 5 seconds, resulting in a total of 3,074 observation points. $\text{PM}_{2.5}$ was identified as the dominant parameter, with a maximum concentration of $314.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and the highest Air Quality Index (AQI) value of 65.74 (Moderate category), predominantly in congested areas. Concentrations tended to be higher in the morning and late afternoon, coinciding with increased traffic volume, while gas parameters showed lower averages and were non-reactive during the observation period. The system effectively provides historical spatial visualization in the form of color-coded points along the traveled route, and with the support of a TFT dashboard display, it can enhance public awareness of air pollution exposure in an informative, flexible, and affordable manner.

Keywords: Internet of Things, GPS, Flutter, ESP32, Firebase, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , PM_1 , carbon monoxide (CO), ammonia (NH_3), nitrogen dioxide (NO_2), portable, map

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN UJIAN SKRIPSI.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	iii
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN KARYA SKRIPSI.....	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	5
2.2 Landasan Teori	6
2.2.1 <i>Particulate Matter PM_{2.5} Air Quality</i> DfRobot Sensor.....	6
2.2.2 Sensor MICS-6814.....	8
2.2.3 Sensor BME680.....	9
2.2.4 Global Positioning System (GPS).....	10
2.2.5 ESP32-S3 (T-Display Lilygo).....	11
2.2.6 Firebase	12
2.2.7 Flutter.....	13
2.2.8 Polutan yang Diamati.....	14
2.2.9 Klasifikasi Data.....	17
2.2.10 Sistem informasi Geografis.....	19
BAB III METODE PENELITIAN	20
3.1 Proses Metode Perancangan.....	20
3.2 Proses Kinerja Perangkat	21
3.3 Desain Perangkat Keras/ <i>hardware</i>	23

3.3.1	Desain Perangkat	23
3.3.2	Skema Rangkaian.....	25
3.4	Perancangan Perangkat Lunak/ <i>software</i>	29
3.4.1	Pengolahan Data Pada Firebase	29
3.4.2	Tampilan Visual pada Flutter	30
3.4.3	Tampilan pada Display Mikrokontroler	32
3.5	Analisis Status Data	32
3.5.1	Metode Pengambilan Data	32
3.5.2	Pengamatan Data	33
3.6	Hasil Yang Diharapkan	35
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	36
4.1	Hasil Implementasi Sisten.....	36
4.1.1	Implementasi Alat	36
4.1.2	Implementasi Aplikasi	38
4.1.3	Implementasi Penyimpanan Data	41
4.2	Hasil Pengujian Sistem	41
4.2.1	Pengujian Alat.....	41
4.2.2	Pengujian Aplikasi	42
4.2.3	Pengujian Penyimpanan Data	43
4.2.4	Pengujian Parameter-parameter yang Diamati	44
4.3	Pembahasan Hasil Implementasi dan Pengujian.....	45
4.3.1	Analisis Implementasi Sistem.....	45
4.3.2	Analisis Pengujian Sistem.....	47
4.3.3	Analisis Perbandingan Hasil terhadap Acuan yang Dipakai di Tinjauan Pustaka	50
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	54
5.1	Kesimpulan	54
5.2	Saran.....	54
	DAFTAR PUSTAKA.....	56
	LAMPIRAN.....	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 PM _{2.5} Air Quality Sensor DFRobot	6
Gambar 2. 2 Ilustrasi Metode Laser Scattering Pada Particulate Matter [16].....	7
Gambar 2. 3 MICS-6814 Sensor	8
Gambar 2. 4 Sensor BME680	9
Gambar 2. 5 Prinsip teknologi Metal Oxide Semiconductor (MOX)[20].....	9
Gambar 2. 6 GPS Module	11
Gambar 2. 7 ESP32 S3 T-Display Lilygo	11
Gambar 2. 8 Firebase Relational Database Management System (RDBMS)[24]	12
Gambar 2. 9 Flutter Intergration[26]	13
Gambar 2. 10 ilustrasi ukuran Partikulat (PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₁₀)[28].....	14
Gambar 2. 11 Perbedaan Particulate Matter (PM) dengan Gas [30].	15
Gambar 2. 12 Peta Lapisan pada Sistem Informasi Geografis (SIG)[33]	19
Gambar 3. 1 Ruang Lingkup Dasar Perancangan	20
Gambar 3. 2 Blok Diagram Perangkat	21
Gambar 3. 3 Diagram Alir Kinerja Perangkat.....	22
Gambar 3. 4 Desain Perangkat.....	23
Gambar 3. 5 Bagian Dalam Perangkat	24
Gambar 3. 6 Baterai	24
Gambar 3. 7 (a). Skema Rangkaian dan (b). Bagian Tata Letak	26
Gambar 3. 8 Portabilitas Perangkat.....	28
Gambar 3. 9 Pengolahan pada Firebase Database.....	29
Gambar 3. 10 Tampilan Utama dan Peta.....	30
Gambar 3. 11 Tampilan Grafik dan Data Logger	31
Gambar 3. 12 Tampilan Pada Display Mikrokontroler	32
Gambar 3. 13 Peta Jalur Observasi	33
Gambar 4. 1 Gambar perangkat (a)Tampak Samping, (b) Tampak depan dan (c) Tampak belakang	36
Gambar 4. 2 Pseudocode Pengiriman Data ke Firebase.....	37
Gambar 4. 3 Tampilan Display TFT Perangkat.....	38
Gambar 4. 4 Fitur dari Halaman Utama Pada Aplikasi AEGIS	38
Gambar 4. 5 Fitur dari Halaman Peta.....	39
Gambar 4. 6 Fitur dari Halaman Statistik dan Logger	40

