Vol. 11, No. 2 – Oktober 2026
ISSN: 2503-5274(p), 2657-1900(e)

Jurnal Fisika
Fisika Sains dan Aplikasinya

SISTEM MONITORING KUALITAS UDARA BERBASIS *INTERNET OF THINGS* (IoT) (Studi Kasus: Daerah Sekitaran Tempat Pemrosesan Akhir Kelurahan Alak)

Natalia A. Messakh, Ari Bangkit S. Umbu dan Abdul Wahid
Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto Penfui, Kota Kupang, Nusa Tenggara Timur, Kode Pos 85001, Indonesia
E-mail: messakhnatalia@gmail.com

Abstrak

Volume sampah yang terus meningkat di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Alak memicu kenaikan emisi gas seperti CO_2, CH_4, dan partikulat debu yang dapat menurunkan kualitas udara serta menimbulkan risiko kesehatan. Untuk memantau kondisi udara secara cepat dan berkelanjutan, penelitian ini mengembangkan sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang mampu membaca beberapa parameter lingkungan secara simultan. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor AHT10 (suhu dan kelembapan), GP2Y1010AU0F (PM10), MQ-135 (CO_2), dan MQ-4 (CH_4). Hasil pengukuran ditampilkan melalui layar OLED dan dikirimkan ke aplikasi Blynk sehingga dapat dipantau dari jarak jauh melalui perangkat seluler. Kalibrasi dilakukan untuk meningkatkan ketelitian sensor dengan membandingkannya dengan alat standar. Sensor AHT10 menunjukkan akurasi suhu sebesar 99,20% dan akurasi kelembapan 92,98%, sedangkan sensor lainnya juga menunjukkan performa baik setelah proses penyesuaian. Pengujian lapangan pada dua lokasi—sekitar TPA dan di dalam TPA—mengungkapkan perbedaan yang jelas pada kadar polutan, di mana konsentrasi CH_4, CO_2, dan debu lebih tinggi di area dalam TPA. Hasil penelitian menegaskan bahwa sistem mampu memberikan pemantauan kualitas udara yang akurat, real-time, dan dapat diakses secara portabel melalui IoT, sehingga berpotensi mendukung pengawasan lingkungan di TPA Alak.

Kata kunci*: Internet of Things (IoT); Kualitas Udara; ESP32, Sensor Gas; TPA Alak*

Abstract

The ever-increasing volume of waste at the Alak Landfill (TPA) has triggered an increase in gas emissions such as CO_2, CH_4, and dust particulates, which can degrade air quality and pose health risks. To monitor air conditions quickly and continuously, this study developed an Internet of Things (IoT)-based air quality monitoring system capable of reading several environmental parameters simultaneously. The system uses an ESP32 microcontroller integrated with AHT10 (temperature and humidity), GP2Y1010AU0F (PM10), MQ-135 (CO_2), and MQ-4 (CH_4) sensors. Measurement results are displayed on an OLED screen and sent to the Blynk application so they can be monitored remotely via mobile devices. Calibration was performed to improve sensor accuracy by comparing them with standard tools. The AHT10 sensor demonstrated a temperature accuracy of 99.20% and a humidity accuracy of 92.98%, while the other sensors also performed well after the adjustment process. Field testing at two locations—around the landfill and inside the landfill—revealed clear differences in pollutant levels, with CH_4, CO_2, and dust concentrations higher in the inner area of the landfill. The results confirmed that the system is capable of providing accurate, real-time, and portable air quality monitoring via IoT, potentially supporting environmental monitoring at the Alak landfill.

Keywords: *Internet of Things (IoT); Air Quality, ESP32; Gas Sensor; Alak Landfill*

PENDAHULUAN

Lingkungan yang bersih memiliki peranan penting dalam menjaga kesehatan manusia, salah satunya melalui ketersediaan udara bersih yang dibutuhkan dalam proses pernapasan. Udara yang tercemar dapat menimbulkan berbagai gangguan kesehatan meskipun dampaknya tidak selalu dirasakan

secara langsung. Menurut Undang-Undang Nomor 23 Tahun 1997, pencemaran udara diartikan sebagai masuknya zat, energi, atau komponen lain akibat aktivitas manusia ke dalam udara sehingga kualitasnya menurun hingga mencapai tingkat tertentu dan dapat merugikan kehidupan makhluk hidup. Pada kenyataannya, tingkat polusi udara terus meningkat seiring perkembangan aktivitas industri, transportasi, pembakaran sampah, dan kegiatan rumah tangga. Selain aktivitas manusia, pencemaran udara juga dapat dipicu oleh proses alam seperti kebakaran hutan, letusan gunung berapi, serta dekomposisi sampah [1].

Sampah merupakan sisa aktivitas manusia yang dapat bersifat organik maupun anorganik dan berpotensi mengandung bahan berbahaya [2]. Penumpukan sampah pada Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) memicu berbagai emisi gas berbahaya seperti metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) yang dilepaskan melalui proses pembusukan. Selain itu, perubahan mikroklimat berupa peningkatan suhu dan kelembaban dapat mempercepat produksi gas berbahaya. Aktivitas di lingkungan TPA juga menghasilkan partikulat debu yang dapat berdampak buruk pada kesehatan masyarakat jika terhirup dalam jangka panjang. Kombinasi gas berbahaya, peningkatan partikulat debu, serta kondisi lingkungan yang tidak stabil menjadikan kualitas udara di sekitar TPA rentan berada pada tingkat tidak aman.

Semakin meningkatnya volume sampah yang masuk setiap hari menyebabkan kebutuhan sistem pemantauan kualitas udara secara real-time menjadi semakin mendesak. Pemantauan manual memiliki keterbatasan waktu, ruang, dan konsistensi, sehingga dibutuhkan teknologi yang mampu bekerja otomatis, efisien, dan dapat diakses dari jarak jauh. Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) memberikan peluang besar dalam penyediaan sistem pemantauan kualitas udara yang terintegrasi dengan platform digital seperti Blynk sehingga data dapat dipantau melalui smartphone.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT dengan berbagai sensor dan mikrokontroler. Namun, beberapa sistem masih memiliki keterbatasan seperti akses perangkat lunak yang rumit, sensor yang hanya mampu membaca satu jenis gas, atau kurang optimal dalam akurasi pengukuran. Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini merancang sistem monitoring kualitas udara pada TPA Alak berbasis IoT dengan mengintegrasikan beberapa parameter sekaligus, yaitu suhu dan kelembaban (sensor AHT10), partikulat debu PM10 (GP2Y1010AU0F), gas CO_2 (MQ-135), dan gas CH_4(MQ-4), menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali dan Blynk sebagai media pemantauan jarak jauh.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT pada TPA Alak serta mengetahui tingkat akurasi sistem setelah dilakukan proses kalibrasi terhadap setiap sensor. Dengan adanya sistem ini, diharapkan masyarakat maupun pihak pengelola dapat memperoleh informasi kualitas udara secara cepat, akurat, dan real-time sehingga dapat mendukung upaya mitigasi risiko kesehatan akibat polusi udara di kawasan TPA.

Polusi Udara

Pencemaran udara terjadi ketika bahan atau zat asing masuk ke atmosfer dalam jumlah berlebih dan bertahan dalam waktu lama sehingga mengganggu keberlangsungan hidup manusia, hewan, dan tumbuhan. Polusi udara umumnya berasal dari aktivitas manusia seperti emisi kendaraan bermotor, proses industri, pembangkit listrik, pembakaran sampah, serta peningkatan volume sampah yang menumpuk [3]. Semakin bertambahnya populasi manusia, semakin meningkat pula produksi limbah dan buangan yang berpotensi mencemari udara.

Paparan polutan dapat terjadi melalui saluran pernapasan maupun pencernaan, dan zat berbahaya tersebut dapat menyebar dalam sirkulasi tubuh. Polusi udara diketahui memicu berbagai gangguan kesehatan seperti Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA), asma, pneumonia, bronkopneumonia, Penyakit Paru Obstruktif Kronik (PPOK), hingga serangan jantung. Selain itu, kualitas udara yang buruk berkontribusi terhadap kontaminasi makanan dan air.

Menurut WHO, udara dapat mengandung berbagai zat berbahaya seperti karbon monoksida, karbon dioksida, formaldehida, jamur, virus, bakteri, dan partikulat debu. Dalam batas tertentu, tubuh

mampu menetralkan zat-zat tersebut, namun jika konsentrasinya melebihi ambang normal maka dapat menimbulkan efek kesehatan yang signifikan.

Saat ini, pemantauan kualitas udara umumnya masih dilakukan secara manual oleh petugas kesehatan. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) menjadi solusi efektif karena memungkinkan pengukuran real-time dan pemantauan jarak jauh melalui platform digital. Beberapa penelitian telah mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara yang meliputi parameter seperti CO_2, debu, asap, CO, dan H_2 [4].

Tempat Pemrosesan Akhir (TPA)

Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) merupakan tempat untuk menimbun sampah dan merupakan bentuk tertua perlakuan sampah. Beberapa TPA masih melakukan pengelolaan sampah menggunakan metode yang dibuang begitu saja (*open dumping*) [5]. Selama ini pembuangan sampah selalu dititik beratkan pada TPA, sehingga beban pencemaran sampah yang menjadi perhatian besar adalah di sekitar TPA. Secara fisik yang perlu diperhatikan adalah proses penyebaran dan pemancaran gas di TPA, serta pergerakan hasil dekomposisi sampah di TPA (Rizqi P. M.2017) [6].

