



Perancangan Alat Pemantauan Berkelanjutan Kualitas Udara Dalam Ruang

Sholahudin*, Muchtar Ali Setyo Yudono, Anang Suryana

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Komputer dan Desain, Universitas Nusa Putra
Jl. Raya Cibolang No.21 Cisaat, Sukabumi, Indonesia 43152

email: sholahudin_te20@nusaputra.ac.id

(Naskah masuk: 9 Agustus 2024; direvisi: 11 Oktober 2024; diterima untuk diterbitkan: 12 Oktober 2024)

ABSTRAK – Kualitas udara dalam ruangan penting untuk diperhatikan karena sebagian besar aktivitas manusia berlangsung di dalam ruangan. Banyak penelitian terkait sistem pemantauan kualitas udara dalam ruangan. Peluang yang muncul dari penelitian sebelumnya adalah perubahan pemilihan sensor pemantau partikel $PM_{2.5}$ dari GP2Y1010AUF menjadi sensor ZH03B (khusus untuk mengukur $PM_{2.5}$). Tujuan dari penelitian ini adalah menghasilkan alat pemantauan kualitas udara dalam ruangan dengan pemilihan sensor khusus untuk deteksi $PM_{2.5}$ dilengkapi sensor polutan lainnya. Polutan yang dideteksi didasarkan pada irisan indikator dari tiga regulasi tentang kualitas udara, yakni $PM_{2.5}$, PM_{10} , dan CO sesuai irisan standar ISPU KLHK, Kemenkes, dan WHO. Perancangan dilakukan menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor, OLED, kartu memori dan komponen lainnya. Keluaran alat dapat diakses pengguna melalui web Google Sheets. Hasil analisis menunjukkan bahwa akurasi alat pemantauan dibandingkan dengan alat standar mengalami galat rata-rata $-3,68\mu g/m^3$ untuk $PM_{2.5}$ dan $-7,67\mu g/m^3$ untuk PM_{10} , serta keduanya sesuai dengan standar manufakturnya. Akurasi pembacaan polutan CO adalah 80,89%. Selain itu, kadar polutan dalam ruangan sampel berada pada kategori sehat hingga sedang saat pengujian. Kontribusi dari penelitian ini adalah alat pemantauan kualitas udara dalam ruangan berdasarkan metode yang diajukan. Simpulan akhir dari penelitian ini adalah alat berhasil memonitoring ketiga polutan terpilih dan menyajikannya ke pengguna dengan baik.

Kata Kunci – google sheets; kualitas udara dalam ruangan; mikrokontroler; pemantauan; $pm_{2.5}$; pm_{10} .

Design of a Continuous Monitoring Tool for Indoor Air Quality

ABSTRACT – Indoor air quality is important to note because most human activities take place indoors. There is a lot of research related to indoor air quality monitoring systems. The opportunity that emerged from previous studies is the change in the selection of $PM_{2.5}$ particle monitoring sensors from GP2Y1010AUF to the ZH03B sensor (specifically for measuring $PM_{2.5}$). The purpose of this study is to produce an indoor air quality monitoring tool with a special sensor selection for $PM_{2.5}$ detection equipped with other pollutant sensors. The pollutants detected are based on the intersection of indicators from three regulations on air quality, namely $PM_{2.5}$, PM_{10} , and CO according to the intersection of ISPU KLHK, Kemenkes, and WHO standards. The design was carried out using an ESP32 microcontroller, sensors, OLED screens, memory cards and other components. The output of the tool can be accessed by users via the Google Sheets web. The results of the analysis showed that the accuracy of the monitoring device compared to standard devices had an average error of $-3.68\mu g/m^3$ for $PM_{2.5}$ and $-7.67\mu g/m^3$ for PM_{10} , and both were in accordance with their manufacturing standards. The accuracy of CO pollutant readings was 80.89%. In addition, the indoor pollutant levels of the samples were in the healthy to moderate category during testing. The contribution of this study is an indoor air quality monitoring device based on the proposed method. The conclusion of this study is that the device successfully monitors the three selected pollutants and presents them to users well.

Keywords – google sheets; indoor air quality; microcontroller; monitoring; $pm_{2.5}$; pm_{10} .

1. PENDAHULUAN

Polusi dalam ruangan menjadi hal yang perlu diperhatikan saat ini. Sumber polutan dalam ruangan antara lain adalah kegiatan memasak di dalam ruangan. Berdasarkan penelitian [1], terdapat 593 juta penduduk dunia tersebar di daerah-daerah dengan bahan bakar padat (kayu, dedaunan, arang, sabut kelapa, dan lain-lain) untuk memasak. Enam puluh enam persen dari penduduk di negara berpendapatan rendah ke menengah (Indonesia termasuk di dalamnya) tinggal di daerah yang melenceng dari target sementara *Sustainable Development Goals* (SDGs) energi bersih 2030. Selain itu, polusi udara dalam ruangan juga bersumber dari asap yang timbul saat kegiatan merokok dalam ruangan dan secara ilmiah risiko kesehatan bagi perokok pasif adalah tinggi [2], [3], [4], [5]. Terakhir, sumber polusi udara dalam ruangan juga berasal dari luar ruangan khususnya untuk ruangan berventilasi, dan menjadi fokus bersama pada peningkatan pencemaran udara luar pada kota besar seperti Jakarta [6].

Kualitas udara adalah tingkat kebersihan udara di suatu tempat dan hal yang mempengaruhinya adalah polusi udara. Polusi udara adalah keadaan ketika udara yang bersih menjadi tercemar oleh berbagai macam zat baik berupa senyawa kimia maupun non senyawa kimia [7]. Polutan berupa senyawa kimia antara lain karbon monoksida dan nitrogen dioksida yang sering dijumpai pada asap pembakaran bahan bakar fosil. Sedangkan contoh polutan non kimia adalah materi partikulat (*particulate matter*) yang sering dijumpai pada lokasi konstruksi, kebakaran hutan, pembakaran kayu, kegiatan pertanian, dan jalan atau lingkungan berdebu. *Particulate matter* yang dibatasi kadarnya oleh pemerintah Indonesia adalah *particulate matter* berukuran sama dengan atau kurang dari 10 μm (disingkat PM₁₀) dan *particulate matter* berukuran sama dengan atau kurang dari 2,5 μm (disingkat PM_{2.5}) [8].

Particulate matter menjadi polutan yang populer dalam penelitian deteksi kualitas udara dalam ruangan yang dilakukan oleh peneliti terdahulu. Berdasarkan hasil penelitian [9], terdapat 11 dari 20 penelitian yang diulas mencantumkan polutan *particulate matter* dalam sistem deteksi mereka. Dari 11 penelitian tersebut, pada kolom sensor tabel hasil ulasan penelitian [9], sensor Sharp GP2Y1010AU0F menjadi pilihan paling banyak muncul digunakan untuk mendeteksi *particulate matter*, yakni empat penelitian.

