

Prototype Sistem Peringatan Dini Kualitas Udara Berbasis *Internet of Things* (IoT)

Dhabit Fauzan^{1*}, Didik Aribowo², dan Desmira³

¹ Universitas Sultan Ageng Tirtayasa ; email : dhabitfauzan@untirta.ac.id

² Universitas Sultan Ageng Tirtayasa; email : d_aribowo@untirta.ac.id

³ Universitas Sultan Ageng Tirtayasa ; email : desmira@untirta.ac.id

* Penulis Korespondensi: Dhabit Fauzan

Abstract: The escalation of air pollution in urban environments and enclosed spaces, primarily driven by the accumulation of Carbon Monoxide (CO) and Carbon Dioxide (CO₂), poses a latent threat to human health due to their colorless and odorless nature. This study aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based air quality early warning system prototype utilizing the ESP32 micro-controller as the core controller. The system architecture integrates an MQ-7 sensor to measure CO levels, an MQ-135 sensor to detect CO₂ concentrations, and a DHT22 sensor to monitor ambient temperature and humidity in real-time. The research methodology employs an engineering experiment approach, encompassing hardware architecture design, software development, sensor calibration via average Analog to Digital Converter (ADC) values, and comprehensive system functional testing. Experimental results demonstrate that the device accurately classifies air quality into three distinct thresholds: Good (CO < 10 ppm, CO₂ ≤ 800 ppm), Moderate (CO 10–25 ppm, CO₂ 801–1500 ppm), and Poor (CO ≥ 26 ppm, CO₂ > 1500 ppm, or temperature 35°C). Upon detecting hazardous air conditions, physical indicators including a red LED and a local buzzer are simultaneously activated. Concurrently, critical alerts are transmitted to the user's smartphone via the Blynk platform, exhibiting a response time ranging from 4 to 42 seconds, with an average of 17.7 seconds. The deployment of this early warning system successfully demonstrates the effectiveness of IoT technology integration in providing a highly responsive environmental protection mechanism.

Keywords: Sistem Peringatan Dini; Kualitas Udara; *Internet of Things* (IoT); ESP32 ; Blynk

Abstrak: Kenaikan tingkat polusi udara di kawasan urban maupun ruang tertutup, khususnya yang dipicu oleh akumulasi gas Karbon Monoksida (CO) dan Karbon Dioksida CO₂ menjadi ancaman laten bagi kesehatan manusia karena karakteristik kedua senyawa tersebut yang tidak berwarna dan tidak berbau. Penelitian ini bertujuan untuk mendesain dan mengimplementasikan sebuah prototipe sistem deteksi dini kualitas udara berbasis teknologi *Internet of Things* (IoT) menggunakan kendali utama mikrokontroler ESP32. Infrastruktur sistem mengintegrasikan komponen sensor MQ-7 sebagai pengukur kadar CO, sensor MQ-135 sebagai detektor CO₂, serta sensor DHT22 untuk mengawasi fluktuasi suhu dan kelembapan udara secara seketika (*real-time*). Pendekatan yang digunakan dalam studi ini adalah metode eksperimen rekayasa (*engineering experiment*) yang mencakup perancangan perangkat keras (*hardware*), pengembangan perangkat lunak (*software*), kalibrasi sensor berbasis kalkulasi nilai rata-rata *Analog to Digital Converter* (ADC), serta pengujian fungsionalitas sistem. Berdasarkan fase eksperimen, alat ini terbukti mampu mengklasifikasikan kondisi kelayakan udara secara akurat ke dalam tiga kategori status, yaitu : Baik (CO < 10 ppm, CO₂ ≤ 800 ppm), Sedang (CO 10–25 ppm, CO₂ 801–1500 ppm), dan Buruk (CO ≥ 26 ppm, CO₂ > 1500 ppm, atau suhu 35°C). Saat sistem mengidentifikasi status udara berada pada level buruk, indikator fisik berupa LED merah beserta komponen *buzzer* lokal akan aktif secara simultan. Pada saat yang sama, sistem mengalirkan sinyal peringatan kritis (*critical alert*) menuju ponsel pintar pengguna lewat aplikasi Blynk dengan durasi waktu respons berkisar 4 hingga 42 detik (memiliki rata-rata 17,7 detik). Implementasi prototipe ini berhasil membuktikan efisiensi integrasi teknologi IoT dalam menyajikan sistem proteksi dini lingkungan yang responsif.

Kata kunci : Sistem Peringatan Dini; Kualitas Udara; *Internet of Things* (IoT); ESP32 ; Blynk

Received June 26, 2026
Revised June 29, 2026
Accepted July 21, 2026
Available: July 25, 2026
Published: July 30, 2026



Hak cipta: © 2026 oleh penulis.
Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

1. Pendahuluan

Keberadaan udara bersih mutlak diperlukan untuk mendukung kehidupan manusia dan menjaga ekosistem tetap seimbang bagi generasi masa kini hingga masa mendatang. Oleh sebab itu, pengawasan kondisi udara secara konsisten menjadi tindakan pencegahan yang sangat penting agar lingkungan terhindar dari paparan polutan berbahaya. Penurunan kualitas udara akibat tingginya konsentrasi unsur kimia berbahaya berisiko mendatangkan gangguan respirasi akut, mengganggu kenyamanan lingkungan hidup, serta merusak struktur material bangunan (Rosyidi, Wibowo, & Wicaksana, 2025). Secara global, polusi udara menjadi ancaman serius yang menyumbang sekitar 7 juta kematian dini setiap tahunnya (World Health Organization, 2014)]. Di Indonesia, sektor transportasi dan emisi kendaraan bermotor diidentifikasi sebagai sumber utama pencemaran udara di wilayah perkotaan [4(Kementerian Lingkungan Hidup, 2013)].

Peningkatan jumlah kepemilikan kendaraan di Provinsi Banten tidak terlepas dari tingginya mobilitas warga urban yang didorong oleh kemajuan ekonomi serta urbanisasi. Berdasarkan Badan Pusat Statistik Provinsi Banten (2024) wilayah Kota Serang kini dihuni oleh sedikitnya 354.181 unit kendaraan bermotor yang mayoritasnya berupa sepeda motor. Dampak dari membeludaknya volume transportasi tersebut adalah meningkatnya emisi gas buang dari pembakaran bahan bakar fosil, terutama senyawa CO₂ dan CO. Menurut Raming et al. (2022), gas CO yang terbentuk akibat pembakaran tidak sempurna tidak dapat dideteksi oleh indra penciuman maupun penglihatan, tetapi memiliki sifat toksik yang tinggi karena mampu mengikat hemoglobin darah membentuk COHb. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan gejala pusing, sesak napas berat, hingga fatalitas. Sementara itu, tingginya konsentrasi CO₂ di udara bertindak sebagai komponen gas rumah kaca yang memicu eskalasi pemanasan global dan ketidakseimbangan iklim (Amsar, Khairuman, & Marlina, 2020).

