


# RANCANG BANGUN SISTEM PEMANTAUAN KUALITAS UDARA DI SEKITAR KAWASAN INDUSTRI TEKSTIL BERBASIS *INTERNET OF THINGS (IoT)*

Raynaldo Ananta Wijaya<sup>1</sup>, Pratomo Budi Santosa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jl. A. Yani Tromol Pos 1, Pabelan, Kartasura, Sukoharjo, Indonesia

 Email korespondensi: raynaldoanantawijaya180@gmail.com

**Abstrak.** Pencemaran udara akibat aktivitas industri berisiko menurunkan kualitas lingkungan dan memengaruhi kesehatan masyarakat, sehingga diperlukan sistem pemantauan yang akurat dan terintegrasi. Penelitian ini merancang sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan sensor MQ7 (CO), BME680 (eCO<sub>2</sub>, VOC, suhu, kelembapan, IAQ), dan Winsen ZH03B (PM1.0, PM2.5, PM10). Data ditampilkan melalui LCD I2C, dikirim ke platform ThingSpeak setiap 1 menit, serta direkam ke SD card dengan penandaan waktu menggunakan RTC DS3231. Sistem dilengkapi buzzer dan notifikasi Telegram untuk peringatan pada kategori “Tidak Sehat” dan “Bahaya”. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata error pengukuran sebesar 3,94% terhadap alat referensi dan waktu respons alarm rata-rata 7,3 detik. Sistem ini efektif untuk pemantauan kualitas udara secara real-time, portabel, dan berkelanjutan di kawasan industri.

**Kata kunci:** *IoT, Kualitas Udara, ESP32, ThingSpeak, MQ7, BME680, ZH03B, Telegram Bot*

## PENDAHULUAN

Pencemaran udara di berbagai wilayah kini menunjukkan kecenderungan yang makin mengkhawatirkan dan telah menjadi isu strategis kesehatan lingkungan. Beragam sumber emisi—baik yang bersifat biologis maupun non-biologis—berkontribusi terhadap penurunan kualitas udara: pembakaran terbuka dan asap, emisi kendaraan bermotor, proses industri dan asap pabrik, pelepasan limbah produksi, hingga aktivitas rumah



tangga sehari-hari. Akumulasi polutan dari sumber-sumber tersebut dapat mengganggu kualitas udara ambien maupun udara dalam ruang dan pada akhirnya menimbulkan dampak kesehatan bagi manusia. Percepatan pembangunan di sektor industri, transportasi, dan infrastruktur memang memberikan manfaat ekonomi dan sosial, namun di sisi lain memunculkan konsekuensi lingkungan berupa meningkatnya beban pencemar udara dan kebisingan. Dampak ini tidak hanya dirasakan di area terbuka seperti koridor lalu lintas padat atau kawasan industri, tetapi juga dapat menjalar ke ruang-ruang tertutup, meningkatkan risiko gangguan pernapasan, penurunan kenyamanan hidup, dan dalam kondisi tertentu memfasilitasi penyebaran penyakit. Secara regulatif, Indonesia telah memiliki PP RI No. 41/1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara sebagai kerangka hukum untuk mencegah dan mengendalikan emisi dari berbagai sumber. Namun implementasi di lapangan masih belum merata; sejumlah kawasan industri dilaporkan belum sepenuhnya menerapkan praktik pengelolaan kualitas udara yang konsisten dengan ketentuan tersebut. Kondisi ini menegaskan perlunya pemantauan kualitas udara yang lebih luas, berkelanjutan, dan berbasis data guna mendukung penegakan regulasi dan perlindungan kesehatan masyarakat [1].

Lingkungan industri kerap didominasi oleh emisi karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), serta kelompok senyawa organik volatil (VOC). Karbon monoksida—gas tanpa warna dan bau yang muncul saat pembakaran tidak selesai sempurna—mudah menggantikan oksigen pada hemoglobin dan membentuk karboksihemoglobin (COHb). Ketika hal ini terjadi, kapasitas distribusi oksigen ke jaringan turun tajam dan dapat berujung pada hipoksia, gangguan kardiovaskular, hingga dampak neurologis. Temuan toksikologi terbaru memperkuat pentingnya mekanisme ikatan COHb sebagai target intervensi medik dalam kasus paparan akut CO [2].

Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) umumnya tidak dikategorikan sebagai gas toksik pada konsentrasi latar, tetapi akumulasinya di ruang tertutup—terutama ketika melewati kisaran 1000 ppm—menjadi indikator ventilasi yang tidak memadai. Kondisi ini dikaitkan dengan turunnya performa kognitif, menurunnya kenyamanan, dan kecenderungan terperangkapnya polutan lain dalam udara dalam ruang [3].

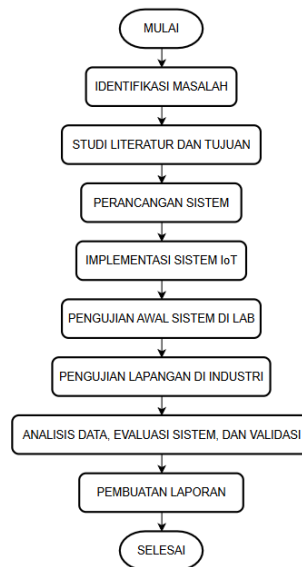
Sumber VOC meliputi cat, pelarut industri, material finishing, furnitur baru, dan aktivitas renovasi. Paparan VOC berkepanjangan diduga berperan dalam mengaktifkan respons imun lokal yang berkorelasi dengan inflamasi saluran napas. Sintesis bukti lintas studi (meta-analisis) memperlihatkan keterkaitan bermakna antara paparan VOC dan peningkatan risiko penyakit paru, asma, gejala mengi, serta iritasi tenggorokan. Karena banyak material terus melepaskan VOC secara bertahap (off-gassing) berbulan hingga bertahun, strategi mitigasi perlu menggabungkan ventilasi memadai, filtrasi berbasis



sorben (misalnya karbon aktif), dan pembatasan sumber emisi pada tingkat material/bahan bangunan [4].

Sebagai jawaban atas tantangan tersebut, penelitian ini bertujuan membuat sistem pemantau kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor lingkungan. Sistem ini mampu mendeteksi kadar CO dengan sensor MQ7, CO<sub>2</sub> dan VOC menggunakan sensor BME680, serta partikel udara PM1.0, PM2.5, dan PM10 dengan sensor ZH03B. Hasil pengukuran akan ditampilkan di layar LCD I2C, dikirim langsung ke platform ThingSpeak, dan disimpan secara rutin ke dalam kartu SD untuk dicatat. Ketika kualitas udara tercemar melebihi batas yang aman, sistem akan otomatis membiarkan bunyi dari buzzer dan mengirimkan pesan notifikasi ke telepon pengguna melalui Telegram sebagai peringatan. Dengan sistem ini, diharapkan monitoring kualitas udara di daerah industri dapat dilakukan secara efisien, murah, dan tepat waktu, serta membantu mencegah efek buruk terhadap kesehatan akibat paparan polutan udara.

## METODE



Gambar 1. Flowchart Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui serangkaian langkah sistematis yang digambarkan pada Gambar 1. Tahapan dimulai dengan perumusan masalah dan penelusuran literatur sebagai dasar dalam menetapkan arah penelitian. Selanjutnya, dilakukan proses perancangan perangkat yang mengintegrasikan ESP32 dengan sensor pemantau kualitas udara. Sistem hasil rancangan tersebut kemudian melalui tahap verifikasi awal di



lingkungan laboratorium untuk memastikan setiap komponen berfungsi sesuai rancangan. Setelah itu, sistem diuji dalam kondisi nyata di lokasi industri (PT) guna memperoleh data lapangan yang relevan. Hasil pengukuran kemudian dianalisis dan divalidasi sebagai dasar penilaian terhadap efektivitas sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT.

### **Persiapan Alat dan Bahan**

Penelitian dimulai dengan persiapan komponen utama dan elemen pendukung untuk merancang sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT). Pusat pengendali dalam sistem menggunakan mikrokontroler ESP32, yang berfungsi membaca data dari sensor, memproses informasi tersebut, serta mengatur komunikasi nirkabel melalui koneksi Wi-Fi. ESP32 dipilih karena mampu melakukan beberapa tugas sekaligus, didukung oleh berbagai antarmuka komunikasi seperti UART, I<sup>2</sup>C, dan SPI, serta memiliki kemampuan yang andal untuk terhubung ke platform cloud dan mengirimkan data secara real-time ke layanan IoT seperti ThingSpeak. Karakteristik tersebut didukung oleh hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa ESP32 sangat efisien dalam penerapan sistem pemantauan IoT, termasuk integrasi dengan layanan berbasis cloud dan opsi penyimpanan data lokal [5].