Penelitian [10] menggunakan mikrokontroler Arduino Uno dan Raspberry Pi dengan sensor *particulate matter* (GP2Y1010AU0F) dan sensor CO₂ (MQ-135), diakses pengguna melalui Amazon Web

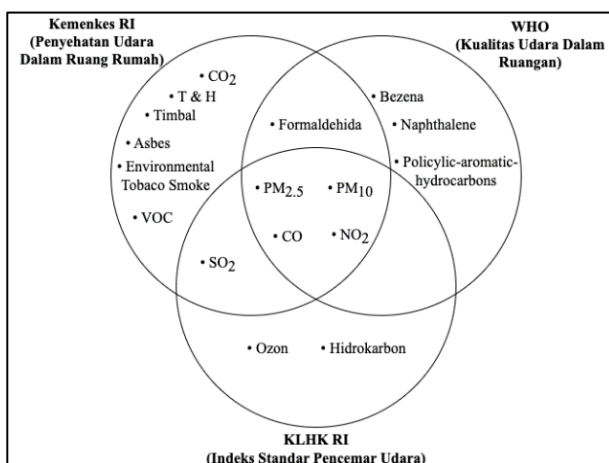
Service IoT Core, dan mengotomatiskan kipas ventilasi menggunakan metode pengambilan keputusan logika fuzzy. Sementara itu, penelitian [11] mengusulkan sistem otomatis untuk mengatur kinerja perangkat HVAC menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan sensor *particulate matter* (GP2Y1010AU0F), sensor suhu (LM35), sensor dan CO₂ (MHZ14-A). Di sisi lain, penelitian [12] menggunakan mikrokontroler utama Arduino Leonardo dengan sensor *particulate matter* (GP2Y1010AU0F) dan sensor suhu & kelembaban (DHT11), yang menyediakan akses pengguna melalui LCD, SMS dan situs web, serta mengotomatiskan kipas. Adapun pada penelitian [13], mikrokontroler utama yang digunakan adalah ESP32 dengan sensor *particulate matter* (GP2Y1010AU0F), sensor CO (MQ-7), sensor CO₂ (MQ-135), dan sensor suhu & kelembaban (DHT11) dengan *output* data disimpan/diakses oleh pengguna melalui platform ThingSpeak.

Apabila diteliti lebih lanjut, manufaktur Sharp dalam manual *datasheet* GP2Y1010AU0F secara tertulis menyatakan bahwa sensor ini adalah sensor debu secara umum. Memang, kapabilitas sensor ini dapat mengukur partikel debu hingga berukuran mikrometer, namun di dalam *datasheet* tersebut tidak ada sama sekali pernyataan bahwa sensor ini secara khusus mengukur PM_{2.5} ataupun PM₁₀. Sehingga, terukurnya *particulate matter* berukuran di atas 10 μm berpeluang semakin besar [14], [15], [16]. Linieritas seri GP2Y1010AU0F saat dikalibrasi terhadap alat ukur Honeywell HPM115S0-XXX juga lebih rendah daripada seri ZH03 dan SDS011 dibuktikan pada penelitian [17]. Dengan adanya dua faktor tersebut, maka penulis memprioritaskan penggunaan sensor *particulate matter* selain GP2Y1010AU0F.

Di samping permasalahan pemilihan sensor *particulate matter*, pemilihan gas berbahaya yang dideteksi oleh penelitian terdahulu juga bervariasi karena preferensi tiap peneliti terdahulu berbeda. Dalam menyikapi keberagaman tersebut, pemilihan gas yang akan dideteksi dalam penelitian ini mengacu pada irisan regulasi kualitas udara dalam ruangan. Diagram venn berupa irisan dari ketiga regulasi kualitas udara juga merupakan gagasan baru yang diusulkan dalam penelitian ini tentang pemilihan polutan udara dalam konteks kualitas udara dalam ruangan.

Irisan regulasi mengenai indikator kualitas udara dalam ruangan pada panduan World Health Organization (WHO) tahun 2014 berjudul "*WHO guidelines for indoor air quality: household fuel combustion*" [18], Kementerian Kesehatan (Kemenkes) RI tahun 2011 dalam Peraturan Menteri Kesehatan nomor 1077/MENKES/PER/V/2011 tentang Penyehatan Udara Dalam Ruang Rumah [19], dan Kementerian Lingkungan Hidup

Kehutanan (KLHK) dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan tahun 2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara Nomor 14 Tahun 2020 [8], ditunjukkan oleh Gambar 1. Pada Gambar 1 berikut, disajikan diagram venn sederhana untuk membandingkan dan mengelompokkan indikator yang diatur oleh tiga regulasi. Irisan ketiganya berada di tengah diagram dan menjadi prioritas untuk digunakan dalam sistem pemantauan kualitas udara dalam ruangan. Pemilihan melalui irisan tersebut dimaksudkan agar rancangan alat pemantauan sesuai dengan pedoman regulasi pemerintah dengan jumlah indikator yang digunakan tidak terlalu banyak sehingga memungkinkan diaplikasikan secara sederhana di dalam ruangan.



Gambar 1. Diagram venn indikator kualitas udara yang diatur dalam pedoman WHO, Kemenkes, dan KLHK

Dalam irisan ketiga regulasi tersebut, empat indikator menjadi anggotanya, yakni *particulate matter* 2.5µm (PM_{2.5}), *particulate matter* 10µm (PM₁₀), nitrogen dioksida, dan karbon monoksida. Lebih lanjut mengenai batasan keempat polutan tersebut diatur dalam regulasi [8]. Dikarenakan kesulitan menjumpai alat pembanding dalam mendeteksi NO₂, polutan gas ini ditiadakan dalam desain penelitian ini. Kemudian, agar mempermudah penyebutan nilai konsentrasi ribuan pada gas CO, satuan kedua gas tersebut diubah dari µg/m³ ke *part per million* (ppm) melalui persamaan (1) dengan menganggap dalam kondisi STP [20]. Dengan demikian diperoleh batasan polutan dan kategorinya disajikan dalam Tabel 1.

$$Gas (ppm) = \frac{0,0224 \times Gas (\mu g/m^3)}{M} \quad (1)$$

Tabel 1. Batasan konsentrasi polutan dalam ruangan terpilih

Kategori	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	CO (ppm)
----------	---	--	-------------

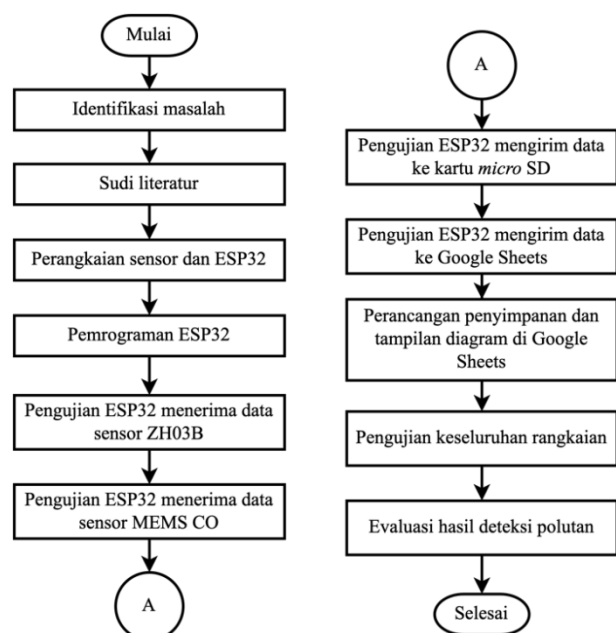
sehat	15,5	50	3,493
sedang	55,4	150	6,986
tidak sehat	150,4	350	13,099
sangat tidak sehat	250,4	420	26,199
berbahaya	500	500	39,298

