

Pengembangan Prototipe Aplikasi Augmented Reality (AR) untuk Pemantauan dan Analisis Kondisi Lingkungan Secara Real-Time Berbasis IoT

Diah Aryani^{1*}, Habibullah Akbar², Indri Handayani³

¹²Fakultas Ilmu Komputer Universitas Esa Unggul Jl. Arjuna Utara No.9, Duri Kepa, Kec. Kb. Jeruk, Kota Jakarta Barat, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 11510

³Program Sistem Informasi Universitas Raharja, Jl. Jenderal Sudirman No.40, Cikokol, Kota Tangerang, Banten 15117

*e-mail penulis korespondensi: diah.aryani@esaunggul.ac.id, habibulah.akbar@esaunggul.ac.id, indri@raharja.info

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan prototipe aplikasi Augmented Reality Monitoring for Environmental Analysis (ARMAN) sebagai solusi inovatif untuk pemantauan dan analisis kondisi lingkungan secara real-time. Aplikasi ini dirancang untuk membantu masyarakat dan lembaga pemerintah dalam meningkatkan efisiensi pengelolaan lingkungan serta kesadaran akan kualitas udara, suhu, kelembaban, dan pengelolaan limbah. Sistem ARMAN dibangun melalui integrasi teknologi Internet of Things (IoT), komputasi awan, dan Augmented Reality (AR) untuk menghasilkan sistem yang interaktif, informatif, dan adaptif. Metodologi penelitian mencakup lima tahap utama, yaitu konsep, desain, pengembangan, pengujian, dan evaluasi. Sensor DHT11 dan MQ-135 digunakan untuk mendeteksi parameter suhu, kelembaban, dan kualitas udara, dan data tersebut kemudian dikirim ke Firebase Cloud Database melalui mikrokontroler ESP32 secara berkala. Data yang disimpan diproses dan ditampilkan secara visual melalui aplikasi AR berbasis Unity 3D dan SDK Vuforia, yang memungkinkan pengguna melihat informasi lingkungan dalam bentuk overlay interaktif. Selain itu, panel admin backend berbasis web disediakan untuk lembaga pemerintah atau pengelola lingkungan untuk memantau data agregat, tren, dan laporan historis dari berbagai titik sensor. Hasil uji coba menunjukkan bahwa sistem ARMAN mampu menampilkan informasi lingkungan secara real-time, akurat, dan menarik, serta mendukung kolaborasi antara masyarakat umum dan otoritas dalam pemantauan lingkungan. Penelitian ini membuktikan bahwa kombinasi teknologi IoT, cloud, dan AR dapat diimplementasikan secara efektif dalam sistem pemantauan lingkungan dan berpotensi menjadi dasar pengembangan lingkungan cerdas menuju implementasi konsep kota cerdas yang berkelanjutan.

Kata Kunci : Augmented Reality, Internet of Things, Pemantauan Lingkungan, Smart Environment

Abstract. This study aims to develop a prototype of the Augmented Reality Monitoring for Environmental Analysis (ARMAN) application as an innovative solution for real-time monitoring and analysis of environmental conditions. This application is designed to assist the community and government agencies in improving the efficiency of environmental management and awareness of air quality, temperature, humidity, and waste management. The ARMAN system is built through the integration of Internet of Things (IoT), cloud computing, and Augmented Reality (AR) technologies to produce an interactive, informative, and adaptive system. The research methodology covers five main stages, namely concept, design, development, testing, and evaluation. DHT11 and MQ-135 sensors are used to detect temperature, humidity, and air quality parameters, and the data is then sent to the Firebase Cloud Database via the ESP32 microcontroller on a regular basis. The stored data is processed and displayed visually through a Unity 3D-based AR application and Vuforia SDK, which allows users to view environmental information in the form of interactive overlays. In addition, a web-based backend admin panel is provided for government agencies or environmental managers to monitor aggregate data, trends, and historical reports from various sensor points. Test results show that the ARMAN system is capable of displaying environmental information in real-time, accurately, and attractively, as well as supporting collaboration between the general public and authorities in environmental monitoring. This research proves that the combination of IoT, cloud, and AR technologies can be effectively implemented in environmental monitoring systems and has the potential to become the basis for the development of a smart environment towards the implementation of a sustainable smart city concept.