Dalam rancangan ini digunakan tiga jenis sensor, yaitu MQ7, BME680, serta ZH03B. Sensor MQ7 bertugas mendeteksi adanya karbon monoksida (CO), gas beracun yang dihasilkan dari pembakaran yang tidak sempurna dan sering ditemukan di lingkungan kerja industri. Sensor BME680 digunakan untuk mengukur kadar karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), senyawa organik volatil (VOC), serta kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembapan. Sensor ini memiliki kemampuan mengukur gas secara akurat dan sudah dilengkapi dengan kalibrasi dari pabrik, sehingga memudahkan pemasangan pada perangkat pemantau portabel. Sensor ZH03B berperan mendeteksi kadar partikel partikulat (PM1.0, PM2.5, dan PM10) di udara. Kombinasi dari ketiga sensor ini memungkinkan pengesanan berbagai jenis polutan secara bersamaan dalam satu perangkat, sesuai dengan berbagai penelitian yang menunjukkan bahwa cara ini efektif dalam memantau kualitas udara, baik di area kecil maupun lingkungan industri [6][7].

Sistem ini menggunakan modul LCD I2C 20×4 sebagai antarmuka lokal untuk menampilkan langsung hasil pembacaan sensor di perangkat. Dengan bantuan modul RTC DS3231, sistem mampu menambahkan informasi waktu secara tepat pada setiap pengukuran. Data yang dikumpulkan secara berkala disimpan ke kartu SD setiap sekitar 10 menit. Sebagai bentuk pencegahan, buzzer akan mengeluarkan alarm jika nilai kualitas udara melebihi batas kategori “tidak sehat” atau “berbahaya”. Fungsi IoT dibangun



dengan menggunakan fitur Wi-Fi internal pada ESP32 yang secara otomatis mengirimkan data ke platform ThingSpeak. Selain itu, bot Telegram digunakan untuk mengirimkan peringatan ke pengguna secara jarak jauh jika kadar polutan melampaui ambang batas. Pendekatan yang digunakan terdiri dari tampilan langsung, penyimpanan data terjadwal, pengumpulan data melalui cloud, dan pemberitahuan instan. Pendekatan ini sebelumnya sudah diterapkan pada sistem pemantauan kualitas udara di ruang bayi dan kampus, laporan menunjukkan bahwa cara ini meningkatkan kesiapsiagaan karena data real-time dan alarm yang cepat membantu mendeteksi lonjakan polutan secara lebih awal [6][8][9].

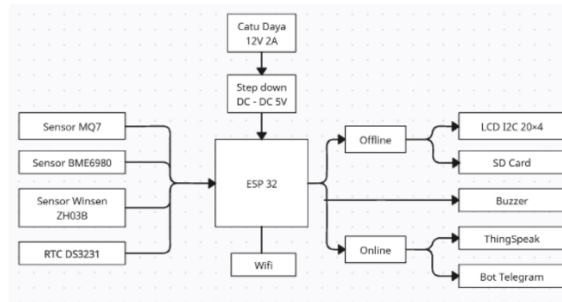
### Perancangan Sistem

Sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) ini dirancang dalam tiga komponen utama: input, pemrosesan, dan output. Bagian input melibatkan tiga sensor utama, yaitu MQ7 untuk mendeteksi konsentrasi karbon monoksida (CO), BME680 untuk mengestimasi kadar karbon dioksida ( $e\text{CO}_2$ ) serta memantau senyawa organik volatil (VOC), suhu, kelembapan, dan indeks kualitas udara (IAQ), serta ZH03B yang digunakan untuk mendeteksi partikel debu pada kategori PM1.0, PM2.5, dan PM10. Untuk memastikan pencatatan waktu yang presisi, sistem dilengkapi dengan modul RTC DS3231, sementara LCD I2C 20×4 menampilkan hasil pengukuran dan status sistem secara langsung [10][11].

Proses pengolahan data dilakukan oleh mikrokontroler ESP32 yang bertugas membaca sinyal dari sensor, mengklasifikasikan kualitas udara berdasarkan ambang batas tertentu, serta mengaktifkan alarm bila konsentrasi polutan melebihi batas aman. Sumber daya listrik berasal dari adaptor DC 12V 2A yang diubah menggunakan modul step-down agar tegangan operasi tetap stabil pada  $\pm 5$  V. ESP32 menggunakan fitur Wi-Fi bawaannya untuk mengirimkan data ke platform cloud ThingSpeak secara hampir real-time, dan juga mengirimkan peringatan melalui bot Telegram jika kualitas udara berada dalam kategori berbahaya. Selain itu, data hasil pengukuran disimpan ke dalam kartu SD secara berkala untuk digunakan dalam analisis historis [1].

Bagian hasil mencakup tampilan data di layar LCD, suara alarm melalui buzzer ketika kadar polutan melebihi batas yang ditentukan, serta pengiriman pemberitahuan otomatis ke aplikasi Telegram. Kombinasi antara ESP32, layanan cloud ThingSpeak, dan sistem pemberitahuan jarak jauh membantu meningkatkan keakuratan pemantauan dan mempercepat respons terhadap kondisi darurat [6]. Gambar 2 menunjukkan diagram blok yang menjelaskan hubungan antar komponen dalam sistem.



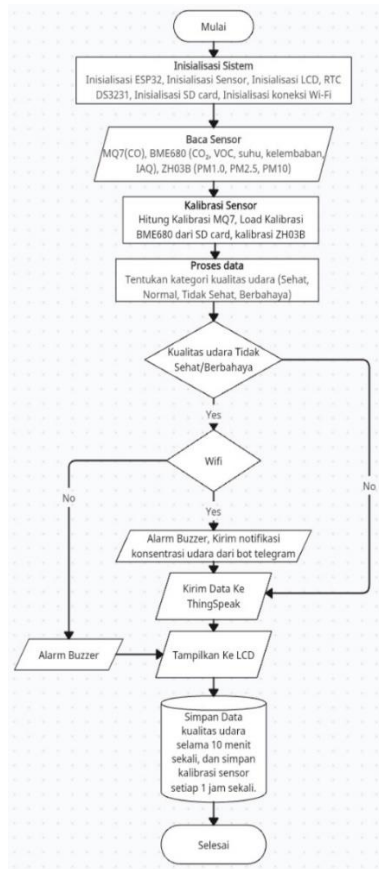


Gambar 2. Blok Diagram Sistem

### Rancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang mendasari sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) dirancang untuk melakukan akuisisi terkoordinasi dari beberapa sensor, memproses data secara terstruktur, dan mengirimkan peringatan secara segera ketika kondisi ambang terlampaui. Alur kerjanya diringkas pada flowchart Gambar 3, yang memperlihatkan rangkaian tahapan mulai dari inisialisasi perangkat hingga transmisi data dan penanganan kondisi kesalahan. Setelah sistem diberi daya, ESP32 menjalankan prosedur inisialisasi yang mencakup konfigurasi sensor MQ7, BME680, dan ZH03B, aktivasi modul pendukung (RTC DS3231, LCD I2C 20×4, antarmuka SD card), serta upaya penyambungan ke jaringan Wi-Fi. Ketika semua komponen berhasil disiapkan, perangkat masuk ke fase akuisisi, di mana ESP32 membaca nilai dari masing-masing kanal sensor: MQ7 untuk karbon monoksida (CO); BME680 untuk estimasi ekuivalen CO<sub>2</sub> (eCO<sub>2</sub>), total VOC, suhu, kelembapan, dan indeks kualitas udara (IAQ); serta ZH03B untuk konsentrasi partikulat dalam rentang PM1.0, PM2.5, dan PM10.