Dalam rangka merancang visualisasi data untuk pengguna sekaligus media penyimpanan, penelitian ini menggunakan Google Sheets [21]. Untuk melakukan log data dimanfaatkan pula Google Sheets *Application Programming Interface* (API) [22]. Sebagai tambahan penanganan perubahan data secara terus menerus pada lembar kerja Google Sheets akibat kegiatan unggah data oleh perangkat deteksi, maka diterapkan pula ekstensi Google Apps Script dalam memperbarui visualisasi data di Google Sheets [23].

Berdasarkan permasalahan dan temuan pada penelitian sebelumnya, maka tujuan yang hendak dicapai dari penelitian ini adalah menghasilkan alat pemantauan kualitas udara dengan pemilihan sensor *particulate matter* yang khusus untuk pemantauan PM_{2.5} dan PM₁₀ yakni ZH03B agar sesuai dengan regulasi kualitas udara. Sementara, penggunaan sensor karbon monoksida (CO) adalah dalam rangka usaha memenuhi irisan indikator kualitas udara dalam ruangan pada Gambar 1.

2. METODE DAN BAHAN

Tahapan penelitian yang dilalui mencakup identifikasi masalah, studi literatur, perancangan komponen, pengujian individual, pengujian keseluruhan, dan terakhir pengujian kemampuan alat pemantauan sebagaimana tergambar pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

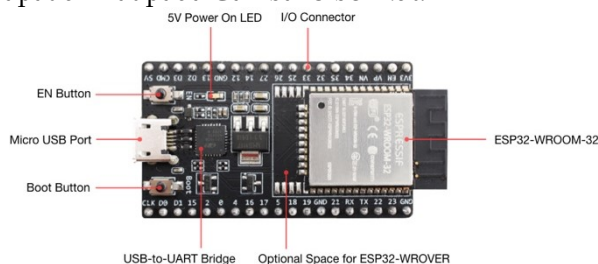
Pada tahap identifikasi masalah, dilakukan pencarian terhadap permasalahan yang muncul dalam penelitian sebelumnya terkait pemantauan kualitas udara dalam ruangan. Analisis mendalam dilakukan terhadap poin yang terdapat dalam penelitian sebelumnya. Selanjutnya, studi literatur dilakukan dengan meninjau berbagai sumber, termasuk buku, pedoman nasional dan internasional tentang kualitas udara dalam ruangan, jurnal penelitian terkait, manual *datasheet* komponen sensor dan mikrokontroler, serta teori pemrograman ESP32 dan Google Apps Script.

Lokasi penelitian dilakukan di dalam ruangan sebuah rumah beralamat di Jalan Kenari 4, Kelurahan Pelabuhanratu, Kab. Sukabumi, Jawa Barat, Indonesia. Ruangan dalam bangunan ini berdekatan dengan jalan raya (<10 meter) dan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (<5 km).

Setelah literatur dipelajari, perancangan rangkaian sensor dan ESP32 dilakukan. Setiap modul sensor dan ESP32 diuji secara individual untuk memastikan data pemantauan sensor diterima dengan baik oleh ESP32. Selain itu, dilakukan pula pengujian individual ESP32 dalam menulis data ke kartu memori eksternal berkapasitas 4 *gigabyte* dan Google Sheets. Selanjutnya, pengujian keseluruhan rangkaian dilakukan secara bersamaan dan akhirnya kemampuan alat pemantauan dibandingkan dengan data pembanding.

Mikrokontroler ESP32

ESP32 adalah modul MCU generik yang dilengkapi dengan Wi-Fi 2.4 GHz dan *Bluetooth*, menggunakan Xtensa® 32-bit LX6 sebagai CPU, yang dapat diterapkan dalam berbagai aplikasi mulai dari jaringan sensor berdaya rendah hingga tugas yang kompleks [24]. Tampilan salah satu contoh ESP32 dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Pin keluaran ESP32 [24]

Pin yang digunakan untuk menerima keluaran dari sensor Fermion adalah pin ADC *Analog-Digital Converter* (IADC) pada ESP32. ADC pada ESP32 defaultnya memiliki 15 pin dan resolusi 12-bit, yang memungkinkan untuk mendeteksi 4096 level diskrit analog (2^{12}). Namun, dokumentasi [25] menjelaskan bahwa resolusi ADC ESP32 dapat diubah sesuai kebutuhan, mulai dari 9 bit hingga 12 bit.

Untuk sensor ZH03B, pin yang dimanfaatkan

adalah *transmit* 2 (TX2) dan *receive* 2 (RX2) pada ESP32. Pin ini digunakan untuk komunikasi serial antara ESP32 dengan perangkat keras lainnya seperti sensor ZH03B. Fitur Wi-Fi ESP32 digunakan untuk mengirim data ke Google Sheets, sedangkan komunikasi *Serial Peripheral Interface* (SPI) digunakan untuk menulis data ke kartu memori eksternal.

Sensor Laser Partikel Winsen ZH03B

Modul sensor partikel laser ZH03B yang dikembangkan oleh perusahaan Zhengzhou Winsen Electronics Technology merupakan sensor kecil yang menggunakan prinsip hamburan laser untuk mendeteksi partikel di udara dengan selektivitas dan stabilitas yang baik. Berdasarkan *datasheet* ZH03B [26], tegangan suplai untuk sensor ini adalah 5 V. Sinyal keluaran yang tersedia dari sensor ini meliputi sinyal PWM (0 - 3,3 V) dan UART (0 - 3,3 V), dengan keluaran UART yang digunakan dalam penelitian ini. Karakteristik dari sensor partikel ini adalah memiliki range valid 0 - 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan jeda deteksi 1 detik. Maksimum nilai galat berdasarkan standar pengujian manufaktur adalah $\pm 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ saat membaca 0 s.d. 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan $\pm 15\%$ saat membaca 101 s.d. 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tampilan sensor ZH03B ditunjukkan Gambar 4 berikut ini.