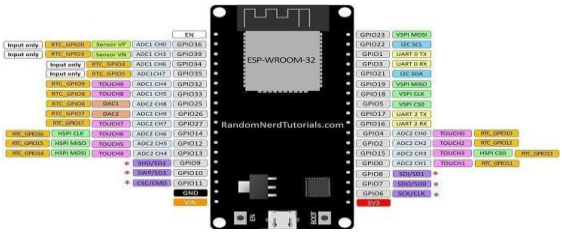
Proses dekomposisi sampah organik di TPA berpotensi menyebabkan pencemaran udara. Proses dekomposisi sampah di TPA menghasilkan gas yang disebut dengan landfill gas (LFG). LFG terdiri dari gas CH_4, CO_2, N2, CO_2 dan sedikit gas Nonmethane Organic compounds (NMOCs) seperti benzene, vinyl chloride, chloroform dll. Selain itu gas NH3, O2, senyawa toksik seperti merkuri (Hg), dan H2S juga sering ditemukan dalam gas di TPA [7].

Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan sebuah inovasi yang dirancang untuk menghubungkan berbagai perangkat elektronik agar dapat membentuk satu sistem yang saling berkomunikasi dan bertukar data dengan memanfaatkan jaringan internet sebagai media utama [7]. Secara umum, IoT berfungsi sebagai sarana untuk memudahkan proses pemantauan dan pengendalian terhadap objek-objek fisik. Penerapannya sangat luas dan dapat digunakan di hampir seluruh aspek kehidupan, mulai dari kebutuhan pribadi, perkantoran, layanan kesehatan, sektor pariwisata, industri, transportasi, konservasi satwa, pertanian, peternakan, hingga bidang pemerintahan.

NodeMCU Esp32

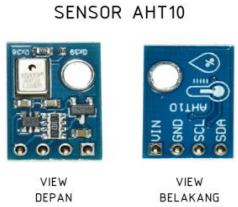
ESP32 merupakan salah satu mikrokontroler keluaran Espressif dan merupakan penerus dari ESP8266. ESP32 ini memiliki keunggulan yang tidak dimiliki oleh arduino, diantaranya yaitu memiliki fitur wifi dan Bluetooth 4.2 yang sudah tertanam di dalam board itu sendiri. Kemudian ESP32 ini memiliki kecepatan prosesor yang cukup cepat yang sudah Dual-Core 32-bit dengan kecepatan 160/240 MHz [8]. Pinout pada board ESP32 DevKit dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Pinout ESP32 DevKit

Sensor AHT10

Sensor AHT10 adalah sensor alternatif sensor suhu dan kelembaban selain sensor DHT11 atau LM35 yang dimana dapat diakses menggunakan komunikasi i2c dengan harga yang murah dan presisi. Sehingga untuk pengkabelannya lebih simpel, dan tingkat pembacaan datanya lebih stabil. Komunikasi i2c terdiri dari Serial Data (SDA) dan Serial Clock (SCL) yang membawa informasi data antara mikrokontroler dan sensornya. Sensor AHT 10 dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Sensor AHT10

Sensor GP2Y1010AU0F

Debu, yang sering disebut materi partikulat (PM_{10}), adalah partikel kecil dengan diameter kurang dari 10 mikrometer yang melayang di udara. Partikel-partikel ini dapat berasal dari berbagai sumber, seperti asap

kendaraan, emisi industri, dan aktivitas manusia lainnya.

Sensor GP2Y1010AU0F hadir sebagai solusi untuk memantau kadar debu di udara. Sensor ini memanfaatkan sistem penginderaan optik, yaitu dengan cara hamburan cahaya. Bentuk fisik sensor GP2Y1010AU0F dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Sensor GP2Y1010AU0F

Sensor MQ-4

Sensor MQ-4 merupakan sensor gas metana (CH_4) yang berfungsi untuk mengukur konsentrasi gas metana di udara. Sensor ini memiliki sensitivitas tinggi terhadap gas metana dan gas mudah terbakar lainnya seperti propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}), serta memiliki waktu respon yang cepat. Keluaran yang dihasilkan oleh sensor ini berupa sinyal analog. Sensor ini membutuhkan tegangan direct current (DC) sebesar 5V untuk beroperasi.

Pada sensor MQ-4 terdapat elemen semikonduktor SnO_2 yang resistansinya (Rs) akan berubah ketika terpapar gas metana. Sensor ini juga dilengkapi dengan pemanas (heater) yang berfungsi menjaga kestabilan kerja sensor dan membersihkan permukaannya dari kontaminan udara luar. Sensor MQ-4 mampu mendeteksi kadar gas metana dalam udara dengan cakupan antara 200 hingga 10.000 ppm.



Gambar 4. Sensor MQ-4

Sensor MQ-135

Sensor MQ-135 adalah sensor gas yang dapat mendeteksi kadar gas-gas berbahaya yang dapat mengganggu kualitas udara dan pernapasan manusia. Sensor MQ-135 memberikan hasil deteksi kualitas udara berupa perubahan pada nilai resistansi analog pada pin outputnya. Sensor MQ-135 memiliki 4 pin, yang terdiri dari; VCC (5 Volt), GND, DOUT (Digital Output), dan AOUT (Analog Output). Sensor MQ-135 dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Sensor MQ-135

METODE

Perancangan dilaksanakan di Laboratorium Fisika dan Pengujian dilaksanakan di TPA Alak, Kelurahan Alak, Kec. Alak, Kota Kupang, Nusa Tenggara Timur pada Maret–November 2025.

Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

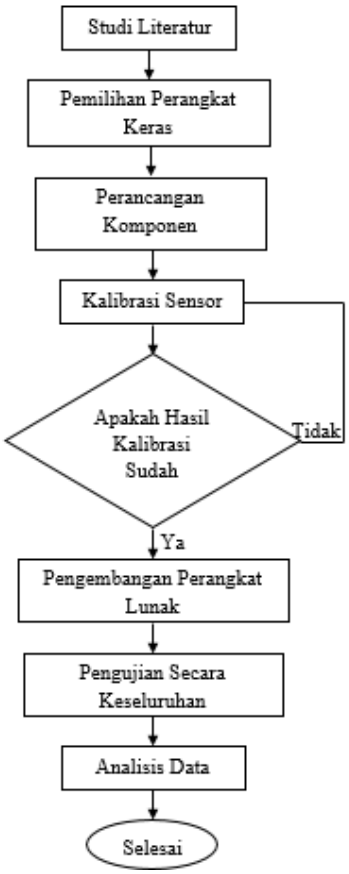
Pada perancangan alat dibutuhkan perangkat penunjang yang terdiri dari *software* dan *hardware. Software* yang digunakan yaitu Arduino IDE *(Integrated Development Environment),*atau Arduino *software.* Sedangkan *hardware* yang digunakan adalah laptop, NodeMCU ESP32, Sensor GP2Y1010AU0F (sensor Partikulat Debu), Sensor AHT10 (suhu dan Kelembaban Udara), Sensor MQ-4 (sensor CH_4), MQ-135 (Sensor CO_2), lcd oled, serta kabel jumper secukupnya.

Prosedur Penelitian

Tahapan tahapan penelitian system monitoring kualitas udara Pada TPA Alak berbasis IoT dimulai dengan pengumpulan referensi yang cocok dengan kasus atau permasalahan yang ditemukan. Dalam metode ini pengumpulan data dilakukan dengan cara membaca buku-buku, jurnal,maupun situs situs dari internet yang system monitoring kualitas udara Pada TPA Alak berbasis IoT kemudian dilanjutkan denga penentuan perangkat keras (hadware) yang digunakan seperti ESP-32 sebagai kontroler, serta bebrapa sensor sebagai input, seperti Sensor GP2Y1010AU0F, AHT 10, Mq-4 dan Mq-135.Setelah itu, dilanjutkan dengan dengan merangkai komponen, dan melakukan pengujian terhadap komponen yang digunakan, kemudian dilanjutkan dengan analisis data serta menari kesimpulan pada akhir penelitian.

Tahapan tahapan penelitian dalam melakukan penelitan ini disusun dalam

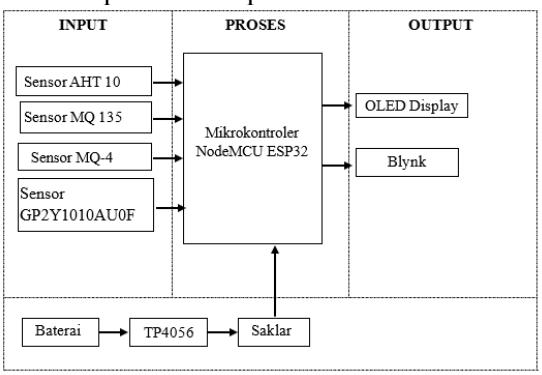
flowchart penelitian seperti pada gambar 6 berikut.