Kondisi kerentanan terhadap paparan gas berbahaya ini tercermin secara jelas di Alun-Alun Kota Serang. Sebagai ruang terbuka publik yang menjadi pusat kegiatan hiburan, olahraga, dan ekonomi informal, kawasan ini memiliki intensitas aktivitas dan mobilitas masyarakat yang sangat tinggi. Hal tersebut menjadikan Alun-Alun Kota Serang sangat rentan terhadap akumulasi emisi gas beracun dari kendaraan yang melintas maupun parkir. Namun demikian, infrastruktur pemantauan kualitas udara yang ada saat ini umumnya masih bersifat manual, berbiaya tinggi, dan tidak bekerja secara *real-time*, sedangkan alat uji emisi konvensional tidak efisien karena tidak dapat memantau kondisi polusi saat kendaraan beroperasi (Kosegeran, Kendekallo, Sompie, & Bahrin, 2013).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, diperlukan sebuah inovasi sistem pemantauan otomatis yang bekerja secara kontinu berbasis teknologi *Internet of Things* (IoT). Melalui penelitian ini, dikembangkan sebuah prototipe sistem peringatan dini (*early warning system*) kualitas udara. Sistem ini mengintegrasikan sensor MQ-7 untuk mendeteksi CO, sensor MQ-135 untuk mendeteksi CO₂, serta sensor DHT22 untuk memantau suhu dan kelembapan udara. Menggunakan mikrokontroler sebagai pusat kendali, perangkat ini dirancang untuk menampilkan data pada layar LCD lokal sekaligus mengirimkan notifikasi peringatan secara *real-time* ke aplikasi seluler Blynk dan email pengguna. Ketika parameter udara melewati ambang batas aman, indikator fisik berupa LED dan *buzzer* akan aktif secara otomatis. Melalui sistem ini, diharapkan masyarakat di area publik dapat memperoleh informasi polusi secara cepat untuk mengambil tindakan preventif yang diperlukan.

2. Tinjauan Literatur

2.1. Kajian Teori

2.1.1 Udara dan Pencemaran Udara

Udara merupakan substansi vital bagi kelangsungan hidup makhluk hidup di bumi, berperan penting sebagai penyedia oksigen, penghantar suara, dan pengatur suhu lingkungan. Karakteristik fisik udara meliputi wujud gas yang tidak terlihat, namun memiliki massa, volume, dan tekanan yang bersifat dinamis. (Aryanta & maharani, 2023)

Degradasi kualitas atmosfer atau pencemaran udara diartikan sebagai masuknya zat asing berwujud padat, cair, maupun gas ke dalam lingkungan hidup yang melebihi batas toleransi alami. Kondisi ini terjadi saat senyawa kimia, partikel biologis, atau material fisik mengendap di lapisan udara dalam kadar yang dapat mengancam keselamatan makhluk hidup, terutama di pusat-pusat kota berpenduduk padat. (Dyana et al., 2025)

2.1.2 Peringatan Dini

Sistem peringatan dini merupakan mekanisme pemanfaatan informasi yang efektif melalui kelembagaan terkait untuk memberdayakan populasi berisiko agar dapat mengambil tindakan mitigasi secara tepat waktu guna meminimalisir dampak destruktif suatu ancaman. (Marlena Dewi & Sihombing Sekolah Staf dan Komando TNI Angkatan Laut, 2022)

2.1.3 Indeks Kualitas Udara dan Parameter Polutan

Faktor lingkungan seperti emisi dari kendaraan, kelayakan ventilasi, dan tingginya aktivitas manusia berkontribusi langsung pada mutu udara dalam ruang maupun area ambien (Rumampuk, Poekoel, & Rumagit, 2021) Adapun standar baku mutu untuk masing-masing parameter zat pencemar di Indonesia secara resmi berpijak (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), 2021)

Tabel 1. Baku Mutu Udara Ambien Nasional

Sumber : (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), 2021)

No.	Parameter	Waktu	Baku Mutu ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)
1	Sulfur Dioksida (SO ₂)	1 jam	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		24 jam	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		1 tahun	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
2	Karbon Monoksida (CO)	1 jam	10000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		8 jam	4000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
3	Nitrogen Dioksida (NO ₂)	1 jam	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		24 jam	65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		1 tahun	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
4	Oksidan Fotokimia (OX) sebagai Ozon (O ₃)	1 jam	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		8 jam	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		1 tahun	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
5	Hidrokarbon Non Metana (NMHC)	3 jam	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
6	Pertikulat Debu <100 μm (TSP)	24 jam	230 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Partikulat debu <10 μm (PM ₁₀)	24 jam	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		1 tahun	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Partikulat Debu <2,5 μm (PM _{2,5})	24 jam	55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		1 tahun	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
7	Timbal	24 jam	2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Batas maksimum toleransi polutan yang diperbolehkan berada di udara bebas dikenal sebagai baku mutu udara ambien. Sementara itu, polutan itu sendiri merujuk pada segala materi, energi, atau unsur lain yang memicu kontaminasi atau penurunan kualitas udara. Merujuk pada regulasi yang berlaku, ambang batas gas Karbon Monoksida (CO) ditetapkan

sebesar 10.000 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ (sebanding dengan 9 ppm) untuk durasi pemantauan 1 jam, serta 30.000 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ (sebanding dengan 25 ppm) untuk periode pengukuran yang sama. Di sisi lain, regulasi domestik di Indonesia belum menetapkan aturan khusus mengenai baku mutu konsentrasi Karbon Dioksida (CO_2) di udara ambien. Oleh karena itu, pengukurannya kerap mengacu pada standar global atau literatur eksternal. Sebagai gambaran, Cahyono (2010) mengemukakan bahwa akumulasi gas CO_2 di atmosfer yang memiliki masa hidup berkisar 50 hingga 200 tahun—terus mengalami lonjakan signifikan. Jika pada era pra-revolusi industri (tahun 1880-an) kadarnya hanya 280 ppm dan meningkat menjadi 315 ppm pada 1957, saat ini konsentrasinya telah menyentuh angka sekitar 360 ppm.