Keywords : Augmented Reality, Internet of Things, Environmental Monitoring, Smart Environment



PENDAHULUAN

Perubahan lingkungan yang semakin kompleks, seperti peningkatan polusi udara, penumpukan limbah, dan perubahan kualitas udara, memerlukan inovasi teknologi dalam proses pemantauan dan pengelolaan. Penggunaan Internet of Things (IoT) memungkinkan data dari sensor lingkungan dikumpulkan secara real-time, memberikan informasi yang cepat dan akurat untuk pengambilan keputusan. Namun, data yang disajikan dalam bentuk numerik seringkali sulit dipahami oleh masyarakat umum, sehingga memerlukan metode penyajian data yang lebih interaktif dan mudah diinterpretasikan. Teknologi Augmented Reality (AR) menawarkan pendekatan inovatif dalam menyajikan informasi dengan menggabungkan dunia nyata secara visual dengan elemen digital. Namun, data yang disajikan dalam bentuk numerik seringkali sulit dipahami oleh masyarakat umum, sehingga memerlukan metode penyajian data yang lebih interaktif dan mudah diinterpretasikan [1]–[5]. Teknologi Augmented Reality (AR) menawarkan pendekatan inovatif dalam menyajikan informasi dengan menggabungkan dunia nyata dengan elemen digital secara visual. AR mampu menampilkan objek virtual seperti grafik, indikator, dan animasi langsung di atas tampilan dunia nyata melalui kamera perangkat mobile. Melalui integrasi dengan IoT, data sensor lingkungan seperti suhu, kelembapan, atau tingkat polusi dapat divisualisasikan langsung di lokasi pengguna, memberikan pengalaman pemantauan yang lebih intuitif dan informatif [5]–[9].

Penggabungan AR dan IoT tidak hanya berguna untuk memantau kondisi lingkungan, tetapi juga memiliki potensi besar dalam bidang edukasi dan peningkatan kesadaran masyarakat terhadap pentingnya menjaga kelestarian lingkungan. Meskipun telah ada penelitian yang menggabungkan kedua teknologi ini, sebagian besar masih terbatas pada skala laboratorium atau belum dioptimalkan untuk penggunaan mobile. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada pengembangan prototipe aplikasi AR berbasis IoT yang dapat menampilkan kondisi lingkungan secara real-time pada perangkat mobile dengan visualisasi yang menarik dan informatif. Penelitian ini juga memanfaatkan beberapa perangkat lunak pendukung, antara lain Unity 3D dan Vuforia SDK sebagai basis pengembangan fitur AR, Android Studio untuk membangun aplikasi mobile, Firebase untuk penyimpanan data real-time dari sensor IoT, Blender 3D untuk pembuatan objek 3D, serta Adobe Illustrator untuk perancangan elemen grafis antarmuka pengguna. Kolaborasi antarperangkat lunak ini diharapkan dapat menghasilkan aplikasi yang tidak hanya fungsional, tetapi juga menarik secara visual dan mudah digunakan oleh pengguna umum [1], [10]–[15].

Permasalahan utama yang diangkat dalam penelitian ini adalah bagaimana merancang dan mengembangkan prototipe aplikasi Augmented Reality (AR) yang mampu menampilkan informasi kondisi lingkungan secara real-time berbasis Internet of Things (IoT). Tantangan yang muncul meliputi proses integrasi antara sensor IoT dengan sistem AR agar data lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan tingkat polusi dapat divisualisasikan secara langsung dalam tampilan dunia nyata. Selain itu, penelitian ini juga berfokus pada bagaimana mengoptimalkan komunikasi data secara real-time menggunakan layanan cloud seperti Firebase, serta memastikan tampilan visual yang interaktif dan mudah dipahami oleh pengguna umum. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan aplikasi AR yang terintegrasi dengan sistem IoT guna memantau kondisi lingkungan secara akurat dan menarik secara visual, serta mengevaluasi efektivitasnya dalam menyampaikan informasi lingkungan melalui perangkat mobile.