Gambar 3. Flowchart System

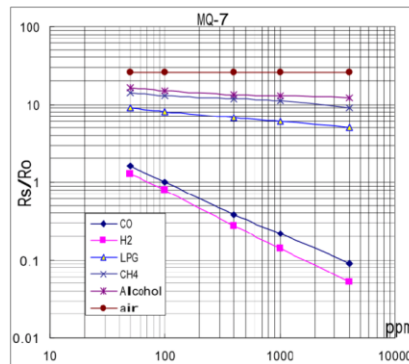
Proses membaca data dari sensor dilakukan secara berkala. Nilai sensor MQ7 dibaca melalui pin analog ESP32, sedangkan BME680 dan ZH03B diakses melalui antarmuka I<sup>2</sup>C dan UART. Untuk sensor MQ7, konsentrasi gas karbon monoksida (CO) dihitung dengan cara kalibrasi berdasarkan grafik dari datasheet. Grafik datasheet MQ7 menunjukkan hubungan antara rasio RS/Ro dengan konsentrasi CO dalam bentuk skala logaritma. Ketika digambarkan dalam grafik log-log, hubungan tersebut membentuk kurva yang hampir lurus. Parameter Ro adalah nilai resistansi sensor saat udara bersih (sekitar 100 ppm), sedangkan RS adalah nilai resistansi saat sedang mengukur.

```

float RL = 1000.0;
float Ro = 2200.0;
int sensorValue = analogRead(MQ7_PIN);
float vrl = sensorValue * 3.3 / 4096.0;
float rs = (3.3 * RL / vrl) - RL;
ppm = 100 * pow(rs / Ro, -1.53);
  
```

Gambar 4. Program Kalibrasi MQ7





Gambar 5. Grafik Kurva Sensor MQ7

Dari grafik Gambar 4 tersebut, dibuat persamaan model berdasarkan hukum pangkat seperti persamaan 1:

$$ppm = a \times \left(\frac{Rs}{Ro}\right)^b \quad (1)$$

Dengan konstanta  $a = 100$  dan eksponen  $b = -1,53$ , hasil regresi dari dua titik pada grafik datasheet untuk CO. Dalam implementasi program, nilai RS dihitung dari tegangan keluaran sensor (VRL) dengan rumus persamaan 2:

$$RS = \left(\frac{Vc \times RL}{VRL}\right) - RL \quad (2)$$

Dengan  $Vc$  adalah tegangan referensi (3,3 V),  $RL$  adalah resistor beban (1 k $\Omega$ ), dan  $VRL$  dihitung dari pembacaan ADC pada ESP32 menggunakan persamaan 3:

$$VRL = \frac{ADC \text{ Value} \times 3,3}{4095} \quad (3)$$

Tahapan ini diimplementasikan dalam kode program dengan variabel  $RL = 1000.0$ ,  $Ro = 2200.0$ , dan eksponen  $-1,53$  sesuai hasil kalibrasi grafik. Potongan logika utama perhitungan ppm dituliskan dalam persamaan 4:

$$ppm = 100 \times pow\left(\frac{Rs}{Ro}, -1,53\right) \quad (4)$$

Persamaan ini diadopsi dari metode kalibrasi sensor berbasis kurva datasheet, sebagaimana direkomendasikan dalam penelitian untuk meningkatkan akurasi pembacaan CO pada sensor tipe MQ di aplikasi IoT [6].

Setelah proses awal selesai, sistem memasuki siklus pengambilan data secara teratur. Di sini, ESP32 membaca nilai dari sensor lingkungan BME680, termasuk estimasi ekuivalen  $CO_2$  ( $eCO_2$ ), total VOC, suhu, kelembapan, serta indeks kualitas udara. Selain itu, data mengenai partikel dari ZH03B (PM1. 0/2. 5/10) juga dikumpulkan. Setiap data yang



diukur diberi tanggal dan waktu oleh RTC DS3231 sebelum diproses lebih lanjut. Program kemudian mengklasifikasikan nilai polutan ke dalam kategori kualitas udara, seperti Baik, Normal, Tidak Sehat, atau Berbahaya, berdasarkan ambang batas kesehatan yang telah disetel (dapat berdasarkan panduan WHO atau standar nasional). Jika hasil klasifikasi menunjukkan status Tidak Sehat atau Berbahaya, maka peringatan lokal diaktifkan melalui buzzer. Jika ada koneksi jaringan, pesan yang berisi parameter yang melebihi batas akan dikirimkan jarak jauh melalui Bot Telegram. Secara berkala, data juga diunggah ke ThingSpeak untuk pemantauan melalui cloud, ditampilkan di layar LCD, dan disimpan ke kartu SD setiap sekitar 10 menit untuk analisis data historis. Alur yang terintegrasi—termasuk pengambilan data multi-sensor, pemrosesan berbasis kalibrasi, dan notifikasi real-time—sesuai dengan pendekatan pemantauan kualitas udara berbasis ESP32 yang menekankan pentingnya kalibrasi terhadap spesifikasi sensor serta penggunaan beberapa parameter untuk meningkatkan keandalan sistem IoT [6][7]

```
//telegram
// Notifikasi Telegram hanya jika status Tdk Sht atau Bahaya
if ((status == "Bahaya" || status == "Tdk Sht") && now - lastTelegramSend > telegramInterval && wifiConnected) {
  String msg = "AD Kualitas Udara " + status + "\n\n";
  msg += getPenyebabKualitasBuruk(ppm, pm25, pm10, lagSensor.co2Equivalent, lagSensor.breathVocEquivalent, lagSensor.iaq);
  msg += "\n\nDetail:\n\n";
  msg += "• CO (MQ7): " + String(ppm, 1) + " ppm\n";
  msg += "• PM2.5: " + String(pm25) + " ug/m³\n";
  msg += "• PM2.5: " + String(pm25) + " ug/m³\n";
  msg += "• PM10: " + String(pm10) + " ug/m³\n";
  msg += "• CO2: " + String(lagSensor.co2Equivalent, 0) + " ppm\n";
  msg += "• VOC: " + String(lagSensor.breathVocEquivalent, 1) + " ppb\n";
  msg += "• IAQ: " + String(lagSensor.iaq, 1) + "\n";
  msg += "• Suhu: " + String(lagSensor.temperature, 1) + " °C\n";
  msg += "• Kelembapan: " + String(lagSensor.humidity, 1) + " %";

  bot.sendMessage(chat_id, msg);
  lastTelegramSend = now;
}
```

Gambar 6. Program Notifikasi Telegram

```
//ThingSpeak
if (wifiConnected && now - lastThingSpeakSend == thingSpeakInterval) {
  lastThingSpeakSend = now;
  ThingSpeak.setField(1, ppm);
  ThingSpeak.setField(2, lagSensor.co2Equivalent);
  ThingSpeak.setField(3, pm1);
  ThingSpeak.setField(4, pm25);
  ThingSpeak.setField(5, pm10);
  ThingSpeak.setField(6, lagSensor.breathVocEquivalent);
  ThingSpeak.setField(7, lagSensor.iaq);
  ThingSpeak.setField(8, lagSensor.temperature);
  ThingSpeak.writeFields(channelID, apiKey);
}
```

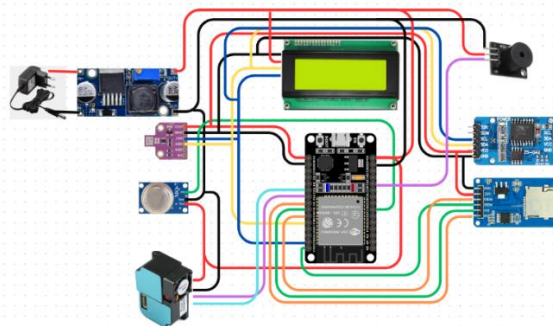
Gambar 7. Program Kirim data ke ThinkSpeak

### Rancangan Elektrikal

Perancangan elektronika pada sistem ini dilakukan dalam dua tahap utama, yaitu pembuatan skema koneksi dan pengembangan papan rangkaian cetak (PCB). Tahap pertama adalah menyusun diagram kabel untuk menentukan cara sinyal bergerak antarperangkat, yang ditampilkan menggunakan perangkat lunak desain agar mudah dianalisis dan diintegrasikan. Komponen utama terdiri dari mikrokontroler ESP32 sebagai pengontrol utama, sensor MQ7 untuk mengukur kadar karbon monoksida (CO), BME680 untuk menghitung estimasi konsentrasi karbon dioksida (eCO<sub>2</sub>), uap volatil organik (VOC), suhu, kelembapan, serta indeks kualitas udara (IAQ), dan ZH03B untuk mengukur kadar partikel (PM1.0, PM2.5, PM10). Modul tambahan meliputi RTC DS3231 sebagai pengatur waktu, LCD I2C 20×4 sebagai layar tampilan, modul kartu SD untuk



menyimpan data secara lokal, serta buzzer sebagai peringatan suara. Komunikasi antarperangkat dilakukan dengan protokol standar: antarmuka I<sup>2</sup>C untuk BME680, RTC, dan LCD melalui kaki SDA (GPIO 21) dan SCL (GPIO 22); komunikasi serial UART untuk ZH03B melalui kaki GPIO 16 dan GPIO 17; serta pembacaan sinyal analog dari sensor MQ7 melalui pin ADC (GPIO 33). Buzzer dihubungkan melalui output digital (GPIO 14), sedangkan modul SD Card terhubung ke jalur SPI melalui pin GPIO 5 sebagai Chip Select (CS). Sumber daya 5 Volt dibuat stabil dengan pengaturan suplai, dan jalur analog MQ7 dirancang agar minim gangguan (noise). Gambar 8 menampilkan representasi lengkap dari koneksi antarperangkat.