2.1.4 Komponen Sistem

- Sensor MQ-7:** Jenis sensor gas ini dirancang khusus untuk mengidentifikasi keberadaan gas Karbon Monoksida (CO) di lingkungan sekitar. Keunggulan utamanya terletak pada responsivitasnya yang tinggi terhadap paparan gas CO, konsistensi performa yang stabil, serta daya tahan operasional yang cukup panjang (Rosa, Simon, & Lieanto, 2020)
- Sensor MQ-135:** Sensor yang mampu mendeteksi berbagai gas berbahaya termasuk CO_2 , Amonia, dan Benzena, dilengkapi dengan output analog dan digital. (Alexander Rombang, Bambang Setyawan, Dewantoro, & Kristen Satya Wacana, 2022)
- DHT22:** Sensor digital untuk memantau suhu dan kelembapan dengan akurasi tinggi dan jangkauan pengukuran yang luas. (Alif, Utama, St, Widya, & Surabaya, 2016)
- ESP32:** Sebagai suksesor dari ESP8266, mikrokontroler ESP32 yang dirancang oleh Espressif Systems menawarkan kapabilitas yang lebih mutakhir. Perangkat ini unggul karena telah menyematkan modul WiFi secara internal ke dalam *chip*-nya, menjadikannya komponen yang sangat efisien dan populer untuk diimplementasikan dalam berbagai proyek berbasis *Internet of Things* (IoT).
- Blynk:** Platform Blynk diterapkan sebagai ekosistem perangkat lunak pendukung untuk memonitor data sensor secara nirkabel, menyajikan visualisasi grafik, serta mengelola pengiriman pesan peringatan secara seketika (*real-time*) ke pengguna. (Nisa et al., 2023)

2.1.5 Metode Waterfall

Guna membangun perangkat lunak secara sistematis, metode *Waterfall* menerapkan konsep sekuensial atau bertahap. Melalui model ini, pengembangan harus melewati siklus yang runtut, dimulai dari analisis kebutuhan pengguna, perancangan arsitektur sistem, penulisan kode program, penyatuan dan pengujian sistem, serta diakhiri dengan fase pemeliharaan.. (Sommerville, 2016)

2.1.6 Regresi linear

Regresi linear sederhana merupakan metode statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara satu variabel independen (variabel bebas) dan satu variabel dependen (variabel terikat) (Afifah Muhartini et al., 2021)

$$Y = a + bx$$

2.1. Hasil Penelitian Yang Relevan

Beberapa penelitian terdahulu yang menjadi acuan dalam pengembangan sistem ini disajikan dalam tabel berikut

- putri, suryadi, cameel, & fitri (2024)): Membangun sistem deteksi kualitas udara dalam ruangan menggunakan parameter suhu, kelembapan, dan CO_2 berbasis IoT. Sistem menggunakan tampilan LCD 16x2 dan LED sebagai indikator saat ambang batas terlampaui serta diintegrasikan dengan platform website. Perbedaannya dengan penelitian ini terletak pada penambahan parameter gas CO, platform IoT mobile (Blynk), serta penerapan sistem untuk area terbuka (*outdoor*).
- Ignatius Sudarto Hasugian, Edi Kurniawan, & Diyah Purwitasari (2024) Merancang sistem keselamatan gas CO_2 pada ruang penyimpanan tabung menggunakan mikrokontroler Raspberry Pi Pico W dan sensor MQ-135. Output alarm diintegrasikan dengan blower elektrik dan Bot Telegram, dengan rata-rata nilai kesalahan sensor sebesar 3,5%. Penelitian ini berbeda karena fokus pada sistem peringatan dini multisensor komprehensif di area

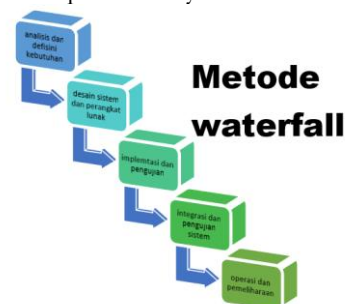
- publik, menggunakan platform Blynk, serta mengombinasikan logika skenario terburuk (*worst-case scenario*).
- c. Fikri et al. (2023). Melakukan rancang bangun monitoring polusi udara karbon monoksida (CO) di lingkungan kampus FKIP Untirta menggunakan sensor MQ-7 berbasis IoT website. Penelitian tersebut berfokus pada pemantauan tren fluktuasi jangka panjang. Sementara penelitian ini mengembangkan aspek kedaruratan melalui sistem peringatan dini seketika (*real-time critical alert*) yang dilengkapi indikator fisik lokal (LED dan Buzzer multimedia) serta notifikasi push alert pada smartphone
 - d. Budiman, Franata, Tinggi Teknologi Payakumbuh, & Korespondensi (2024) Mengembangkan prototipe pemantauan polusi udara ruangan berbasis NodeMCU ESP8266 dan sensor MQ-135 untuk mengirim data kadar gas CO₂ ke platform ThingSpeak. Penelitian ini memiliki kesamaan dalam penggunaan MQ-135, namun dibedakan oleh penggunaan mikrokontroler ESP32 yang lebih mutakhir serta integrasi tiga sensor sekaligus (MQ-7, MQ-135, DHT22) untuk mengklasifikasikan status kelayakan udara secara simultan
 - e. (Dafa, Yulianto, Desy, Utomo, & Wijayanto, 2022) merancang alat yang dapat mendeteksi tingkat polusi udara, khususnya karbon monoksida (CO), di udara terbuka. Hasil penelitian tersebut sensor MQ-07 dapat mengukur kadar karbon monoksida (CO). Alat ini dapat mendeteksi suhu udara dengan sensor DHT11. Data hasil pengukuran ditampilkan pada layar LCD dan juga dikirim ke smartphone sehingga dapat dipantau dari jarak jauh.

3. Metode

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen rekayasa (Engineering Experiment) untuk merancang, mengimplementasikan, dan menguji Prototype Sistem Peringatan Dini Kualitas Udara Berbasis Internet of Things (IoT)

3.1. Alur dan Model Pengembangan Penelitian

Penelitian ini menerapkan metode eksperimen rekayasa (*engineering*) dengan model pengembangan *Waterfall* yang diadaptasi dari Sommerville (2016). Model ini dipilih karena strukturnya yang linear dan sistematis, di mana setiap tahapan harus diselesaikan secara terstruktur sebelum melangkah ke tahap berikutnya.



Gambar 1. Tahapan Pengembangan Sistem Model Waterfall

Alur pengembangan prototipe sistem peringatan dini kualitas udara ini meliputi lima tahapan utama :

- a. Requirements Analysis and Definition: Menganalisis kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak yang relevan dengan parameter pemantauan kualitas udara
- b. System and Software Design: Merancang arsitektur perangkat keras melalui diagram blok dan skema rangkaian elektrik, serta merancang logika pemrograman dalam bentuk *flowchart*.
- c. Implementation and Unit Testing: Merealisasikan rancangan menjadi bentuk fisik (perakitan komponen) dan penulisan kode program (*coding*) pada Arduino IDE serta pengujian fungsionalitas individual komponen.
- d. Integration and System Testing: Menggabungkan seluruh komponen yang telah teruji menjadi satu kesatuan sistem yang utuh, menghubungkannya ke platform IoT Blynk, dan melakukan simulasi pengujian validitas logika serta kecepatan respons
- e. Operation and Maintenance: Penempatan prototipe di lingkungan nyata (Alun-Alun Kota Serang) serta pemeliharaan berkala untuk menjamin kontinuitas operasi sistem

3.2. Spesifikasi Komponen dan Perangkat Penelitian

Intrumens penelitian terdiri atas komponen perangkat keras (Hardware) dan Perangkat Lunak (Software) dengan spesifikasi sebagai berikut

