

BAB I

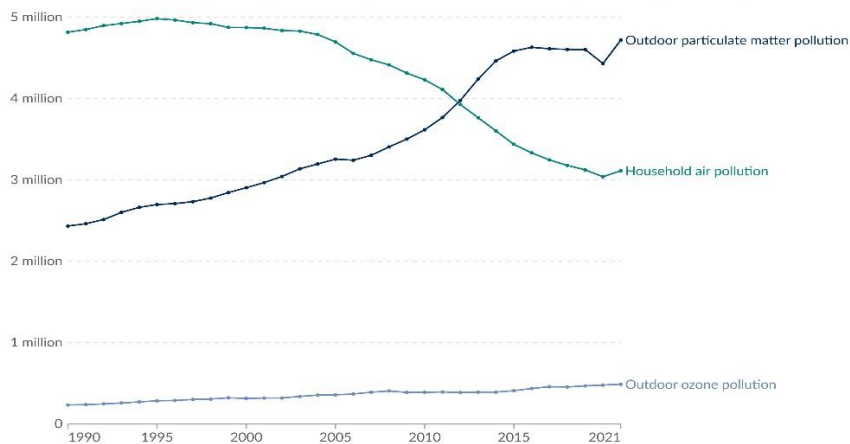
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Polusi udara merupakan persoalan lingkungan yang semakin serius, terutama di wilayah perkotaan yang mengalami perkembangan cepat. Kegiatan industri yang intensif, lalu lintas kendaraan bermotor yang padat, serta urbanisasi yang tidak terkendali menjadi penyebab utama memburuknya kualitas udara yang berdampak negatif pada kesehatan masyarakat. Di berbagai daerah di Indonesia, termasuk di Bali, peningkatan jumlah kendaraan bermotor, kegiatan industri, serta pembangunan infrastruktur yang intensif berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi polutan di atmosfer (BPS, 2024).

Deaths from household and outdoor air pollution, World

Total number of deaths from household and outdoor air pollution per year. Household pollution-related deaths result from the use of solid fuels (crop wastes, dung, firewood, charcoal and coal) for cooking and heating.



Data source: IHME, Global Burden of Disease (2024)

OurWorldinData.org/air-pollution | CC BY

Gambar 1.1 Grafik kematian akibat polusi udara

Sumber: (Ritchie & Rosado, 2025)

Polusi udara di perkotaan sering kali disebabkan oleh emisi kendaraan bermotor, aktivitas industri, pembakaran sampah, dan faktor alam seperti kebakaran

hutan (WHO, 2024). Zat pencemar seperti partikel mikro (PM_{2.5} dan PM₁₀), gas karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), serta sulfur dioksida (SO₂) diketahui berdampak langsung pada kesehatan manusia, khususnya sistem pernapasan dan kardiovaskular (Anandari et al., 2024). Pada tahun 2021, polusi udara menyebabkan sekitar 8 juta kematian, sebagian besar dari emisi manusia: 3,1 juta dari polusi udara rumah tangga, 4,7 juta dari partikel luar ruangan, dan 0,5 juta dari ozon luar ruangan, seperti terlihat pada Gambar 1.1.

Di Bali, Kabupaten Buleleng menjadi salah satu daerah yang mengalami permasalahan polusi udara. Kota Singaraja, sebagai ibu kota Kabupaten Buleleng, mengalami peningkatan kepadatan kendaraan bermotor yang turut menyumbang emisi gas berbahaya ke atmosfer. Salah satu sumber utama polusi udara di wilayah perkotaan Pamaron yang berlokasi di Desa Pamaron, Kecamatan Buleleng, Bali, telah beroperasi sejak tahun 20 Permen LHK No. 15/2019 – menetapkan baku mutu emisi dan metode pemantauan CEMS serta manual menggunakan sistem dual-fuel, yakni gas dan minyak, meski sering bermasalah dengan pasokan gas sehingga masih memakai solar (HSD) hingga kini 15 ini berperan penting dalam memenuhi kebutuhan energi listrik di wilayah Bali Utara. Namun, penggunaan bahan bakar fosil seperti batu bara dan gas dalam proses pembangkitannya menimbulkan permasalahan lingkungan yang serius.