Gambar 4. Sensor partikel ZH03B [26]

Sensor Fermion MEMS CO

Dikembangkan oleh perusahaan DFRobot [27] adalah sensor yang menggunakan teknologi *microelectromechanical system* (MEMS) dengan dimensi *compact* (13x13x2.5mm), konsumsi daya rendah (<20mA), dan pemulihan respons yang cepat. Sensor ini dapat mengukur konsentrasi gas karbon monoksida secara kualitatif (0-500 ppm). Keluaran dari sensor ini adalah sinyal analog dengan level tegangannya 3,3V. Tidak ada standar baku dari manufaktur mengenai kemampuan sensor ini. Selain itu, manufaktur sensor ini menyatakan bahwa sensor ini tidak cocok untuk menjadi acuan kuantitatif yang berkaitan langsung dengan keselamatan manusia di area tinggi gas CO. Sensor yang sifatnya kuantitatif memiliki nilai harga yang lebih tinggi, sehingga hal tersebut belum menjadi kebutuhan dalam penelitian berskala kecil ini. Gambar 5 berikut menunjukkan tampilan sensor Fermion MEMS CO.



Gambar 5. Tampilan sensor Fermion MEMS CO [27]

Layar OLED

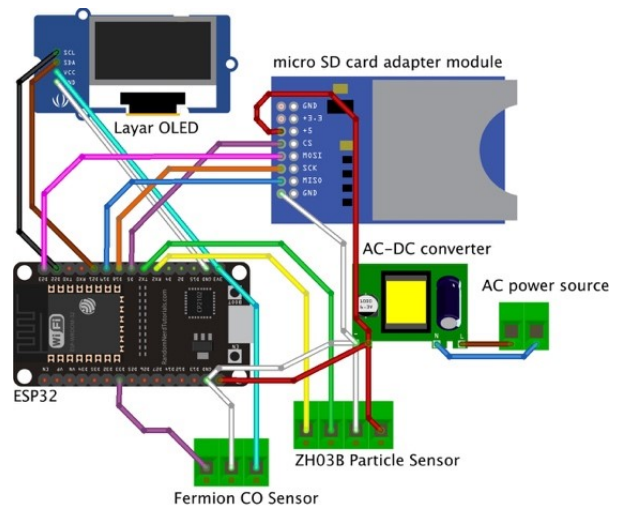
Dalam rangka menampilkan kualitas udara hasil pembacaan rancangan alat pemantauan, ditambahkan layar *Organic Light Emitting Diode* (OLED) yang mampu menampilkan data kualitas udara dengan jeda setiap detik menggunakan komunikasi I2C [28]. Layar OLED yang digunakan dalam rancangan ini adalah SSD1306 dengan dimensi 128 x 64 *dot matrix* atau setara 0,96 inch. Tampilan layar OLED yang digunakan ditunjukkan Gambar 6.



Gambar 6. Layar OLED

Skema Rangkaian

Dalam rangka menyusun rancangan alat pemantauan, diperlukan skema rangkaian yang tepat agar penyusunan dapat dilaksanakan sesuai dengan tujuan penggunaan komponen. Skema rangkaian dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 7 berikut. Pada skema rangkaian tersebut, sensor digambarkan dengan terminal standar karena tidak tersedia *library* yang mendukung ketiga sensor tersebut secara khusus.



Gambar 7. Skema rangkaian

Mikrokontroler ESP32, sensor ZH03B, dan adapter kartu memori menerima suplai tegangan 5 V dari modul *converter* AC-DC yakni dihubungkan ke pin *Vin* ESP32, pin 1 ZH03B, dan pin 5V adapter kartu memori. Di sisi lain, pin VCC sensor Fermion CO dihubungkan ke pin 3V3 ESP32 agar mendapatkan tegangan 3,3V. Keluaran sensor Fermion CO (pin A) dihubungkan ke pin D33 ESP32 untuk kemudian dikonfigurasi sebagai *input* analog dalam pemrograman ESP32. Sementara pin RX2 dan TX2 ESP32 dihubungkan ke pin 5 (TX) dan pin 4 (RX) ZH03B. Level tegangan komunikasi UART pada ZH03B adalah 3,3V sehingga sesuai dengan ESP32.

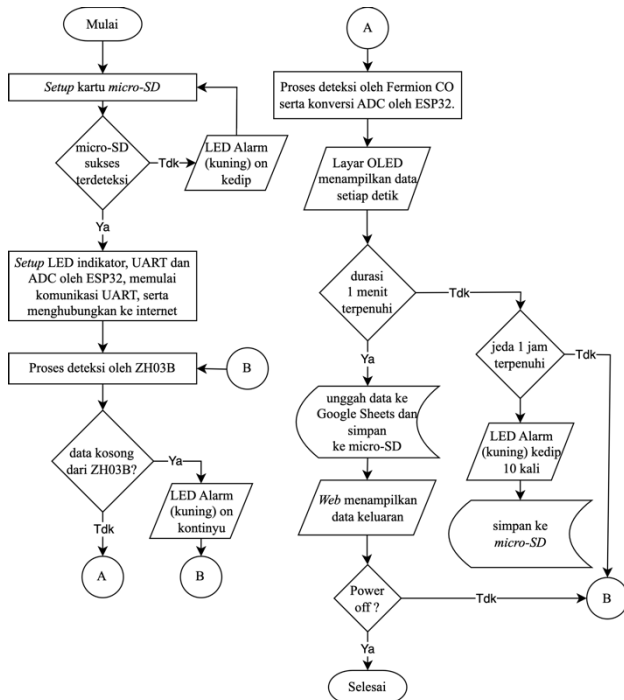
Selanjutnya, layar OLED memperoleh VCC 3,3V dari pin 3V3 ESP32. Kemudian pin SDA dan SCL layar OLED dihubungkan ke pin D21 dan D22 ESP32 (untuk komunikasi I2C). Adapter kartu memori yang memanfaatkan komunikasi SPI (*serial peripheral interface*) dihubungkan pin MOSI-nya ke pin MISO ESP32 (D19), pin MISO ke pin MOSI ESP32 (D23), pin SCK ke pin SCK ESP32 (D18), dan pin CS ke pin D5 ESP32. Setiap pin *ground* komponen dijadikan satu pada pin GND ESP32 ataupun pada pin negatif keluaran AC-DC *converter*.

Diagram Alir Sistem

Hasil pemantauan dari sensor ZH03B dikirimkan ke ESP32 melalui komunikasi *serial* dan kemudian diperiksa untuk memastikan data tidak kosong. Sementara itu, hasil deteksi dari sensor Fermion dikirimkan ke ESP32 dalam bentuk sinyal analog. ESP32 secara berkelanjutan mengirim data ke layar OLED dengan jeda 1 detik. Setelah 1 menit, ESP32 menghitung rerata data selama semenit, kemudian dikirim ke Google Sheets dan kartu memori (jika *online*) atau hanya ke kartu memori saja (jika *offline*). Siklus tersebut berulan terus menerus selama rangkaian masih menerima daya.