Perangkat keras

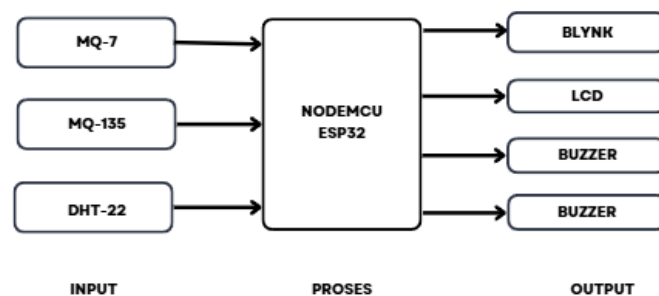
- NodeMCU ESP32: Sebagai mikrokontroler utama dengan CPU Xtensa dual-core 32-bit yang dilengkapi modul Wi-Fi dan Bluetooth internal untuk transmisi data IoT.
- Sensor MQ-7: Sensor elektrokimia sensitif untuk mendeteksi konsentrasi gas Karbon Monoksida (CO) dengan jangkauan deteksi 20–2000 ppm.
- Sensor MQ-135: Sensor kualitas udara untuk mendeteksi konsentrasi gas Karbon Dioksida (CO₂).
- Sensor DHT22 : Sensor kapasitif untuk memantau suhu (rentang -40°C hingga +80°C, akurasi $\pm 0.5^\circ\text{C}$) dan kelembapan udara.
- Aktuator & Indikator Lokal: Buzzer piezoelektrik (alarm suara), LED Tiga Warna (Merah, Kuning, Hijau sebagai indikator visual), dan LCD I2C 16x2 karakter (penampil informasi status lokal).

Perangkat Lunak

- Arduino IDE (v2.3.8): Perangkat lunak kompilasi berbasis bahasa pemrograman C untuk mengompilasi dan mengunggah kode program ke ESP32.
- Blynk Cloud & Blynk Mobile App: Platform IoT berbasis cloud yang digunakan untuk merancang dasbor pemantauan (*mobile/web interface*) serta mengirimkan notifikasi peringatan kritis secara *real-time* ke smartphone.

3.3. Perancangan Perangkat Keras (Hardware Design)

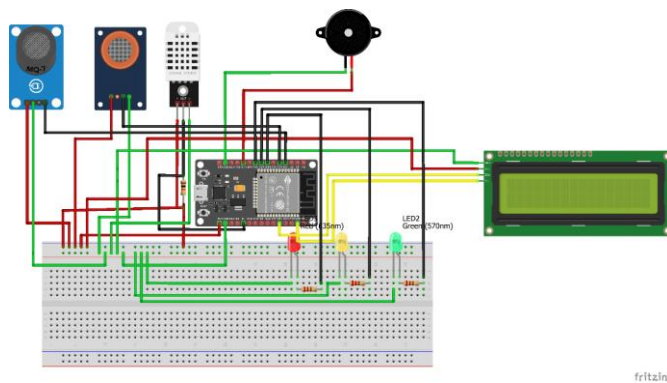
Integrasi antarkomponen elektronik dikonfigurasi secara terpusat pada pin GPIO NodeMCU ESP32 dengan arsitektur kelistrikan sebagai berikut:



Gambar 2. Blok Diagram Aksitektur Perangkat Keras Sistem

- Input : Sensor MQ-7 dihubungkan ke Pin GPIO 34 (A0 / VP) pada ESP32. Sensor MQ-135 dihubungkan ke Pin GPIO 35 (A1 / VN) pada ESP32. Sensor DHT22 dihubungkan ke Pin GPIO 4 pada ESP32.
- Proses : NodeMCU ESP32 (Gunakan tanda panah masuk dari blok input ke kotak ESP32 ini).
- Output : LCD 16x2 dengan Modul I2C dihubungkan ke Pin GPIO 21 (SDA) dan Pin GPIO 22 (SCL). LED 3 Warna (R-G-B), LED Merah Pin GPIO 26. LED Kuning Pin GPIO 25. LED Hijau Pin GPIO 33. Buzzer dihubungkan ke Pin GPIO 14. Blynk Cloud Aplikasi Smartphone Blynk.

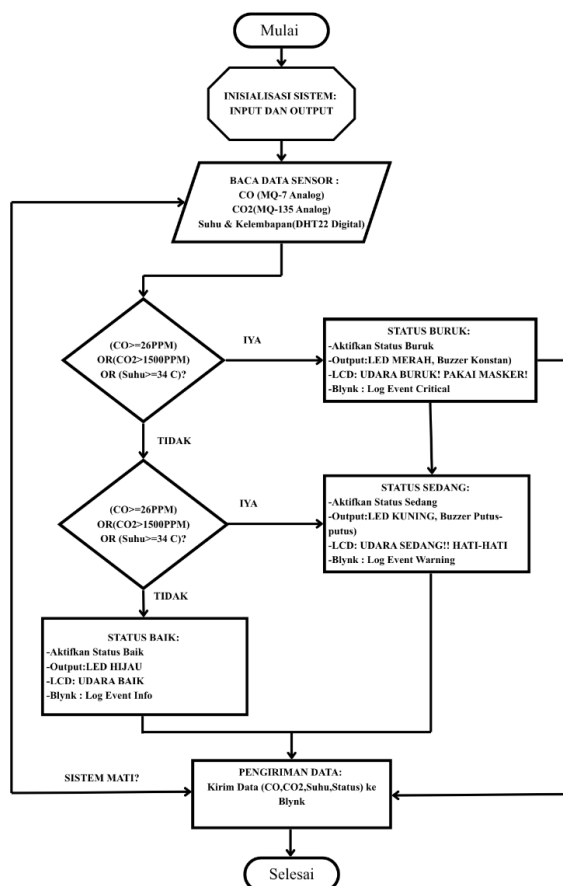
Setelah membuat diagram blok selanjutnya membuat skema rangkaian alat. Adapun Skema Rangkaian Alat dapat di lihat pada gambar



Gambar 3. Diagram Wiring Alat

3.4. Perancangan Perangkat Lunak

Sistem perangkat lunak dieksekusi secara berulang (*infinite loop*) pada mikrokontroler. Algoritma program dirancang menggunakan pendekatan *worst-case scenario* menggunakan operator logika OR. Melalui logika ini, sistem akan langsung menaikkan status bahaya jika salah satu parameter melewati batas aman, tanpa harus menunggu seluruh parameter terpenuhi bersamaan. Alur jalannya program secara detail digambarkan pada Gambar 3.