Gambar 6. Proses Penelitian

Perancangan Perangkat Keras

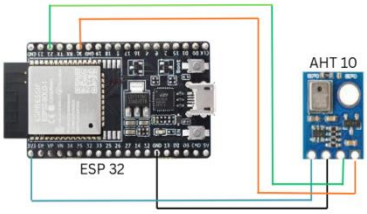
Perancangan perangkat keras pada sistem Monitoring kualitas Udara berbasis IoT dimulai dengan pembuatan diagram blok sistem seperti dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan Pengukuran Suhu Dan Kelembaban Menggunakan AHT10

Pada Perancangan ini menggunakan sensor AHT 10 bersama ESP32 memungkinkan kita untuk memantau Suhu dan kelembaban udara secara real-time dengan cara yang tahan lama dan akurat. Sensor ini di rancang untuk mengukur suhu dan kelembaban udara ,berbeda dengan DHT 22, DHT11 dan LM35 karena penghubungannya yang lebih sederhana. Selain itu, pembacaan data dari sensor ini juga cenderung lebih stabil. Komunikasi I2C, yang terdiri dari Serial Data (SDA) dan Serial Clock (SCL), digunakan untuk mengirimkan informasi data antara mikrokontroler dan sensor AHT10. Penggunaan komunikasi I2C dalam sensor AHT10 memungkinkan pertukaran data yang efisien antara mikrokontroler dan sensor. Ini memberikan solusi yang handal dan praktis dalam mengukur suhu dan kelembaban dalam berbagai aplikasi seperti pemantauan lingkungan, sistem kontrol iklim, dan lain sebagainya. Rangkaian Perancangan Pengukuran suhu dan kelembaban menggunakan sensor AHT 10 di tunjukan pada gambar 8.



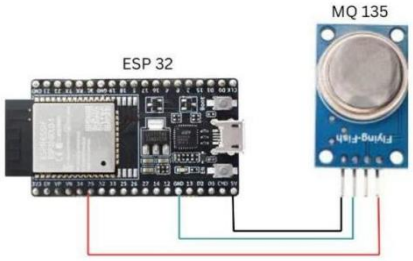
Gambar 8. Perancangan pengukuran suhu dan kelembaban udara menggunakan sensor AHT10

Berdasarkan Gambar 8 Penyusunan rangkaiannya, sensor AHT10 disambungkan ke ESP32 dengan menghubungkan pin VCC sensor ke pin 3V3 pada ESP32, Pin GND sensor ke pin GND ESP32, Pin SCL Sensor ke pin GPIO 22 (SCL) pada ESP32, dan pin SDA sensor ke GPIO 21 (SDA) pada ESP32.

Perancangan Pengukuran Kadar CO_2

Pada perancangan blok pengukuran kadar CO_2 menggunakan sensor MQ 135 yang merupakan sensor gas yang mempunyai keluaran dual output yaitu output digital (dengan op-amp sebagai komparator yang sensitifitas / offsetnya bisa anda atur dengan memutar trimpott) dan output analog yaitu output langsung dari sensor yang dapat anda hubungkan dengan ADC. Sensor tipe MQ-135 disebut sebagai sensor pengatur kualitas udara, karena sensor ini mempunyai fungsi dan penutup yang luas untuk mendeteksi kualitas udara dari gas yang mencemari

lingkungan atau membahayakan kesehatan seperti amonia, senyawa aromatik, belerang, uap benzena, asap, NH3, NOx, alkohol, dan juga CO_2.Rangkaian Perancangan Pengukuran Kadar CO2 menggunakan sensor MQ 135 di tunjukan pada Gambar 9.



Gambar 9. Perancangan Blok Pengukuran kadar CO_2

Berdasarkan Gambar 9 rangkaian Ini dapat disusun dengan menyambungkan pin VCC sensor ke pin 5V pada ESP32, Pin GND sensor ke pin GND ESP32,Pin DO sensor ke PIN DO ESP32 dan pin AO sesnsor ke Pin GPIO 35 ESP32.

Perancangan Blok Pengukuran CH_4

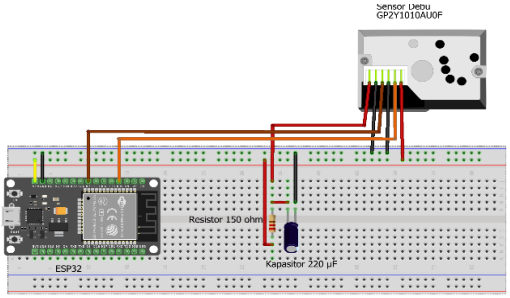
Kadar CH_4 Pada perancangan blok pengukuran kadar CH_4 menggunakan sensor MQ 4 yaitu sensor gas yang memiliki Aouput digital dan juga analog, Sensor ini memiliki sensitivitas tinggi, stabil, dan usia pakai yang lama. Rangkaian Ini dapat disusun dengan menyambungkan pin VCC sensor ke pin 5V pada ESP32, Pin GND sensor ke pin GND ESP32 dan pin AO sesnsor ke Pin GPIO 33 ESP32 dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Perancangan Blok Pengukuran kadar CH_4

Perancangan Partikulat debu

Perancangan blok pengukuran partikulat debu menggunakan. Sensor GP2Y1010AU0F bekerja dengan memanfaatkan prinsip hamburan cahaya. Di dalam sensor terdapat sebuah dioda laser inframerah (IR LED) yang memancarkan cahaya. Ketika ada partikel debu yang melewati jalur cahaya, partikel tersebut akan menghamburkan cahaya. Hamburan cahaya ini kemudian ditangkap oleh sebuah fotodioda di dalam sensor. Semakin banyak debu yang melewati jalur cahaya, semakin banyak pula cahaya yang dihamburkan, dan semakin besar pula sinyal yang dihasilkan oleh fotodioda. Sinyal ini kemudian diolah oleh sensor untuk menghasilkan output berupa nilai konsentrasi debu.Rangkaian Perancangan Pengukuran Partikulat debu menggunakan sensor GP2Y1010AU0F di tunjukan pada Gambar 11.



Gambar 11. Perancangan Blok Pratikulat Debu

Berdasarkan Gambar 11 rangkain Disusun V-LED (Pin 1) Terhubung ke resistor 150 Ohm, lalu ke 5V (VCC) ESP32 (Ini berfungsi untuk memberi daya pada LED di dalam sensor),LED-GND (Pin 2) Terhubung ke GND ESP32 (Ground untuk LED internal sensor),LED- (Pin 3) Terhubung ke pin GPIO ESP32 (untuk mengontrol LED sensor),VOUT (Pin 4) Terhubung ke pin analog ESP32 (Digunakan untuk membaca data keluaran Rangkaian Ini dapat disusun dengan menyambungkan pin VCC sensor ke pin 3V3 pada ESP32, Pin GND sensor ke pin GND ESP32 dan pin AO sesnsor ke Pin GPIO 33 ESP32 dapat dilihat pada Gambar 11.

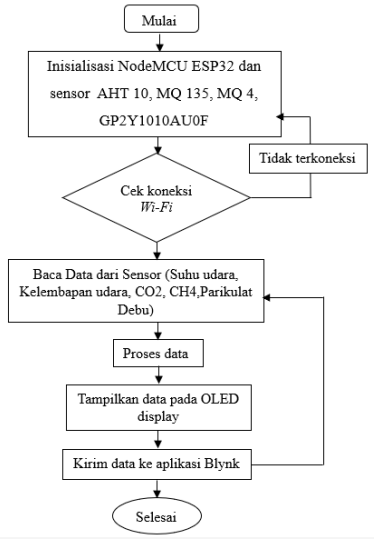
Perancangan Perangkat Lunak

Perancangn software untuk sistem pengukuran suhu dan kelembanban udara, suhu, partikulat debu, dan Kadar CO Perancangan perangkat lunak ini berfokus pada sistem pemantauan otomatis yang memanfaatkan beberapa sensor untuk suhu dan kelembaban udara, Partikulat debu,Kadar CO. Pada tahap awal, dilakukan inisialisasi terhadap tiga sensor utama: seperti AHT 10 yang membaca suhu dan kelembaban udara, sensor GP2Y1014AU0 untuk mengukur partikulat, sensor MQ-7 untuk mengukur

kadar CO, dan MQ-135 Untuk mengukur CO_2.

Setelah inisialisasi, sensor-sensor tersebut akan mulai mengukur parameter-parameter penting itampilkan pada LCD sehingga pengguna dapat melihat Suhu dan kelembaban Udara, Partikulat debu, Kadar secara real-time. Selain itu, data ini juga dikirim ke aplikasi Blynk, memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi tersebut dari jarak jauh menggunakan smartphone.