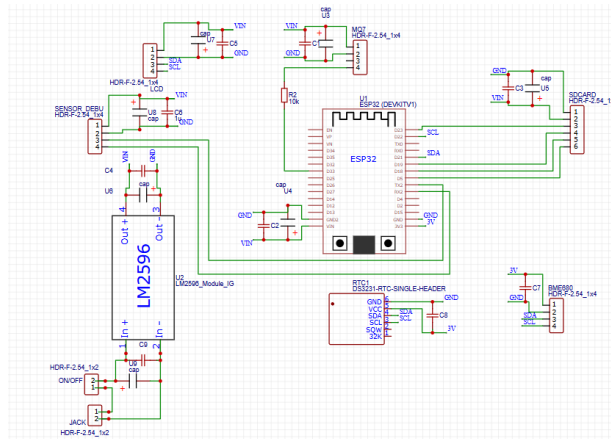
Gambar 8. *Wiring Diagram System*

Tahap kedua berupa pembuatan papan sirkuit cetak (PCB) yang dirancang menggunakan platform EasyEDA dengan konfigurasi satu lapisan untuk memudahkan proses pembuatan fisik. Desain PCB dirancang dengan lapisan ground plane menyeluruh yang berfungsi mengurangi interferensi elektromagnetik sekaligus menjaga kestabilan tegangan referensi pada seluruh rangkaian. Ukuran jalur distribusi daya diperbesar untuk menurunkan resistansi, sementara jalur sinyal diatur agar tetap pendek agar mengurangi potensi terjadinya crosstalk. Untuk menjaga kualitas suplai daya dan mengurangi fluktuasi tegangan, setiap modul dilengkapi dengan kapasitor elektrolit 470  $\mu$ F/16 V dan kapasitor keramik 100 nF yang ditempatkan secara paralel dekat pin suplai. Konfigurasi ini berfungsi sebagai jaringan decoupling guna meredam ripple, meningkatkan kualitas sensor analog seperti MQ7, serta menjaga keandalan keseluruhan sistem. Pemosisian header koneksi diatur sesuai dengan pemetaan pin yang digunakan oleh mikrokontroler, antara lain GPIO 21 dan 22 untuk jalur I<sup>2</sup>C (SDA dan SCL), GPIO 16 dan 17 untuk komunikasi UART, GPIO 33 untuk membaca data MQ7, GPIO 14 untuk mengaktifkan buzzer, serta GPIO 5 sebagai sinyal Chip Select (CS) untuk modul SD Card.

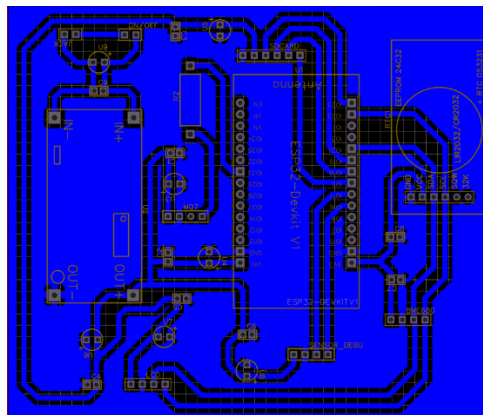
Tata letak akhir dapat dilihat pada Gambar 9, yang menunjukkan jalur koneksi, distribusi ground plane, serta posisi kapasitor pendukung di setiap komponen. Pendekatan ini sesuai dengan prinsip desain PCB pada sistem IoT modern yang menekankan



penggunaan kapasitor decoupling dan ground plane untuk mengurangi interferensi dan menjaga stabilitas sumber daya [6][7].



9a. Schematic PCB



9b. Board PCB

Gambar 9. Desain papan PCB

### Rancangan Mekanikal

Perancangan mekanik difokuskan pada proteksi komponen elektronik, kemudahan pemeliharaan, dan kestabilan pembacaan sensor. Perancangan menggunakan platform canva yang ditunjukkan pada gambar 10. Tata letak dikembangkan dengan memperhitungkan posisi modul di dalam dan di luar enclosure agar ventilasi udara tidak terhambat—penting karena sejumlah sensor memerlukan paparan langsung terhadap udara lingkungan. Enclosure yang digunakan adalah kotak plastik tipe X6 (hitam) berukuran cukup untuk menampung papan rangkaian beserta modul pendukung; permukaan kotak dibor dan dipotong untuk membuka port pemasangan. Layar LCD I2C 20×4 dipasang di panel depan sebagai antarmuka pengguna. Seluruh sensor eksternal ditempatkan di luar ruang panas internal: MQ7 dan BME680 pada sisi kiri, ZH03B

pada



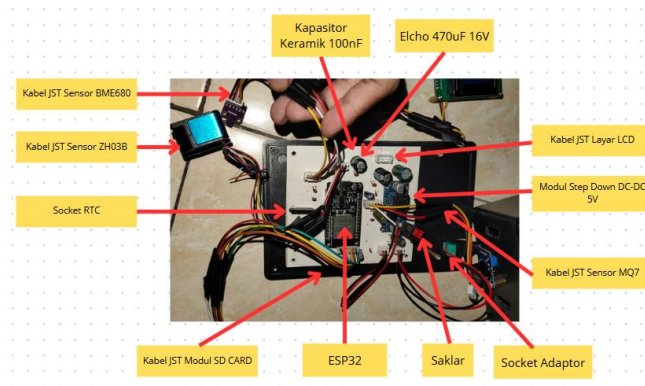
sisi kanan. Bagian atas disediakan bukaan untuk slot kartu SD dan saklar daya, serta jalur JST yang memungkinkan lepas-pasang sensor tanpa membuka seluruh kotak. Di bagian dalam, PCB satu lapis menahan ESP32, regulator step-down, dan konektor pemipaan sinyal. Jalur udara internal direncanakan untuk menghindari penumpukan panas yang dapat mendistorsi respon sensor gas. Konfigurasi ini menyeimbangkan perlindungan mekanis, servisabilitas, dan akurasi metrologi; pendekatan semacam ini disorot dalam praktik desain perangkat IoT ergonomis dan modular [7][6].



Gambar 10. Desain 3D Alat

## HASIL

*Hardware* sistem ini menggunakan box plastik sebagai kerangka utama dengan ukuran X6 : 10,5cm x 17,5cm x 5,8cm dan berat 500 gram. Berikut bentuk fisik dari rancangan ini ditunjukkan pada gambar 11.



Gambar 11. Fisik Rangkaian Elektronik





12a. Tampak depan



12b. Tampak Kiri



12c. Tampak Kanan



12d. Tampak Atas

Gambar 12. Tampilan Fisik Alat

Pada Gambar 12a, panel depan menampilkan LCD 20×4 sebagai antarmuka lokal untuk memantau parameter utama (CO, CO<sub>2</sub> estimasi, VOC, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>, IAQ, dan status kualitas udara). Sensor MQ7 dan BME680 ditempatkan pada sisi kiri luar boks (Gambar 12b) agar aliran udara tidak teredam oleh pemanasan internal komponen elektronika. Sensor Winsen ZH03B diletakkan pada sisi kanan luar (Gambar 12c), dengan posisi yang memungkinkan ventilasi bebas untuk sampel udara partikulat. Bagian atas boks (Gambar 12d) memuat slot SD card untuk pelepasan cepat data historis dan tombol ON/OFF utama. Interior perangkat (Gambar 11) menunjukkan PCB satu layer dengan ground plane penuh, berisi modul ESP32, regulator step-down DC-DC, header koneksi JST untuk sensor eksternal, serta rangkaian buzzer. Penempatan komponen mengikuti pemetaan pin dan topologi rangkaian yang dijelaskan pada Bab Perancangan Elektronika.