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) dengan pendekatan Prototyping Model. Tahapan penelitian dimulai dengan analisis kebutuhan sistem untuk menentukan parameter lingkungan yang akan dipantau serta kebutuhan pengguna terhadap tampilan data. Selanjutnya dilakukan perancangan sistem yang mencakup desain arsitektur perangkat keras dan perangkat lunak, di mana Unity 3D dan Vuforia SDK digunakan untuk membangun fitur AR, sedangkan Android Studio digunakan untuk mengembangkan aplikasi mobile. Firebase dimanfaatkan sebagai basis data real-time yang menerima dan menyimpan data dari sensor IoT. Setelah itu dilakukan proses implementasi, integrasi, dan pengujian sistem untuk memastikan kestabilan pengiriman data, akurasi sensor, serta kehalusan visualisasi AR di berbagai kondisi lingkungan. Evaluasi akhir dilakukan untuk menilai kinerja sistem dan potensi penerapannya dalam pemantauan serta edukasi lingkungan secara interaktif.

METODOLOGI

Metodologi penelitian ini menggunakan pendekatan Research and Development (R&D) dengan model prototyping, yang berfokus pada proses iteratif dalam merancang dan



mengembangkan aplikasi Augmented Reality (AR) berbasis Internet of Things (IoT) untuk pemantauan kondisi lingkungan secara real-time. Tahap awal dalam penelitian ini adalah tahap concept, yang bertujuan untuk menentukan kebutuhan pengguna serta konsep dasar aplikasi yang akan dikembangkan. Pada tahap ini dilakukan identifikasi terhadap karakteristik pengguna, kebutuhan fungsional, dan konteks penggunaan aplikasi. Perancangan antarmuka (interface) dilakukan dengan prinsip user-friendly dan sederhana agar mudah digunakan oleh berbagai kalangan, namun tetap menarik dengan penambahan elemen visual interaktif seperti animasi tombol dan ikon. Tujuan utama dari tahap ini adalah memastikan desain aplikasi mampu menghadirkan pengalaman pengguna yang intuitif dan informatif dalam menyajikan data lingkungan secara visual melalui teknologi AR [16]–[21].



Gambar 1. Diagram Alir Aplikasi AR berbasis IoT untuk Pemantauan Kondisi Lingkungan

Pada gambar 1 menunjukkan diagram alur metodologi pengembangan aplikasi Augmented Reality (AR) berbasis Internet of Things (IoT) untuk pemantauan kondisi lingkungan secara real-time. Diagram ini digambarkan dalam bentuk flowchart vertikal yang terdiri atas lima tahap utama, yaitu Concept, Design, Development, Testing, dan Evaluation. Setiap tahap dihubungkan dengan panah berarah tunggal dari atas ke bawah, menggambarkan proses yang berurutan dan sistematis. Tahap Concept berfokus pada analisis kebutuhan pengguna serta perancangan antarmuka yang sederhana dan mudah digunakan. Selanjutnya, tahap Design mencakup pembuatan arsitektur sistem dan pemodelan objek 3D yang akan digunakan dalam tampilan AR.

Tahap berikutnya, Development, merupakan proses implementasi sistem yang mengintegrasikan teknologi AR dan IoT agar aplikasi dapat menampilkan data lingkungan secara real-time. Setelah itu, tahap Testing dilakukan untuk menguji fungsi, validasi data sensor, serta kestabilan sistem agar aplikasi berjalan sesuai dengan yang dirancang. Tahap terakhir, Evaluation, menekankan pada pengumpulan umpan balik pengguna serta penyempurnaan sistem untuk meningkatkan keandalan dan efektivitas aplikasi. Secara keseluruhan, diagram ini menggambarkan alur kerja yang terstruktur dan iteratif dalam pengembangan aplikasi AR berbasis IoT, mulai dari konseptualisasi hingga evaluasi akhir, guna menghasilkan solusi teknologi yang efisien, interaktif, dan edukatif untuk pemantauan lingkungan.

