EVALUASI PARAMETER LINGKUNGAN MELALUI RANCANG BANGUN KUALITAS UDARA BERBASIS IOT

Imroatul Karimah[1], Nur Lailatu zahro Latifatu Rofiqoh[2], Nurul Sely Fadhillatur Rohmah[3], Alfin Najib[4], Arif Budiman[5], Muhamad Lutfi[6], Elvinda Bendra Agustina[7*]

[12,3,4,5,6,7]Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Institut Teknologi dan Sains Nahdlatul Ulama Pekalongan

Jln. Karangdowo No. 9 Kedungwuni Kab. Pekalongan, Jawa Tengah, 51173
[1]imroatka19@gmail.com, [2]lailatulzahro225@gmail.com, [3]selly166193@gmail.com, [4]alfinnajib889@gmail.com, [5]arifbudimanmaulana@gmail.com, [6]m14lutfi@gmail.com, [7]elvindabendra89@gmail.com

Abstract

Air quality in industrial areas may deteriorate due to production activities that generate gas emissions and alter microclimate conditions. This study aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based air quality monitoring system using MQ-135 and DHT11 sensors integrated with an ESP32 microcontroller and the Blynk platform. Measurements were conducted at several locations around the Pekalongan industrial area, with three measurement points at each location. The monitored parameters included CO_2 concentration, CO concentration, temperature, and humidity. The results show that under relatively clean air conditions, CO_2 concentrations ranged between 426–428 ppm and CO levels were approximately 1 ppm. In industrial areas, CO_2 concentrations were generally within the range of 400–800 ppm; however, a maximum value of 2002 ppm was detected at one measurement point in PT Textile. CO concentrations were mostly below the 9 ppm reference limit, with a maximum value of 10 ppm at a single point. The highest recorded temperature was 42°C at PT Kusuma, while humidity levels ranged from 60–79%.These findings indicate variations in air quality among locations influenced by industrial activities and local environmental conditions. The developed system demonstrates the capability to comparatively distinguish between relatively clean air and industrial environments, suggesting its potential as a low-cost IoT-based air quality monitoring device for preliminary environmental assessment in industrial areas.

Keywords : *Air Quality, IoT-Based Monitoring System, ESP32, MQ-135 Sensor, DHT11 Sensor, Real-Time Monitoring, Industrial Area*

Abstrak

Kualitas udara di kawasan industri berpotensi mengalami penurunan akibat aktivitas produksi yang menghasilkan emisi gas dan perubahan kondisi mikroklimat. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan sensor MQ-135 dan DHT11 yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32 serta platform Blynk. Pengukuran dilakukan pada beberapa lokasi di sekitar kawasan industri Pekalongan dengan tiga titik pengambilan data pada setiap lokasi. Parameter yang diukur meliputi konsentrasi CO_2, CO, suhu, dan kelembapan. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pada kondisi udara relatif bersih, konsentrasi CO_2 berada pada kisaran 426–428 ppm dan CO sekitar 1 ppm. Pada beberapa lokasi di sekitar industri, konsentrasi CO_2 umumnya berada pada rentang 400–800 ppm, namun terdeteksi nilai maksimum sebesar 2002 ppm pada salah satu titik di PT Textile. Konsentrasi CO sebagian besar berada di bawah batas referensi 9 ppm, dengan nilai maksimum 10 ppm pada satu titik pengukuran. Suhu tertinggi tercatat sebesar 42°C di PT Kusuma, sedangkan kelembapan berkisar antara 60–79%. Hasil ini menunjukkan adanya variasi kualitas udara antar lokasi yang dipengaruhi oleh aktivitas industri dan kondisi lingkungan setempat. Sistem yang dikembangkan mampu membedakan kondisi udara relatif bersih dan area industri secara komparatif, sehingga berpotensi digunakan sebagai perangkat monitoring kualitas udara berbasis IoT berbiaya rendah untuk pemantauan awal lingkungan industri.