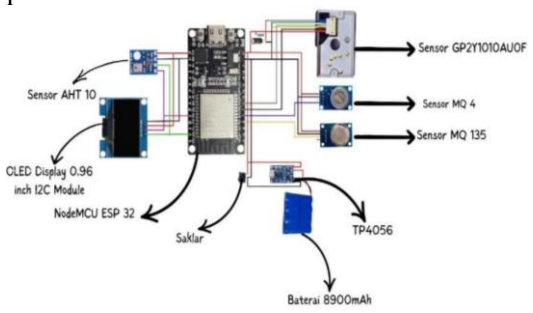
Sistem ini bekerja dalam siklus yang terus-menerus, di mana setelah satu kali pembacaan sensor selesai, sistem akan mengulangi proses pengukuran secara berkala untuk memastikan bahwa kondisi lingkungan serta Udara pada TPA Alak selalu dalam pengawasan. Perancangan perangkat lunak (*Software*) dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Diagram Alir Sistem

Perancangan Keseluruhan

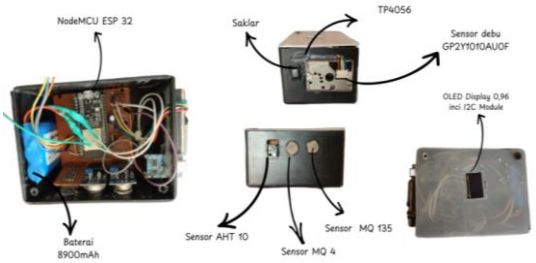
Pada Perancangan Sistem Keseluruhan dari sistem monotoring kualitas udaran berbasis IoT terdiri dari Mikrokontroler ESP-32, Sensor Debu,Sensor CH_4, sensor CO_2 ,dan sensor suhu dan kelembaban udara. Rangkaian sistem Keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Perancangan Keseluruhan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perancangan Perangkat Keras

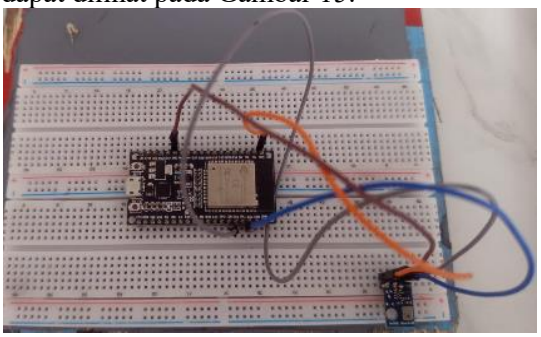


Gambar 14. Hasil Perancangan Lintasan Robot

Gambar 14 menunjukkan bentuk fisik dari alat sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang telah berhasil dirancang dan direalisasikan. Alat ini berfungsi untuk memantau parameter kualitas udara seperti suhu, kelembapan, konsentrasi gas berbahaya (CO_2, CH_4), serta Partikulat debu debu secara real-time.

Hasil Kalibrasi Sensor AHT10

Hasil perancangan sensor AHT10 untuk mengukur suhu dan kelembaban tanah dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15.Hasil Perancangan Sensor AHT10

Berdasarkan datasheet, suhu yang dapat diukur AHT10 yaitu dengan rentang -40 sampai 80°C dengan tingkat toleransi keakuratan sensor suhu sebesar ± 0.3°C. Kelembaban yang dapat diukur dari 0% hingga 100% dengan tingkat toleransi keakuratansebesar ± 2%. Sensor AHT10 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara dalam sistem ini. Sensor ini terhubung dengan NodeMCU ESP32, yang membaca data dan mengolahnya sebelum menampilkan hasil pada OLED display serta mengirimkannya ke aplikasi Blynk melalui *Wi-Fi*. Dalam perancangan ini, pin VCC dari sensor AHT10 dihubungkan ke pin 3.3V pada NodeMCU ESP32 sebagai sumber daya, Pin GND ke Pim GND ESP32, pin SDA ke GPIO

21, dan pin SCL ke GPIO 22. Dengan konfigurasi ini, ESP32 mengambil data suhu dan kelembaban udara dari sensor AHT10 kemudian menampilkannya secara real-rime melalui layar OLED.

Kalibrasi dilakukan untuk menyesuaikan pembacaan sensor AHT10 dengan alat ukur standar, yaitu *Mini Temperature Humidity Meter*. Gambar 4.2 menunjukkan konfigurasi pemasangan sensor dan alat ukur standar dalam proses pengukuran suhu dan kelembapan udara. Data hasil pengukuran disajikan dalam Tabel 1 dan Tabel 2. Pengukuran dilakukan sebanyak 30 kali untuk memperoleh data suhu dan kelembapan udara.

Tabel 1. Hasil Pembacaan Suhu Udara Menggunakan Sensor AHT10

Suhu Udara			
Alat Ukur (°C)	Sensor (°C)	Persentase Error (%)	Akurasi (%)
21,7	21,3	1,84	98,16
22,8	22,5	1,32	98,68
23,5	22,7	3,40	96,60
24,7	24,8	0,40	99,60
25,6	25,7	0,39	99,61
26,6	26,8	0,75	99,25
27,5	27,7	0,73	99,27
28,7	28,8	0,35	99,65
29,7	29,8	0,34	99,66
30,5	30,6	0,33	99,67
31,6	31,7	0,32	99,68
32,5	32,6	0,31	99,69
33,8	33,9	0,30	99,70
34,4	34,6	0,58	99,42
35,6	35,7	0,28	99,72
36,4	36,5	0,27	99,73
37,5	36,6	2,40	97,60
38,2	38,9	1,83	98,17
39,5	38,6	2,28	97,72
40,6	40,7	0,25	99,75
41,3	41,5	0,48	99,52
42,4	42,1	0,71	99,29
43,7	43,8	0,23	99,77
44,4	44,5	0,23	99,77
45,4	45,6	0,44	99,56
46,2	46,5	0,65	99,35
47,4	46,5	1,90	98,10
48,7	48,8	0,21	99,79
49,5	49,6	0,20	99,80
50,1	50,3	0,40	99,60
Rata-rata		0,8035	99,20

Tabel 2. Hasil Pembacaan Kelembaban Udara Menggunakan Sensor AHT10

Kelembaban Udara			
Alat Ukur	Sensor	Persentase Error (%)	Akurasi (%)
69,4	65,39	5,78	94,22
67,3	65,65	2,45	97,55
65,5	60,2	8,09	91,91
62,3	54,18	13,03	86,97
58	53,14	8,38	91,62
62,8	63,4	0,96	99,04
60,3	61,5	1,99	98,01
59,8	52,37	12,42	87,58
57,4	56,7	1,22	98,78
54,9	62,55	13,93	86,07
54	57,4	6,28	93,7
52,8	54,8	3,79	96,21
49,8	51,6	3,61	96,39
48,5	49,3	1,65	98,35
46,2	46,3	0,22	99,78
44,9	44,5	0,89	99,11
42,9	42,5	0,93	99,07
41,2	40,4	1,94	98,06
39,4	37,6	4,57	95,43
38,1	35,8	6,04	93,96
37,8	34,7	8,2	91,8
35,5	32,4	8,73	91,27
33,5	28,4	9,25	90,75
32,7	29,5	9,79	90,21
31,3	27,5	12,14	87,86
29,9	26,8	10,37	89,63
28,5	25,2	11,58	88,42
27,1	23,5	13,28	86,72
26,5	22,7	14,34	85,66
25,7	21,9	14,79	85,21
Rata-rata		7,02	92,98

Dari Tabel 1, terlihat bahwa pembacaan suhu udara oleh sensor AHT10 memiliki rata-rata *error* sebesar 0,62% dengan tingkat

akurasi sebesar 99,38%. Hal ini menunjukkan bahwa sensor AHT10 cukup akurat dalam mengukur suhu udara, meskipun masih terdapat sedikit deviasi yang perlu dikoreksi.

Sebaliknya, berdasarkan Tabel 2 pembacaan kelembapan udara menunjukkan deviasi yang lebih signifikan, dengan rata-rata *error* sebesar 7,02% dan tingkat akurasi sebesar 92,98%. Nilai *error* yang relatif tinggi ini mengindikasikan bahwa sensor AHT10 cenderung memberikan pembacaan kelembapan udara yang lebih tinggi dibandingkan alat ukur standar. Oleh karena itu, dilakukan proses kalibrasi untuk meningkatkan kesesuaian hasil pengukuran sensor terhadap nilai referensi.

Kalibrasi dilakukan menggunakan metode regresi linier, baik untuk suhu maupun kelembapan udara. Model regresi linier digunakan untuk menentukan hubungan linier antara data pembacaan sensor dan data pembanding dari alat ukur standar. Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa pendekatan ini cukup efektif dalam mengoreksi deviasi data pengukuran.

Persamaan regresi linier untuk suhu udara diperoleh $y = 0.9935x - 0.3043$, dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9989. Nilai R^2 yang sangat tinggi ini menunjukkan bahwa model regresi linier mampu menjelaskan hampir seluruh variasi data suhu udara yang dihasilkan oleh sensor . Dalam konteks kalibrasi, nilai R^2 yang mendekati 1 menjadi indikator penting bahwa model regresi mampu menghasilkan estimasi yang sangat mendekati nilai sebenarnya, sehingga *error* dalam pengukuran dapat diminimalkan secara signifikan.

Sementara itu, untuk kelembapan udara diperoleh persamaan regresi linier $y = 0.9917x - 1.958$, dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9526. Meskipun tidak setinggi pada suhu udara, nilai R^2 tersebut tetap menunjukkan bahwa model regresi linier dapat memberikan koreksi yang cukup signifikan terhadap data kelembapan. Nilai ini menunjukkan bahwa sekitar 92,98% variasi data dapat dijelaskan oleh model regresi yang masih berada dalam kategori baik, terutama mengingat karakteristik kelembapan udara yang cenderung lebih fluktuatif dibandingkan suhu.