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada tahap ini dilakukan analisis dan pembahasan terhadap hasil perancangan serta implementasi prototipe aplikasi Augmented Reality (AR) untuk pemantauan dan analisis kondisi lingkungan secara real-time. Analisis dilakukan dengan meninjau fungsi, tampilan antarmuka, serta



interaktivitas sistem yang dihasilkan dari proses pengembangan. Setiap elemen antarmuka dirancang agar mampu menyampaikan informasi lingkungan secara efektif dan mendukung tujuan utama aplikasi, yaitu meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap pengelolaan sampah dan kualitas udara melalui visualisasi data berbasis AR. Prototipe aplikasi pada gambar 2 menampilkan beberapa antarmuka utama yang saling terhubung untuk memberikan pengalaman pengguna yang komprehensif. Tampilan pertama adalah Halaman Utama (Real-Time Environmental Analysis) yang berfungsi sebagai beranda utama ketika aplikasi dijalankan. Pengguna langsung disajikan dengan indikator kualitas udara real-time yang ditampilkan melalui status “GOOD” dan nilai PM 2.5, menunjukkan kondisi udara yang sehat. Tiga ikon tong sampah berwarna kuning, hijau, dan merah masing-masing melambangkan kategori sampah organik, daur ulang, dan bahan berbahaya (B3). Desain visual yang menarik dan informatif ini memberikan kesan awal yang kuat serta memudahkan pengguna memahami kondisi lingkungan di sekitarnya secara cepat. Selanjutnya, halaman Dashboard berperan sebagai pusat informasi utama yang menampilkan data lingkungan terkini dalam format visual yang mudah dipahami. Indikator Air Quality ditampilkan dalam bentuk lingkaran hijau dengan label “GOOD”, sedangkan Temperature dan Humidity divisualisasikan melalui indikator berwarna oranye dan biru lengkap dengan nilai satuan. Di bagian bawah dashboard terdapat grafik tren suhu yang menggambarkan perubahan suhu dalam jangka waktu tertentu, memungkinkan pengguna untuk memantau fluktuasi kondisi lingkungan. Tampilan ini dirancang agar informatif namun tetap ringan dan efisien bagi pengguna aplikasi.

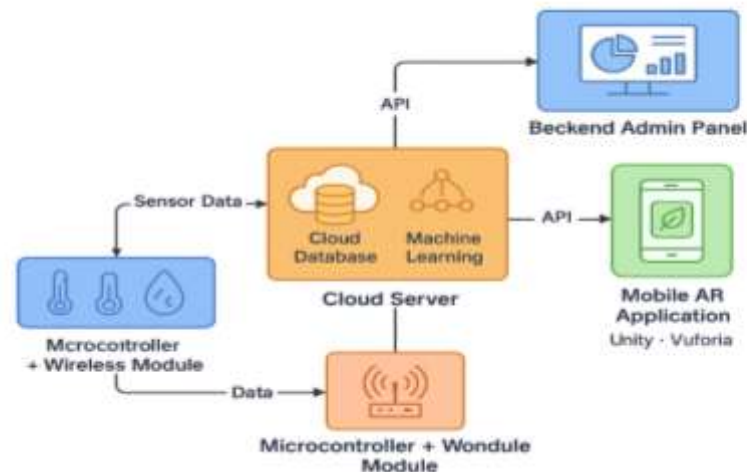


Gambar 2. Prototipe UI Aplikasi ARMAN

Bagian Manajemen Sampah (Waste Management) menampilkan peta interaktif yang berisi pin lokasi tempat penampungan sampah terdekat. Setiap kategori tempat sampah memiliki indikator kapasitas atau status volume, sehingga pengguna dapat dengan mudah mengetahui lokasi dan kondisi fasilitas pengelolaan sampah. Warna hijau, biru, dan oranye digunakan untuk menandai kategori Organic Waste, Recyclable Waste, dan Hazardous Waste. Fitur ini tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu navigasi, tetapi juga sebagai sarana edukatif dalam mengajak masyarakat untuk memilah dan membuang sampah dengan lebih bertanggung jawab. Terakhir, halaman Statistik menampilkan data analitik lingkungan yang divisualisasikan dalam bentuk grafik interaktif. Grafik Air Quality menunjukkan perubahan indeks kualitas udara secara temporal, sementara diagram Pie Chart bertajuk “Aquatrics” memberikan gambaran proporsi kondisi kualitas air, seperti kategori bersih, sedang, dan tercemar. Halaman ini berfungsi sebagai alat pemantauan tren dan evaluasi yang dapat dimanfaatkan oleh instansi pemerintah, lembaga lingkungan, maupun masyarakat umum.

untuk memahami kondisi lingkungan secara lebih mendalam. Melalui analisis keseluruhan antarmuka ini, aplikasi AR yang dikembangkan terbukti mampu menghadirkan pengalaman interaktif yang informatif sekaligus mendukung tujuan peningkatan kesadaran dan partisipasi masyarakat dalam menjaga lingkungan.