Gambar 4. 7 Dokumentasi logger pada google spreadsheets	41
Gambar 4. 8 Dokumentasi Alat Selama Uji Lapangan	41
Gambar 4. 9 Integrasi Realtime Database Firebase dengan Tampilan Aplikasi Flutter	42
Gambar 4. 10 Sistem Penyimpanan Data Melalui Kendali Switch Slider	43
Gambar 4. 11 Dokumentasi pengujian prameter $PM_{2.5}$	44
Gambar 4. 12 Grafik Box Plot pada Parameter data Suhu, Kelembapan dan Tekanan Udara.....	49
Gambar 4. 13 Grafik Box Plot pada Parameter data $PM_{2.5}$, PM_{10} , PM_1	49
Gambar 4. 14 Grafik Box Plot pada Parameter data CO , NH_3 , dan NO_2	50

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Hasil Pengujian Sensor PM _{2.5} dan Air Quality Indeks [17].....	7
Tabel 2. 2 Nilai hasil pengujian sensor BME680 Suhu dan Kelembaban udara[21]	10
Tabel 2. 3 Perbedaan Particulate Matter (PM) dengan Gas	16
Tabel 2. 4 Kategori Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU)[32].....	17
Tabel 2. 5 Konversi Nilai Konsentrasi [32].....	18
Tabel 3. 1 Keterangan Gambar Komponen	25
Tabel 3. 2 Detail Komponen	26
Tabel 3. 3 Data Logger Google Spreadsheet.....	33
Tabel 3. 4 Nilai Konsentrasi Per hari	34
Tabel 3. 5 Nilai Konsentrasi Dalam Satu Minggu dengan Metode Statistik Deskriptif	34
Tabel 4. 1 Keterangan Dokumentasi Pengujian	45
Tabel 4. 2 Hasil Analisis Menggunakan Metode Statistik Deskriptif	48
Tabel 4. 3 Rata-rata dan Analisis Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) pada hari Sabtu, 5 Juli 2025.....	51
Tabel 4. 4 Ringkasan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)	52

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Udara merupakan elemen yang sangat vital setelah air dalam mendukung kelangsungan makhluk hidup di permukaan bumi, normalnya terdiri dari sekitar 78,1% nitrogen, 20,93% oksigen, dan 0,03% karbon dioksida, dan berbagai gas lainnya, seperti argon, neon, kripton, xenon, helium, uap air, debu juga bakteri. Walaupun sebagai penyedia oksigen, udara dapat menyebarkan penyakit kepada manusia, hewan, dan tumbuhan melalui persebaran polutan, masuknya berbagai zat atau komponen lain ke dalam udara, pada satuan *particulate matter* atau partikel halus berukuran kecil mikrogram per meter kubik ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) disebut $\text{PM}_{2.5}$ [1] [2] [3]. Sebagian besar polutan dihasilkan oleh aktivitas manusia berskala besar, seperti mesin industri, pembangkit listrik, dan mesin berbahan bakar yang menyumbang sekitar 80% polusi udara saat ini, serta beberapa sumber alam seperti kebakaran hutan dan letusan gunung berapi[4].

