

## Perancangan dan Implementasi Sensor Node untuk Pemantauan Kualitas Udara Secara Luas

Amadeo Engelo Latif<sup>1</sup>, Mardhani Riassetiawan<sup>\*2</sup>

<sup>3</sup>Contoh: Departemen Ilmu Komputer dan Elektronika, FMIPA UGM, Yogyakarta, Indonesia  
e-mail: <sup>1</sup>amadeoengelo2020@mail.ugm.ac.id, <sup>\*2</sup>mardhani@ugm.ac.id

### Abstrak

Polusi udara merupakan masalah lingkungan yang semakin meningkat dan berdampak pada kesehatan manusia serta ekosistem. Pemantauan kualitas udara secara luas menjadi tantangan karena keterbatasan infrastruktur pemantauan yang tersedia. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem sensor node berbasis Wireless Sensor Network (WSN) untuk pemantauan kualitas udara secara luas. Sistem yang dikembangkan menggunakan sensor low-cost untuk mendeteksi polutan seperti PM2.5, karbon monoksida (CO), dan toluene, serta parameter lingkungan seperti suhu dan kelembapan untuk kompensasi pada bacaan sensor MQ135. Data yang diperoleh dikirim ke edge computing module menggunakan protokol komunikasi ESP-NOW dan diteruskan ke cloud melalui jaringan MQTT. Sistem menggunakan sensor MQ7, MQ135, DHT11, dan SHARP GP2Y1010AU0F untuk pengukuran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat mengumpulkan dan mengirim dari 80% hingga 90% data yang diharapkan. Algoritma kompensasi yang diterapkan berhasil meningkatkan akurasi pembacaan sensor terhadap perubahan suhu dan kelembapan. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa sistem yang dikembangkan mampu melakukan pemantauan kualitas udara secara luas dengan tingkat akurasi yang cukup baik. Namun, beberapa perbaikan masih diperlukan, seperti peningkatan stabilitas komunikasi jaringan dan metode kalibrasi sensor yang lebih akurat.

**Kata kunci**—Polusi udara, Wireless Sensor Network, Pemantauan Lingkungan

### Abstract

Air pollution is an increasingly serious environmental issue that impacts both human health and ecosystems. Widespread air quality monitoring remains a challenge due to limitations in available monitoring infrastructure. This research aims to design and implement a sensor node system based on a Wireless Sensor Network (WSN) for large-scale air quality monitoring. The developed system utilizes low-cost sensors to detect pollutants such as PM2.5, carbon monoxide (CO), and toluene, as well as environmental parameters like temperature and humidity for compensation in MQ135 sensor readings. The collected data is transmitted to an edge computing module using the ESP-NOW communication protocol and then forwarded to the cloud via an MQTT network. The system employs MQ7, MQ135, DHT11, and SHARP GP2Y1010AU0F sensors for measurements. Testing results indicate that the system is capable of collecting and transmitting between 80% and 90% of the expected data. The implemented compensation algorithm successfully improves sensor reading accuracy in response to temperature and humidity changes. The conclusion of this research is that the developed system can perform large-scale air quality monitoring with reasonably good accuracy. However, some improvements are still necessary, such as enhancing network communication stability and implementing more accurate sensor calibration methods.

**Keywords**—Air Pollution, Wireless Sensor Network, Environmental Monitoring

## 1. PENDAHULUAN

Polusi udara adalah masalah global yang semakin meningkat. Masalah ini adalah ancaman bagi kesehatan manusia dan lingkungan sekitar. Polusi ini terjadi karena adanya zat-zat berbahaya di udara yang dihasilkan oleh aktivitas manusia dan proses alam. Polusi udara dapat mempengaruhi berbagai hal, seperti kesehatan, ekosistem lingkungan, perubahan iklim, tanaman, dan hewan.