Arsitektur sistem aplikasi ARMAN dirancang dengan pendekatan integratif yang menggabungkan teknologi Internet of Things (IoT), komputasi awan (cloud computing), dan Augmented Reality (AR) untuk membentuk ekosistem pemantauan lingkungan yang cerdas, interaktif, dan berbasis data real-time. Sistem ini disusun secara berlapis, di mana setiap komponen memiliki peran spesifik namun saling bergantung dalam mendukung aliran data yang efisien, mulai dari pengumpulan informasi di lapangan hingga visualisasi hasil analisis di perangkat pengguna.



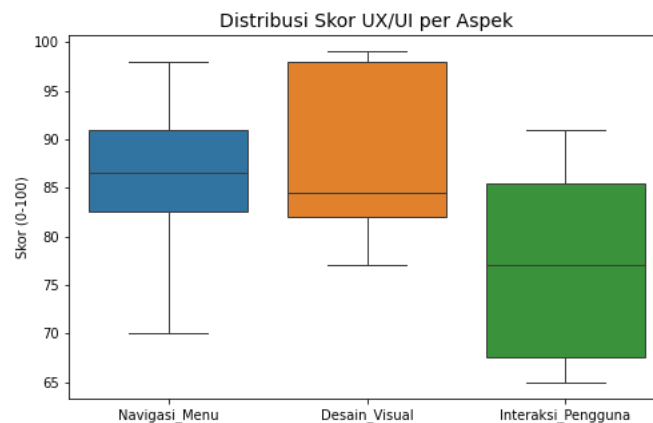
Gambar 3. Arsitektur Sistem Aplikasi AR untuk pemantauan lingkungan secara real-time

Tahap awal pada gambar 3, sistem dimulai dari lapisan perangkat IoT, yang berfungsi sebagai sumber data utama. Sensor seperti DHT11 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembaban, sedangkan sensor MQ-135 mendeteksi tingkat kualitas udara berdasarkan konsentrasi gas tertentu. Sensor-sensor ini dihubungkan dengan mikrokontroler seperti NodeMCU atau ESP32 yang dilengkapi modul Wi-Fi, memungkinkan pengiriman data secara otomatis dan berkala ke server cloud. Desain ini memungkinkan sistem melakukan akuisisi data lingkungan secara berkelanjutan tanpa intervensi manual, sehingga mendukung prinsip real-time monitoring. Selanjutnya, lapisan cloud server berperan sebagai pusat pemrosesan dan penyimpanan data. Data yang dikirim dari perangkat IoT akan diterima oleh cloud database, yang menyimpan informasi suhu, kelembaban, dan kualitas udara secara terstruktur. Di sisi lain, modul analitik cloud berfungsi untuk mengolah data tersebut menjadi informasi yang lebih bermakna, seperti tren perubahan kualitas udara dan peringatan dini terhadap potensi pencemaran. Hasil pengolahan ini kemudian diintegrasikan dengan API (Application Programming Interface) yang memungkinkan pertukaran data antara server dan aplikasi pengguna secara cepat dan aman.

Lapisan berikutnya adalah aplikasi mobile berbasis Augmented Reality (AR) yang dikembangkan menggunakan Unity 3D dan Vuforia SDK. Aplikasi ini menjadi antarmuka utama bagi pengguna umum untuk berinteraksi dengan data lingkungan. Melalui kamera perangkat mobile, pengguna dapat melihat informasi lingkungan dalam bentuk overlay AR — seperti indikator suhu, kelembaban, dan kualitas udara — yang muncul secara kontekstual di lokasi yang sedang diamati. Pendekatan visual ini meningkatkan pemahaman pengguna terhadap kondisi lingkungan di sekitar mereka secara intuitif dan menarik, sekaligus memperkuat aspek edukatif dari aplikasi.