Berdasarkan data World Health Organization (WHO) sekitar 4,2 juta kematian dini di seluruh dunia pada tahun 2019, terutama akibat paparan partikel halus yang menyebabkan hingga 68% kematian ini oleh penyakit jantung iskemik dan stroke, 14% oleh penyakit paru obstruksi kronik, 14% oleh infeksi saluran pernapasan bawah akut, dan 4% oleh kanker paru-paru [5]. Sehingga perlunya perhatian khusus di wilayah perkotaan yang terpapar polutan langsung pada aktivitas keseharian.

Di kota-kota besar Indonesia, khususnya di Denpasar, Bali, berdasarkan data *Electronic Registration and Identification* (ERI) Korps Lalu Lintas Polri (Korlantas Polri), jumlah kendaraan bermotor di Denpasar telah mencapai 1,76 juta unit per Oktober 2024 [6]. Kondisi ini diperkuat oleh laporan dari data indeks kualitas udara oleh IQAir, yang mencatat bahwa pada 4 Maret 2024 pukul 10.40 WIB, Denpasar menjadi kota dengan tingkat polusi udara tertinggi di Indonesia sebesar 84 poin atau masuk dalam kategori moderat [7]. Paparan polutan udara yang semakin memburuk ini meningkatkan risiko gangguan kesehatan pernapasan bagi masyarakat, terutama kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan penderita penyakit paru-paru.

Sehingga pada penelitian ini, Penulis memantau aktivitas paparan polutan di wilayah perkotaan pada berbagai waktu yang didasari dari tingkat persebaran polutan, seperti pagi hari saat berangkat kantor, saat istirahat makan siang, dan sore hari saat pulang kantor. Dalam melakukan pemantauan ini, Penulis merancang alat yang

dilengkapi dengan komponen utama yaitu, sensor *particulate matter* PM_{2.5} mendeteksi partikel halus berukuran kecil mikrogram per meter kubik ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [2]. Sensor MICS6814 mendeteksi gas seperti karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), dan amonia (NH₃)[8]. Serta sistem penentuan posisi global atau *Global Positioning System* (GPS) dalam pemantauan personal yang lebih baik tentang aktivitas ruang dan waktu serta dampaknya terhadap paparan polutan [9]. Pada mikrokontroler menggunakan ESP32 sebagai pengirim data ke basis data Firebase dalam penerapan *Internet of Things* IoT, kemudian data tersebut divisualisasikan pada aplikasi *mobile* Flutter dengan fitur utama geo-informasi berdasarkan warna tingkat polutan yang terpapar.

Oleh karena itu, penelitian ini merupakan penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) pada bidang kesehatan dan lingkungan, dengan tujuan memantau kualitas udara secara waktu nyata dan memberikan informasi yang relevan bagi masyarakat. Dari sudut pandang pengguna, ketersediaan informasi kualitas udara yang akurat dan mudah diakses menjadi kebutuhan penting untuk mengantisipasi risiko kesehatan akibat paparan polusi. Saat ini, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) telah memasang stasiun pemantauan kualitas udara di beberapa lokasi strategis. Namun, perangkat tersebut memerlukan biaya instalasi dan operasional yang tinggi, serta cakupan area pemantauannya terbatas pada titik pemasangan alat. Kondisi ini menimbulkan kesenjangan informasi bagi wilayah yang berada di luar jangkauan stasiun pemantau. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini menghadirkan solusi berupa perangkat bernama AEGIS (*Air and Environmental Geo-Information System*), yaitu perangkat monitoring portabel berbasis IoT yang terjangkau dan mampu memantau kualitas udara di berbagai lokasi secara portabel.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, adapun rumusan masalah yang akan diangkat adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan merealisasikan alat monitoring portabel berbasis IoT yang mampu memantau paparan polutan udara secara waktu nyata?
2. Bagaimana menyimpan dan memvisualisasikan data kualitas udara secara efektif melalui *platform cloud*?
3. Bagaimana menganalisis data hasil pemantauan kualitas udara berdasarkan lokasi dan waktu pengukuran?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini ditetapkan untuk memperjelas fokus dan ruang lingkup terkait objek penelitian, sebagai berikut:

1. Ruang lingkup alat yaitu, fokus pada pengembangan alat pemantauan portabel berbasis IoT sensor PM_{2.5} dan MICS6814 untuk mendeteksi kualitas udara serta menggunakan sistem penentuan global (GPS), tanpa mempertimbangkan teknologi lain.
2. Waktu pemantauan yaitu, pemantauan dilakukan pada pagi hari, saat istirahat makan siang, dan sore hari, tanpa mencakup waktu lain.
3. *Platform* penyimpanan data yaitu, data disimpan di cloud Firebase dan divisualisasikan melalui aplikasi *mobile* Flutter.
4. Analisis data yaitu, Analisis terbatas pada pengukuran kualitas udara berdasarkan sensor digunakan, lokasi pada geo-infromasi dan waktu yang ditentukan, tanpa mempertimbangkan faktor eksternal seperti cuaca atau aktivitas industri.
5. Fokus pada paparan polutan personal yaitu, penelitian berfokus pada pemantauan paparan polutan personal, tanpa analisis pada tingkat populasi atau komunitas.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diidentifikasi, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk merancang dan merealisasikan alat monitoring portabel berbasis IoT yang mampu memantau paparan polutan udara secara waktu nyata.
2. Untuk menyimpan dan memvisualisasikan data kualitas udara secara efektif melalui *platform cloud*.
3. Untuk menganalisis data hasil pemantauan kualitas udara berdasarkan lokasi dan waktu pengukuran.

1.5 Manfaat Penelitian

Berdasarkan penelitian ini diharapkan memberikan manfaat akademik dan manfaat aplikatif, sebagai berikut:

1. Manfaat Akademik:
 - a. Pengembangan Ilmu Pengetahuan. Penelitian ini akan menyumbang pada pengembangan teknologi pemantauan kualitas udara, yang dapat memperkaya literatur ilmiah di bidang lingkungan.

- b. Referensi Penelitian Lanjutan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi peneliti lain dalam studi-studi terkait, sehingga mendorong penelitian lebih lanjut di bidang yang sama.
- c. Peningkatan Teori. Penelitian ini berpotensi memperluas pemahaman tentang teknik analisis data lingkungan, yang dapat digunakan untuk meningkatkan metodologi penelitian di masa depan.

2. Manfaat Aplikatif:

- a. Pemantauan Kualitas Udara. Alat yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat digunakan oleh masyarakat untuk memantau polutan udara secara waktu nyata, sehingga meningkatkan partisipasi pengguna.
- b. Kesadaran Lingkungan. Penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan kesadaran masyarakat tentang isu polusi udara dan dampaknya terhadap kesehatan, mendorong tindakan proaktif dalam menjaga kualitas lingkungan.
- c. Dukungan Kebijakan. Data penelitian ini, memberikan dukungan yang kuat bagi pemerintah dalam merumuskan kebijakan lingkungan yang lebih efektif dan responsif terhadap masalah polusi udara.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian sistem monitoring polutan udara portabel selama tujuh hari dengan total 3.074 titik pengamatan pada rute yang sama, maka dapat disimpulkan:

1. Perancangan dan Realisasi Perangkat

Perangkat monitoring portabel berbasis IoT berhasil dirancang dan direalisasikan dengan kemampuan merekam, mengirim, dan menyimpan data lingkungan secara waktu nyata setiap interval 5 detik. Parameter yang diamati meliputi partikulat udara (PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10}) dan gas polutan (CO , NO_2 , NH_3), dilengkapi modul GPS untuk pemetaan lokasi.