Pembakaran bahan bakar tersebut menghasilkan emisi gas rumah kaca serta partikel berbahaya yang dapat mencemari udara dan memberikan dampak negatif bagi kesehatan masyarakat sekitar.

Meski kota singaraja berkonsep *combined cycle* yang dinilai lebih efisien, tetap saja emisi yang dihasilkan, terutama dari sisa pembakaran sampah dan asap

kendaraan, mengandung partikel halus seperti PM2.5. Partikel ini berbahaya karena ukurannya yang sangat kecil memungkinkan untuk masuk hingga ke bagian terdalam paru-paru dan bahkan ke dalam aliran darah. Hal ini meningkatkan risiko penyakit pernapasan kronis, gangguan jantung, dan dampak kesehatan jangka panjang lainnya (Arwini, 2020).

Selain PM2.5, emisi yang dilepaskan ke atmosfer juga mengandung gas beracun seperti nitrogen dioksida (NO₂), karbon monoksida (CO), dan sulfur dioksida (SO₂). Paparan jangka panjang terhadap gas-gas ini dapat menyebabkan iritasi saluran pernapasan, memperburuk penyakit asma, serta meningkatkan potensi terbentuknya hujan asam yang bisa merusak ekosistem lokal dan pertanian di sekitar kota singaraja.

Berdasarkan data dari berbagai laporan lingkungan, termasuk dari Greenpeace dan investigasi lapangan media lingkungan seperti Mongabay, wilayah yang berada di sekitar pembangkit listrik berbahan bakar fosil cenderung mengalami penurunan kualitas udara secara signifikan. Walaupun belum banyak penelitian spesifik yang dilakukan di sekitar pusat kota, kekhawatiran terhadap dampak lingkungan dan kesehatan masyarakat tetap relevan, terutama jika melihat kasus serupa di wilayah pembangkit lain seperti PLTU Celukan Bawang yang berada tidak jauh dari lokasi tersebut (Suriyani, 2018; Greenpeace, 2018).

Kondisi ini menunjukkan perlunya pemantauan kualitas udara secara berkala serta implementasi sistem deteksi dini terhadap pencemaran udara, terutama di kawasan yang berdekatan dengan industri. Tujuannya adalah untuk meningkatkan kesadaran lingkungan, melindungi kesehatan masyarakat, serta mendorong pengambilan kebijakan berbasis data yang berkelanjutan.

Selain dari sektor industri, polusi udara di Buleleng juga dipengaruhi oleh emisi kendaraan bermotor yang terus meningkat. Kendaraan bermotor merupakan salah satu sumber utama pencemaran udara di perkotaan, terutama melalui emisi gas buang yang mengandung karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), dan hidrokarbon (HC). Menurut penelitian (Arwini, 2020), pencemaran udara di Bali dipengaruhi oleh aktivitas transportasi yang meningkat setiap tahunnya. Tingginya jumlah kendaraan bermotor di perkotaan menyebabkan peningkatan konsentrasi polutan udara, yang pada akhirnya berdampak negatif terhadap kualitas udara dan kesehatan masyarakat.

Data dari IQAir menunjukkan bahwa kualitas udara di Kabupaten Buleleng berada pada kategori sedang dengan *Air Quality Index* (AQI) sekitar 56, sementara Kota Denpasar memiliki AQI sekitar 58. Meskipun angka ini belum mencapai tingkat yang berbahaya, kondisi ini tetap menunjukkan adanya polusi udara yang perlu diwaspadai. Pemantauan kualitas udara menjadi sangat penting untuk mengidentifikasi tren polusi serta memberikan informasi yang akurat kepada masyarakat agar dapat mengambil tindakan pencegahan yang diperlukan untuk menjaga kesehatan mereka.