Kata kunci : *Kualitas Udara, Sistem Monitoring Berbasis IoT, ESP32, MQ-135, DHT11, Pemantauan Lingkungan, Real-Time Monitoring, Kawasan Industri*

1. PENDAHULUAN

Kualitas udara merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi kesehatan manusia, khususnya bagi masyarakat yang tinggal di kawasan industri. Aktivitas industri sering menghasilkan emisi gas berbahaya, seperti karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO_2), serta meningkatkan suhu dan mempengaruhi kelembaban udara. Paparan jangka panjang terhadap gas CO dapat menyebabkan gangguan pada sistem pernapasan dan sistem saraf, sedangkan peningkatan (CO_2) dapat mengurangi kualitas udara dan menurunkan kenyamanan lingkungan [1]. Organisiasi Kesehatan Dunia (WHO) juga menyatakan bahwa paparan polusi udara berkontribusi terhadap peningkatan risiko penyakit kardovaskular dan gangguan fungsi paru-paru [2].

Kondisi mikroklimat seperti suhu dan kelembaban juga turut berperan dalam menentukan karakteristik persebaran polutan di udara terbuka. Namun, pemantauan kualitas udara di wilayah sekitar industri seringkali terfokus pada area di dalam kawasan industri, sementara area luar gerbang yang menjadi jalur aktivitas pekerja dan masyarakat sering luput dari pengawasan [3]. Berbagai organisasi nasional dan internasional, termasuk Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) dan lembaga keselamatan kerja, telah menetapkan standar kualitas udara ambien dan batas paparan di lingkungan kerja sebagai acuan konsentrasi aman polutan guna melindungi kesehatan manusia dan lingkungan [4] [5].

Disisi lain, perangkat monitoring kualitas udara profesional memiliki biaya yang tinggi dan akses terbatas, sehingga diperlukan alternatif sistem pemantauan yang lebih ekonomis, portabel, dan dapat diakses secara real-time [6]. Dalam beberapa tahun terakhri, pengembangan sistem monitoring kualitas udara berbasis sensor dengan biaya rendah semakin banyak diteliti sebagai Solusi praktis untuk pemantauan lingkungan [7].

Teknologi *Internet of Things* (IoT) menjadi solusi yang semakin banyak digunakan karena mampu menghubungkan sensor dengan platform digital berbasis internet untuk mengirimkan data secara langsung. Sensor MQ-135 telah banyak digunakan untuk mendeteksi gas berbahaya seperti CO dan CO_2, sedangkan DHT11 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembaban dengan tingkat akurasi yang sesuai untuk keperluan lingkungan luar [8].

Mikrokontroler seperti ESP32 mampu mengirimkan data secara nirkabel melalui internet dan menampilkannya dalam aplikasi *Blynk* untuk pemantauan jarak jauh secara *real-time*. Penggunaan kombinasi ini memungkinkan pemantauan kualitas udara dilakukan secara efisien di daerah-daerah yang sebelumnya sulit dijangkau [9].

Sejumlah penelitian nasional telah membuktikan efektivitas sistem IoT dalam pemantauan kualitas udara. Erik et al. [10] mengintegrasikan MQ-135 dan DHT11 dengan sistem IoT untuk mendeteksi kualitas udara secara efektif pada lingkaran kota.

Selain itu, Taufiq et al. [11] membuktikan bahwa MQ-135 mampu mendeteksi konsentrasi CO_2 dan CO di area perkotaan dengan cukup baik, sehingga layak digunakan pada area industri. Sistem monitoring kualitas udara berbasis Iot juga dibuktikan oleh Faturrahman et al. [12] yang menekankan pentingnya pengawasan gas berbahaya dengan platform IoT.

Penggunaan teknologi Internet of Things (IoT) dalam pemantauan kualitas udara menawarkan solusi yang praktis, real-time, dan terintegrasi. Beberapa studi sebelumnya menunjukkan efektivitas sensor MQ-135 dan DHT11 yang diintegrasikan dengan platform IoT, khususnya Blynk, dalam mendeteksi parameter gas dan kelembapan udara [13] [14]. Sistem *Internet of Things (IoT)* ini memungkinkan pemantauan jarak jauh, pengambilan data yang cepat, serta visualisasi hasil secara langsung melalui perangkat mobile [15].

Namun, Sebagian besar penelitian tersebut belum secara spesifik mengkaji penerapan sistem monitoring pada kawasan industri dengan pendekatan pengujian pada dua kondisi lingkungan berbeda, yaitu udara relative bersih dan udara dengan tingkat polusi lebih tinggi. Selain itu, implementasi sistem monitoring kualitas udara di kawasan industri Pekalongan masih terbatas, sehingga diperlukan kajian berbasis kondisi lingkungan untuk memperoleh gambaran kualiitas udara secara kontekstual.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan mengembangkan sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT yang mampu mengukur kadar CO, CO_2, suhu, dan kelembapan di sekitar kawasan industri Pekalongan, serta mengevaluasi kemampuan

sistem dalam memedakan kondisi udara bersih dan tercemar.