Keluaran sistem berupa diagram data hanya berdasarkan data yang berhasil diunggah ke Google

Sheets. Lampu alarm disediakan untuk menunjukkan ketidaknormalan kabel kartu memori/kabel sensor di rangkaian. Jika terjadi kedip lampu alarm, pengguna perlu menekan tombol reset. Bila masih terjadi, maka pengguna perlu memeriksa lebih lanjut kekencangan rangkaian. Secara keseluruhan, diagram alir program dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Diagram alir sistem

Penyimpanan di Google Sheets

Dalam rangka menerima data yang dikirim ESP32 ke Google Sheets, beberapa *sheet* dibuat dengan nama *sheet* adalah nama-nama bulan selama setahun. Pada setiap *sheet* terdapat tabel dengan penamaan kolom yang sama, yakni "Date", "PM_{2.5}", "PM₁₀", dan "CO". Secara detail, perancangan *sheet* untuk keperluan penyimpanan ditunjukkan Gambar 9 berikut.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Date	PM2.5	PM10	CO				
2	2024/10/2 22:42:04	14,23	15,47	5,69				
3	2024/10/2 22:43:09	14,28	15,57	5,41				
4	2024/10/2 22:44:12	13,68	14,73	5,73				
5	2024/10/2 22:45:17	12,72	13,72	5,59				
6	2024/10/2 22:46:21	14,05	15,15	5,81				
7	2024/10/2 22:47:24	13,28	14,28	5,34				
8	2024/10/2 22:48:28	13,68	14,68	3,85				
9	2024/10/2 22:49:32	13,88	14,88	4,03				

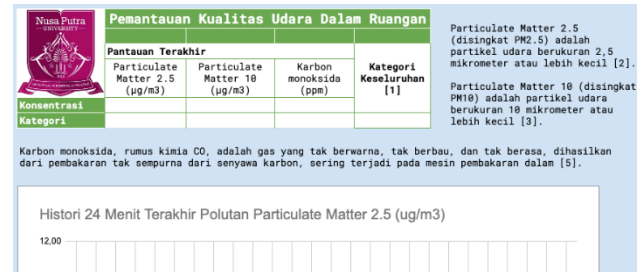
(a)

(b)

Gambar 9. Penyimpanan di Google Sheets (a) contoh nama kolom pada setiap sheet (b) sheet dinamakan dengan nama bulan

Sheet dengan nama "Sheet1" dijadikan sebagai halaman penampil data yang akan dipublikasikan ke publik. Pada *sheet* ini, sebuah tabel dan 4 diagram

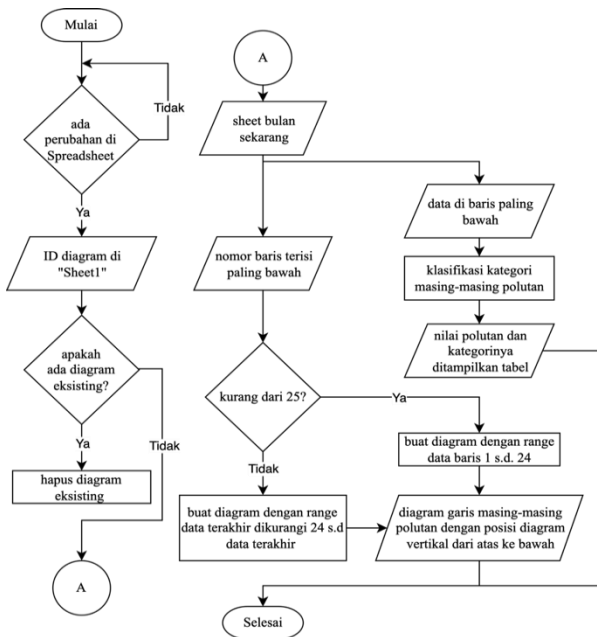
garis ditampilkan. Data yang disajikan tabel adalah data pemantauan terakhir, sedangkan data yang disajikan diagram garis adalah data 24 jam terakhir. Rancangan tampilannya adalah seperti ditunjukkan Gambar 10 berikut.



Gambar 10. Rancangan tampilan *web* hasil publikasi Google Sheets untuk akses pengguna.

Diagram Alir Program Google Apps Script

Pemrograman dalam Google Apps Script direpresentasikan dalam diagram alir pada Gambar 11. Setelah kode pemrograman disimpan, program memantau perubahan pada spreadsheet. Jika ada tambahan masuk, program mengevaluasi keberadaan data baru tersebut dan menambahkannya ke diagram di "Sheet1". Sementara data dari ESP32 disimpan di sheet lain (masih dalam satu spreadsheet) dengan nama sheet adalah nama-nama bulan (agar sinkron dengan waktu unggah oleh ESP32). ESP32 akan mengisi baris kosong pada sheet bernama bulan sesuai bulan *upload*-nya. Karena upload dilakukan semenit sekali, maka akan ada ribuan baris data di dalam sheet penyimpanan. Berdasarkan pustaka pengembang Google Spreadsheet, setiap sheet mampu mencapai puluhan ribu baris selama ukuran file belum mencapai 100MB. Data yang ditampilkan pada diagram hanyalah sebanyak 25 data terakhir (terbawah) agar tampilan diagram proporsional.



Gambar 11. Diagram alir pemrograman di Google Apps Script

Alat Pembanding

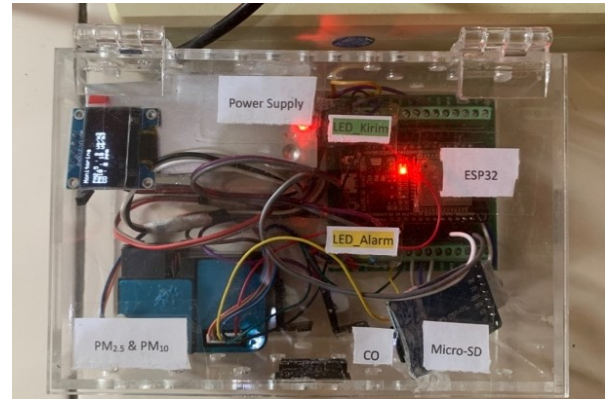
Perancangan alat pemantauan ini melibatkan tahapan perbandingan data hasil pemantauan alat yang dirancang dengan alat ukur lainnya. Alat ukur yang digunakan sebagai pembanding adalah alat deteksi kualitas udara tanpa merk yang beredar di pasar daring Indonesia [29]. Alat tersebut mampu mendeteksi polutan udara formaldehida, *total volatile organic compound* (tVOC), particulate matter 2.5 (PM_{2.5}), particulate matter 10 (PM₁₀), CO, dan CO₂. Tampilan alat tersebut ditunjukkan seperti Gambar 12.