Gambar 13. Tampilan Awal LCD

LCD digunakan sebagai antarmuka untuk inspeksi cepat di lapangan. Baris pertama menampilkan nilai gas karbon monoksida (CO) dari sensor MQ7 serta kategori kualitas udara (“Sehat”, “Normal”, “Tidak Sehat”, “Bahaya”) yang ditentukan berdasarkan fungsi klasifikasi berbasis ambang di dalam perangkat lunak. Baris kedua menunjukkan nilai



sensor debu ZH03B untuk partikulat PM1. 0, PM2. 0, dan PM10. Baris ketiga menampilkan nilai CO2, VOC, IAQ, suhu, kelembapan, serta tingkat akurasi dari sensor BME680. Contoh layar pembuka (startup) sistem pada modul LCD dapat dilihat pada Gambar 13.

### Pengujian RTC dan Modul SD Card

Tabel 1. Pengujian RTC dan Modul SD card

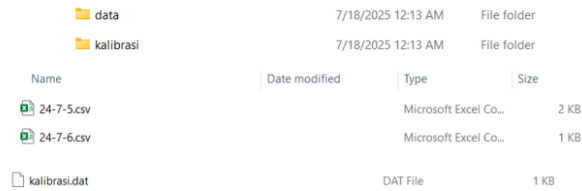
No	Waktu RTC	Waktu SD	Status Penyimpanan	Selisih (Detik)
1.	08.00	08.00	Berhasil	0
2.	08.10	08.10	Berhasil	0
3.	08.20	08.21	Berhasil	1
4.	08.30	08.30	Berhasil	0
5.	08.40	08.42	Berhasil	2
6.	08.50	08.50	Berhasil	0
7.	09.00	09.01	Berhasil	1
8.	09.10	09.10	Berhasil	0
9.	09.20	09.21	Berhasil	1
10.	09.30	09.30	Berhasil	0
Rata - rata				5

Uji coba dilakukan untuk mengecek akurasi waktu dari modul RTC DS3231 serta memastikan modul SD card bisa merekam data sensor secara teratur. Modul RTC berfungsi memberi tanda waktu tepat pada setiap hasil pengukuran, sedangkan modul SD card menyimpan data dalam bentuk file CSV dengan jeda setiap 10 menit. Uji coba dilakukan selama satu jam, sehingga terdapat enam kali perekaman data sesuai jadwal yang ditentukan.

Hasil uji coba disajikan pada Tabel 1, yang menunjukkan waktu dari RTC dan data yang disimpan di SD card sama persis tanpa ada perbedaan signifikan (0,5 detik). Semua proses penyimpanan data berjalan lancar tanpa ada gangguan atau kegagalan.

Temuan ini menegaskan bahwa integrasi antara modul RTC dan kartu SD berfungsi dengan baik. Konsistensi waktu antara RTC dan waktu pembuatan file menjadi faktor kunci dalam menjaga keandalan data pengukuran, khususnya saat data tersebut digunakan untuk korelasi dengan hasil pengamatan lain pada waktu atau lokasi berbeda. Selain itu, stabilitas dan ketepatan RTC DS3231 terhadap time drift memiliki peran penting dalam memastikan akurasi data jangka panjang.





Gambar 14. Folder SD Card

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	Timestamp	CO(ppm)	PM1	PM2.5	PM10	temperature(°C)	Humidity(%)	CO2(ppm)	VOC(ppb)	IAQ	IAQ_Accuracy	Pressure(hPa)
2	24-7-5 2:1:8	0.3	17	22	24	27.7	72.5	487	0.3	24.1	2	1001.9
3	24-7-5 2:11:8	0.4	17	22	24	27.6	72.7	604	0.5	50.8	3	1001.9
4	24-7-5 2:21:8	0.2	28	35	39	27.6	72.9	613	0.5	52.5	3	1001.9
5	24-7-5 2:31:8	0.2	40	50	56	27.6	72.9	631	0.6	56.1	3	1001.8
6	24-7-5 2:41:8	0.2	43	53	60	27.6	73.9	658	0.7	61.2	0	1001.7
7	24-7-5 2:51:8	0.4	40	49	55	27.4	73.4	634	0.6	56.7	3	1001.6
8	24-7-5 3:1:8	0.4	135	166	188	27.7	72.9	1145	2.2	100.3	0	1001.7
9	24-7-5 3:11:8	0.3	133	163	184	27.7	72.9	1239	2.7	107.9	3	1001.7
10	24-7-5 4:49:38	0.2	75	93	105	27.2	74.3	734	0.8	68.2	0	1002.3
11	24-7-5 4:59:38	0.2	59	73	82	27.2	74.3	661	0.7	62	3	1002.3
12	24-7-5 5:16:8	1.7	87	107	121	27.3	73.7	638	0.6	57.4	0	1002.4
13	24-7-5 5:26:36	0.3	199	244	276	27.2	74.2	636	0.6	56.9	0	1002.6
14	24-7-5 5:39:14	0.2	46	57	64	27	74.7	911	1.3	82	3	1002.7
15	24-7-5 5:49:14	0.2	26	32	36	27	75	739	0.9	68.8	3	1002.7
16	24-7-5 20:18:31	0.3	113	139	157	30.2	71.1	634	0.6	56.7	0	998.9
17	24-7-5 20:28:31	0.3	70	86	97	30.3	72.2	634	0.6	56.7	0	999.1
18	24-7-5 20:38:31	0.3	60	74	83	30.2	72.8	634	0.6	56.7	0	999.2
19	24-7-5 20:48:32	0.3	64	79	89	30.1	73.2	634	0.6	56.7	0	999.4
20	24-7-5 20:58:32	0.3	49	60	68	30	72.9	662	0.7	62.2	3	999.3
21	24-7-5 21:8:33	0.3	53	65	73	29.8	73.5	820	1	75.2	3	999.4

Gambar 15. File Penyimpanan Data Sensor

Sistem ini dilengkapi dengan modul SD Card yang berfungsi untuk menyimpan data pengukuran secara lokal dalam format Comma Separated Values (CSV) yang ditunjukkan gambar 14. Mekanisme penyimpanan dirancang agar setiap hari secara otomatis membuat file baru dengan nama sesuai tanggal pengambilan data, sehingga memudahkan proses pengelolaan dan analisis riwayat pengukuran. Parameter yang direkam meliputi CO, PM1.0, PM2.5, PM10, CO<sub>2</sub>, VOC, IAQ, suhu, dan kelembapan, dengan interval pencatatan setiap 10 menit untuk menjaga efisiensi penyimpanan sekaligus mencakup variasi kondisi udara seperti yang ditunjukkan gambar 15. Selain pencatatan data, sistem juga mengatur proses kalibrasi sensor BME680 berdasarkan nilai akurasi yang diberikan oleh algoritma BSEC. Ketika akurasi mencapai level tertinggi (accuracy = 3), data kalibrasi disimpan ke SD Card guna mempertahankan kestabilan hasil pengukuran. Proses penyimpanan ini dilakukan secara periodik setiap 1 jam, dan data kalibrasi akan dimuat kembali saat perangkat diaktifkan. Dengan pendekatan ini, sensor dapat memberikan hasil pengukuran yang stabil dan akurat tanpa memerlukan proses adaptasi ulang.

### Pengujian Sensitivitas Sensor

Pengujian sensor dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam merespons variasi kualitas udara pada kondisi terkontrol. Tiga skenario pengujian diterapkan, yaitu: (1) kondisi udara normal tanpa adanya pemicu, (2) pemberian gas dari korek api untuk memicu kenaikan konsentrasi gas seperti CO, CO<sub>2</sub>, VOC, dan memengaruhi indeks kualitas udara (IAQ), (3) menghidupkan api untuk memicu parameter suhu dan



kelembaban, serta (4) pemaparan asap rokok yang ditujukan untuk meningkatkan jumlah partikel polutan (PM1.0, PM2.5, PM10) sekaligus menambah kandungan VOC.