Selain aplikasi pengguna, sistem juga dilengkapi dengan backend admin panel berbasis web yang ditujukan bagi instansi pemerintah atau pengelola lingkungan. Panel ini menyediakan akses

terhadap data agregat dari berbagai titik sensor dalam bentuk grafik, statistik, dan laporan historis. Melalui fitur ini, pengguna tingkat administratif dapat melakukan analisis mendalam terhadap kondisi lingkungan dari waktu ke waktu serta membuat keputusan berbasis data yang lebih tepat. Dengan demikian, sistem tidak hanya bermanfaat bagi pengguna individu, tetapi juga mendukung peran lembaga resmi dalam melakukan pemantauan dan pengendalian kualitas lingkungan. Secara keseluruhan, arsitektur sistem ARMAN menampilkan siklus kerja yang terintegrasi dan kolaboratif. Alur data dimulai dari sensor IoT yang mendeteksi parameter lingkungan, diteruskan ke cloud untuk penyimpanan dan analisis, kemudian divisualisasikan secara interaktif melalui aplikasi AR serta disajikan dalam bentuk analitik di dashboard web. Sinergi antara komponen IoT, cloud, AR, dan sistem administrasi ini menciptakan platform pemantauan lingkungan yang real-time, adaptif, dan partisipatif, sehingga mampu mendukung upaya pelestarian lingkungan secara lebih efektif dan berkelanjutan.



Gambar 4. Distribusi Skor UX/UI per Aspek dari hasil Pengujian

Evaluasi pengalaman pengguna (User Experience) dan tampilan antarmuka (UI/UX) pada gambar 4, dilakukan untuk menilai sejauh mana aplikasi ARMAN dapat memberikan kenyamanan, kemudahan, dan kejelasan informasi bagi pengguna awam. Tujuan utama dari evaluasi ini adalah untuk mengetahui tingkat keterbacaan, kemudahan navigasi, serta daya tarik visual yang ditampilkan oleh aplikasi dalam konteks pemantauan lingkungan secara real-time. Pengujian dilakukan dengan melibatkan beberapa responden dari kalangan pengguna non-teknis guna memperoleh perspektif objektif terhadap pengalaman penggunaan aplikasi. Aspek-aspek yang dievaluasi meliputi tiga komponen utama. Pertama, navigasi menu, yaitu kemampuan pengguna dalam berpindah antarfitur seperti tampilan peta lokasi penampungan sampah, mode kamera Augmented Reality (AR), dan halaman statistik lingkungan. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa tata letak menu yang intuitif dan penempatan ikon yang konsisten memudahkan pengguna dalam menjelajahi aplikasi tanpa kebingungan. Kedua, desain visual, mencakup kejelasan ikon, pemilihan warna indikator, serta keterbacaan grafik yang menampilkan suhu, kelembaban, dan kualitas udara. Kombinasi warna hijau, oranye, dan merah pada indikator terbukti membantu pengguna memahami kondisi lingkungan dengan cepat. Ketiga, interaksi pengguna, yang menilai sejauh mana pengguna merasa terbantu oleh informasi yang ditampilkan melalui elemen interaktif, seperti peta dan overlay AR. Secara keseluruhan, hasil evaluasi menunjukkan bahwa aplikasi ARMAN memiliki tampilan antarmuka yang menarik, informatif, dan mudah dioperasikan oleh pengguna awam, sehingga mendukung efektivitasnya sebagai media edukatif dan alat bantu pemantauan lingkungan digital.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pengembangan prototipe aplikasi Augmented Reality Monitoring for Environmental Analysis (ARMAN), dapat disimpulkan bahwa sistem ini berhasil