2. Penyimpanan dan Visualisasi Data

Data kualitas udara berhasil disimpan tersinkronisasi ke *platform cloud* Google *Spreadsheets*. Visualisasi data dilakukan melalui aplikasi AEGIS dengan basis *framework* Flutter, yang mampu menampilkan peta sebaran polutan berbasis GPS dengan klasifikasi warna.

3. Analisis Data Berdasarkan Lokasi dan Waktu

Hasil analisis menunjukkan $PM_{2.5}$ sebagai parameter dominan dengan konsentrasi maksimum $314,00 \mu g/m^3$ dan nilai ISPU tertinggi 65,74 (kategori Sedang), terutama di area kemacetan. Konsentrasi cenderung meningkat pada pagi dan sore hari sesuai pola aktivitas lalu lintas, sedangkan parameter gas menunjukkan nilai rendah dan tidak reaktif selama periode pengamatan. “pengujian sekian ISPU menekankan pembaca”

5.2 Saran

Sebagai tindak lanjut dari penelitian ini, berikut beberapa saran pengembangan sistem ke depan:

1. Perluasan Area Pengamatan

Karena keterbatasan pengambilan data dalam penelitian ini, disarankan untuk memperluas wilayah atau rute pengambilan data ke area yang lebih beragam, seperti kawasan industri, pemukiman, dan ruang terbuka publik.

2. Perpanjangan Durasi Pengumpulan Data

Penambahan jangka waktu pengamatan dalam hitungan minggu atau bulan diperlukan untuk mendapatkan gambaran yang lebih komprehensif terhadap variasi kualitas udara dalam berbagai kondisi cuaca dan waktu.

3. Peningkatan Presisi dan Skalabilitas

Perlu dilakukan pengembangan sensor dengan tingkat presisi yang lebih tinggi serta pengelolaan data berbasis *cloud backend* untuk memfasilitasi manajemen data secara *realtime* dan meningkatkan skalabilitas sistem.

4. Sumber Energi Alternatif

Perlu ditambahkan panel surya mini sebagai sumber daya alternatif untuk mendukung portabilitas perangkat di luar ruangan dalam meningkatkan daya tahan perangkat.

5. Pembaruan Sistem Nirkabel

Disarankan untuk menerapkan pembaruan perangkat lunak secara *Over-The-Air* (OTA), baik pada perangkat keras maupun aplikasi, guna memudahkan pemeliharaan dan pengembangan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jerri Agustan, P. Lukitowati Hariani, and Novrikasari, “Hubungan PM_{2,5} Dan PM₁₀ Dalam Udara Ambien Terhadap Penyakit Infeksi Saluran Pernapasan Akut (Studi Kasus Desa Tanjung Jambu Kecamatan Merapi Timur Kabupaten Lahat),” *J. Pengendali. Pencemaran Lingkung. JPPL*, vol. 6, no. 2, pp. 1–8, Sept. 2024, doi: 10.35970/jppl.v6i2.2271.
- [2] S. Maharani and W. R. Aryanta, “Dampak Buruk Polusi Udara Bagi Kesehatan Dan Cara Meminimalkan Risikonya,” *J. Ecocentrism*, vol. 3, no. 2, Art. no. 2, Aug. 2023, doi: 10.36733/jeco.v3i2.7035.
- [3] S. Arba, “Kosentrasi Respirable Debu Particulate Matter (Pm_{2,5}) Dan Gangguan Kesehatan Pada Masyarakat Di Pemukiman Sekitar PLTU,” *Promot. J. Kesehat. Masy.*, vol. 9, no. 2, Art. no. 2, Dec. 2019, doi: 10.56338/pjkm.v9i2.963.
- [4] I. Manisalidis, E. Stavropoulou, A. Stavropoulos, and E. Bezirtzoglou, “Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review,” *Front. Public Health*, vol. 8, p. 14, Feb. 2020, doi: 10.3389/fpubh.2020.00014.
- [5] “Ambient (outdoor) air pollution.” Accessed: Jan. 16, 2025. [Online]. Available: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [6] “Jumlah Kendaraan Bermotor di Kota Denpasar (5 Oktober 2024) | Databoks.” Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: <https://databoks.katadata.co.id/transportasi-logistik/statistik/b1d3054afa1ebb9/jumlah-kendaraan-bermotor-di-kota-denpasarhari-ini>
- [7] F. S. Pratiwi, “8 Kota Indonesia dengan Polusi Udara Tertinggi, Denpasar Teratas (4 Maret 2024),” Data Indonesia: Data Indonesia for Better Decision. Valid, Accurate, Relevant. Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: <https://dataindonesia.id/varia/detail/8-kota-indonesia-dengan-polusi-udara-tertinggi-denpasar-teratas-4-maret-2024>
- [8] S. F. R. Bachri, “Implementasi Protocol LoRaWAN pada Wireless Sensor Network untuk Sistem Kompos Pintar dengan modul komunikasi LoRa,” bachelorThesis, Fakultas Sains dan Teknologi UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, 2022. Accessed: Jan. 16, 2025. [Online]. Available: <https://repository.uinjkt.ac.id/dspace/handle/123456789/65285>