2. METODOLOGI PENELITIAN

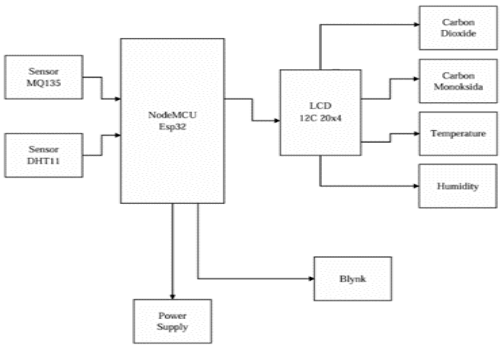
Penelitian ini merupakan penelitian rancang bangun yang bertujuan merancang serta mengimplementasikan sistem monitoring kualitas udara berbasis *Internet of Things (IoT)*. Perancangan dan pengujian awal dilakukan di Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi Institut Teknologi dan Sains Nahdlatul Ulama Pekalongan pada tahun 2025. Pengujian lapangan dilakukan di sekitar kawasan industry Pekalongan pada dua kondisi lingkungan berbeda. Tabel 1 menunjukkan alat dan bahan yang digunakan.

TABEL I. ALAT DAN BAHAN

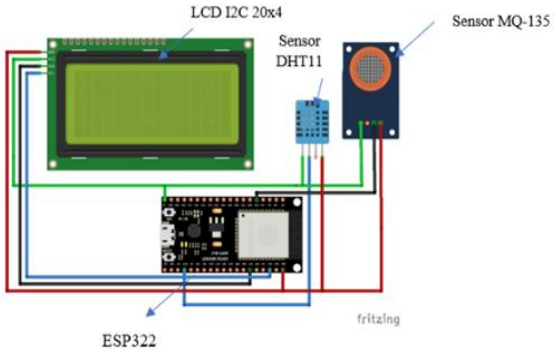
No	Keterangan	Jumlah
1	ESP 32 Devkit V1	1 buah
2	Sensor MQ-135	1 buah
3	Sensor DHT11	1 buah
4	LCD I2C 20x4	1 buah
5	Kotak *cashing* ukuran 18 cm x 11 cm x 6 cm	1 buah

Perancangan Sistem

Sistem monitoring dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali yang terhubung dengan sendor MQ-135 dan DHT11. Sensor MQ-135 digunakan untuk mendeteksi perubahan konsentrasi gas CO dan CO_2 berdasarkan perubahan resistansi sensor, sedangkan DHT11 digunakan uuntuk mengukur suhu dan kelembapan. Data hasil pembacaan sensor diproses oleh ESP32, ditampilkan pada LCD I2C 20x4, serta dikirim melalui jaringan Wi-Fi ke Platform *Blynk* untuk prmantauan jarak jauh secara *real-time*. Diagram blok dan rangkaian system ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



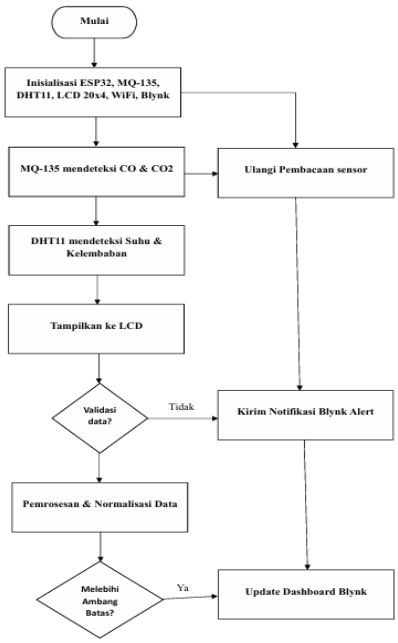
Gambar 1. Diagram Blok



Gambar 2. Desain Rangkaian

Alur Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan sebagai berikut:



Gambar 3. Flowchart

Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan di beberapa lokasi di sekitar kawasan industri Pekalongan. Pada setiap Lokasi, pengukuran dilakukan pada tiga titik berbeda untuk memperoleh Gambaran variaasi kondisi lingkungan setempat. Pengambilan data dilakukan satu kali pada masing-masing titik. Parameter yang diukur meliputi konsentrasi CO, CO_2, suhu, dan kelembapan. Setiap pengukuran dilakukan dengan menempatkan alat pada titik yang telah ditentukan dan menunggu hingga pembacaan sensor stabil sebelum data dicatat

Metode Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan ppendekatan statistic deskriptif. Untuk setiap Lokasi dihitung nilai rata-rata dari tiga titik pengukuran menggunakan persamaan (1):

$$\bar{X} = \frac{X_1+X_2+X_3}{3} \qquad (1)$$

di mana:

X_1, X_2, X_3 adalah hasil pengukuran pada tiga titik

$\bar{X}$ adalah nilai rata-rata pada lokasi tersebut

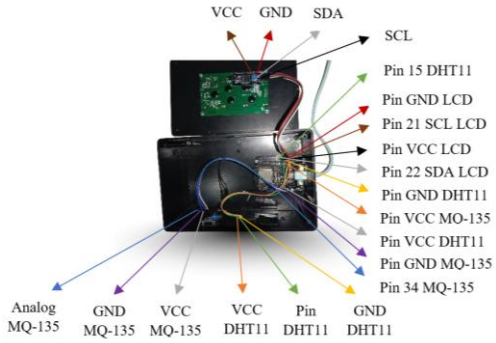
Perbandingan dilakukan antara lokasi dengan kondisi udara relative bersih dan lokasi dengan tingkat polusi lebih tinggi untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam membedakan kondisi lingkungan.

Pengoperasian Sistem

Setelah proses inisialisasi dan pemanasan awal sensor, sistem akan secara otomatis membaca parameter udara sesuai interval waktu yang ditentukan, menampilkan hasil pada LCD, dan mengirimkan data ke aplikasi *Blynk*. Sistem akan memberikan notifikasi peringatan melalui indikator LED jika parameter melebihi batas ambang yang telah ditentukan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancang bangun sistem monitoring kualitas udara tampak dalam dan luar dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5.



Gambar 4. Rancang Bangun Monitoring Kualitas Udara Tampak Dalam



Gambar 5. Rancang Bangun Monitoring Kualitas Udara Tampak Luar

Rancang bangun monitoring Kualitas udara berbasis ESP32 yang terintegrasi *Platform Blynk* ini melibatkan beberapa komponen utama di antaranya ESP32 Devkit V1 sebagai mikrokontroler yang mengatur sistem, sensor MQ-135 untuk mengukur gas CO_2 dan CO dan sensor DHT11 untuk mengukur suhu dan kelembaban udara. Melibatkan LCD 20x4 guna menampilkan teks agar lebih jelas. Sensor DHT11 dan sensor MQ-135 ditempatkan pada bagian luar box casing supaya dapat mengukur kualitas udara dengan akurat. Digunakan platform blynk IoT untuk menampilkan pengendalian perangkat fisik secara jarak jauh melalui pengguna secara real-time. Gambar 5 menunjukkan tampilan blynk yang menampilkan 4 indikator utama yaitu CO_2, CO, suhu dan kelembaban.



Gambar 6. Platfom Blynk Smarthone

Perancangan system monitoring kualitas udara berbasis *IoT* diawali dengan proses inisialisasi dan pemanasan awal (*pre-heating*) sensor untuk memperoleh pembacaan yang stabil sebelum pengambilan data. Sensor MQ-135 dan DHT11 diuji untuk memastikan respons terhadap perubahan konsentrasi gas, suhu, dan kelembapan. Proses ini dilakukan guna memastikan sistem dapat berfungsi dengan baik sebelum digunakan pada pengukuran di lingkungan industri.