Setelah persamaan regresi diterapkan, maka hasil kalibrasi sensor disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Hasil Kalibrasi Suhu Udara Menggunakan Sensor AHT10

Suhu Udara			
Alat Ukur (°C)	Sensor (°C)	Persentase Error (%)	Akurasi (%)
21,6	21,9	1,39	98,61
22,8	22,9	0,44	99,56
23,4	23,6	0,85	99,15
24,7	24,8	0,4	99,6
25,6	25,7	0,39	99,61
26,5	26,8	1,13	98,87
27,5	27,8	1,09	98,91
28,6	28,9	1,05	98,95
29,7	29,9	0,67	99,33
28,5	28,4	0,33	99,67
32,6	31,8	2,45	97,55
32,5	32,6	0,31	99,69
33,8	33,9	0,28	99,7
34,4	34,5	0,29	99,71
35,6	35,7	0,28	99,72
36,3	36,5	0,55	99,45
37,5	37,6	0,27	99,73
38,2	38,3	0,26	99,74
39,5	39,6	0,25	99,75
40,6	40,8	0,49	99,51
41,3	41,5	0,48	99,52
42,4	42,5	0,24	99,76
43,7	43,8	0,23	99,77
44,4	44,3	0,23	99,77
45,4	44,3	2,42	97,58
46,2	46,5	0,65	99,35
47,4	47,5	0,21	99,79
48,6	48,8	0,41	99,59
49,5	49,6	0,2	99,8
50,2	50,3	0,2	99,8
Rata-Rata		0,62	99,38

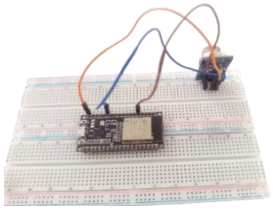
Tabel 4. Hasil Kalibrasi Kelembaban Udara Menggunakan Sensor AHT10

Kelembaban Udara			
Alat Ukur	Sensor	Persentase Error (%)	Akurasi (%)
69,3	67,39	0,03	99,97
68,3	66,5	0,03	99,97
64,5	60,2	0,07	99,93
62,3	58,1	0,07	99,93

60,8	55,19	0,09	99,91
62,5	63,4	0,01	99,99
61,3	61,5	0	100
59,4	56,37	0,05	99,95
58,6	55,7	0,05	99,95
56,7	61,13	0,08	99,92
55,3	57,4	0,04	99,96
52,8	54,8	0,04	99,96
49,8	51,6	0,04	99,96
48,5	49,3	0,02	99,98
45,2	46,3	0,02	99,98
44,9	44,5	0,01	99,99
43,9	42,5	0,03	99,97
41,2	40,4	0,02	99,98
39,4	38,6	0,02	99,98
38,1	37,8	0,01	99,99
35,8	34,7	0,03	99,97
35,8	33,4	0,07	99,93
33,5	31,4	0,06	99,94
31,7	29,5	0,07	99,94
31,3	28,5	0,09	99,91
28,9	26,8	0,07	99,93
26,3	25,2	0,04	99,96
26,1	24,5	0,06	99,94
26,5	23,7	0,11	99,89
23,7	21,9	0,08	99,92
Rata-rata		0,05	99,95

Hasil Kalibrasi Sensor MQ135

Kalibrasi dilakukan untuk menyesuaikan pembacaan sensor MQ 135 dengan alat ukur standar, yaitu *Air Quality Detector Display 6 in 1*. Dalam perancangan sistem, pin VCC sensor dihubungkan ke pin 3.3V pada NodeMCU ESP32 sebagai sumber daya, pin GND ke GND ESP32, dan pin AOUT sensor dihubungkan ke pin GPIO 34 untuk pembacaan data analog. Perancangan sensor Mq-135 dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. Hasil Perancangan Sensor MQ135

Hasil pembacaan awal sensor dilakukan sebanyak 30 kali untuk memperoleh data CO_2 di udara dan disajikan dalam Tabel 5.

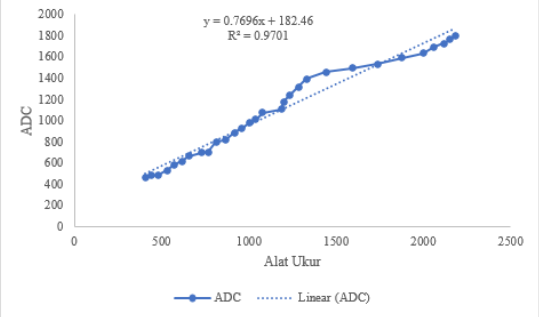
Tabel 5. Hasil Pembacaan Sensor Flame

No	Alat Ukur	Nilai ADC
1	409	80
2	418	95
3	448	101
4	496	177
5	524	214
6	595	281
7	634	316
8	673	333
9	716	432
10	759	496
11	801	593
12	841	718
13	880	784
14	916	826
15	949	898
16	978	923
17	1006	958
18	1052	999
19	1085	1019
20	1110	1056
21	1120	1073
22	1141	1100
23	1152	1132
24	1163	1156
25	1174	1162
26	1195	1182
27	1234	1215
28	1284	1271
29	1332	1311
30	1404	1383

Nilai hasil pembacaan pada Tabel 5, menunjukkan bahwa Ketika proses pembakaran berlangsung dan menghasilkan lebih banyak gas CO_2 di udara, sensor merespons dengan kenaikan nilai ADC. Sebaliknya, ketika sumber emisi berkurang dan kadar gas menurun, nilai ADC juga ikut menurun. Peningkatan nilai ADC ini disebabkan oleh penurunan resistansi lapisan semikonduktor pada sensor MQ-135 akibat paparan gas CO_2, yang mengakibatkan naiknya tegangan output yang dibaca mikrokontroler. Dengan demikian, hasil

pengujian ini menunjukkan adanya hubungan berbanding lurus antara nilai ADC dan konsentrasi gas CO_2 di udara.

Berdasarkan data tersebut, akan di ploting sehingga didapatkan grafik hubungan antara nilai CO2 dengan pembacaan nilai ADC ditunjukan pada Gambar 17.



Gambar 17. Grafik Kalibrasi Sensor MQ-135

Berdasarkan hasil pemodelan grafik, diperoleh persamaan garis linear $Y = 0{,}7696x + 182{,}46$dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0{,}9701$. Nilai R^2yang mendekati satu menunjukkan bahwa hubungan antara nilai ADC dan kadar gas CO_2 memiliki tingkat kecocokan yang sangat kuat, sehingga model linear tersebut dapat digunakan sebagai persamaan kalibrasi untuk mengonversi nilai ADC menjadi kadar gas CO_2 yang terukur.

Setelah menggunakan persamaan dari grafik tersebut maka di peoleh data hasil kalibrasi yang di perlihatkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Kalibrasi Sensor Sensor MQ135

Alat ukur (PPM)	Sensor MQ-135 (PPM)	Persentase Error (%)	Akurasi (%)
405	413,41	0,0208	99,9792
412	463,28	0,1245	99,8755
428	565,93	0,3161	99,6839
458	594,02	0,297	99,7028
491	602,31	0,2267	99,7733
524	663,98	0,2671	99,7329
552	721,86	0,2877	99,6923
575	738,75	0,2848	99,7152
596	762,14	0,2788	99,7212
614	781,63	0,2728	99,727
628	793,32	0,2592	99,7408
645	819,31	0,2702	99,7298
660	868,69	0,3162	99,6838
704	920,66	0,2878	99,6922
755	962,24	0,2745	99,7255
812	983,03	0,2106	99,7894
876	1072,69	0,2245	99,7755
956	1092,18	0,1424	99,8576
1057	1115,57	0,0554	99,9446
1175	1177,88	0,0025	99,9975
1234	1239,01	0,0041	99,9959
1343	1242,91	0,0745	99,9255
1425	1296,18	0,0904	99,9096
1509	1322,17	0,1238	99,8762
1676	1394,91	0,1677	99,8323
1841	1454,7	0,2098	99,7902
2001	1549,56	0,2256	99,7744
2157	1649,61	0,2352	99,7648
Rata-rata		0,2	99,80

Hasil Kalibrasi Sensor GP2Y1010AU0F

Hasil perancangan Sensor GP2Y1010AU0F digunakan untuk mengukur konsentrasi partikulat debu PM_{10} di udara dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 18. Hasil Perancangan Sensor GP2Y1010AU0F

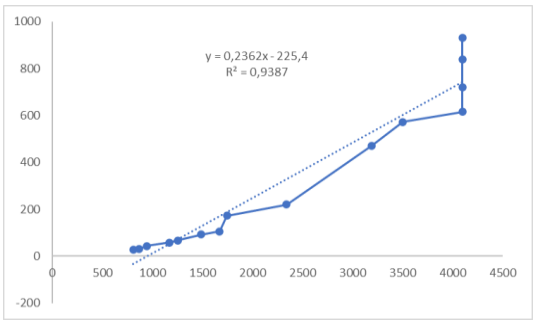
Kalibrasi dilakukan untuk menyesuaikan pembacaan sensor GP2Y1010AU0F dengan alat ukur standar, yaitu *Air Quality Detector Display 6 in 1*. Gambar 4.6 menunjukkan konfigurasi pemasangan sensor dan alat ukur standar dalam proses pengukuran Debu di udara. Pembacaan nilai ADC sensor dilakukan sebanyak 15 kali dan Data hasil pengukuran disajikan dalam Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pembacaan Sensor GP2Y1010AU0F

No	Alat Ukur (µg/m³)	Nilai ADC Sensor GP2Y1010AU0F
1	27	810
2	28	865
3	43	941

4	58	1170
5	68	1251
6	93	1488
7	106	1671
8	173	1744
9	221	2339
10	472	3193
11	572	3503
12	615	4095
13	721	4095
14	839	4095
15	931	4095

Pada tahap pengujian sensor debu, dilakukan uji coba dengan membuat pembakaran sederhana di dekat sensor sebagai sumber emisi partikel debu. Tujuannya untuk melihat respons sensor terhadap peningkatan konsentrasi debu di udara. Selama pengujian, nilai ADC dari sensor debu dicatat secara berkala menggunakan mikrokontroler, sementara pada saat yang sama konsentrasi debu juga diukur menggunakan alat ukur *Air Quality Detector Display 6 in 1* sebagai referensi pembacaan yang akurat. Berdasarkan Tabel 7, menunjukkan bahwa nilai ADC yang terbaca sensor meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi debu yang terdeteksi oleh alat ukur. Ketika pembakaran sederhana menghasilkan lebih banyak partikel debu di udara, sensor merespons dengan kenaikan nilai ADC, dan ketika emisi berkurang, nilai ADC juga menurun. Nilai hasil pembacaan pada Tabel 7, akan di ploting sehingga didapatkan grafik hubungan antara nilai partikulat debu dengan pembacaan nilai ADC ditunjukan pada Gambar 20.