Gambar 4. Flowchart Sistem Kerja

Untuk menjamin Validitas data, Nilai mentah(Raw data) ADC dari sensor gas dikonversi menjadi satuan Parts Per Million (PPM) melalui persamaan Regresi linear. Logika Pembagian Status Kualitas Udara dan Respons Aktuator yang ditanamkan pada algoritma Gambar 3. Merujuk pada batasan parameter baku yang disederhanakan pada tabel 1

Tabel 2. Parameter dan Status Klasifikasi Kualitas Udara

No	Karbon Monoksida	Karbon Dioksida	Suhu	Status
1	<10 ppm	≤800	<34°C	Baik
2	10 – 25 ppm	801 – 1500 ppm	<34°C	Sedang
3	≥26 ppm	> 1500 ppm	≥34°C	Buruk

3.5. Teknik Analisis Data dan Validasi

Akurasi kinerja prototipe diuji melalui komparasi data pembacaan terhadap alat ukur pembandingan standar industri. Analisis deviasi dihitung menggunakan metode persentase kesalahan (*Mean of Error*) dengan rumus matematika pada Persamaan

$$\text{Error (\%)} = \frac{\text{nilai sebenarnya} - \text{nilai pengukuran}}{\text{nilai sebenarnya}} \times 100\% \quad 2.1$$

$$\text{Rata-rata Error} = \frac{\text{nilai sebenarnya} - \text{nilai pengukuran}}{\text{nilai sebenarnya}} \quad 2.2$$

Di mana nilai sebenarnya merupakan nilai parameter yang terbaca oleh alat ukur valid pihak ketiga dan nilai pengukuran adalah nilai parameter hasil konversi prototipe. Validasi akhir dilakukan dengan menguji keandalan sistem dalam memicu alarm fisik lokal serta mengukur *delay* waktu respons pengiriman *push notification* kritis ke aplikasi Blynk saat terjadi perubahan kondisi udara lingkungan

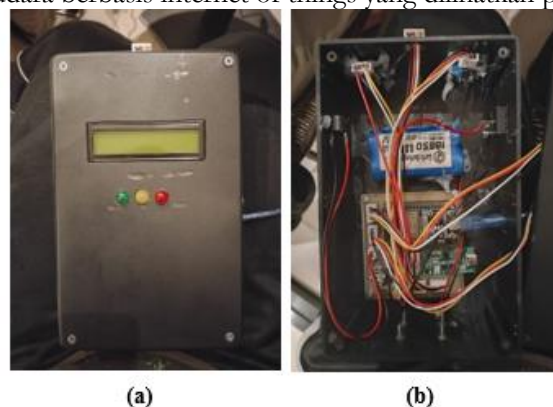
4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil Perancangan Sistem

Hasil pengembangan sistem Peringatan Dini Kualitas Udara invasive mencakup perancangan perangkat keras (hardware) dan perangkat lunak (software). Selain itu, ditampilkan hasil integrasi komponen dengan mikrokontroler sebagai pusat kendali sistem

4.1.1 Perancangan Hardware

Implementasi hardware hasil perakitan komponen perangkat keras prototype sistem peringatan dini Kualitas udara berbasis internet of things yang dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. (a) tampak luar prototipe (b) penyambungan prototipe

Pada gambar 5 menunjukkan proses perakitan perangkat keras yang terdiri dari berbagai komponen utama, yaitu ESP32, Sensor karbon monoksida MQ-7, Sensor karbon Dioksida MQ135, Sensor Suhu DHT22, Buzzer dan LCD I2C 16x2. Komponen-komponen tersebut telah dirangkai dengan teliti dan dihubungkan satu sama lain sesuai dengan diagram rangkaian yang telah dirancang sebelumnya. Proses ini dilakukan untuk memastikan bahwa setiap bagian dari perangkat keras dapat berfungsi secara optimal dan mendukung sistem peringatan dini kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT).

4.1.2 Perancangan Software

Perancangan perangkat lunak dikonfigurasi pada software Blynk sebagai pusat visualisasi data dan peringatan dini secara nirkabel. Tampilan Blynk dapat dilihat pada gambar



Gambar 6. Tampilan Antarmuka Software Blynk

4.2 hasil pengujian alat dan kalibrasi

4.2.1 kalibrasi Sensor

Proses kalibrasi dilakukan untuk menyelaraskan nilai tegangan analog mentah (*raw data* ADC) dari sensor agar dapat dikonversi menjadi satuan metrik yang valid. Kalibrasi dilakukan menggunakan metode analisis regresi linear sederhana dengan membandingkan pembacaan prototipe terhadap alat ukur standar referensi. Persamaan matematis yang dihasilkan dari proses kalibrasi adalah sebagai berikut:

- Sensor MQ-7 (Gas CO): Menghasilkan persamaan $y = 0,041x - 5,6896$
 $R^2 = 0,954$ untuk mengonversi data analog menjadi satuan ppm.
- Sensor MQ-135 (CO₂): Menghasilkan persamaan $7,9827x - 1506,5$
 $R^2 = 0,8435$ untuk mendapatkan nilai pembacaan ppm gas karbon dioksida.
- Sensor DHT22 (Suhu): Menggunakan basis fungsi kalibrasi linear $y = 1,0355x - 1,064$
 $R^2 = 0,9792$ untuk penyesuaian pembacaan temperatur ruangan dalam satuan derajat Celsius (°C).

4.2.2 Hasil Pengujian sensor MQ-7

Setelah algoritma kalibrasi diterapkan pada program mikrokontroler, dilakukan pengujian ulang untuk menghitung tingkat kesalahan pembacaan sistem. Evaluasi akurasi dihitung berdasarkan nilai kesalahan rata-rata (*Mean of Error*). Data hasil pengujian akurasi multisensor dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Data hasil pengujian Sensor MQ-7

No.	Alat Pemandangan	Alat Rancangan	Error (%)	Akurasi (%)
1	2	2,1	5,00%	95,00%
2	6	5,79	3,50%	96,50%
3	6	5,71	4,83%	95,17%
4	7	7,31	4,43%	95,57%
5	17	17,13	0,76%	99,24%

6	21	21,34	1,62%	98,38%
7	23	23,13	0,57%	99,43%
8	30	30,35	1,17%	98,83%
9	38	39,62	4,26%	95,74%
10	47	47,67	1,43%	98,57%
RATA RATA			2,76%	97,24%

Berdasarkan hasil pengujian komparatif dengan alat ukur standar, pembacaan kadar gas CO oleh sensor MQ-7 memiliki nilai kesalahan rata-rata (*Mean of Error*) sebesar 2,76%. Nilai deviasi yang rendah ini menghasilkan tingkat akurasi fungsional sebesar 97,24%, sehingga sensor dikategorikan sangat valid untuk mendeteksi fluktuasi gas CO secara presisi.

4.2.3 Pengujian Sensor MQ 135

Pengujian sensor MQ-135 dilakukan dengan membandingkan pembacaannya terhadap air quality detektor digital.