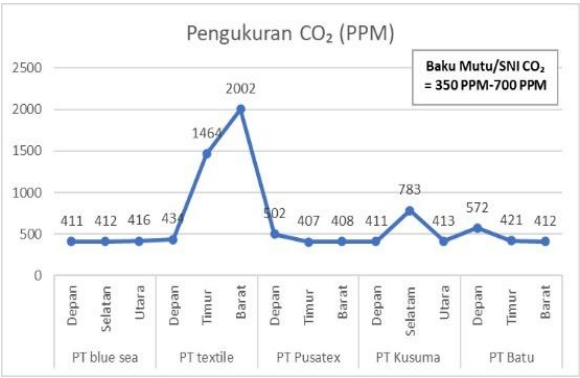
Pengambilan data dilakukan di dua lokasi untuk udara relatif bersih dan lima lokasi berbeda di sekitar kawasan industri, yaitu PT Blue Sea, PT Textile, PT Pusatex, PT Kusuma, dan PT Batu. Pada setiap lokasi dilakukan pengukuran di tiga titik berbeda, kemudian dinilai rata-rata sebagai representasi kondisi lokasi tersebut Data yang diperoleh menunjukkan berbagai variasi kualitas udara dan kondisi lingkungan di setiap area.

TABEL II. RATA-RATA KONSENTRASI CO_2 PADA SETIAP LOKASI

Lokasi	Titik 1 (ppm)	Titik 2 (ppm)	Titik 3 (ppm)	Rata-rata (ppm)
Wilayah 1	445	413	421	426
Wilayah 2	460	409	415	428
PT Blue Sea	411	412	416	413
PT Textile	1464	2002	502	1322
PT Pusatex	407	408	411	409
PT Kusuma	783	413	572	589
PT Batu	421	412	415	416



Gambar 7. Pengukuran Hasil CO_2 Pada Udara Bersih



Gambar 8. Pengukuran Hasil CO_2 Disekitar Perusahaan /PT

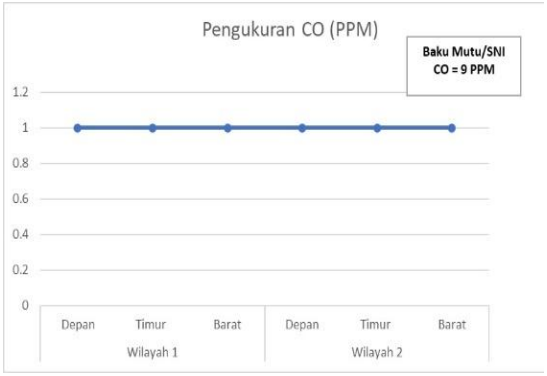
Berdasarkan Tabel 2, Gambar 7, dan Gambar 8, menunjukkan bahwa nilai konsentrasi CO_2 pada wilayah yang dikategorikan sebagai udara relatif bersih berada pada rentang 426–428 ppm, mendekati konsentrasi atmosfer normal (~400 ppm). Hal ini menunjukkan bahwa lokasi tersebut tidak mengalami peningkatan signifikan akibat aktivitas industri. Sebaliknya, pada beberapa lokasi di sekitar kawasan industri terjadi variasi konsentrasi yang lebih besar. PT Blue Sea, PT Pusatex, dan PT Batu menunjukkan rata-rata konsentrasi di bawah 500 ppm, yang masih berada dalam rentang referensi 350–700 ppm yang digunakan sebagai acuan pembanding kualitas udara.

Namun, PT Kusuma menunjukkan peningkatan hingga rata-rata 589 ppm, mendekati batas atas referensi tersebut. Peningkatan paling signifikan terjadi pada PT Textile dengan rata-rata 1322 ppm akibat lonjakan pada salah satu titik pengukuran yang mencapai 2002 ppm. Nilai maksimum sebesar 2002 ppm menunjukkan variasi lokal yang signifikan dan berbeda jauh dibandingkan lokasi lainnya. Lonjakan ini dapat dipengaruhi oleh aktivitas industri di sekitar titik pengukuran atau respons sensor MQ-135 terhadap keberadaan gas lain di lingkungan. Meskipun nilai tersebut jauh di atas rentang referensi 350 –700 ppm, sebagian besar lokasi masih berada dalam kisaran yang relatif stabil.