Polusi didefinisikan sebagai munculnya zat-zat berbahaya ke lingkungan. Polusi udara memiliki berbagai dampak terhadap kesehatan. Kesehatan seseorang yang sensitif terhadap udara dapat terpengaruh bahkan pada hari dengan polusi udara yang rendah. Paparan jangka pendek terhadap polusi udara dapat menyebabkan COPD (Chronic Obstructive Pulmonary Disease), batuk, sesak napas, asma, dan penyakit pernapasan [1].

Dalam perkotaan, lalu lintas merupakan salah satu penyebab utama lepasnya polutan perkotaan ke atmosfer. Dengan meningkatnya skala perkotaan, jumlah kendaraan bermotor semakin meningkat. Polusi lalu lintas telah menjadi bagian paling besar dari penyebab total polusi dalam perkotaan [2].

Beberapa penelitian sebelumnya pernah dilakukan. Toma et al. (2019) meneliti penggunaan IoT untuk monitoring polusi di smart city. Sistem menggunakan sensor untuk mendeteksi berbagai parameter lingkungan, dengan ESP8266 sebagai IoT Nodes dan Raspberry Pi sebagai gateway. Jaringan yang digunakan bisa GSM, SigFox, LoRaWAN, atau Wi-Fi. Arsitektur berbasis cloud IaaS/CaaS dengan webserver, MQTT broker, Node.js, Node-RED, dan NoSQL database, serta IoT PaaS untuk analisis time series. Penelitian diuji di Bucharest, Romania, untuk memantau penyebaran polusi[3].

Mahajan et al. (2021) meneliti AirKit, perangkat pemantau polusi udara berbasis sensor low-cost. Sistem menggunakan PMS5003 untuk mendeteksi PM1, PM2.5, PM10, serta sensor suhu dan kelembapan. ESP8266 berfungsi sebagai gateway IoT yang mengirim data ke server. Perangkat diuji dengan SidePak TSI AM 520 sebagai pembanding, menunjukkan 90% hasil observasi memiliki offset di bawah  $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ . AirKit dapat mendeteksi pola polusi yang sejalan dengan monitor standar LAQN[4].

Popa et al. (2021) meneliti prediksi perubahan suhu perkotaan menggunakan machine learning berbasis data polusi udara. Sensor mendeteksi NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, PM2.5, serta suhu, kelembapan, dan tekanan udara. Peneliti membandingkan linear regression, SVM, dan optimised GPR, dengan hasil terbaik diperoleh dari optimised GPR (RMSE 4.753) untuk memprediksi fluktuasi suhu sepanjang tahun[5].

Penelitian ini akan fokus terhadap pembangunan sistem yang dapat mengobservasi kualitas udara pada berbagai tempat menggunakan Wireless Sensor Network (WSN) dengan parameter pengukuran PM2.5, CO, toluene, dan kelembapan dan suhu untuk proses kalibrasi sensor. Penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan sistem pemantauan kualitas udara yang ada dengan menggunakan WSN untuk meningkatkan titik pemantauan kualitas udara.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1 Rancangan modul sensor