Tabel 2. Pengujian Sensitivitas Sensor

No.	Sensor	Parameter	Tanpa Pemicu	Gas Korek Api	Api	Asap Rokok
1.	MQ7	CO (ppm)	1	65	70	10
2.		CO <sub>2</sub> (ppm)	420	980	1200	720
3.		VOC (ppb)	70	650	900	500
4.	BME680	IAQ	30	160	190	120
5.		Suhu (°C)	27	28	30	27
6.		Kelembaban (%)	65	60	58	66
7.		PM1.0 (µg/m <sup>3</sup> )	10	12	15	80
8.	ZH03B	PM2.0 (µg/m <sup>3</sup> )	15	18	22	95
9.		PM10 (µg/m <sup>3</sup> )	28	32	36	180

Pengujian dilaksanakan pada empat kondisi berbeda, yaitu udara normal tanpa pemicu, paparan gas dari korek api, keberadaan api terbuka, serta paparan asap rokok. Berdasarkan table 2 hasil pengamatan, sensor MQ7 menunjukkan respons signifikan terhadap gas korek api dan api terbuka, di mana konsentrasi CO meningkat dari 8 ppm menjadi 90 ppm. Sensor BME680 juga memperlihatkan kenaikan tajam pada parameter CO<sub>2</sub> dan VOC, terutama saat terjadi pemicu api terbuka dengan nilai CO<sub>2</sub> mencapai 1200 ppm dan VOC 900 ppb, yang berkontribusi pada peningkatan nilai IAQ hingga 190. Di sisi lain, sensor ZH03B yang berfungsi mendeteksi partikel udara memberikan lonjakan tertinggi saat pengujian dengan asap rokok, yaitu PM2.5 mencapai 95 µg/m<sup>3</sup> dan PM10 sebesar 180 µg/m<sup>3</sup>, sedangkan pada pemicu berbasis gas tidak terjadi perubahan signifikan pada nilai PM. Peningkatan suhu juga tercatat ketika api terbuka akibat efek panas, sementara kelembapan relatif tetap stabil. Temuan ini mengindikasikan bahwa sistem mampu mengenali perubahan kualitas udara akibat polutan gas maupun partikulat secara *real-time* [6][7].

### Pengujian Alarm Kualitas Udara

Pengujian ini dilakukan untuk menilai efektivitas alarm buzzer dan fitur notifikasi Telegram dalam memberikan peringatan saat kualitas udara masuk kategori Tidak Sehat maupun Bahaya. Proses uji dilakukan di dua lokasi berbeda, yakni Taman Balekambang



yang merepresentasikan lingkungan dengan udara relatif bersih, serta Jalan Slamet Riyadi yang memiliki tingkat polusi tinggi akibat kepadatan lalu lintas. Pengujian dilaksanakan pada tiga rentang waktu, yaitu pagi, siang, dan malam, untuk mendapatkan variasi kondisi udara.

Tabel 3. Pengujian Alarm Kualitas Udara

No.	Lokasi	Waktu	Status Udara	CO/PM2.5/ PM10/CO2/ VOC/IAQ	Penyebab	Buzzer	Telegram	Waktu Respon (Detik)
1.	Taman	Pagi	Sehat	7/12/25/420 /70/25	-	-	-	-
		Siang	Norma 1	18/32/45/68 0/180/60	CO buruk	-	-	-
		Malam	Sehat	9/14/30/500 /90/28	-	-	-	-
2.	Jalan Raya	Pagi	Tdk Sehat	38/58/95/11 80/450/110	PM2.5 buruk; IAQ buruk CO tinggi;	Aktif	Aktif	10
		Siang	Bahaya	58/112/188/ 2020/1200/210	PM2.5 tinggi; IAQ sangat buruk PM2.5 buruk;	Aktif	Aktif	5
		Malam	Tdk Sehat	42/68/102/1 350/520/150	IAQ buruk	Aktif	Aktif	7
Rata-rata waktu respon Alarm								7,3

Hasil pengujian yang dirangkum pada Tabel 3 menunjukkan bahwa di Taman Balekambang, kualitas udara cenderung berada pada kategori Sehat hingga Normal sehingga tidak terjadi pemicu alarm buzzer maupun pengiriman notifikasi melalui Telegram. Sebaliknya, di Jalan Slamet Riyadi, kualitas udara terdeteksi masuk kategori Tidak Sehat pada pagi dan malam, serta mencapai kategori Bahaya pada siang hari, dengan nilai CO sebesar 58 ppm, PM2.5 mencapai 112  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , dan IAQ sebesar 210.



Kondisi ini melampaui ambang batas yang ditetapkan, sehingga memicu aktivasi buzzer serta pengiriman peringatan melalui Telegram kepada pengguna.

### Pengujian Kualitas Udara di Sekitar Kawasan PT. Sari Warna Surakarta

Tabel 4. Pengujian Kualitas Udara di sekitar PT. Sari Warna Surakarta

No	Jarak	Waktu	CO	PM 1.0	PM 2.5	PM 10	CO <sub>2</sub>	VOC	IAQ	Status Udara	Buzzer	Telegram
1.	30 m	Pagi	5	22	30	34	1180	2600	120	Tdk Sehat	Aktif	Aktif
		Siang	65	45	85	140	2300	3500	225	Bahaya	Aktif	Aktif
		Malam	2	28	35	39	1261	2800	139	Tdk Sehat	Aktif	Aktif
2.	100 m	Pagi	3	18	25	29	1050	2000	95	Normal	Tidak	Tidak
		Siang	48	35	65	110	2100	3000	185	Tdk Sehat	Aktif	Aktif
		Malam	2	20	27	32	1100	2150	105	Normal	Tidak	Tidak
3.	500 m	Pagi	2	14	22	26	980	1700	95	Normal	Tidak	Tidak
		Siang	2	15	23	27	990	1750	100	Normal	Tidak	Tidak
		Malam	2	16	24	28	1010	1800	102	Normal	Tidak	Tidak
4.	1000 m	Pagi	1	11	18	22	950	1500	85	Normal	Tidak	Tidak
		Siang	1	12	19	23	960	1550	88	Normal	Tidak	Tidak
		Malam	1	13	20	24	970	1600	90	Normal	Tidak	Tidak

Pengujian lapangan dilakukan di area sekitar industri PT Sari Warna Surakarta dengan pengambilan data pada empat titik jarak berbeda, yaitu 30 m, 100 m, 500 m, dan 1000 m dari sumber emisi. Pengujian juga mencakup tiga rentang waktu pengamatan, yakni pagi, siang, dan malam, untuk mengevaluasi variasi polusi berdasarkan jarak dan waktu.



Parameter yang diukur meliputi konsentrasi CO, partikulat PM1.0, PM2.5, PM10, serta estimasi CO<sub>2</sub>, VOC, dan indeks kualitas udara (IAQ). Selain pengukuran, sistem diuji dalam mendeteksi kategori kualitas udara (Sehat, Normal, Tidak Sehat, Bahaya) serta kemampuannya memicu alarm buzzer dan mengirimkan peringatan melalui Telegram pada kategori Tidak Sehat dan Bahaya.

Hasil pengukuran yang dirangkum dalam Tabel 4 menunjukkan bahwa titik terdekat (30 m) memiliki tingkat polusi tertinggi, khususnya pada siang hari, dengan konsentrasi CO mencapai 65 ppm, PM2.5 sebesar 85 µg/m<sup>3</sup>, dan IAQ mencapai 225, sehingga masuk dalam kategori Bahaya. Kondisi ini memicu aktivasi buzzer dan pengiriman notifikasi melalui Telegram. Pada jarak 100 m, kualitas udara tercatat pada kategori Tidak Sehat dengan nilai PM2.5 sebesar 65 µg/m<sup>3</sup> dan IAQ sebesar 185, yang juga memicu pengiriman peringatan. Sementara itu, pada jarak ≥500 m, kualitas udara cenderung berada pada kategori Normal karena konsentrasi polutan lebih rendah.

Hasil analisis mengindikasikan bahwa variasi jarak memiliki pengaruh signifikan terhadap tingkat kualitas udara. Semakin jauh lokasi pengukuran dari sumber emisi, konsentrasi polutan menunjukkan tren penurunan yang konsisten. Selain jarak, variabel waktu turut memengaruhi variasi konsentrasi polutan.. Pengamatan menunjukkan bahwa periode siang hari cenderung mencatat konsentrasi tertinggi, yang dapat dikaitkan dengan intensitas aktivitas industri pada jam kerja serta kenaikan temperatur lingkungan yang memicu peningkatan laju pelepasan emisi ke udara.