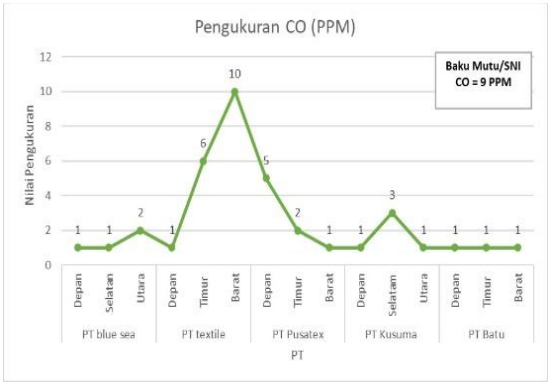
Secara umum, perbandingan antara udara relatif bersih dan lokasi sekitar industri menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi CO_2 pada beberapa titik tertentu, yang mengindikasikan pengaruh aktivitas industri terhadap kondisi kualitas udara lokal. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa aktivitas industri dapat meningkatkan konsentrasi gas di udara terbuka, terutama pada area dengan ventilasi alami yang terbatas.

TABEL III RATA-RATA KONSENTRASI CO PADA SETIAP LOKASI

Lokasi	Titik 1 (ppm)	Titik 2 (ppm)	Titik 3 (ppm)	Rata-rata (ppm)
Wilayah 1	1	1	1	1,0
Wilayah 2	1	1	1	1,0
PT Blue Sea	1	1	2	1,3
PT Textile	6	10	5	7,0
PT Pusatex	2	1	1	1,3
PT Kusuma	3	1	1	1,7
PT Batu	1	1	1	1,0



Gambar *9*. Pengukuran Hasil CO Pada Udara Bersih



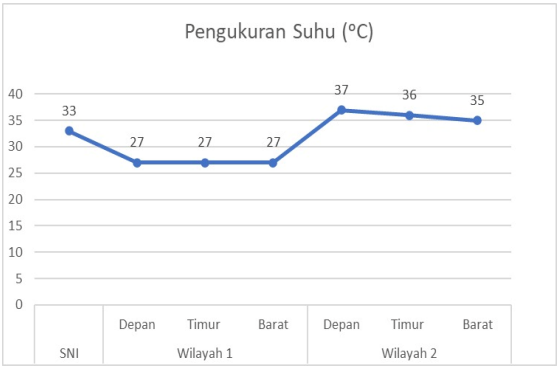
Gambar 10. Pengukuran Hasil CO Disekitar Perusahaan /PT

Berdasarkan Tabel 3, Gambar 9, dan Gambar 10 menunjukkan bahwa nilai konsentrasi CO pada wilayah yang dikategorikan sebagai udara relatif bersih menunjukkan nilai rata-rata sebesar 1 ppm. Nilai ini jauh di bawah batas referensi 9 ppm, sehingga menunjukkan kondisi udara yang stabil dan tidak terpengaruh sumber emisi signifikan. Pada lokasi sekitar kawasan industri, sebagian besar rata-rata konsentrasi CO masih berada dalam rentang 1–2 ppm. Namun, PT Textile menunjukkan peningkatan rata-rata hingga 7 ppm, dengan nilai maksimum 10 ppm pada salah satu titik pengukuran. Nilai tersebut sedikit melebihi batas referensi 9 ppm dan mengindikasikan adanya sumber emisi lokal pada titik tersebut.

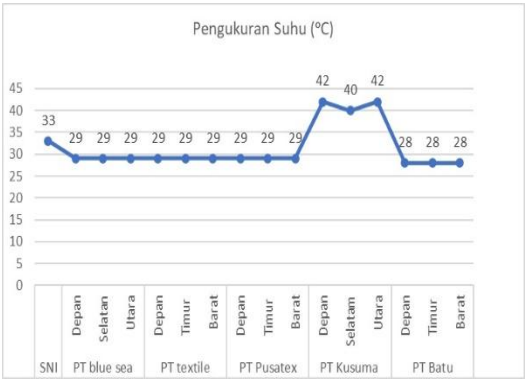
Secara keseluruhan, rata-rata konsentrasi CO pada sebagian besar lokasi masih berada di bawah batas ambang yang digunakan sebagai acuan, sehingga parameter CO dapat dikategorikan relatif terkendali. Perbedaan nilai antar lokasi menunjukkan bahwa sistem monitoring mampu mendeteksi variasi konsentrasi CO sesuai kondisi lingkungan setempat.