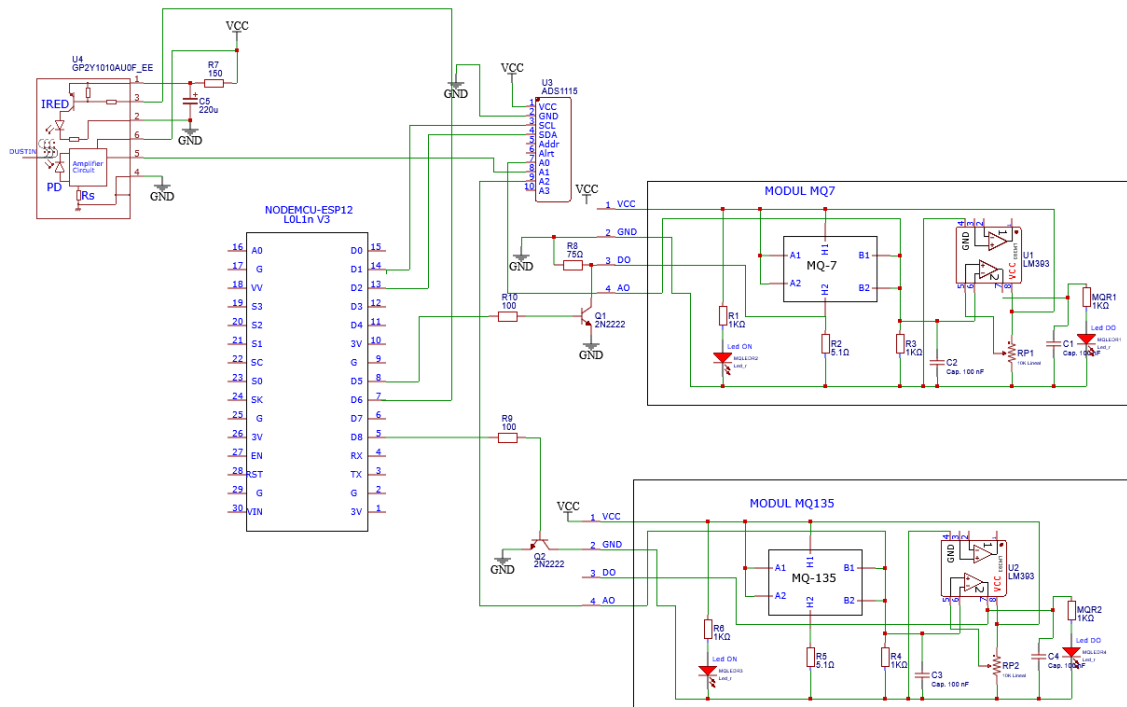
Gambar 1 menunjukkan skema rangkaian rancangan modul sensor. Gambar tersebut menunjukkan wiring dari ESP8266 ke sensor-sensor yang digunakan. MQ-135, MQ7 dan

GP2Y1014AU0F dihubungkan ke ADS1115 yang berkomunikasi dengan ESP8266 untuk membaca nilai analog data. DHT11 menggunakan komunikasi digital sehingga dihubungkan langsung dengan ESP8266. Sensor dikalibrasi menggunakan library UnifiedMQsensor. Kalibrasi tersebut mengambil nilai bacaan sensor dengan asumsi kondisi udara bersih untuk menghasilkan nilai resistansi sensor pada udara bersih yang akan digunakan untuk perbandingan.

Pada sensor MQ135 digunakan algoritma kompensasi terhadap suhu dan kelembapan. Bacaan sensor MQ135 mudah terpengaruh dari suhu dan kelembapan pada sensor [6]. Algoritma ini akan memberikan koreksi pada nilai bacaan MQ135 berdasarkan perubahan suhu dan kelembapan dari DHT11 [7]. Algoritma untuk perhitungan correction factor ditunjukkan pada persamaan (1).