Tabel 4 Data Hasil Pengujian Sensor MQ-135

No	Alat Referensi	Alat Rancangan	Error (%)	Akurasi (%)
1	743	704	5,25%	94,75%
2	762	696	8,66%	91,34%
3	630	680	7,94%	92,06%
4	870	872	0,23%	99,77%
5	1457	1479	1,51%	98,49%
6	1392	1335	4,09%	95,91%
7	1313	1367	4,11%	95,89%
8	1630	1590	2,45%	97,55%
9	1693	1614	4,67%	95,33%
10	1630	1582	2,94%	97,06%
RATA RATA			4,19%	95,81%

Pembacaan konsentrasi gas CO₂ pada lingkungan uji menunjukkan nilai kesalahan rata-rata sebesar 4,19%. Meskipun memiliki nilai *error* sedikit lebih tinggi dibanding sensor lainnya akibat pengaruh sensitivitas gas campuran di udara terbuka, sensor ini tetap menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi yaitu mencapai 95,81% dan memenuhi standar kelayakan sistem pemantauan.

4.2.4 Pengujian Sensor DHT22

Pengujian sensor suhu DHT22 dilakukan dengan membandingkan pembacaannya terhadap thermometer digital.

Tabel 5 Data Hasil Pengujian Sensor DHT22

No.	Alat Pembanding	Alat Rancangan	Error (%)	Akurasi (%)
1	31	30,4	1,94%	98,06%
2	31	30,4	1,94%	98,06%
3	31	30,5	1,61%	98,39%

4	31,1	30,4	2,25%	97,75%
5	31,1	30,5	1,93%	98,07%
6	31,1	30,5	1,93%	98,07%
7	31,2	30,4	2,56%	97,44%
8	31,3	30,5	2,56%	97,44%
9	31,5	30,7	2,54%	97,46%
10	31,6	30,8	2,53%	97,47%
Rata-rata			2,18%	97,82%

Pengujian parameter temperatur udara menghasilkan nilai kesalahan rata-rata terkecil di antara multisensor lainnya, yaitu hanya sebesar 2,18%. Angka tersebut merepresentasikan tingkat keandalan akurasi yang sangat tinggi sebesar 97,82%, yang membuktikan bahwa respons sensor DHT22 sangat stabil dan mendekati nilai riil temperatur lingkungan.

4.3 pembahasan

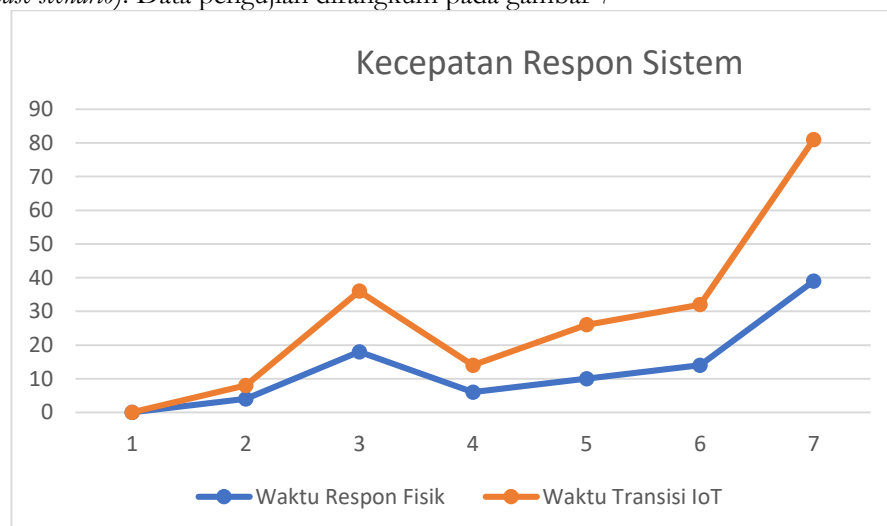
4.3.1 Validasi Logika peringatan Dini

Tabel 6 Validasi Logika Peringatan Dini

No.	CO (PPM)	CO2(PPM)	Suhu (C)	LED	Buzzer	LCD	Blynk	Keterangan
1	11	412	32,5	kuning	Berbunyi putus-putus	Udara Sedang	notifikasi waspada	Sesuai
2	12,6	412	33,1	Kuning	Berbunyi putus-putus	Udara Sedang	Notifikasi waspada	Sesuai
3	19,81	1008	33,3	Kuning	Berbunyi putus-putus	Udara Sedang	Notifikasi waspada	Sesuai
4	6,94	928	33,6	kuning	Berbunyi putus-putus	Udara Sedang	Notifikasi Waspada	Sesuai
5	3,41	553	34,8	hijau	Tidak aktif	udara baik	Notifikasi Info	Sesuai
6	8,21	1175	38,6	merah	Berbunyi terus menerus	udara buruk	Notifikasi buruk	Sesuai

4.3.2 Kecepatan Respon Sistem

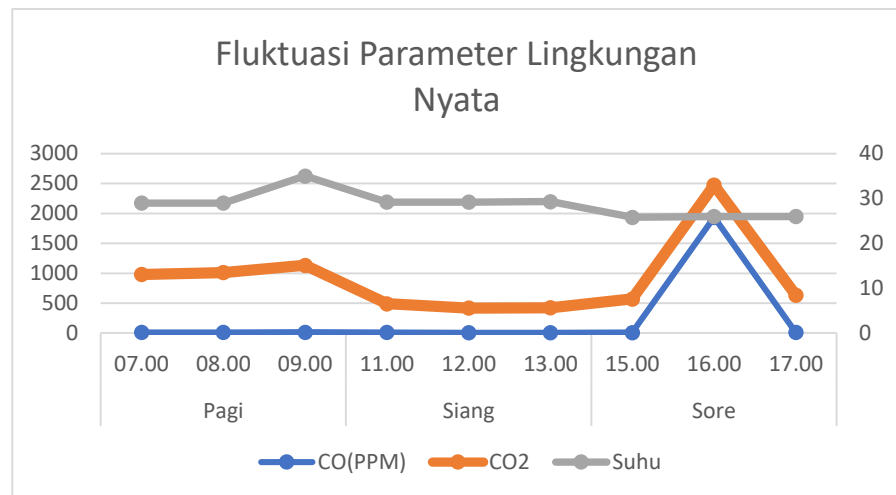
Pengujian fungsionalitas IoT dilakukan untuk mengukur waktu tundaan (*delay*) pengiriman sinyal dari alat menuju aplikasi smartphone pengguna ketika mendeteksi kondisi udara buruk (*worst-case scenario*). Data pengujian dirangkum pada gambar 7



Gambar 7 Grafik data Kecepatan Respon Sistem

Berdasarkan gambar 7, perbandingan pengiriman data antara respon fisik lokal dan nirkabel menunjukkan kesesuaian alur. Sinyal peringatan dini berupa pesan alarm kritis (*critical alert push-notification*) membutuhkan waktu rata-rata 17,7 detik untuk sampai ke ponsel pengguna. Fluktuasi waktu antara 4 hingga 42 detik sepenuhnya disebabkan oleh stabilitas *bandwidth* jaringan internet di lokasi, namun secara keseluruhan sistem dinilai sangat responsif untuk kebutuhan mitigasi darurat.