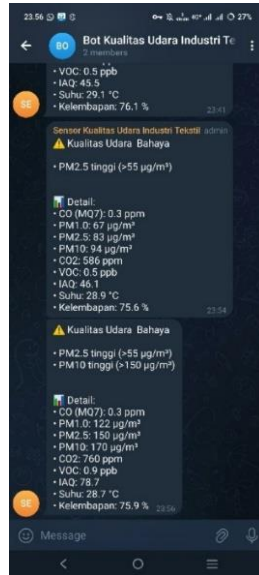
Pengujian validasi dilakukan untuk memastikan keakuratan alat berbasis IoT yang telah dirancang. Proses ini melibatkan perbandingan hasil pengukuran dengan instrumen referensi standar. Pengambilan data dilakukan pada jarak 30 meter dari sumber emisi, dengan pengujian dilaksanakan pada periode malam hari di sekitar area PT Sari Warna. Ringkasan hasil perbandingan ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan hasil dengan alat pembanding

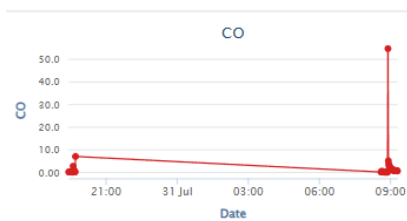
No.	Parameter	Alat IoT (30 m, Malam)	Alat Pembanding	Selisih (%)
1.	CO (ppm)	2	2.1	4,76 %
2.	PM1.0 (µg/m <sup>3</sup> )	28	27	3,70 %
3.	PM2.5 (µg/m <sup>3</sup> )	35	33	6,06 %
4.	PM10 (µg/m <sup>3</sup> )	39	37	5,40 %
5.	CO <sub>2</sub> (ppm)	1261	1300	3,00 %
6.	IAQ	139	140	0,71 %
Rata-rata selisih error				3,94%



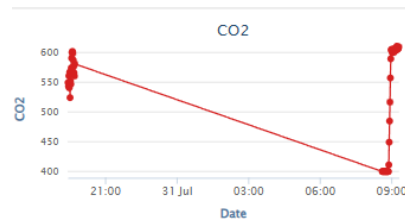
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rata-rata perbedaan pengukuran berada pada 3,94%, yang mengindikasikan tingkat akurasi tinggi pada perangkat IoT yang dikembangkan. Persentase kesalahan yang berada di bawah ambang 5% memenuhi standar toleransi yang direkomendasikan untuk sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT [7][6].



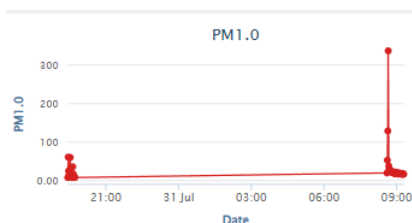
Gambar 16. Notifikasi Grup Bot Telegram



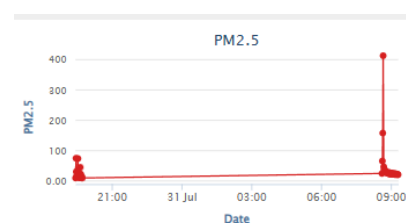
Gambar 17a. CO



Gambar 17b. CO2

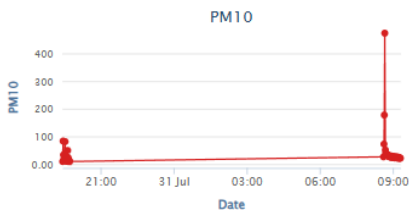


Gambar 17c. PM1.0

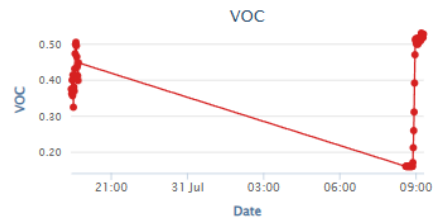


Gambar 17d. PM2.5

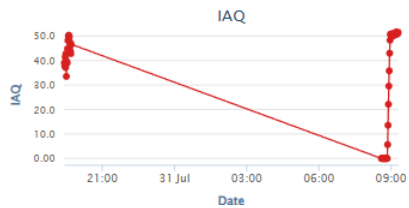




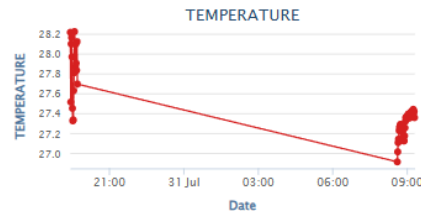
Gambar 17e. PM10



Gambar 17f. VOC



Gambar 17g. IAQ



Gambar 17h. Suhu

Gambar 17. Grafik ThinkerSpeak

## PEMBAHASAN

Rancangan perangkat ini memanfaatkan box plastik berukuran  $10,5 \times 17,5 \times 5,8$  cm dengan berat sekitar 500 gram, yang dinilai cukup praktis serta mendukung portabilitas sistem. Penempatan sensor dilakukan dengan perhitungan matang: sensor MQ7 dan BME680 berada di sisi kiri, sedangkan sensor ZH03B ditempatkan di sisi kanan. Tata letak ini memastikan sirkulasi udara tidak terhambat panas internal, sehingga hasil pengukuran gas dan partikulat lebih akurat. Slot penyimpanan SD card ditempatkan di bagian atas perangkat sehingga proses pelepasan maupun pengambilan data dapat dilakukan dengan lebih praktis. Sementara itu, tombol utama ON/OFF dirancang agar pengguna dapat menyalakan dan mematikan sistem dengan mudah. Desain PCB dengan penggunaan ground plane penuh juga berkontribusi dalam mengurangi noise serta menjaga kestabilan sinyal. Secara keseluruhan, rancangan fisik perangkat dinilai ergonomis, efisien, dan mendukung keandalan sistem.

Pengujian integrasi antara modul RTC DS3231 dan SD card menunjukkan performa yang sangat baik, dengan perbedaan pencatatan waktu hanya 0–2 detik serta rata-rata error mendekati 0%. Hal ini membuktikan bahwa perangkat memiliki akurasi waktu yang memadai untuk pemantauan jangka panjang. Sinkronisasi waktu yang stabil sangat penting karena menjadi acuan utama dalam analisis tren kualitas udara maupun



perbandingan dengan data eksternal. Proses pencatatan data dalam format CSV serta penyimpanan hasil kalibrasi sensor BME680 semakin menambah reliabilitas sistem dalam menghasilkan data yang konsisten.

Hasil pengujian sensitivitas menunjukkan bahwa perangkat mampu merespons perubahan kondisi lingkungan secara nyata. Sensor MQ7 memperlihatkan peningkatan kadar CO yang cukup signifikan ketika mendapatkan paparan gas dari korek api maupun nyala api langsung. Sementara itu, sensor BME680 memperlihatkan perubahan nyata pada parameter CO<sub>2</sub>, VOC, serta indeks kualitas udara (IAQ), terutama saat terjadi pembakaran, dengan nilai CO<sub>2</sub> mencapai 1200 ppm dan VOC hingga 900 ppb. Sensor ZH03B terbukti paling peka terhadap partikulat, khususnya saat terpapar asap rokok, dengan nilai PM2.5 mencapai 95 µg/m<sup>3</sup> dan PM10 sebesar 180 µg/m<sup>3</sup>. Selain itu, peningkatan suhu dan penurunan kelembapan saat adanya api semakin menguatkan bukti bahwa perangkat mampu merekam perubahan lingkungan secara real-time.

Fitur buzzer dan notifikasi Telegram juga diuji dan menunjukkan hasil yang memuaskan. Sistem mampu memberikan peringatan dini dengan rata-rata waktu respons 7,3 detik, yang tergolong cepat untuk perangkat IoT. Alarm hanya aktif pada kondisi kualitas udara Tidak Sehat atau Bahaya, sehingga risiko false alarm dapat diminimalkan. Saat diuji di taman dengan udara bersih, alarm tidak aktif, tetapi pada kondisi jalan raya yang padat polusi, buzzer dan notifikasi Telegram berfungsi sesuai dengan kenaikan konsentrasi CO, PM2.5, dan IAQ. Hal ini membuktikan efektivitas perangkat dalam mendukung pemantauan udara baik secara langsung maupun jarak jauh.

Hasil uji lapangan di sekitar PT. Sari Warna Surakarta memperlihatkan bahwa kualitas udara sangat dipengaruhi oleh jarak dan waktu. Pada radius 30 meter dari sumber emisi, udara tercatat dalam kategori Bahaya terutama siang hari, dengan CO sebesar 65 ppm, PM2.5 mencapai 85 µg/m<sup>3</sup>, dan IAQ sebesar 225. Pada jarak 100 meter, kualitas udara masih termasuk kategori Tidak Sehat, namun pada jarak di atas 500 meter konsentrasi polutan menurun signifikan hingga masuk kategori Normal. Tren ini sejalan dengan teori dispersi polutan, di mana konsentrasi berkurang seiring bertambahnya jarak. Selain itu, konsentrasi polutan siang hari cenderung lebih tinggi dibanding pagi dan malam, yang diduga berkaitan dengan aktivitas industri serta peningkatan temperatur.