Gambar 12. Alat deteksi pembanding

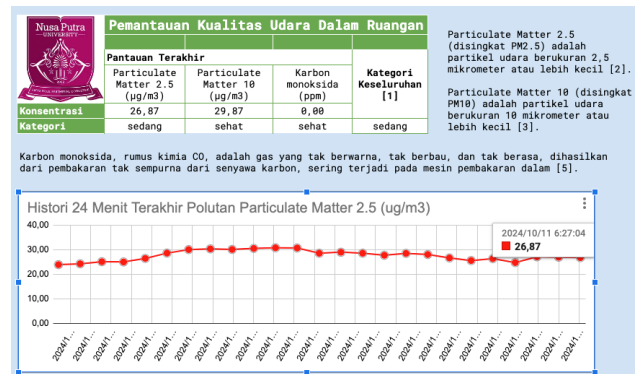
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tampilan layar OLED yang menunjukkan pembacaan polutan setiap detik setelah rancangan alat dinyalakan dan sampai pada tahap pemantauan ditunjukkan Gambar 13.



Gambar 13. Tampilan alat pemantauan hasil rancangan

Kemudian, dilakukan pengujian keseluruhan proses dari tahap sensor mendeteksi polutan hingga tersimpan di Google Sheet dan kartu memori. Tampilan diagram di Google Sheet sudah sesuai dengan perencanaan yakni seperti ditunjukkan Gambar 14.



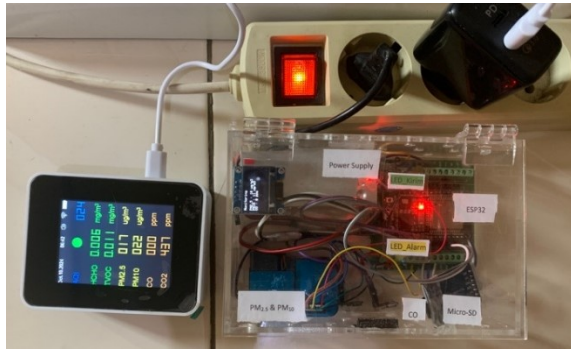
Gambar 14. Tampilan *web* hasil rancangan

Sementara itu, hasil penyimpanan di kartu memori berupa *file* berformat *txt* ditunjukkan Gambar 15.

```
6/6;33.00;37.00;0.00;0.00;
6/7;29.00;32.00;0.00;0.00;
6/8;34.00;38.00;0.00;0.00;
6/9;26.00;29.00;0.00;0.00;
6/10;39.00;44.00;0.00;0.00;
6/18;26.00;29.00;0.00;0.00;
6/19;24.00;27.00;0.00;0.00;
6/20;28.00;31.00;0.00;0.00;
6/21;24.00;27.00;0.00;0.00;
6/22;34.00;38.00;0.00;0.00;
6/23;47.00;53.00;0.00;0.00;
7/0;31.00;35.00;0.00;0.00;
7/1;29.00;32.00;0.00;0.00;
```

Gambar 15. Tampilan *file* di penyimpanan kartu memori

Selanjutnya, dilakukan perbandingan hasil pembacaan polutan antara alat hasil rancangan dengan alat pembanding. Pengujian rancangan alat pemantau kualitas udara dalam ruangan dibandingkan dengan alat pembanding dilakukan pada tanggal 5 Oktober 2024 pukul 5.20 s.d. 5.21. Proses perbandingan data ditunjukkan oleh Gambar 16.



Gambar 16. Komparasi pembacaan alat hasil rancangan dengan alat pembanding

Pembacaan PM_{2.5}

Berikut ini ditunjukkan data hasil perbandingan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan pembacaan alat hasil rancangan dan alat banding untuk polutan PM_{2.5}

Detik ke-	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Galat ($\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$)	Sesuai Standar Pabrik
	Alat Hasil Rancangan	Alat Banding		
1	17	20	-3	Ya
2	17	20	-3	Ya
3	17	20	-3	Ya
4	17	20	-3	Ya
5	17	20	-3	Ya
6	17	20	-3	Ya
7	17	22	-5	Ya
8	17	22	-5	Ya
9	17	22	-5	Ya
10	17	22	-5	Ya
11	17	22	-5	Ya
12	17	22	-5	Ya
13	16	22	-6	Ya
14	16	22	-6	Ya
15	16	22	-6	Ya
16	16	22	-6	Ya
17	16	21	-5	Ya
18	16	21	-5	Ya
19	17	21	-4	Ya
20	17	21	-4	Ya
21	17	21	-4	Ya
22	17	20	-3	Ya
23	17	20	-3	Ya
24	17	20	-3	Ya
25	16	20	-4	Ya
26	17	20	-3	Ya
27	17	20	-3	Ya
28	17	20	-3	Ya
29	17	20	-3	Ya
30	17	20	-3	Ya
31	17	20	-3	Ya
32	17	20	-3	Ya
33	17	20	-3	Ya
34	17	20	-3	Ya
35	17	20	-3	Ya
36	18	20	-2	Ya
37	18	20	-2	Ya
38	18	20	-2	Ya
39	18	20	-2	Ya

40	18	20	-2	Ya
41	18	20	-2	Ya
42	18	20	-2	Ya
43	18	20	-2	Ya
44	18	20	-2	Ya
45	18	20	-2	Ya
46	18	20	-2	Ya
47	18	20	-2	Ya
48	17	19	-2	Ya
49	17	19	-2	Ya
50	17	22	-5	Ya
51	17	22	-5	Ya
52	17	22	-5	Ya
53	17	22	-5	Ya
54	17	22	-5	Ya
55	17	22	-5	Ya
56	17	22	-5	Ya
57	17	22	-5	Ya
58	17	22	-5	Ya
59	17	22	-5	Ya
60	17	23	-6	Ya
Rata-rata galat			-3,68	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Jumlah data tidak sesuai standar pabrik			0	
Jumlah data sesuai standar pabrik			60	

Berdasarkan Tabel 2, maka kemampuan rancangan alat pemantauan dalam mendeteksi PM_{2.5} saat dibandingkan dengan alat pembanding adalah mengalami galat rata-rata -3,68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sementara bila dimasukkan ke dalam standar pabrik, maka keseluruhan rekam data tersebut dinyatakan sesuai standar.

Kemudian, data pada Tabel 2 saat diaplikasikan pada Tabel 1 (batasan indikator kualitas udara) kolom indikator PM_{2.5}, maka kedua alat tersebut sama-sama menyimpulkan kategori kualitas udara dalam ruangan yang diukur adalah sedang (kurang dari 55,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Pembacaan PM₁₀: Berikut ini ditunjukkan data hasil perbandingan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan pembacaan alat hasil rancangan dan alat banding untuk polutan PM₁₀

Detik ke-	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Galat ($\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$)	Sesuai Standar Pabrik
	Alat Hasil Rancangan	Alat Banding		
1	19	26	-7	Ya
2	19	26	-7	Ya
3	19	26	-7	Ya
4	19	26	-7	Ya
5	19	26	-7	Ya
6	19	26	-7	Ya
7	19	28	-9	Ya
8	19	28	-9	Ya
9	19	28	-9	Ya
10	19	28	-9	Ya
11	19	28	-9	Ya
12	19	28	-9	Ya
13	18	28	-10	Ya
14	18	28	-10	Ya
15	18	28	-10	Ya
16	18	28	-10	Ya