Pemanfaatan teknologi *Internet of Things* (IoT) menjadi solusi strategis dalam membangun sistem pemantauan kualitas udara yang efisien dan terintegrasi. Mikrokontroler ESP32 memiliki keunggulan dalam hal konektivitas Wi-Fi, konsumsi daya rendah, serta kemampuan integrasi dengan berbagai sensor lingkungan dan platform *cloud* secara *real-time* (Easterline et al., 2024). Meskipun memiliki keterbatasan jumlah pin dan memori dibandingkan dengan ESP32, ESP32

tetap cukup andal untuk proyek berskala menengah dengan jumlah sensor terbatas dan tampilan data sederhana.

Dalam proyek ini, akan dikembangkan Sistem Deteksi Polusi Udara berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan tiga sensor, yaitu: 1) Sensor PMS5003 untuk mendeteksi konsentrasi polusi udara dari partikel debu (PM1.0, PM2.5, dan PM10); 2) Sensor MQ135 untuk mendeteksi gas berbahaya seperti CO, NH₃, dan NO_x; dan 3) Sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembaban lingkungan. Data dari ketiga sensor tersebut akan diproses oleh NodeMCU ESP32 dan ditampilkan pada dua buah layar LED P5 yang dipasang secara berjajar. LED P5 dipilih karena kemampuannya dalam menampilkan informasi secara lebih besar, jelas, dan mudah dibaca dari jarak jauh, menjadikannya lebih efektif dibandingkan dengan tampilan LCD 16x2. Hal ini sangat sesuai untuk kebutuhan media informasi publik di ruang terbuka.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh (Dani et al., 2024) mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT menggunakan sensor MQ135, PMS5003, dan DHT22 dengan tampilan data pada layar LCD 16x2. Sementara itu, (Suryantoro & Kusriyanto, 2023) mengembangkan sistem pemantauan PM2.5 berbasis sensor PMS5003 dan Arduino Uno untuk kebutuhan ruang dalam (indoor). Namun, penelitian-penelitian tersebut masih memiliki keterbatasan dalam hal cakupan sensor yang digunakan dan tampilan informasinya.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem berbasis ESP32 dengan cakupan sensor yang cukup untuk kebutuhan pemantauan kualitas udara luar ruang (*outdoor*) dan penyampaian informasi melalui media visual LED P5. (Gitakarma & Ariawan, 2024) Sistem ini

juga memungkinkan integrasi dengan platform Blynk IoT, sehingga data dari sensor dapat dipantau melalui aplikasi seluler oleh pengguna secara *real-time*.

Dengan memanfaatkan ESP32 dan tampilan LED P5, sistem ini menawarkan solusi pemantauan yang ekonomis, efisien, dan aplikatif, khususnya di daerah-daerah yang memiliki keterbatasan infrastruktur namun menghadapi tantangan pencemaran udara yang nyata. Penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan manfaat langsung bagi masyarakat kota Singaraja, tetapi juga dapat direplikasi di wilayah lain di Indonesia, serta menjadi bagian dari transformasi digital dalam pemantauan dan pengelolaan lingkungan secara berkelanjutan.

Oleh karena itu, penelitian ini perlu dilakukan untuk mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara yang mampu mendeteksi partikel dan gas pencemar secara *real-time*, khususnya di wilayah perkotaan yang berdekatan dengan aktivitas industri dan kepadatan lalu lintas kendaraan. Pengembangan sistem ini diharapkan dapat mengatasi keterbatasan pemantauan kualitas udara yang masih bersifat terbatas dan tidak selalu tersedia secara langsung bagi masyarakat, sehingga informasi kondisi udara dapat disampaikan secara cepat, akurat, dan mudah dipahami sebagai dasar upaya perlindungan kesehatan dan pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.