$$CF = CORA.t^2 - CORB.t + CORC - (h - 33).CORD \quad (1)$$

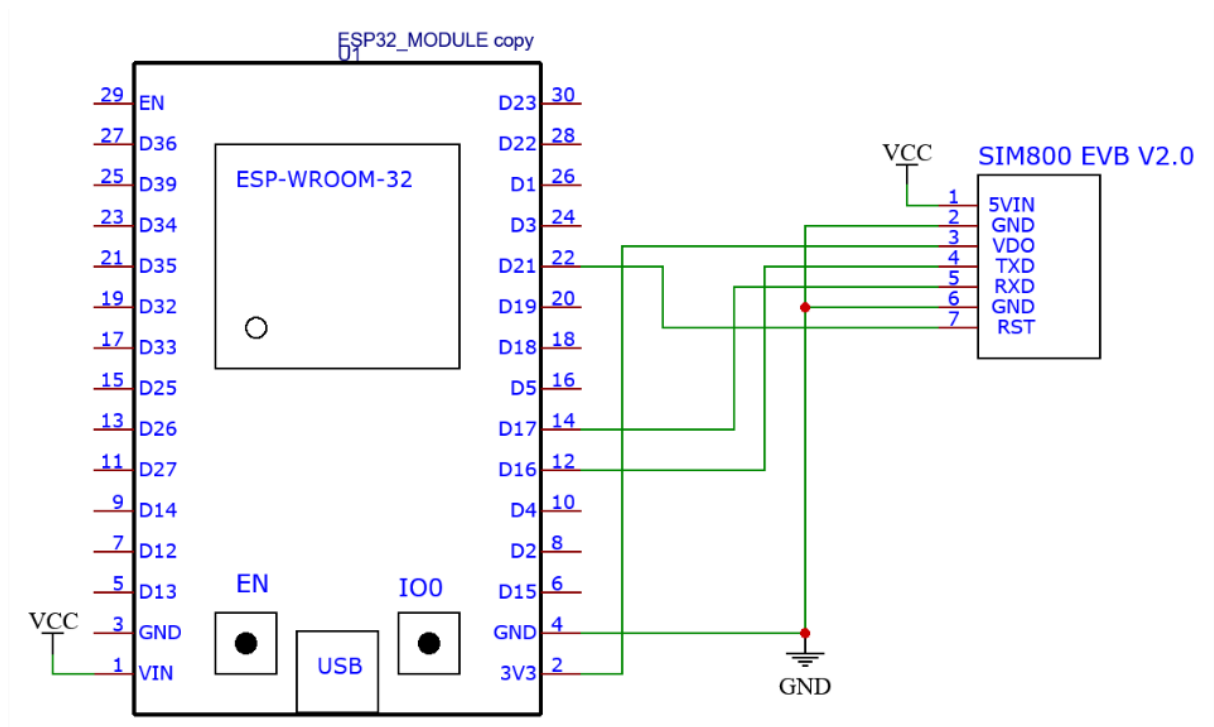
Modul sensor mengambil data bacaan sensor setiap 150 detik. Data kemudian dikirimkan ke modul edge computing menggunakan protokol ESP-NOW. ESP-NOW adalah protokol komunikasi yang dikembangkan oleh espressif. Protokol ini memungkinkan perangkat ESP32 dan ESP8266 berkomunikasi secara langsung. ESP-NOW mendukung koneksi one-to-many dan many-to-many yang dapat digunakan untuk transmisi data. Protokol ini menggunakan komunikasi 2.4Ghz secara langsung tanpa memerlukan Wi-Fi stack. ESP-NOW dapat mengirim data hingga 250 bytes untuk setiap payload. [8]



Gambar 1 Skema Rangkaian Modul Sensor

## 2.2 Rancangan modul edge computing

Gambar 2 menunjukkan skema rancangan modul edge computing. Modul edge computing terdiri dari ESP32 dan SIM800L. Data bacaan sensor dari ESP8266 akan diterima oleh ESP32. Data tersebut akan dibandingkan dengan data terakhir yang diterima, dan apabila tidak ada perubahan yang signifikan antara data tersebut, data tidak akan dikirim ke server cloud[9].