Gambar 20. Grafik Kalibrasi Sensor GP2Y1010AU0F Terhadap Pembacaan Alat Ukur Standar

Berdasarkan hasil pemodelan grafik, diperoleh persamaan garis linear: $Y = 0{,}2362\ x - 225{,}4$ dengan koefisien determinasi. Nilai R^2 sebesar 0,9387 menunjukkan bahwa hubungan antara nilai ADC dan kadar partikel debu PM_{10} memiliki tingkat kecocokan yang sangat kuat, yaitu sebesar 93,87%. Hal ini berarti model linear yang diperoleh cukup akurat untuk digunakan sebagai persamaan kalibrasi dalam mengonversi nilai ADC menjadi kadar debu PM_{10} yang terukur (µg/m³). Hasil kalibrasi sensor dengan menggunakan persamaan $Y = 0{,}2362\ x - 225{,}4$ dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Kalibrasi Sensor GP2Y1010AU0F

No	Alat ukur (µg/m³)	Sensor (µg/m³)	Persentase Error	Akurasi
1	25	23.93	4.28	95.72
2	32	27.92	12.75	87.25
3	28	26.93	3.82	96.18
4	40	38.88	2.80	97.2
5	37	36.91	0.24	99.76
6	45	42.88	4.71	95.29
7	50	47.86	4.28	95.72
8	60	57.86	3.57	96.43
9	55	53.87	2.05	97.95
10	70	69.83	0.24	99.76
11	80	79.79	0.26	99.74
12	90	89.78	0.24	99.76
13	95	92.76	2.36	97.64
14	85	83.8	1.41	98.59
15	100	96.75	3.25	96.75
Rata - rata			3.085	96.914

Berdasarkan Tabel 8, menunjukkan hasil pengujian sensor GP2Y1010AU0F yang dibandingkan dengan alat ukur standar partikel debu PM_{10}. Berdasarkan data pengujian, terlihat bahwa nilai pembacaan sensor memiliki perbedaan yang sangat kecil dibandingkan dengan alat ukur standar,Dengan persentase error rata-rata sebesar 3.08% dan akurasi sebesar 96,91%. Nilai akurasi yang sangat tinggi ini menunjukkan bahwa sensor GP2Y1010AU0F memiliki kinerja yang sangat baik dan stabil dalam mendeteksi konsentrasi partikel debu di udara.

Hasil Kalibrasi Sensor MQ-4

Kalibrasi pada sensor MQ-4 dilakukan engan mengacu pada literatur umum

mengenai kualitas udara dan keselamatan kerja, di mana kadar gas metana (CH_4) di udara normal berkisar antara 1,8–2 ppm. Nilai tersebut masih jauh di bawah batas paparan aman menurut *NIOSH* (*National Institute for Occupational Safety and Health*) yang mencapai 1.000 ppm untuk paparan jangka panjang. Oleh karena itu, konsentrasi CH_4 di bawah 5 ppm dapat dikategorikan sebagai kondisi udara yang aman dan bebas dari risiko kebakaran atau ledakan.Untuk mengetahui nilai ppm tersebut, langkah awal yang dilakukan adalah menentukan nilai *Rs* (resistansi sensor saat mendeteksi gas) dan *Ro* (resistansi sensor saat udara bersih). Gas CH_4 yang digunakan sebagai acuan pada kondisi udara bersih berkisar antara 0–5 ppm. Sebelum menentukan nilai *Rs* dan *Ro*, terlebih dahulu dihitung tegangan keluaran sensor (*Vout*) menggunakan persamaan 1.

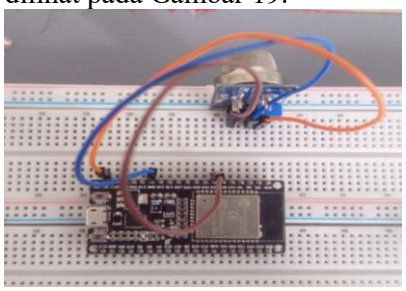
$$R_s = \frac{V_{cc \times RL}}{V_{out}} - RL \quad (1)$$

Kemudian nilai *Rs* ditentukan berdasarkan persamaan 2.

$$\frac{R_S}{R_o} = a + b \ln\ln(ppm)$$

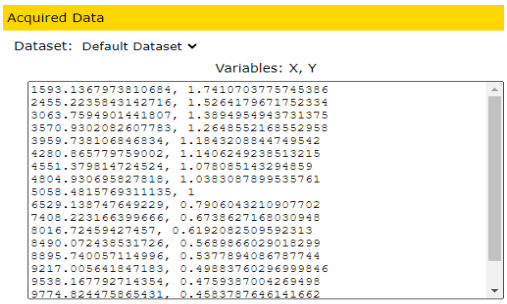
$$R_o = \frac{R_S}{a + b \ln\ln(ppm)} \quad (2)$$

Hasil perancangan kalibrasi sensor MQ-4 dapat dilihat pada Gambar 19.



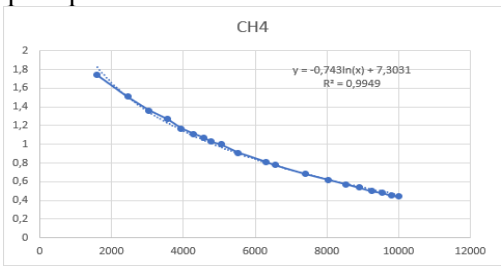
Gambar 19. Hasil Perancangan Sensor MQ-4

Untuk menentukan nilai konstanta *a* dan *b* pada persamaan 1 dan persamaan 2, digunakan grafik karakteristik sensor MQ-4 yang diperoleh dari *datasheet*. Grafik tersebut menunjukkan hubungan antara variabel-x (konsentrasi gas CH_4 dalam ppm) dan variabel-y (nilai *Rs/Ro*). Plot titik-titik data dari grafik ini diambil menggunakan aplikasi *WebPlotDigitizer*, sehingga diperoleh data yang dapat digunakan untuk menentukan persamaan kalibrasi sensor. Hasil plot titik data hubungan *Rs/Ro* terhadap ppm CH_4 dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 20. Hasil Plot Hubungan Rs/Ro terhadap ppm CH_4

Selanjutnya hubungan antara ppm CO dan Rs/Ro dibuat dalam bentuk grafik untuk dicari persamaan atau model matematisnya menggunakan *Microsoft Excel*. Hasilnya seperti pada Gambar 21.



Gambar 21. Grafik hubungan antara ppm CH_4 dan Rs/Ro

Dengan menggunakan *trendline logarithmic*, diperoleh persamaan *y = -0,743 ln(x) + 7,2831)* yang menunjukkan hubungan antara nilai *Rs/Ro* dan konsentrasi gas metana (CH_4) dalam satuan *ppm*. Nilai konstanta a = 7,2831 dan b = -0,743 diperoleh dari hasil regresi data eksperimen. Persamaan ini menunjukkan bahwa hubungan antara *Rs/Ro* dan konsentrasi CH_4 bersifat menurun secara logaritmik, di mana peningkatan kadar gas CH_4 akan menyebabkan penurunan nilai *Rs/Ro*. Setelah diperoleh nilai konstanta a dan b, keduanya disubstitusikan ke dalam persamaan kalibrasi 1 dan persamaan 2, sehingga konsentrasi CH_4 dapat dihitung menggunakan persamaan 3.

$$R_o = \frac{R_S}{7{,}3031 - 0{,}743 \ln\ln(ppm)}$$

$$ppm = e^{\frac{\left(\frac{R_S}{R_o}\right) - 7{,}3031}{-0{,}743}} \quad (3)$$

Hasil Pengujian Sistem Secara Keseluruhan

Pengujian alat pemantau kualitas udara dilakukan selama 2 hari dan di dua lokasi, yaitu di sekitar lingkungan masyarakat terdekat dilakukan pada tanggal 10 November 2025 dan di dalam Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) dilakukan pada tanggal 11 November

2025, dengan tujuan utama untuk mengevaluasi kinerja, keakuratan, dan stabilitas operasional alat tersebut saat bekerja di kondisi lapangan. Pengambilan data selama 2 hari ini di mulai dari pukul 06.00 hingga 18.00 WITA.

Pengambilan data dilakukan pada tanggal 10 November 2025 direkam setiap 10 menit secara otomatis oleh sistem berbasis mikrokontroler. Parameter yang diukur meliputi suhu udara (°C), kelembaban udara (%), Karbon dioksida/CO2 (PPM), Gas metana/CH_4 (PPM) dan Partikulat Debu PM_{10} ($\mu g/m^3$). Data hasil pengujian pada hari pertama disajikan dalam Tabel 9.