1.2 Identifikasi Masalah

Menurut berbagai sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) telah dikembangkan, namun masih terdapat sejumlah keterbatasan dalam hal cakupan parameter yang dipantau, efektivitas penyajian data, serta

tingkat aksesibilitas informasi bagi masyarakat. Beberapa kelemahan yang teridentifikasi dari penelitian sebelumnya antara lain:

1. Cakupan parameter terbatas. Sebagian besar sistem pemantauan hanya menggunakan sensor seperti PMS5003 dan MQ135, yang memang dapat mendeteksi partikel udara dan gas berbahaya. Namun, sistem tersebut belum mencakup parameter penting lain seperti suhu dan kelembaban udara yang dapat memberikan konteks tambahan terhadap kualitas udara secara keseluruhan. Sensor seperti DHT22, yang mampu mengukur suhu dan kelembaban, belum banyak diintegrasikan.
2. Tampilan data kurang efektif. Banyak penelitian sebelumnya hanya menampilkan data kualitas udara melalui LCD 16x2 atau perangkat pribadi seperti smartphone. Meskipun fungsional, tampilan ini kurang memadai untuk diseminasi informasi di ruang terbuka karena keterbatasan jumlah karakter dan ukuran layar, sehingga tidak efektif sebagai media informasi publik.
3. Kurangnya aksesibilitas untuk masyarakat luas. Sebagian sistem pemantauan kualitas udara hanya digunakan dalam ruang tertutup atau area terbatas, sehingga masyarakat umum sulit memperoleh informasi *real-time* terkait kondisi udara di lingkungan mereka. Hal ini membatasi peran serta masyarakat dalam merespons potensi bahaya polusi udara.

Sebagai solusi terhadap permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan sistem pemantauan kualitas udara yang lebih komprehensif dan dapat diakses oleh masyarakat luas dengan pendekatan sebagai berikut.

1. Integrasi beberapa sensor lingkungan. Sistem akan menggunakan kombinasi sensor PMS5003 untuk mendeteksi partikel debu (PM1.0, PM2.5, PM10),

MQ135 untuk mendeteksi gas berbahaya (seperti CO, NH₃, NO_x), serta DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembaban udara. Kombinasi sensor ini diharapkan mampu memberikan data kualitas udara yang lebih akurat dan lengkap.

2. Penyajian informasi melalui dua layar LED P5. Informasi kualitas udara akan ditampilkan secara *real-time* pada dua layar LED P5 yang disusun berjajar. Media ini memiliki keunggulan dalam hal visibilitas tinggi, kapasitas tampilan yang besar, dan cocok digunakan sebagai sarana informasi publik di ruang terbuka.
3. Implementasi di wilayah strategis dengan potensi polusi tinggi. Sistem akan diterapkan di wilayah yang memiliki tingkat polusi udara relatif tinggi, seperti di sekitar perkotaan pusat kota Singaraja. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap kondisi udara serta mendorong pengambilan tindakan preventif yang diperlukan..

Dengan pendekatan ini, sistem yang dikembangkan diharapkan lebih efektif dalam meningkatkan kesadaran masyarakat serta memberikan informasi kualitas udara yang lebih akurat dan mudah diakses.

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan tidak melebar, penelitian ini memiliki beberapa pembatasan sebagai berikut:

- 1) Perangkat keras dan sensor yang digunakan.
 - Mikrokontroler yang digunakan adalah ESP32, yang memiliki keunggulan dalam konektivitas Wi-Fi dan efisiensi daya.
 - Sensor yang digunakan dalam pengukuran kualitas udara meliputi: PMS5003 untuk mendeteksi partikel PM2.5 dan PM10. MQ-135 untuk

mendeteksi gas berbahaya seperti CO₂, NH₃, dan NO_x. DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembaban udara.

- Tampilan informasi menggunakan dua layar LED P5 yang disusun berjajar untuk meningkatkan visibilitas di ruang terbuka.

2) Cakupan pengukuran

- Pengukuran kualitas udara terbatas pada parameter yang dapat dideteksi oleh sensor yang digunakan.
- Fokus utama adalah pemantauan terhadap partikel udara (PM2.5 dan PM10), gas berbahaya (CO₂, NH₃, NO_x), serta parameter lingkungan seperti suhu dan kelembaban.
- Sistem tidak mencakup deteksi gas atau partikel lain di luar cakupan sensor tersebut.

3) Area pengujian dan implementasi

- Sistem akan diuji di beberapa lokasi di kota Singaraja, terutama di kawasan yang dianggap memiliki potensi polusi udara tinggi seperti daerah sekitar pusat kota.
- Uji coba dilakukan di lingkungan terbuka, bukan di dalam ruangan atau lingkungan industri tertutup.