4.3.3 Fluktuasi parameter Lingkungan Nyata



Gambar 8. Fluktuasi Parameter Lingkungan Nyata

Karakteristik grafik pada Gambar 8 membuktikan adanya korelasi kuat antara peningkatan polutan dengan intensitas aktivitas mobilitas masyarakat. Kadar CO: Melonjak drastis pada jam sibuk pagi hari (pukul 07.00 s.d 09.00) mencapai 14,11 ppm dan mencapai puncak tertinggi pada sore hari (pukul 16.00) sebesar 19,36 ppm. Kenaikan drastis ini dipicu oleh akumulasi emisi gas buang kendaraan bermotor pada jam pulang kantor, di mana angka tersebut telah melewati ambang batas regulasi mutu udara ambien nasional (9 ppm). Kadar CO₂: Menunjukkan fluktuasi yang ekstrem pada sore hari hingga menembus angka 2500 ppm akibat padatnya volume kendaraan di area Alun-Alun. Konsentrasi gas ini mengindikasikan penurunan kualitas udara yang signifikan karena melebihi ambang kenyamanan standar baku lingkungan udara terbuka sebesar 1000 ppm. Suhu Udara: Bergerak konsisten mengikuti fluktuasi radiasi termal matahari harian, dimulai dari 31°C pada pagi hari dan mencapai puncak tertinggi 35°C di siang hari. Kenaikan suhu udara ini secara termodinamika mempercepat laju ekspansi volume gas polutan pencemar di lingkungan sekitar.

5. Perbandingan

Penelitian dilakukan analisis komparatif antara prototipe yang dikembangkan dengan stasiun pemantau konvensional serta sistem monitoring pada penelitian terdahulu (*state-of-the-art*). Stasiun pemantau konvensional memiliki keterbatasan mobilitas karena ukuran alat yang besar serta data yang dihasilkan tidak *real-time* akibat prosedur laboratorium. Sementara itu, mayoritas penelitian terdahulu berbasis IoT masih bersifat pasif (*data logging*), di mana pengguna harus memeriksa grafik polusi pada aplikasi atau website secara manual tanpa adanya sistem respons bahaya yang aktif.

Prototipe dalam penelitian ini memberikan kontribusi lebih maju dengan mentransformasikan fungsi alat menjadi sistem peringatan dini (*early warning system*) yang portabel. Kebaruan sistem ini terletak pada penerapan algoritma logika keputusan berbasis operator OR (|) bertingkat yang terhubung dengan LCD 16x2, LED indikator, dan *buzzer*. Jika salah satu parameter—baik CO, CO_2 , maupun suhu—melewati ambang batas

aman, mikrokontroler NodeMCU ESP32 seketika membunyikan *buzzer* konstan di lokasi sekaligus mengaktifkan alarm jarak jauh secara bersamaan.

Kontribusi nyata lainnya ditunjukkan melalui integrasi fitur *Notification Widget* pada aplikasi Blynk IoT. Fitur ini otomatis mengirimkan pesan alarm kritis (*critical alert push-notification*) langsung ke layar utama ponsel pengguna saat polusi terjadi, sehingga pengguna tidak perlu memantau aplikasi secara terus-menerus. Berdasarkan hasil pengujian transmisi nirkabel, sistem mencatatkan rata-rata waktu respons keseluruhan yang sangat cepat, yaitu 17,7 detik. Jeda waktu di bawah dua puluh detik ini membuktikan bahwa prototipe yang dikembangkan bekerja secara andal dan responsif dalam mendukung aksi mitigasi cepat terhadap risiko paparan gas beracun di lapangan.

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian fungsional terhadap prototipe sistem peringatan dini kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) ini, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

- Prototipe sistem peringatan dini kualitas udara luar ruangan (*outdoor*) berbasis NodeMCU ESP32 telah berhasil dirancang dan diimplementasikan secara terintegrasi dengan menghubungkan sensor MQ-7, MQ-135, DHT22, layar LCD 16x2 i2C, LED indikator, *buzzer*, serta platform Blynk Cloud.
- Proses kalibrasi menggunakan metode analisis regresi linear sederhana terbukti efektif dalam meningkatkan presisi pembacaan data sensor, dengan capaian tingkat akurasi sebesar 97,24% untuk sensor MQ-7 (gas CO), 95,81% untuk sensor MQ-135 (gas CO₂), dan 97,82% untuk sensor DHT22 (suhu udara).
- Penerapan algoritma keputusan berbasis operator logika OR ($||$) bertingkat mampu memicu sistem kesiapsiagaan lokal (LED Merah aktif dan alarm *buzzer* berbunyi konstan) secara instan ketika salah satu parameter lingkungan melewati ambang batas aman.
- Integrasi nirkabel dengan platform Blynk IoT teruji andal untuk mengirimkan pesan peringatan kritis (*critical alert push-notification*) secara otomatis ke ponsel cerdas pengguna dengan rata-rata waktu respons transmisi keseluruhan yang cepat, yaitu sebesar 17,7 detik. Hal ini membuktikan efektivitas prototipe sebagai instrumen mitigasi polusi secara *real-time*.

Kontribusi Penulis: Dhabit Fauzan bertanggung jawab atas metodologi penelitian, perancangan perangkat keras (*hardware*), pengembangan kode program (*software*), pengujian alat di lapangan, pengumpulan data fluktuasi parameter, serta penyusunan draf utama naskah jurnal. Didik Aribowo berkontribusi dalam pengawasan penelitian, validasi model kalibrasi regresi linear, peninjauan kritis terhadap struktur artikel ilmiah, serta analisis perbandingan sistem. Desmira berperan dalam pengawasan pengujian sistem IoT, penyelarasan format naskah jurnal sesuai pedoman, serta revisi akhir artikel ilmiah. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir naskah yang dikirimkan.

Pendanaan: Penelitian mandiri ini sepenuhnya didanai oleh penulis tanpa adanya dukungan finansial atau hibah dari lembaga donor, universitas, maupun pihak ketiga lainnya.

Pernyataan Ketersediaan Data: Seluruh data hasil pengujian akurasi sensor, pengukuran jeda respons transmisi Blynk IoT, serta data perekaman fluktuasi parameter kualitas udara yang mendukung temuan penelitian ini telah disajikan secara lengkap di dalam naskah artikel ini.

Ucapan Terima Kasih: Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Program Studi Pendidikan Vokasional Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, atas penyediaan sarana laboratorium selama perancangan alat. Apresiasi juga disampaikan kepada teman-teman sejawat yang telah dengan sabar membantu dalam tahap pengujian sistem hingga pengambilan data lapangan di area Alun-Alun Kota Serang.

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan, baik secara personal, finansial, maupun institusional, terkait dengan pelaksanaan penelitian, analisis data, hingga publikasi artikel ilmiah ini.