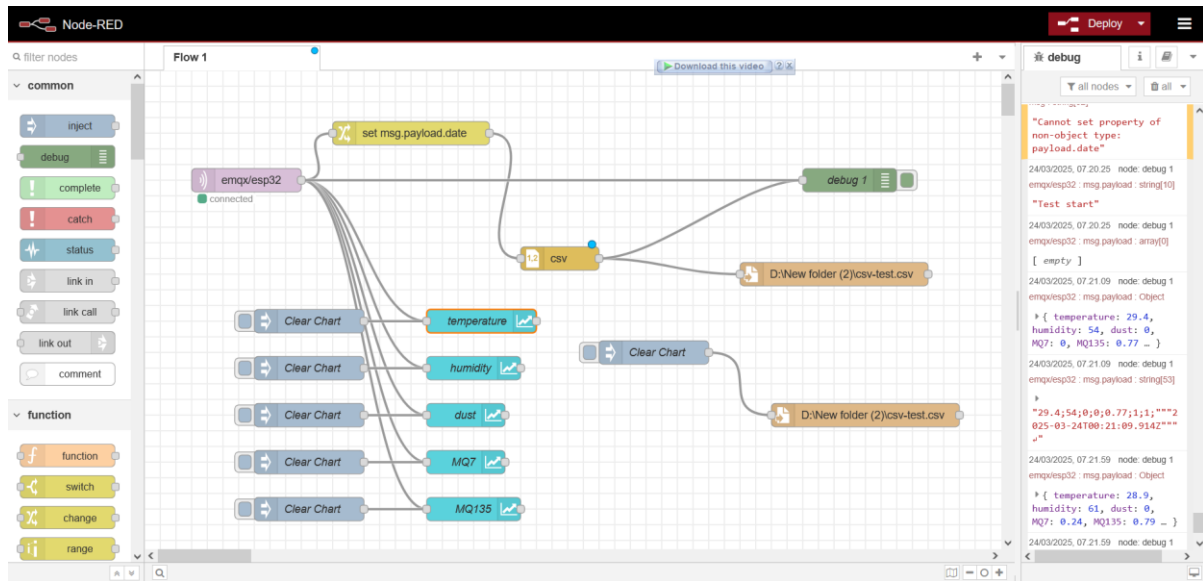


Gambar 2 Modul Edge Computing

Pengiriman data dilakukan menggunakan MQTT melalui jaringan GPRS. SIM800L digunakan sebagai modem untuk koneksi internet pada ESP32. MQTT digunakan karena protokol transportasi pengiriman pesan tersebut sangat ringan dan cocok untuk perangkat dengan kode sederhana dan bandwidth network minimal [10].

## 2.3. Konfigurasi jaringan MQTT

Jaringan MQTT menggunakan broker EMQX untuk komunikasi data ke cloud. Node-RED akan menerima payload MQTT dan menambahkan timestamp kapan data tersebut diterima. Data dan waktunya kemudian dimasukkan ke database csv. Gambar 3 menunjukkan flow Node-RED yang digunakan.



Gambar 3 Tampilan Flow Node-RED

## 2.4. Prosedur dan Pengumpulan Data

Data dikumpulkan untuk evaluasi efektivitas sistem untuk pemantauan kualitas udara secara luas.

### 2.4.1 Data pengujian komunikasi

Data komunikasi yang dikumpulkan adalah data throughput komunikasi ESP-NOW terhadap jarak sensor module dan edge computing module, serta data bacaan sensor terhadap jarak.

Pengujian pengiriman data sensor dilakukan dengan mengirim data bacaan sensor untuk menemukan batas jarak komunikasi. Data bacaan sensor yang dikirim adalah 1 paket sebesar 20 byte.

### 2.4.2 Data Pengujian algoritma kompensasi

Data yang dikumpulkan adalah hasil perbandingan antara bacaan sensor yang menggunakan algoritma kompensasi dan bacaan sensor yang tidak menggunakan algoritma tersebut, serta bacaan dari sensor suhu dan kelembapan. Kedua data diambil secara bersamaan dan kondisi suhu dan kelembapan ruangan akan divariasikan.

### 2.4.3 Data pengujian algoritma filtrasi

Data dikumpulkan dengan mengirimkan seluruh data ke server dan menandai data yang masuk dalam klasifikasi algoritma filtrasi. Data yang dikirim memiliki nilai "significant" yang dapat bernilai 1 atau 0, dimana nilai 1 berarti data signifikan dan nilai 0 berarti data tidak signifikan.

#### 2.4.4 Data Uptime

Data dikumpulkan dengan menjalankan sistem dalam jangka waktu tertentu untuk memastikan uptime sistem. Pengujian dilakukan dengan menyalakan sistem dalam jangka waktu 15 jam. Modul sensor dan edge computing diletakkan di jarak 20 meter tanpa line-of-sight. Data yang dikirim oleh modul edge computing ke jaringan MQTT akan diproses menggunakan Node-RED. Dalam waktu tersebut akan dihitung jumlah data yang diterima dan stabilitas koneksi sistem ke jaringan MQTT.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