4) Sistem komunikasi dan penyimpanan data. Sistem menggunakan koneksi Wi-Fi untuk pengiriman data secara realtime ke server lokal atau cloud. Tidak digunakan teknologi komunikasi lain seperti jaringan seluler, LoRa, atau NB-IoT. Data disimpan secara langsung tanpa dilakukan analisis historis atau prediksi berbasis kecerdasan buatan (AI).

5) Sumber daya dan daya tahan perangkat

- Sistem menggunakan catu daya listrik permanen (adapter atau sumber listrik PLN), tidak menggunakan baterai atau sumber daya terbarukan seperti panel surya.
- Pengujian dilakukan dalam jangka waktu tertentu dan tidak mencakup uji ketahanan perangkat dalam kondisi ekstrem seperti hujan lebat atau paparan sinar matahari terus-menerus.

1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah yang telah diuraikan, penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem pemantauan kualitas udara berbasis ESP32 dengan tampilan LED P5 yang lebih informatif dan mudah diakses oleh masyarakat. Untuk itu, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis ESP32 dengan integrasi sensor PMS5003, MQ-135, dan DHT22, serta menampilkan data secara real-time pada dua layar LED P5 agar informasi kualitas udara dapat diakses secara luas oleh masyarakat?
2. Bagaimana kinerja sistem dalam mengukur parameter kualitas udara, meliputi PM2.5, PM10, gas berbahaya (CO_2 , NH_3 , NO_x), suhu, dan kelembaban lingkungan secara akurat dan berkelanjutan?
3. Sejauh mana efektivitas penggunaan layar LED P5 dalam menyampaikan informasi kualitas udara kepada masyarakat dibandingkan dengan media tampilan konvensional seperti LCD 16x2?

1.5 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menjawab rumusan masalah yang telah dikemukakan sebelumnya. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang dan mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan sensor PMS5003, MQ-135, dan DHT22, serta menampilkan data secara real-time pada dua layar LED P5 sebagai media informasi publik yang mudah diakses.
2. Menganalisis kinerja sistem dalam mendeteksi dan merekam parameter kualitas udara, yaitu PM2.5, PM10, gas berbahaya (CO_2 , NH_3 , NO_x), suhu, dan kelembaban, secara akurat dan berkelanjutan.
3. Mengevaluasi parameter ukur penggunaan layar LED P5 dalam menyampaikan informasi kualitas udara kepada masyarakat, dibandingkan dengan media tampilan konvensional seperti LCD 16x2.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak yang terkait, antara lain:

1. Masyarakat Kota Singaraja
 - Memperoleh informasi real-time mengenai kualitas udara di lingkungan sekitar melalui tampilan layar LED P5.
 - Dapat mengambil tindakan pencegahan seperti mengurangi aktivitas luar ruangan atau menggunakan masker ketika tingkat polusi udara tinggi.
2. Pemerintah Daerah dan Dinas Lingkungan Hidup

- Menyediakan data kualitas udara sebagai dasar dalam perumusan kebijakan terkait pengelolaan lingkungan dan pengendalian polusi udara di Kabupaten Buleleng.
- Mendukung upaya perencanaan dan pengawasan terhadap sumber pencemaran udara, seperti emisi kendaraan dan aktivitas industri.

3. Lembaga Pendidikan dan Peneliti

- Menjadi referensi bagi penelitian lebih lanjut terkait sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT.
- Memberikan wawasan bagi mahasiswa dan akademisi dalam
- mengembangkan teknologi berbasis sensor dan tampilan digital untuk pemantauan lingkungan.

4. Industri dan Sektor Swasta

- Dapat dijadikan sebagai model bagi perusahaan yang ingin menerapkan sistem pemantauan kualitas udara di area industri atau kawasan bisnis.
- Memfasilitasi penerapan *Corporate Social Responsibility* (CSR) dalam mendukung lingkungan yang lebih bersih dan sehat.