mengintegrasikan teknologi IoT (Internet of Things), Augmented Reality (AR), dan cloud computing dalam satu kesatuan platform yang mampu melakukan pemantauan kondisi lingkungan secara real-time dan interaktif. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan akan solusi digital yang efektif dalam mendukung pengelolaan lingkungan serta meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap isu-isu lingkungan seperti kualitas udara, suhu, kelembapan, dan pengelolaan sampah. Proses pengembangan aplikasi dilakukan secara sistematis melalui beberapa tahap, yaitu concept, design, development, testing, dan evaluation. Pada tahap konseptual, kebutuhan pengguna dan rancangan antarmuka sederhana ditetapkan sebagai dasar pengembangan. Tahap desain dan implementasi memanfaatkan perangkat lunak seperti Unity 3D dan Vuforia SDK untuk visualisasi AR, Firebase sebagai basis data real-time, serta sensor DHT11 dan MQ-135 yang terhubung dengan ESP32 untuk pengambilan data lingkungan. Seluruh elemen ini bekerja secara terkoordinasi untuk membentuk sistem yang efisien, adaptif, dan mudah digunakan oleh masyarakat umum maupun pihak berwenang. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa arsitektur sistem ARMAN terdiri dari empat komponen utama, yaitu perangkat IoT, cloud server, aplikasi mobile AR, dan web admin panel. Keempat komponen ini berperan penting dalam memastikan alur data berjalan secara terintegrasi mulai dari akuisisi, penyimpanan, pengolahan, hingga visualisasi hasil. Aplikasi AR memberikan pengalaman pengguna yang imersif dengan menampilkan data lingkungan secara visual dan kontekstual, sedangkan web admin panel mendukung proses analisis data lingkungan secara agregat oleh instansi terkait. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya bersifat informatif tetapi juga mendukung kolaborasi antara masyarakat dan pemerintah dalam menjaga kualitas lingkungan.

Pengembangan prototipe aplikasi ARMAN telah menunjukkan bahwa teknologi Augmented Reality dapat dimanfaatkan secara efektif dalam sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT. Sistem ini mampu menyajikan informasi lingkungan secara real-time, interaktif, dan edukatif, sekaligus mendukung penerapan konsep smart environment di masa depan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan lebih lanjut dengan penambahan fitur analitik cerdas, integrasi dengan lebih banyak sensor lingkungan, serta peningkatan efisiensi sistem agar dapat digunakan secara luas dalam skala kota cerdas (smart city).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Shahid *et al.*, “Innovations in Air Quality Monitoring: Sensors, IoT and Future Research,” *Sensors* 2025, Vol. 25, no. 7, Mar. 2025, doi: 10.3390/S25072070.
- [2] S. Lipiński, J. Piotrowski, and T. Olkowski, “Mobile air quality monitoring station - a solution for better pollution control,” *Tech. Sci.*, Dec. 2025, doi: 10.31648/TS.11507.
- [3] S. P. Pathak, A. K. Singh, and S. Gokulanathan, “A Low-Cost IoT-Based Real-Time Air Quality Monitoring System Using Multi-Sensor Integration and Bluetooth Communication,” *2025 Int. Conf. Sensors Relat. Networks, SENNET 2025 - Spec. Focus Digit. Healthc.*, 2025, doi: 10.1109/SENNET64220.2025.11135994.
- [4] V. Shakhov and O. Sokolova, “Probabilistic Clustering for Data Aggregation in Air Pollution Monitoring System,” *Sensors*, vol. 25, no. 23, Dec. 2025, doi: 10.3390/S25237285.
- [5] I. G. A. I. F. Ramadhani *et al.*, “IoT Implementation for Air Quality Monitoring System using Low Cost Sensor,” *Proc. 2025 IEEE Int. Conf. Ind. 4.0, Artif. Intell. Commun. Technol. IAICT 2025*, pp. 621–627, 2025, doi: 10.1109/IAICT65714.2025.11100335.
- [6] A. Alzahrani, P. Kostkova, H. Alshammari, S. Habibullah, and A. Alzahrani, “Intelligent integration of AI and IoT for advancing ecological health, medical services, and community prosperity,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 127, pp. 522–540, Aug. 2025, doi: 10.1016/J.AEJ.2025.05.046.
- [7] Y. Zhang, P. Geng, C. B. Sivaparthipan, and B. A. Muthu, “Big data and artificial intelligence based early risk warning system of fire hazard for smart cities,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 45, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2020.100986.
- [8] L. Andeobu, S. Wibowo, and S. Grandhi, “Artificial intelligence applications for sustainable solid waste management practices in Australia: A systematic review,” *Sci. Total Environ.*, vol. 834, Aug.