Tabel 9 Hasil Pengujian Sistem Pada Hari Pertama

No	Date	Debu ($\mu g/m^3$)	CO_2 (PPM)	CH_4 (PPM)	Suhu (˚C)	Kelembaban (%)
1	10/11/2025 06:02	29.4	409.2	0,012	28.0	84.6
2	10/11/2025 06:12	30.1	412.5	0,013	28.01	84.0
3	10/11/2025 06:22	31.8	415.6	0,019	28.3	83.4
4	10/11/2025 06:32	33.5	419.0	0,015	28.6	82.9
5	10/11/2025 06:42	34.2	421.3	0,016	28.8	82.4
6	10/11/2025 06:52	35.9	425.0	0,020	29.0	81.8
7	10/11/2025 07:00	37.2	430.1	0,018	29.3	81.0
8	10/11/2025 07:10	39.0	435.4	0,019	29.6	80.5
9	10/11/2025 07:20	41.5	441.0	0,021	29.9	79.8
10	10/11/2025 07:30	43.8	447.6	0,023	30.4	78.9
11	10/11/2025 07:40	46.0	454.2	0,025	30.8	77.9
12	10/11/2025 07:50	48.7	462.1	0,027	31.2	76.8
13	10/11/2025 08:12	47,7	497,2	0,035	29,37	76,2
14	10/11/2025 08:22	52,6	515,6	0,043	29,42	77,3
15	10/11/2025 08:32	55,7	521,7	0,04	29,94	76,4
16	10/11/2025 08:42	54,2	547,9	0,04	29,63	75,2
17	10/11/2025 08:52	55,6	545,3	0,049	29,84	74
18	10/11/2025 09:02	60,9	554	0,043	30,36	72,9
19	10/11/2025 09:12	64,3	574,2	0,043	30,14	68,8
20	10/11/2025 09:22	61,2	588,3	0,05	30,73	69
21	10/11/2025 09:32	64	593,1	0,054	30,58	70,6
22	10/11/2025 09:42	72,2	613,1	0,053	30,89	69,3
23	10/11/2025 09:52	77,3	609,2	0,053	30,62	68,6
24	10/11/2025 10:02	79	623,9	0,057	30,82	66,5
25	10/11/2025 10:12	74,2	635,4	0,055	31,31	65,4
26	10/11/2025 10:22	81,8	653,9	0,055	31,14	62,9
27	10/11/2025 10:32	81,2	645,5	0,056	31,47	64,8
28	10/11/2025 10:42	83,2	653,1	0,059	31,16	63,5
29	10/11/2025 10:52	86,4	661,1	0,056	31,41	64,6
30	10/11/2025 11:02	83,2	678,2	0,056	31,35	60,8
31	10/11/2025 11:12	88,9	674,6	0,055	32	61,4
32	10/11/2025 11:22	89,7	680	0,056	31,85	61,1
33	10/11/2025 11:32	83,7	689,3	0,058	31,89	60,6
34	10/11/2025 11:42	89	690	0,054	31,93	60
35	10/11/2025 11:52	88,2	697	0,057	32,03	61,3
36	10/11/2025 12:02	90	697	0,055	32,21	60,7
37	10/11/2025 12:12	87,4	702,8	0,056	32	60,6
38	10/11/2025 12:22	86,6	709,4	0,058	31,82	60
39	10/11/2025 12:32	88,2	696,9	0,06	31,72	60
40	10/11/2025 12:42	90	693,9	0,058	31,88	60
41	10/11/2025 12:52	86,1	691,6	0,06	31,82	60
42	10/11/2025 13:02	90	694,9	0,057	31,76	61,1
43	10/11/2025 13:12	85,8	702,9	0,058	32,16	60

44	10/11/2025 13:22	85,4	685,7	0,056	31,79	60,9
45	10/11/2025 13:32	90	685,1	0,058	31,84	61,9
46	10/11/2025 13:42	87,5	691	0,055	31,65	60,1
47	10/11/2025 13:52	82,4	686,2	0,055	31,68	63,3
48	10/11/2025 14:02	81,5	675,5	0,056	31,79	62,5
49	10/11/2025 14:12	83,6	672,1	0,052	31,8	61,9
50	10/11/2025 14:22	79,3	667,6	0,06	31,68	64
51	10/11/2025 14:32	79,4	644,6	0,055	31,53	65,5
52	10/11/2025 14:42	81,7	643	0,053	31,1	63
53	10/11/2025 14:52	76,4	644,7	0,05	31,06	66,9
54	10/11/2025 15:02	70,7	627,5	0,054	31,2	64,5
55	10/11/2025 15:12	72,9	611,9	0,051	31,05	67,6
56	10/11/2025 15:22	75,1	607,4	0,048	30,64	68,1
57	10/11/2025 15:32	71,3	603,5	0,051	30,51	70,3
58	10/11/2025 15:42	69	595,8	0,048	30,74	69,7
59	10/11/2025 15:52	64,3	582	0,052	30,32	72
60	10/11/2025 16:02	65,2	564,2	0,05	30,25	71,6
61	10/11/2025 16:12	60,5	555,1	0,043	30,27	73,6
62	10/11/2025 16:22	51,8	531,6	0,043	30,09	74,5
63	10/11/2025 16:32	54,8	535,7	0,047	29,46	76,6
64	10/11/2025 16:42	50,2	516,1	0,046	29,41	74,5
65	10/11/2025 16:52	44,7	490,5	0,043	29,58	75,9
66	10/11/2025 17:02	39,8	494	0,034	29,24	77,8
67	10/11/2025 17:12	38,5	465,6	0,032	29,11	80,1
68	10/11/2025 17:22	41,7	459,1	0,037	28,95	78,5
69	10/11/2025 17:32	33,3	440,1	0,037	28,46	80,8
70	10/11/2025 17:42	32,5	427,6	0,035	28,4	84
71	10/11/2025 17:52	31,8	420,6	0,034	28,47	83,8
72	10/11/2025 18:02	31	393,2	0,027	28,14	84,6

Berdasarkan Tabel 9, kondisi udara di sekitar TPA Alak pada 10 November 2025 menunjukkan pola harian yang jelas dari pukul 06.00–18.00 WITA, di mana suhu pagi yang sejuk sekitar 28°C dengan kelembaban tinggi 84–86% meningkat secara bertahap hingga mencapai 32°C pada siang hari sebelum kembali turun ke 28°C menjelang sore, sedangkan kelembaban menunjukkan pola kebalikan: tinggi pada pagi, turun hingga 60% saat siang akibat peningkatan suhu yang mempercepat penguapan, lalu naik kembali ke sekitar 84% ketika suhu menurun pada sore hari. Kadar CO_2 mengikuti pola serupa dengan nilai rendah 400–450 ppm di pagi hari, meningkat menjadi sekitar 700 ppm di siang hari akibat pengaruh suhu tinggi, aktivitas mikroorganisme pada sampah, serta emisi kendaraan truk yang meningkat, kemudian menurun ketika aktivitas berkurang dan suhu mereda, dengan seluruh nilai masih jauh di bawah ambang batas aman 5.000 ppm. Gas metana (CH_4) juga meningkat dari 0,012 ppm pada pagi menjadi sekitar 0,06 ppm saat siang hari sebagai hasil pembusukan organik yang tetap lambat sehingga kadarnya masih rendah dan aman. Sementara itu, kadar PM_{10} mengalami perubahan paling signifikan, dari 29 µg/m³ pada pagi hari, melonjak hingga 142 µg/m³ di siang hari akibat aktivitas kendaraan dan tiupan angin, lalu turun kembali ke sekitar 31 µg/m³ pada sore hari ketika kondisi udara lebih tenang.

Sedangkan data hasil pengujian pada hari kedua yang dilakukan pada tanggal 11 November 2025 disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10 Hasil Pengujian Sistem Pada Hari Kedua

No	Date	Debu (µg/m³)	CO_2 (PPM)	CH_4 (PPM)	Suhu (˚C)	Kelembaban (%)
1	11/11/2025 06:02	16,06	376	0,083	28,7	79,3
2	11/11/2025 06:12	90,48	391	0,109	29,4	76,4
3	11/11/2025 06:22	16,06	379	0,114	29,3	78,3