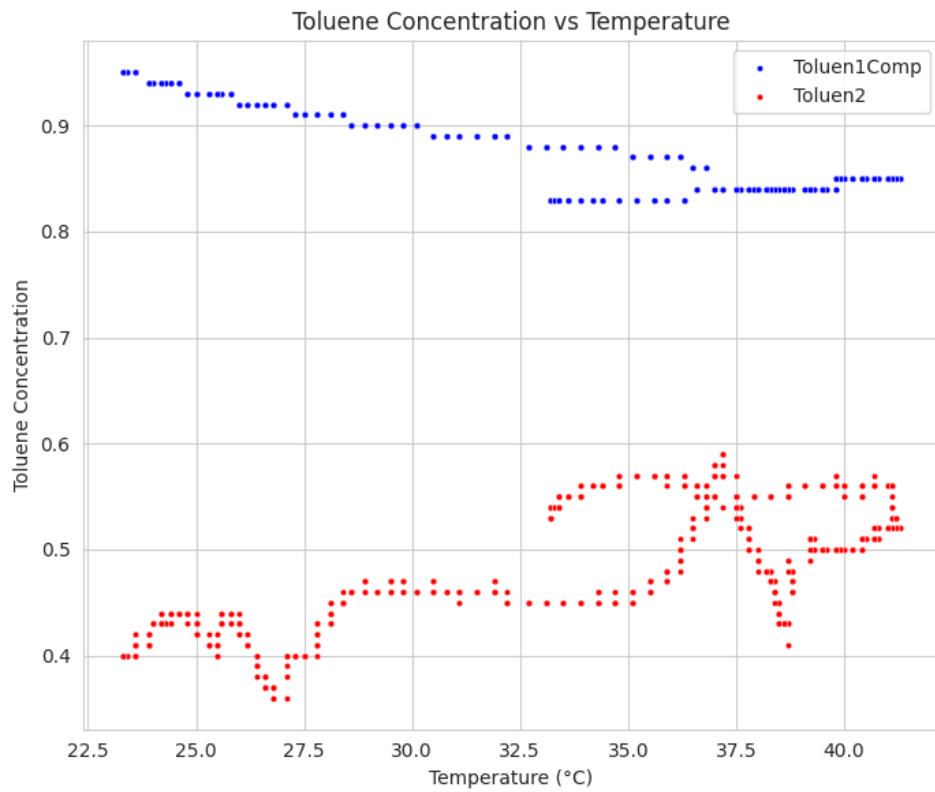
Tabel 1 menunjukkan hasil data yang dikumpulkan dalam berbagai jarak selama pengujian. Data ini dikumpulkan di tempat terbuka dengan obstruksi minimal dari modul sensor ke modul edge computing. Nilai packet loss semakin bertambah dengan meningkatnya jarak. Data masih memiliki throughput optimal hingga 100 meter dimana throughput bernilai 0.86 Mbps. Namun, setelah mencapai jarak 150 meter throughput data berkurang drastis hingga 0.26 Mbps. Dalam pengujian dengan line-of-sight, semua data berhasil terkirim dalam jarak 200 meter. Dalam pengujian dimana modul sensor dan modul edge computing terhalang bangunan, data hanya dapat diterima sejauh 20 meter.

Dalam pengujian pengiriman data bacaan sensor, jarak dapat mencapai 200 meter dan modul edge computing masih dapat menerima data. Namun, tidak semua paket data berhasil dikirim, sehingga frekuensi data yang diterima berkurang.