- [9] J. Wu, C. Jiang, Z. Liu, D. Houston, G. Jaimes, and R. McConnell, "Performances of Different Global Positioning System Devices for Time-Location Tracking in Air Pollution Epidemiological Studies," *Environ. Health Insights*, vol. 4, p. EHI.S6246, Jan. 2010, doi: 10.4137/EHI.S6246.
- [10] A. A. Rosa, B. A. Simon, and K. S. Lieanto, "Sistem Pendeteksi Pencemar Udara Portabel Menggunakan Sensor MQ-7 dan MQ-135".
- [11] L. Fu, S. You, G. Li, X. Li, and Z. Fan, "Application of Semiconductor Metal Oxide in Chemiresistive Methane Gas Sensor: Recent Developments and Future Perspectives," *Molecules*, vol. 28, no. 18, p. 6710, Sept. 2023, doi: 10.3390/molecules28186710.
- [12] J. Kuula *et al.*, "Utilization of scattering and absorption-based particulate matter sensors in the environment impacted by residential wood combustion," *J. Aerosol Sci.*, vol. 150, p. 105671, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jaerosci.2020.105671.
- [13] G. C. Rumampuk, V. C. Poekoel, and A. M. Rumagit, "Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbasis IoT," *J. Tek. Inform.*, vol. 17, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2022, doi: 10.35793/jti.v17i1.34212.
- [14] Y. M. Park, S. Sousan, D. Streuber, and K. Zhao, "GeoAir—A Novel Portable, GPS-Enabled, Low-Cost Air-Pollution Sensor: Design Strategies to Facilitate Citizen Science Research and Geospatial Assessments of Personal Exposure," *Sensors*, vol. 21, no. 11, Art. no. 11, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21113761.
- [15] "Gravity: PM2.5 Air Quality Sensor PM2.5/PM10 Particle Sensor Wiki - DFRobot." Accessed: Jan. 26, 2025. [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Gravity_PM2.5_Air_Quality_Sensor_SKU_SEN0460#target_0
- [16] "(PDF) Evaluating Low-Cost Commercially Available Sensors for Air Quality Monitoring and Application of Sensor Calibration Methods for Improving Accuracy," *ResearchGate*, Oct. 2024, doi: 10.4236/ojap.2021.101001.
- [17] H. Suryantoro and M. Kusriyanto, "Sistem Monitoring Partikel (PM2.5) Air Purifier untuk Mengetahui Kualitas Udara Berbasis Sensor PMS5003 dan Arduino," *Indones. J. Lab.*, no. 3, p. 88, Nov. 2023, doi: 10.22146/ijl.v0i3.88043.
- [18] A. N. Abdullah *et al.*, "Correction Model for Metal Oxide Sensor Drift Caused by Ambient Temperature and Humidity," *Sensors*, vol. 22, no. 9, p. 3301, Apr. 2022, doi: 10.3390/s22093301.