17	18	27	-9	Ya
18	18	27	-9	Ya
19	19	27	-8	Ya
20	19	27	-8	Ya
21	19	27	-8	Ya
22	19	26	-7	Ya
23	19	26	-7	Ya
24	19	26	-7	Ya
25	18	26	-8	Ya
26	19	26	-7	Ya
27	19	26	-7	Ya
28	19	26	-7	Ya
29	19	26	-7	Ya
30	19	26	-7	Ya
31	19	26	-7	Ya
32	20	26	-6	Ya
33	19	26	-7	Ya
34	19	26	-7	Ya
35	20	26	-6	Ya
36	20	26	-6	Ya
37	20	26	-6	Ya
38	20	26	-6	Ya
39	20	26	-6	Ya
40	20	26	-6	Ya
41	20	26	-6	Ya
42	20	26	-6	Ya
43	20	26	-6	Ya
44	20	26	-6	Ya
45	20	26	-6	Ya
46	20	26	-6	Ya
47	20	26	-6	Ya
48	19	24	-5	Ya
49	19	24	-5	Ya
50	19	28	-9	Ya
51	19	28	-9	Ya
52	19	28	-9	Ya
53	19	28	-9	Ya
54	19	28	-9	Ya
55	19	28	-9	Ya
56	19	28	-9	Ya
57	19	28	-9	Ya
58	19	28	-9	Ya
59	19	30	-11	Ya
60	19	30	-11	Ya
Rata-rata galat			-7,67	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Jumlah data tidak sesuai standar pabrik			0	
Jumlah data sesuai standar pabrik			60	

Berdasarkan Tabel 3, maka kemampuan rancangan alat pemantauan dalam mendeteksi polutan PM_{10} saat dibandingkan dengan alat pembanding adalah mengalami galat rata-rata sebesar $-7,67\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sementara bila dimasukkan ke dalam standar pabrik, maka keseluruhan rekam data tersebut dinyatakan sesuai standar.

Kemudian, data pada Tabel 3 saat diaplikasikan pada Tabel 1 (batasan indikator kualitas udara) kolom indikator PM_{10} , maka kedua alat tersebut sama-sama menyimpulkan kategori kualitas udara dalam ruangan yang diukur adalah sehat (kurang dari $50\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Pembacaan CO

Dikarenakan tidak terdapat standar pabrik/manufaktur sensor ini, maka performa sensor menggunakan nilai 100 persen dikurangi rata-rata persentase galat. Berikut ini ditunjukkan data hasil perbandingan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan pembacaan alat hasil rancangan dan alat banding untuk polutan CO

Detik ke-	CO (ppm)		Gala (ppm)	Persentase Galat
	Alat Hasil Rancangan	Alat Banding		
1	3	3	0	0
2	3	3	0	0
3	3	3	0	0
4	3	3	0	0
5	3	3	0	0
6	4	3	1	45
7	4	3	1	45
8	4	3	1	33
9	4	3	1	45
10	3	3	0	0
11	3	3	0	0
12	3	3	0	0
13	3	3	0	0
14	3	3	0	0
15	4	3	1	45
16	4	3	1	33
17	3	2	1	50
18	3	2	1	50
19	3	2	1	50
20	3	2	1	50
21	2	2	0	0
22	2	2	0	0
23	2	2	0	0
24	2	2	0	0
25	2	2	0	0
26	2	2	0	0
27	2	3	-1	33
28	3	3	0	0
29	3	3	0	0
30	3	3	0	0
31	3	3	0	0
32	2	3	-1	33
33	2	3	-1	33
34	2	2	0	0
35	2	2	0	0
36	2	2	0	0
37	2	2	0	0
38	2	2	0	0
39	2	2	0	0
40	2	2	0	0
41	3	2	1	50
42	3	2	1	50
43	3	2	1	50
44	3	2	1	50
45	2	2	0	0
46	2	2	0	0
47	2	2	0	0
48	2	1	1	100
49	2	2	0	0
50	2	2	0	0

51	2	2	0	0
52	2	2	0	0
53	1	2	-1	50
54	1	2	-1	50
55	1	2	-1	50
56	1	2	-1	50
57	1	2	-1	50
58	2	2	0	0
59	2	2	0	0
60	1	2	-1	50
Rata-rata			-0,12	19,11
Kemampuan rancangan alat (100% - rata-rata persen galat)				80,89%

Berdasarkan Tabel 4, maka persentase kemampuan rancangan alat pemantauan dalam mendeteksi polutan CO saat dibandingkan dengan alat banding adalah 80,89% dengan rata-rata galat adalah -0,12 ppm.

Kemudian, data pada Tabel 4 saat diaplikasikan pada Tabel 1 (batasan indikator kualitas udara) kolom indikator CO, maka alat hasil rancangan sempat mengkategorikan kualitas udara dalam ruangan adalah sedang pada detik ke-6 s.d 9 dan detik ke-15 s.d 16, sedangkan alat pembading mengkategorikan kualitas udara pada 60 detik tersebut adalah sehat seluruhnya (kurang dari 3,493 ppm).

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diperoleh berdasarkan temuan penelitian, analisis, dan desain perancangan alat pemantauan kualitas udara dalam ruangan sebagai pemantauan berkelanjutan adalah telah dirancang alat pemantauan kualitas udara berkelanjutan dalam ruangan menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai otak utama, sensor ZH03B sebagai pendeteksi polutan *particulate matter* (PM_{2.5} dan PM₁₀), dan sensor Fermion CO untuk mendeteksi karbon monoksida. Alat pemantauan dilengkapi penyimpanan berbasis kartu *micro-SD* dan Google Sheets serta pengguna dapat mengakses keluaran deteksi melalui *web* yang dibagikan dari Google Sheets. Hasil pengujian kemampuan akurasi alat pemantauan pada setiap polutan saat dibandingkan dengan alat pembading adalah mengalami galat rata-rata -3,68µg/m³ untuk polutan PM₂ dan -7,67µg/m³ untuk polutan PM₁₀, serta keduanya masih sesuai standar manufaktur modul sensor partikel ZH03B. Sementara itu, persentasi akurasi untuk polutan CO adalah 80,89% dan tidak ada acuan standar nilai akurasi manufaktur untuk sensor fermion CO yang digunakan.