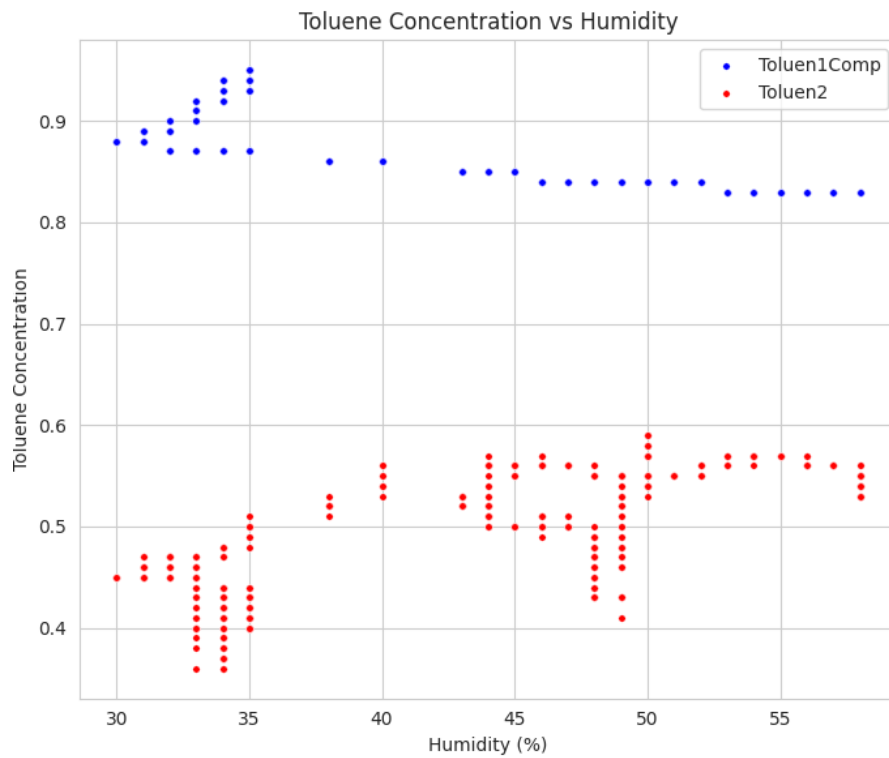
Tabel 1 Hasil Pengujian Komunikasi

Jarak(m)	Throughput(Mbps)	packetloss (%)	packet loss
20	0.9	0.01	1
50	0.9	0	0
100	0.86	4.92	492
150	0.26	70.90	7090
200	0	99.82	9982

Gambar 4 dan 5 menunjukkan hasil pengujian algoritma kompensasi. Pada gambar tersebut bacaan sensor yang terkompensasi (Toluen1Comp) dibandingkan dengan bacaan sensor yang tidak terkompensasi (Toluen2). Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa bacaan sensor yang terkompensasi menjadi lebih stabil dibandingkan bacaan sensor yang tidak terkompensasi.



Gambar 4 Grafik perbandingan antara bacaan sensor terhadap suhu



Gambar 5 Grafik perbandingan antara bacaan sensor terhadap kelembapan

Tabel 2 Menunjukkan hasil data dari pengujian transmisi. Threshold filtrasi data diatur menjadi 0,1. Dalam kurun waktu 18 jam, data tidak signifikan yang diterima hanya 17 data. Hal ini disebabkan karena threshold transmisi yang terlalu rendah. Waktu interval pengiriman data juga dapat menyebabkan perbedaan data yang besar antara data terakhir yang dikirim.

Tabel 2 Data Pengujian Transmisi

Parameter	Nilai
Threshold transmisi	0,1
Durasi Pengujian	15 Jam
Total data diterima	651
Data tidak signifikan	17
Persentase data tidak signifikan	0.02%

Jumlah data yang diterima dan diproses oleh Node-RED berjumlah 303 untuk sensor 1 dan 348 untuk sensor 2. Data yang diharapkan berdasarkan lama jalannya sistem adalah 371, sehingga persentase data yang diterima oleh sensor bernilai 81.67% dan 93.80%. Hal ini dapat disebabkan karena terjadinya gangguan pada koneksi jaringan modul sensor atau modul edge computing, atau koneksi jaringan edge computing ke cloud. Data yang diterima juga dapat berkurang apabila terjadi gangguan pada bacaan sensor dan data yang diterima tidak punya nilai. Pada Tabel 6.3 dapat dilihat hasil pengujian integrasi data yang menunjukkan total data yang diterima.