- [19] J. Palacín, E. Clotet, and E. Rubies, “Assessing over Time Performance of an eNose Composed of 16 Single-Type MOX Gas Sensors Applied to Classify Two Volatiles,” *Chemosensors*, vol. 10, no. 3, Art. no. 3, Mar. 2022, doi: 10.3390/chemosensors10030118.
- [20] “(PDF) Innovative Sensor Technology for Emergency Detection in Life Science Laboratories,” in *ResearchGate*. doi: 10.3233/SHTI220008.
- [21] M. Rizal, A. Arifin, M. F. Rasyd, A. A. M. Suradi, and A. Bahtiar, “Desain dan Implementasi Sistem Pemantauan Polusi Udara Berbasis Android Real-Time di SMKS Darul Ulum Layoa Bantaeng: Design and Implementation of A Real-Time Air Pollution Monitoring System Based on Android at SMKS Darul Ulum Layoa Bantaeng,” *MALCOM Indones. J. Mach. Learn. Comput. Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 143–152, Oct. 2023, doi: 10.57152/malcom.v3i2.894.
- [22] “(PDF) Accuracy Analysis of GNSS (GPS, GLONASS and BEIDOU) Obsevation For Positioning.” Accessed: Jan. 27, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/332943353_Accuracy_Analysis_of_GNS_S_GPS_GLONASS_and_BEIDOU_Obsevation_For_Positioning
- [23] “Step-by-Step Guide for the LilyGO T-Display S3 setup | Steve Zafeiriou.” Accessed: Jan. 27, 2025. [Online]. Available: <https://stevezafeiriou.com/lilygo-t-display-s3-setup/>
- [24] “Firestore vs. Realtime Database: Which Performs Better? | Estuary.” Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: <https://estuary.dev/firestore-vs-realtime-database/>
- [25] “(PDF) Firebase Overview and Usage,” *ResearchGate*, Oct. 2024, Accessed: Jan. 27, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/362539877_FIREBASE_-_OVERVIEW_AND_USAGE
- [26] D. R. Denishtsany, “Flutter: Pengembangan Aplikasi Multiplatform dengan Mudah,” *ToffeeDev*. Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: <https://toffeedev.com/blog/website/flutter-adalah/>
- [27] S. T. Aung, N. Funabiki, L. H. Aung, S. A. Kinari, M. Mentari, and K. H. Wai, “A Study of Learning Environment for Initiating Flutter App Development Using Docker,” *Information*, vol. 15, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2024, doi: 10.3390/info15040191.
- [28] “Size Comparison of Particulate Matter (PM) with Human Hair and Beach...,” *ResearchGate*. Accessed: Aug. 15, 2025. [Online]. Available:

https://www.researchgate.net/figure/Size-Comparison-of-Particulate-Matter-PM-with-Human-Hair-and-Beach-Sand-A-Visual_fig1_380788578

- [29] Y. Sukarmawati, R. H. Ayu Murti, and M. A. Salam Jawwad, “Dampak Pembuangan Sampah Terbuka (Open Dumping) terhadap Kualitas Udara di Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA) Gohong,” *J. ENVIROTEK*, vol. 15, no. 1, pp. 34–48, Apr. 2023, doi: 10.33005/envirotek.v15i1.218.
- [30] “Figure 1. Classification of air pollutant according to some physical...,” ResearchGate. Accessed: Aug. 15, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Classification-of-air-pollutant-according-to-some-physical-properties-Abbreviation-PM_fig1_339567258
- [31] T. Zettira and R. Yudhastuti, “Perbedaan Polutan Penyebab Polusi Udara Dalam Ruangan Pada Negara Maju dan Berkembang: Literature Review,” *Media Gizi Kesmas*, vol. 11, no. 2, Art. no. 2, Nov. 2022, doi: 10.20473/mgk.v11i2.2022.625-632.
- [32] “Portal Direktorat Pengendalian Pencemaran Udara Ditjen PPKL/KLHK.” Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: <https://ditppu.menlhk.go.id/portal/read/indeks-standar-pencemar-udara-ispu-sebagai-informasi-mutu-udara-ambien-di-indonesia>
- [33] “Maps (2D) | Documentation | Esri Developer,” Documentation. Accessed: Feb. 13, 2025. [Online]. Available: <https://developers.arcgis.com/documentation/mapping-and-location-services/mapping/maps-2d/>
- [34] U. F. Kurniawati, N. A. Pratomoadmojo, and R. S. Septriadi, “Pengolahan Data Berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) Untuk Kebutuhan Penyusunan Profil di Kecamatan Sukolilo”.