Proses validasi menggunakan alat pembanding menunjukkan rata-rata error sebesar 3,94%, masih berada di bawah batas toleransi 5%. Selisih yang kecil pada parameter CO, PM, CO<sub>2</sub>, dan IAQ menandakan bahwa perangkat ini memiliki tingkat akurasi tinggi. Integrasi algoritma BSEC pada BME680 dan metode kalibrasi yang diterapkan terbukti efektif dalam meningkatkan konsistensi data.

Integrasi sistem dengan IoT semakin memperluas manfaat perangkat. Data sensor tidak hanya tersimpan secara lokal pada SD card, tetapi juga ditransmisikan ke platform



ThingSpeak untuk divisualisasikan dalam bentuk grafik real-time. Hal ini memudahkan analisis tren jangka panjang dan pemantauan jarak jauh. Selain itu, adanya fitur notifikasi melalui Telegram Bot menjadi nilai tambah sebagai sistem peringatan dini, sehingga pengguna dapat langsung mengetahui kondisi udara tanpa harus berada di lokasi pengukuran.

Secara keseluruhan, hasil pembahasan ini menunjukkan bahwa perangkat pemantau kualitas udara berbasis IoT yang dikembangkan bekerja secara efektif, responsif, dan akurat. Sistem ini tidak hanya andal dalam mendeteksi polutan gas maupun partikulat, tetapi juga unggul dalam hal integrasi IoT untuk pencatatan, analisis, dan peringatan dini. Dengan demikian, perangkat ini sangat potensial digunakan untuk pemantauan kualitas udara di kawasan industri maupun perkotaan.

## **KESIMPULAN**

Rangkaian pemantauan yang dirancang pada studi ini mengimplementasikan arsitektur IoT untuk pengukuran multiparameter kualitas udara. Node lapangan membaca karbon monoksida (CO) melalui MQ7; estimasi CO<sub>2</sub>, VOC, suhu/kelembapan, dan IAQ melalui BME680; serta partikulat PM1.0, PM2.5, dan PM10 melalui ZH03B. Data divisualkan secara langsung pada LCD, dipublikasikan ke ThingSpeak untuk pemantauan jarak jauh, dan direkam ke media SD pada interval terjadwal 10 menit dengan sinkronisasi waktu RTC DS3231.

Ketelitian sistem diuji terhadap instrumen pembanding dan menunjukkan rata-rata selisih 3,94%, nilai yang masih dalam kisaran diterima (<5%) untuk perangkat pemantauan lingkungan kelas IoT. Respons sensor di bawah skenario paparan berbeda memperlihatkan pola yang sesuai dengan karakteristik masing-masing modul: MQ7 peka terhadap kenaikan CO saat gas/nyala api diberikan; BME680 merekam peningkatan eCO<sub>2</sub>, VOC, disertai perubahan IAQ. Respons ZH03B paling jelas terlihat sebagai kenaikan PM2.5 dan PM10 pada skenario asap rokok.

Fitur alarm terintegrasi bekerja baik: ketika klasifikasi kualitas udara mencapai Tidak Sehat atau Bahaya, buzzer aktif dan notifikasi Telegram dikirim dengan rata-rata latensi 7,3 detik. Pengukuran lapangan di sekitar PT Sari Warna Surakarta menunjukkan gradien polusi yang jelas menurut jarak dan waktu; konsentrasi puncak terjadi pada pengukuran siang hari di 30 m dari sumber, sedangkan pada 500–1000 m nilai indikator turun ke rentang Normal. Secara keseluruhan, perangkat ini menawarkan platform monitoring yang efektif, mudah dipindahkan, dan potensial digunakan untuk pemantauan berkesinambungan di lingkungan industri.



## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, petunjuk, dan kemudahan-Nya sehingga artikel ini dapat diselesaikan dengan baik. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga dan sahabat beliau. Penulis menyampaikan apresiasi setinggi-tingginya kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, baik secara moril maupun teknis, selama proses penelitian hingga penyusunan artikel ini. Secara khusus, penghargaan penulis tujukan kepada:

1. Orang tua dan keluarga yang senantiasa mendoakan, memberikan dorongan, serta semangat dalam menyelesaikan studi dan penelitian ini.
2. Ir. Pratomo Budi Santosa, M.T. , selaku dosen pembimbing yang dengan sabar memberikan arahan, bimbingan, dan masukan berharga selama proses penelitian dan penulisan artikel ilmiah ini.
3. Seluruh dosen dan staf pengajar di Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta atas ilmu, bimbingan, dan pengalaman yang telah diberikan selama masa perkuliahan.
4. Semua rekan mahasiswa Teknik Elektro angkatan 2021 yang turut membantu dan mendukung hingga proses akhir penyusunan artikel ini.

Semoga seluruh kebaikan dan bantuan yang diberikan menjadi amal jariyah dan mendapat balasan terbaik dari Allah SWT. Aamiin.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Harpad, S. Salmon, and R. M. Saputra, "Sistem Monitoring Kualitas Udara Di Kawasan Industri Dengan Nodemcu Esp32 Berbasis Iot," *J. Inform. Wicida*, vol. 12, no. 2, pp. 39–47, 2022, doi: 10.46984/inf-wcd.1955.
- [2] Q. Xu *et al.*, "Cell-free and alkylated hemoproteins improve survival in mouse models of carbon monoxide poisoning," *JCI Insight*, vol. 7, no. 21, 2022, doi: 10.1172/jci.insight.153296.
- [3] D. Chen, G. Huebner, E. Bagkeris, M. Ucci, and D. Mumovic, "Effects of short-term exposure to moderate pure carbon dioxide levels on cognitive performance, health symptoms and perceived indoor environment quality," *Build. Environ.*, vol. 245, no. April, p. 110967, 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110967.
- [4] K. L. Alford and N. Kumar, "Pulmonary health effects of indoor volatile organic compounds—a meta-analysis," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 4, pp. 1–12, 2021, doi: 10.3390/ijerph18041578.
- [5] P. Megantoro, S. A. Aldhama, G. S. Prihandana, and P. Vigneshwaran, "IoT-based weather station with air quality measurement using ESP32 for environmental aerial condition study," *Telkomnika (Telecommunication Comput. Electron. Control.)*, vol. 19, no. 4, pp. 1316–1325, 2021, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v19i4.18990.



- [6] Najmawatih, Imran Taufik, Supriadi, and Anders Christensen, "Internet of Things (IoT) Based Air Pollution Detector for Baby Rooms," *Ceddi J. Inf. Syst. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 40–51, 2025, doi: 10.56134/jst.v4i1.111.
- [7] A. M. Simamora, A. Denih, and M. I. SURIANSYAH, "Indoor Air Quality Detection Robot Model Based on the Internet of Things (IoT)," pp. 2–6, 2025, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2505.19600>
- [8] A. A. Rahmadani, Y. W. Syaifudin, B. Setiawan, Y. Y. F. Panduman, and N. Funabiki, "Enhancing Campus Environment: Real-Time Air Quality Monitoring Through IoT and Web Technologies," *J. Sens. Actuator Networks*, vol. 14, no. 1, pp. 1–26, 2025, doi: 10.3390/jsan14010002.
- [9] G. R. Utomo, F. W. Fuedsi, N. Hardiyanti, M. H. Mustofa, and A. Yuliana, "Real-Time Monitoring System for CO Pollutant Concentration Using Fuzzy Logic on an Internet of Things (IoT) Platform and Telegram Around UNNES," *BIO Web Conf.*, vol. 144, pp. 1–9, 2024, doi: 10.1051/bioconf/202414403004.
- [10] N. Nanos, A. Lee, and T. Mavridou, "A study on a low-cost real time MEMS based modular Indoor Environmental Quality monitor sensor," *E3S Web Conf.*, vol. 634, p. 03002, 2025, doi: 10.1051/e3sconf/202563403002.
- [11] S. Botticini *et al.*, "Index Air Quality Monitoring for Light and Active Mobility," *Sensors*, vol. 24, no. 10, pp. 1–27, 2024, doi: 10.3390/s24103170.