Tabel 3 Hasil Pengujian Integrasi Data

Modul Sensor	Data yang diharapkan	Data yang diterima	Persentase Data Diterima
Sensor 1	371	303	81.67%
Sensor 2	371	348	93.80%

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa sistem sensor yang dirancang berhasil mengumpulkan data polusi udara menggunakan wireless sensor network. Data yang dikumpulkan mencakup PM2.5, CO, toluene, suhu, dan kelembapan. Pengujian komunikasi menunjukkan bahwa dalam kondisi ideal, data dapat dikirim hingga 200 meter, meskipun terdapat peningkatan packet loss seiring bertambahnya jarak. Dalam kondisi terhalang, jangkauan komunikasi efektif berkurang hingga sekitar 20-50 meter.

Selain itu, algoritma kompensasi yang diterapkan mampu membuat nilai bacaan sensor MQ135 menjadi lebih stabil terhadap perubahan suhu dan kelembapan. Namun, algoritma transmisi data tidak memberikan hasil yang efektif karena hanya 0.2% data yang dianggap tidak signifikan. Dari segi reliabilitas sistem, pengujian integrasi data menunjukkan bahwa dalam waktu 15 jam, jumlah data yang diterima mencapai 81.67% hingga 93.80% dari total data yang diharapkan.

## 5. SARAN

Untuk meningkatkan penelitian ini dapat dilakukan kalibrasi sensor yang sesuai menggunakan sensor lain yang lebih akurat. Kalibrasi tersebut perlu dilakukan untuk memastikan data yang dihasilkan lebih valid dan dapat diandalkan. Perlu dikembangkan juga penelitian pada transmisi data terhadap jarak dan obstruksi tertentu, dan menggunakan protokol lain yang lebih stabil untuk jarak jauh. Pengujian dengan protokol komunikasi seperti LoRa, Zigbee, atau NB-IoT dapat dilakukan untuk menemukan protokol yang paling optimal dalam berbagai kondisi lingkungan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A. and Bezirtzoglou, E., 2020. Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in public health*, p.14.
- [2] Ilarri, S., Trillo-Lado, R. and Marrodán, L., 2022. Traffic and Pollution Modelling for Air Quality Awareness: An Experience in the City of Zaragoza. *SN Computer Science*, 3(4), p.281.
- [3] Toma, C., Alexandru, A., Popa, M. and Zamfiroiu, A., 2019. IoT solution for smart cities' pollution monitoring and the security challenges. *Sensors*, 19(15), p.3401.
- [4] Mahajan, S., Gabrys, J. and Armitage, J., 2021. AirKit: a citizen-sensing toolkit for monitoring air quality. *Sensors*, 21(12), p.4044.
- [5] Popa, C.L., Dobrescu, T.G., Silvestru, C.I., Firulescu, A.C., Popescu, C.A. and Cotet, C.E., 2021. Pollution and weather reports: Using machine learning for combating pollution in big cities. *Sensors*, 21(21), p.7329.
- [6] Kalra, Vandana & Baweja, Chaitanya & Simmarpreet, Dr & Chopra, Supriya. (2016). Influence of Temperature and Humidity on the Output Resistance Ratio of the MQ-135 Sensor. *International Journal of Computer Science and Software Engineering*. 6. 2277.
- [7] Krockner, G. (2014). MQ135 [GitHub repository]. GitHub. <https://github.com/GeorgK/MQ135>
- [8] Siebeneicher, H. (2025, March 15). Device to Device Communication with ESP-NOW. docs.arduino.cc. Retrieved March 25, 2025, from <https://docs.arduino.cc/tutorials/nano-esp32/esp-now/>
- [9] Idrees, Z., Zou, Z. and Zheng, L., 2018. Edge computing based IoT architecture for low cost air pollution monitoring systems: a comprehensive system analysis, design considerations & development. *Sensors*, 18(9), p.3021.

- [10] Söderby, K. (2025, March 15). Sending Data over MQTT. docs.arduino.cc. Retrieved March 25, 2025, from <https://docs.arduino.cc/tutorials/uno-wifi-rev2/uno-wifi-r2-mqtt-device-to-device/>