Di masa depan, penulis berharap penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut. Pengembangan selanjutnya dapat meliputi penambahan aksi otomatis pada perangkat rumah untuk pengendalian

kualitas udara dan modifikasi desain guna meningkatkan fungsi dan keandalan perangkat pemantauan kualitas udara dalam ruangan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. J. Frostad et al., "Mapping development and health effects of cooking with solid fuels in low-income and middle-income countries, 2000–18: a geospatial modelling study," *Lancet Glob Health*, vol. 10, no. 10, pp. e1395–e1411, Oct. 2022, doi: 10.1016/S2214-109X(22)00332-1.
- [2] H. Holipah, H. W. Sulistomo, and A. Maharani, "Tobacco smoking and risk of all-cause mortality in Indonesia," *PLoS One*, vol. 15, no. 12, p. e0242558, Dec. 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0242558.
- [3] S. Cao, C. Yang, Y. Gan, and Z. Lu, "The Health Effects of Passive Smoking: An Overview of Systematic Reviews Based on Observational Epidemiological Evidence," *PLoS One*, vol. 10, no. 10, p. e0139907, Oct. 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0139907.
- [4] L. S. Flor et al., "Health effects associated with exposure to secondhand smoke: a Burden of Proof study," *Nat Med*, vol. 30, no. 1, pp. 149–167, Jan. 2024, doi: 10.1038/s41591-023-02743-4.
- [5] J. Kim et al., "Smoking and passive smoking increases mortality through mediation effect of cadmium exposure in the United States," *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, p. 3878, Mar. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-30988-z.
- [6] G. Syuhada et al., "Impacts of Air Pollution on Health and Cost of Illness in Jakarta, Indonesia," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 20, no. 4, p. 2916, Feb. 2023, doi: 10.3390/ijerph20042916.
- [7] I. Manisalidis, E. Stavropoulou, A. Stavropoulos, and E. Bezirtzoglou, "Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review," *Front Public Health*, vol. 8, Feb. 2020, doi: 10.3389/fpubh.2020.00014.
- [8] Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 Tentang Indeks Standar Pencemar Udara. Jakarta: Direktorat Jenderal Peraturan Perundang-Undangan Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia, 2020.
- [9] Sholahudin, Y. Damey, W. Fauji, and M. A. S. Yudono, "Indoor Air Quality Monitoring System with Automation: A Review," in 2023 IEEE 9th International Conference on Computing, Engineering and Design (ICCED), IEEE, Nov. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCED60214.2023.10425129.
- [10] F. Pradityo and N. Surantha, "Indoor Air Quality Monitoring and Controlling System based on IoT and Fuzzy Logic," in 2019 7th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT), IEEE, Jul. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICoICT.2019.8835246.
- [11] S. Dhanalakshmi, M. Poongothai, and K. Sharma, "IoT Based Indoor Air Quality and Smart Energy Management for HVAC System," *Procedia Comput Sci*, vol. 171, pp. 1800–1809, 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.04.193.
- [12] M. Zhou, A. M. Abdulghani, M. A. Imran, and Q. H. Abbasi, "Internet of Things (IoT) Enabled Smart Indoor Air Quality Monitoring System," in Proceedings of the 2020 International Conference on Computing, Networks and Internet of Things, New York, NY, USA: ACM, Apr. 2020, pp. 89–93. doi: 10.1145/3398329.3398342.
- [13] Q. Aini, U. Rahardja, D. Manongga, I. Sembiring, M. Hardini, and H. Agustian, "IoT-Based Indoor Air Quality Using Esp32," in 2022 IEEE Creative Communication and Innovative Technology (ICCIT), IEEE, Nov. 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICCIT55355.2022.10119001.

- [14] Sharp Corporation, "GP2Y1010AU0F Dust Sensor Datasheet," Sharp Corporation Sheet Number E4-A01501EN. Accessed: Mar. 02, 2024. [Online]. Available: https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/gp2y1010au_e.pdf
- [15] K. Bučar, J. Malet, L. Stabile, J. Pražnikar, S. Seeger, and M. Žitnik, "Statistics of a Sharp GP2Y Low-Cost Aerosol PM Sensor Output Signals," *Sensors*, vol. 20, no. 23, p. 6707, Nov. 2020, doi: 10.3390/s20236707.
- [16] A. Vidwans and P. Biswas, "A Systematic, Cross-Model Evaluation of Ensemble Light Scattering Sensors," *Aerosol Air Qual Res*, vol. 24, no. 2, p. 230129, 2024, doi: 10.4209/aaqr.230129.
- [17] D. A. Hapidin, C. Saputra, D. S. Maulana, M. M. Munir, and K. Khairurrijal, "Aerosol Chamber Characterization for Commercial Particulate Matter (PM) Sensor Evaluation," *Aerosol Air Qual Res*, vol. 19, no. 1, pp. 181–194, 2019, doi: 10.4209/aaqr.2017.12.0611.
- [18] World Health Organization, WHO guidelines for indoor air quality: household fuel combustion. World Health Organization, 2014. Accessed: Jan. 15, 2024. [Online]. Available: <https://iris.who.int/handle/10665/141496>
- [19] Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077/MENKES/PER/V/2011 Tentang Pedoman Penyehatan Udara Dalam Ruang Rumah. Jakarta: Direktorat Jenderal Peraturan Perundang-Undangan Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia, 2011.
- [20] AMETEK Land Instruments, Technical Bulletin 03: Calculations, Normalisations, Conversions, vol. 3. 2004. Accessed: Mar. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.ametek-land.com/>
- [21] Google Workspace, "Google Sheets API Overview." Accessed: Jan. 15, 2024. [Online]. Available: <https://developers.google.com/sheets/api/guides/concepts>
- [22] D. Srivastava, "An Introduction to Data Visualization Tools and Techniques in Various Domains," *International Journal of Computer Trends and Technology*, vol. 71, no. 4, pp. 125–130, Apr. 2023, doi: 10.14445/22312803/IJCTT-V71I4P116.
- [23] L. J. Ekanayake, D. Ihalage, and Sachith. P. Abyesundara, "Performance Evaluation of Google Spreadsheet over RDBMS through Cloud Scripting Algorithms," in 2021 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI), IEEE, Jan. 2021, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICCCI50826.2021.9402432.
- [24] Espressif Systems, "ESP32 Series Datasheet." Accessed: Jan. 25, 2024. [Online]. Available: www.espressif.com
- [25] Espressif Systems, "ESP32 ADC (Analog to Digital Converter) Documentation," Espressif. Accessed: Mar. 04, 2024. [Online]. Available: <https://espressif-docs.readthedocs-hosted.com/projects/arduino-esp32/en/latest/api/adc.html>
- [26] Winsen Sensor, "Winsen ZH03B Laser Dust Sensor Module Datasheet," Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd. Accessed: Mar. 02, 2024. [Online]. Available: [https://www.winsen-sensor.com/d/files/zh03b-laser-dust-module-v2_1\(2\).pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/zh03b-laser-dust-module-v2_1(2).pdf)
- [27] DFRobot, "SKU:SEN0564 Fermion MEMS CO." Accessed: Jan. 28, 2024. [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/SKU_SEN0564_Fermion_ME_MS_CO_Sensor_breakout
- [28] S. Systech, "SOLOMON SYSTECH SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA SSD1306 128 x 64 Dot Matrix OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller," 2008. [Online]. Available: <http://www.solomon-systech.com>
- [29] Shopee, "Wifi Portable Air Quality Detector 9in1 PM2.5 PM10 HCHO TVOC CO CO2 Monitor." Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: https://shopee.co.id/product/88764779/25650990374?d_id=5ec5b&uls_trackid=50vgketg00hm&utm_content=oMozSgE7RxQeDewwzymYHTKy77m