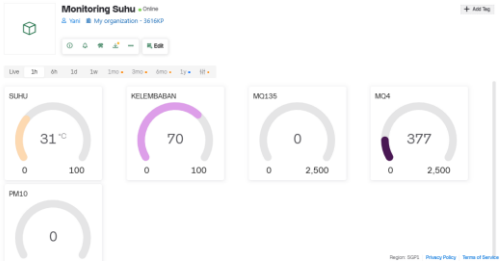
4	11/11/2025 06:32	49,83	373	0,094	28,9	77,2
5	11/11/2025 06:42	67,74	388	0,115	29,3	77,4
6	11/11/2025 06:52	87,73	391	0,13	30	77,8
7	11/11/2025 07:00	100,82	377	0,1	28,9	77
8	11/11/2025 07:10	81,52	390	0,137	29,6	76,2
9	11/11/2025 07:20	69,81	399	0,148	30,2	76
10	11/11/2025 07:30	36,07	394	0,128	29,7	75,1
11	11/11/2025 07:40	34,67	396	0,137	29,9	74,9
12	11/11/2025 07:50	54,65	398	0,135	30,1	70,3
13	11/11/2025 08:12	35,35	401	0,17	30,7	73,3
14	11/11/2025 08:22	109,09	398	0,14	30,2	73
15	11/11/2025 08:32	36,73	400	0,154	30,4	72,1
16	11/11/2025 08:42	98,06	397	0,166	30,5	71,8
17	11/11/2025 08:52	79,46	418	0,192	31,4	72,3
18	11/11/2025 09:02	80,84	418	0,203	31,5	70,2
19	11/11/2025 09:12	97,37	411	0,193	31,2	73,1
20	11/11/2025 09:22	84,28	409	0,185	31,1	70,7
21	11/11/2025 09:32	81,52	409	0,185	31,3	69,4
22	11/11/2025 09:42	73,26	419	0,206	31,7	68,6
23	11/11/2025 09:52	59,47	411	0,194	31,1	68,2
24	11/11/2025 10:02	49,14	418	0,202	31,8	66,7
25	11/11/2025 10:12	76,01	414	0,187	31,2	67,1
26	11/11/2025 10:22	67,74	696,31	0,197	31,5	67
27	11/11/2025 10:32	39,49	1185,99	0,221	32	66,9
28	11/11/2025 10:42	43,62	1185,99	0,2	31,4	66,3
29	11/11/2025 10:52	50,6	1185,45	0,224	31,9	64,8
30	11/11/2025 11:02	60,85	1105,14	0,211	31,8	62,9
31	11/11/2025 11:12	49,83	1137,32	0,228	32,1	63,2
32	11/11/2025 11:22	127,01	1137,12	0,202	31,5	65,4
33	11/11/2025 11:32	36,04	1139,55	0,218	31,9	64,1
34	11/11/2025 11:42	57,41	1140,47	0,229	32,3	62,9
35	11/11/2025 11:52	56,03	1135,22	0,251	32,9	61
36	11/11/2025 12:02	115,98	1128,11	0,242	32,7	61,4
37	11/11/2025 12:12	36,73	1119,77	0,248	32,8	59,3
38	11/11/2025 12:22	90,48	1111,45	0,266	33,1	59,7
39	11/11/2025 12:32	62,92	1103,22	0,256	32,8	59,5
40	11/11/2025 12:42	84,97	1098,5	0,27	33,2	58,8
41	11/11/2025 12:52	51,2	1087,32	0,257	33	59,9
42	11/11/2025 13:02	56,72	1075,19	0,261	32,8	56,5
43	11/11/2025 13:12	78,08	1059,87	0,284	33,4	56,6
44	11/11/2025 13:22	89,79	1048,33	0,286	28	63,5
45	11/11/2025 13:32	67,05	1037,1	0,288	29	63,1
46	11/11/2025 13:42	142,85	1026,85	0,293	27	64,2
47	11/11/2025 13:52	27,77	1013,76	0,33	28	61,6
48	11/11/2025 14:02	37,42	999,44	0,306	29	63,9
49	11/11/2025 14:12	45,16	986,32	0,315	27	63,3
50	11/11/2025 14:22	58,61	974,2	0,322	28	62,8
51	11/11/2025 14:32	72,39	962,14	0,327	29	62,5
52	11/11/2025 14:42	81,52	948,02	0,331	27	62,1
53	11/11/2025 14:52	69,12	935,88	0,334	28	62,4
54	11/11/2025 15:02	55,34	923,76	0,338	29	63
55	11/11/2025 15:12	47,91	911,55	0,342	27	64,1
56	11/11/2025 15:22	39,49	899,48	0,345	28	65,3
57	11/11/2025 15:32	36,04	887,32	0,348	29	66,5
58	11/11/2025 15:42	42,24	878,2	0,351	27	67,6

59	11/11/2025 15:52	49,83	870,1	0,354	28	68,2
60	11/11/2025 16:02	63,61	582,56	0,356	29	69
61	11/11/2025 16:12	58,61	584,64	0,358	27	70,3
62	11/11/2025 16:22	46,53	578,4	0,359	28	71,5
63	11/11/2025 16:32	37,42	633,19	0,361	29	72,7
64	11/11/2025 16:42	33,97	601,98	0,363	27	73,9
65	11/11/2025 16:52	29,15	814,22	0,365	28	75,2
66	11/11/2025 17:02	27,08	633,19	0,367	29	76,6
67	11/11/2025 17:12	24,32	601,98	0,368	27	78,1
68	11/11/2025 17:22	22,26	412	0,369	28	79,8
69	11/11/2025 17:32	20,19	417	0,37	29	81,2
70	11/11/2025 17:42	18,13	417	0,37	27	82,6
71	11/11/2025 17:52	17,44	420	0,369	28	84
72	11/11/2025 18:02	16,06	420	0,368	29	85,4

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 10, kondisi lingkungan dari pagi hingga sore hari menunjukkan perubahan yang jelas pada suhu, kelembaban, dan berbagai parameter kualitas udara. Pada pagi hari suhu masih rendah (28,7–30,5°C) dengan kelembaban tinggi (79–70%), kemudian meningkat signifikan hingga mencapai puncak 33,4°C pada pukul 13.12 disertai penurunan kelembaban menjadi 56–59%, menggambarkan korelasi negatif antara kedua variabel tersebut. Setelah itu, cuaca mendung menurunkan suhu kembali ke 29–30°C menjelang sore dan kelembaban naik hingga 85%. Konsentrasi CO_2 awalnya stabil (373–420 ppm), lalu melonjak tajam hingga 1185–1240 ppm pada sekitar pukul 10.00–13.52 akibat aktivitas alat berat, suhu tinggi, dan sirkulasi udara yang terbatas, sebelum menurun lagi menjadi 420–500 ppm ketika suhu dan aktivitas menurun. Gas CH_4 menunjukkan peningkatan bertahap sepanjang hari, dari 0,083 ppm pada pagi menjadi 0,293–0,33 ppm pada puncaknya, dipengaruhi oleh percepatan dekomposisi organik pada suhu tinggi, lalu stabil pada 0,28–0,31 ppm ketika cuaca mendung. PM_{10} juga mengalami pola serupa: rendah pada pagi (16–50 µg/m³), meningkat tajam hingga maksimum 142,85 µg/m³ pada sekitar pukul 13.32 akibat suhu tinggi, kelembaban rendah, dan aktivitas alat berat, kemudian menurun bertahap menjadi 40–60 µg/m³ menjelang sore seiring cuaca mendung dan kelembaban yang meningkat.

Hasil Pengiriman Data penelitian

Dalam penelitian ini, Blynk digunakan sebagai platform utama untuk melakukan pemantauan data sensor secara real-time karena antarmukanya yang sederhana, mudah digunakan, dan mampu menampilkan data secara langsung melalui smartphone. Tampilan blynk dapat dilihat pada Gambar 22.



Gambar 22. Tampilan Blynk

SIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan prototipe robot deteksi dan pemadam kebakaran berbasis Arduino Mega 2560. Sistem deteksi api menggunakan sensor flame KY-026 mampu mengenali sumber api dengan baik dan secara otomatis mengaktifkan pompa R385, penyemprot, serta motor servo SG90 untuk memadamkan api, disertai buzzer sebagai peringatan. Sistem navigasi dengan tiga sensor ultrasonik HC-SR04 dan metode wall following terbukti efektif dalam mengikuti lintasan dan menghindari rintangan, dengan dukungan kendali PID (Kp = 3.5, Ki = 0.01, Kd = 7.5) yang meningkatkan kestabilan gerak robot. Selain itu, ESP32-CAM berhasil digunakan untuk pemantauan visual secara real-time dan kontrol manual melalui aplikasi Blynk, serta penyimpanan data sensor ke MicroSD dalam format CSV.

Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan penambahan sensor garis (line sensor) agar navigasi lebih fleksibel, peningkatan sistem manajemen daya untuk memperpanjang waktu operasi, serta integrasi kontrol jarak jauh dalam satu antarmuka

tunggal agar lebih praktis. Dengan pengembangan tersebut, robot ini berpotensi menjadi dasar bagi teknologi robotika pemadam kebakaran yang lebih efisien, adaptif, dan aplikatif di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

1 Axmalia A, Mulasari SA. 2020. Dampak tempat pembuangan akhir sampah (TPA) terhadap gangguan kesehatan masyarakat. J. Kesehat. komunitas (Journal community Heal. **6**(2): 171.
2 Hidayatullah F, Mulasari SA. 2020. Literature Review: Gangguan Saluran Penapasan Akibat Pencemaran Udara di Lingkungan Tempat Pembuangan Akhir (TPA). J. Kesehat. **13**(2): 119.
3 Rosyidah M. 2018. Polusi udara dan kesehatan pernapasan. Integr. J. Ilm. Tek. Ind. **1**(2): 1.
4 Budianto H, Sumanto B. 2024. Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara dalam Ruangan Berbasis Internet of Things. J. List. Instrumentasi, dan Elektron. Ter. **5**(1): 9.
5 Putri DVS, Sakti HPN, Walid A. 2020. Pengaruh Tempat Pembuangan Akhir(TPA) Terhadap Pencemaran Udara Di lingkungan Sebakul Kota Bengkulu. J. Pengabdi. Masy. Ilmu Terap. **2**(2): 117.
6 Mahyudin R. 2017. Kajian Permasalahan Pengelolaan Sampah Dan Dampak Lingkungan Di Tpa (Tempat Pemrosesan Akhir). Jukung (Jurnal Tek. Lingkungan). **3**(1): 66.
7 Iriandina G. Monitoring kualitas udara di TPA Antang menggunakan aplikasi Telegram berbasis Internet of Things. Universitas Hasanuddin.
8 Iqbal M. Mikrokontroler ESP32. Telkom University, Indonesia. 2022.