Referensi

- [1] Afifah Muhartini, A., Sahroni, O., Dwi Rahmawati, S., Febrianti, T., Mahuda, I., Saintek, F., & Bina Bangsa, U. (2021). *ANALISIS PERAMALAN JUMLAH PENERIMAAN MAHASISWA BARU DENGAN MENGGUNAKAN METODE REGRESI LINEAR SEDERHANA* (Vol. 1). Retrieved from <http://bayesian.lppmbinabangsa.id/index.php/home>
- [2] Alexander Rombang, I., Bambang Setyawan, L., Dewantoro, G., & Kristen Satya Wacana, U. (2022). *Perancangan Prototipe Alat Deteksi Asap Rokok dengan Sistem Purifier Menggunakan Sensor MQ-135 dan MQ-2*.
- Alif, Y., Utama, K., St, S., Widya, U., & Surabaya, K. (2016). Perbandingan Kualitas Antar Sensor Suhu dengan Menggunakan Arduino Pro Mini. *Jurnal NARODROID*, 2(2).
- [3] Amsar, A., Khairuman, K., & Marlina, M. (2020). PERANCANGAN ALAT PENDETEKSI CO2 MENGGUNAKAN SENSOR MQ-2 BERBASIS INTERNET OF THING. *METHOMIKA Jurnal Manajemen Informatika Dan Komputerisasi Akuntansi*, 4(1), 73–79. <https://doi.org/10.46880/jmika.Vol4No1.pp73-79>
- [4] Aryanta, I. W. R., & maharani, shinta enggar. (2023). DAMPAK BURUK POLUSI UDARA BAGI KESEHATAN DAN CARA MEMINIMALKAN RISIKONYA. *Jurnal Ecocentrism*, 3.
- [5] Badan Pusat Statistik Provinsi Banten. (2024). Jumlah Kendaraan Bermotor Menurut Kabupaten/Kota dan Jenis Kendaraan di Provinsi Banten (unit), 2024. Retrieved October 13, 2025, from <https://banten.bps.go.id/id/statistics-table/3/VjJ3NGRGa3dkRk5MTIU1bVNFOTVVbmQyVURSTVFUMDkjMw==/jumlah-kendaraan-bermotor-menurut-kabupaten-kota-dan-jenis-kendaraan-di-provinsi-banten--unit---2023.html?year=2024>
- [6] Budiman, A., Franata, M., Tinggi Teknologi Payakumbuh, S., & Korespondensi, P. (2024). Perancangan Prototype Pemantauan Polusi Udara dalam Ruangan Berbasis IoT Design of IoT Based Indoor Air Pollution Monitoring Prototype. *Technologica*, 3(2), 96–110.
- [7] Dafa, B., Yulianto, M., Desy, A., Utomo, N., & Wijayanto, A. (2022). Perancangan Alat Monitoring Suhu dan Polusi Karbon Monoksida (Co) di Udara Berbasis Internet Of Things (Iot). *LEDGER: Journal Informatic and Information Technology*, 1(4).
- [8] Dyana, J. S., Amelia, rizka nurhanifa, Davita, R., Arafah, S. A., Sede, Y. I., & Hidayati, A. R. (2025). Dampak Bahaya Pencemaran Udara Terhadap Kesehatan Masyarakat di Perkotaan. *Jurnal Ilmiah Wabana Pendidikan*, 11(1), 132.
- [9] Fikri, A., Darmawan, I. A., & Fatkhurrohman, M. (2023). Rancang Bangun Monitoring Kadar Polusi Udara di Lingkungan Kampus FKIP Menggunakan Sistem IoT. *JiIP (Jurnal Ilmiah Ilmu Pendidikan)*, 6. Retrieved from <http://jiip.stkipyapisdompu.ac.id>
- [10] Ignatius Sudarto Hasugian, Edi Kurniawan, & Diyah Purwitasari. (2024). Rancang Bangun Sistem Keselamatan terhadap Gas CO2 dalam Ruang Penyimpanan Tabung Gas CO2 Menggunakan Raspberry Pi Pico W. *Ocean Engineering: Jurnal Ilmu Teknik Dan Teknologi Maritim*, 3(3), 81–108. <https://doi.org/10.58192/ocean.v3i3.2523>
- [11] Kementerian Lingkungan Hidup. (2013). *Pedoman Teknis Penyusunan Inventarisasi Emisi Pencemaran Udara di Perkotaan*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. , Lembaran Negara Republik Indonesia § (2021).
- Kosegeran, V. V., Kendekallo, E., Sompie, S. R. A., & Bahrin. (2013). Perancangan Alat Ukur Kadar Karbon Monoksida(CO), Karbon Dioksida(CO2) dan Hidro Karbon(HC) pada Gas Buang Kendaraan Bermotor. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer*.
- Marlena Dewi, I., & Sihombing Sekolah Staf dan Komando TNI Angkatan Laut, G. P. (2022). KEARIFAN LOKAL MASYARAKAT PULAU SIMEULUE DALAM MENGHADAPI BENCANA ALAM TSUNAMI DAN IMPLIKASINYA PADA KETAHANAN NASIONAL. *Jurnal Maritim Indonesia*, 10. <https://doi.org/10.52307//jmi>
- Nisa, M., Mustofa, A., Saiful Millah, I., Nailah, F., Raya Camplong Km, J., & Timur, J. (2023). *Rancang Bangun Smart Green House Pada Budidaya Tanaman Kangkung Berbasis IoT (Internet of Things)*. 10(2), 11–17.
- putri, euis A. P., suryadi, N. F. N., cameel, Muhammad Thorieq Al, & fitri, , Susanti Ainul. (2024). *Optimalisasi Pengelolaan Sampah Dengan Alat Pembakaran Minim Asap Di RW 007 Desa Wahya*. 5(2). Retrieved from <https://proceedings.uinsgd.ac.id/index.php/Proceedings>

- Rambling, V. V, Umboh, J. M. L., Warouw, F., Kesehatan, F., Universitas, M., Ratulangi, S., ... Kesehatan, K. (2022). Literature Review: Gambaran Risiko Kesehatan pada Masyarakat akibat Paparan Gas Karbon Monoksida (CO). In *Jurnal KESMAS* (Vol. 11).
- Rosa, A. A., Simon, B. A., & Licanto, K. S. (2020). Sistem Pendeteksi Pencemar Udara Portabel Menggunakan Sensor MQ-7 dan MQ-135. *ULTIMA Computing*, XII(1).
- Rosyidi, L., Wibowo, E., & Wicaksana, A. M. (2025). Perancangan Sistem Pemantauan Kualitas Udara Pada Daerah Perkotaan Berbasis Teknologi Internet of Things. *Digital Transformation Technology*, 5(1), 90–96. <https://doi.org/10.47709/digitech.v5i1.5799>
- Rumampuk, G. C., Poekoel, V. C., & Rumagit, A. M. (2021). Internet of Things-Based Indoor Air Quality Monitoring System Design. *Jurnal Teknik Informasi*, 17, 11–18.
- Sommerville, Ian. (2016). *Software engineering*. Pearson.
- World Health Organization. (2014). 7 million premature deaths annually linked to air pollution. Retrieved October 15, 2025, from World Health Organization website: https://www.who.int/news/item/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution?utm_source=chatgpt.com