- 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155389.
- [9] X. Zhang, K. Shu, S. Rajkumar, and V. Sivakumar, "Research on deep integration of application of artificial intelligence in environmental monitoring system and real economy," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 86, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.eiar.2020.106499.
- [10] T. I. Ladykova, E. I. Sokolova, L. Y. Grebenshchikova, R. G. Sakhieva, N. I. Lapidus, and Y. V. Cheresheva, "Augmented reality in environmental education: A systematic review," *EURASIA J. Math. Sci. Technol. Educ.*, vol. 2024, no. 8, p. 2488, 2024, doi: 10.29333/ejmste/14914.
- [11] A. Garcia, Y. Saez, I. Harris, X. Huang, and E. Collado, "Advancements in air quality monitoring: a systematic review of IoT-based air quality monitoring and AI technologies," *Artif. Intell. Rev.* 2025 589, vol. 58, no. 9, pp. 275-, Jun. 2025, doi: 10.1007/S10462-025-11277-9.
- [12] M. Marć, M. Tobiszewski, B. Zabiegała, M. de la Guardia, and J. Namieśnik, "Current air quality analytics and monitoring: A review," *Anal. Chim. Acta*, vol. 853, no. 1, pp. 116–126, 2015, doi: 10.1016/J.ACA.2014.10.018.
- [13] J. Reis, D. Lopes, D. Graça, A. P. Fernandes, A. I. Miranda, and M. Lopes, "Using low-cost sensors to assess real-time comfort and air quality patterns in indoor households," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 3, pp. 7736–7751, Jan. 2023, doi: 10.1007/S11356-022-22771-W.
- [14] H. Relvas, D. Lopes, and J. M. Armengol, "Empowering communities: Advancements in air quality monitoring and citizen engagement," *Urban Clim.*, vol. 60, p. 102344, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.UCLIM.2025.102344.
- [15] S. Bashath, N. Perera, S. Tripathi, K. Manjang, M. Dehmer, and F. E. Streib, "A data-centric review of deep transfer learning with applications to text data," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 585, pp. 498–528, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.INS.2021.11.061.
- [16] V. Braun, V. Clarke, N. Hayfield, and G. Terry, "Thematic analysis," *Handb. Res. Methods Heal. Soc. Sci.*, pp. 843–860, Jan. 2019, doi: 10.1007/978-981-10-5251-4_103.
- [17] L. Bryant and B. Hemsley, "Augmented reality: a view to future visual supports for people with disability," *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 800–813, 2024, doi: 10.1080/17483107.2022.2125090.
- [18] L. S. Nielsen, L. Skov, and H. Jensen, "Visual dysfunctions and ocular disorders in children with developmental delay. I. Prevalence, diagnoses and aetiology of visual impairment," *Acta Ophthalmol. Scand.*, vol. 85, no. 2, pp. 149–156, Mar. 2007, doi: 10.1111/J.1600-0420.2006.00867.X.
- [19] A. Vahabzadeh, N. U. Keshav, J. P. Salisbury, and N. T. Sahin, "Improvement of attention-deficit/hyperactivity disorder symptoms in school-aged children, adolescents, and young adults with autism via a digital smartglasses-based socioemotional coaching aid: Short-term, uncontrolled pilot study," *JMIR Ment. Heal.*, vol. 5, no. 2, Apr. 2018, doi: 10.2196/MENTAL.9631.
- [20] S. M. Rao and B. Gagie, "Learning through Seeing and Doing," *Teach. Except. Child.*, vol. 38, no. 6, pp. 26–33, Jul. 2006, doi: 10.1177/004005990603800604.
- [21] A. O. Alkhamisi *et al.*, "Reality to Treat," *Proc. 2nd IEEE ACM Int. Work. Augment. Real.*, vol. 3, no. 1, pp. 31–37, 2004, Accessed: Dec. 24, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/281672818_Augmented_reality_enabled_iiot_services_for_environmental_monitoring_utilising_serious_gaming_concept.