TABEL IV RATA-RATA SUHU PADA SETIAP LOKASI

Lokasi	Titik 1 (°C)	Titik 2 (°C)	Titik 3 (°C)	Rata-rata (°C)
Wilayah 1	27	27	27	27,0
Wilayah 2	37	36	35	36,0
PT Blue Sea	29	29	29	29,0
PT Textile	29	29	29	29,0
PT Pusatex	29	29	29	29,0
PT Kusuma	42	40	42	41,3
PT Batu	28	28	28	28,0



Gambar 11. Pengukuran Hasil Suhu Pada Udara Bersih



Gambar 12. Pengukuran Hasil Suhu Disekitar Perusahaan /PT

Berdasarkan Tabel 4, Gambar 11, dan Gambar 12 menunjukkan bahwa nilai suhu pada wilayah yang dikategorikan sebagai udara relatif bersih berada pada kisaran 27–36°C. Wilayah 1 menunjukkan suhu rata-rata 27°C, sedangkan Wilayah 2 mencapai rata-rata 36°C, yang menunjukkan adanya variasi kondisi mikroklimat

antar lokasi terbuka. Pada area sekitar industri, sebagian besar lokasi seperti PT Blue Sea, PT Textile, dan PT Pusatex menunjukkan suhu relatif stabil pada rata-rata 29°C. Namun, PT Kusuma menunjukkan peningkatan suhu yang signifikan dengan rata-rata 41,3°C dan nilai maksimum 42°C. Nilai ini jauh lebih tinggi dibanding lokasi lainnya dan mengindikasikan adanya pengaruh aktivitas industri atau sumber panas lokal di sekitar titik pengukuran.

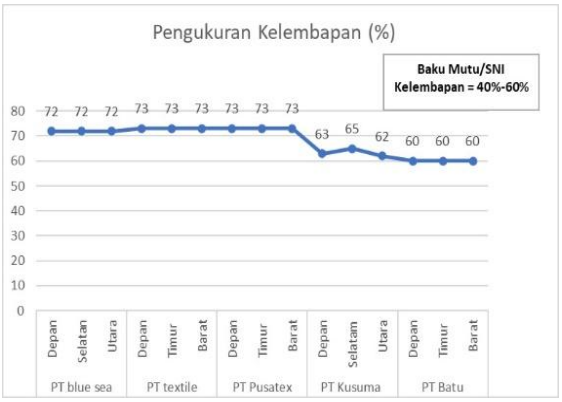
Suhu yang tinggi dapat mempercepat proses reaksi kimia di udara serta memengaruhi persebaran polutan. Perbedaan suhu antar lokasi menunjukkan bahwa sistem monitoring mampu mendeteksi variasi kondisi termal lingkungan secara responsif.

TABEL V RATA-RATA KELEMBAPAN PADA SETIAP LOKASI

Lokasi	Titik 1 (%)	Titik 2 (%)	Titik 3 (%)	Rata-rata (%)
Wilayah 1	70	70	70	70,0
Wilayah 2	75	78	85	79,3
PT Blue Sea	72	72	72	72,0
PT Textile	73	73	73	73,0
PT Pusatex	73	73	73	73,0
PT Kusuma	63	65	62	63,3
PT Batu	60	60	60	60,0



Gambar 13 Pengukuran Hasil Kelembaban Pada Udara Bersih



Gambar 14 Pengukuran Hasil Kelembaban Disekitar Perusahaan /PT

Berdasarkan Tabel 5, Gambar 13, dan Gambar 14 menunjukkan bahwa nilai kelembapan udara pada wilayah yang dikategorikan sebagai udara relatif bersih berada pada kisaran 70–79,3%, yang berada di atas rentang referensi 40–60%. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi mikroklimat di area tersebut cenderung lembap.

Pada lokasi sekitar kawasan industri, sebagian besar lokasi seperti PT Blue Sea, PT Textile, dan PT Pusatex menunjukkan rata-rata kelembapan sekitar 72–73%, yang juga berada di atas rentang referensi. PT Kusuma menunjukkan nilai yang sedikit lebih rendah dengan rata-rata 63,3%, sedangkan PT Batu berada tepat pada batas atas referensi yaitu 60%.

Kelembapan yang relatif tinggi dapat memengaruhi proses dispersi polutan dan berpotensi meningkatkan akumulasi gas di udara terbuka. Variasi nilai kelembapan antar lokasi menunjukkan bahwa sistem monitoring mampu mendeteksi perbedaan kondisi mikroklimat lingkungan secara konsisten.

4. Kesimpulan dan Saran

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring kualitas udara berbasis *Internet of Things (IoT)* menggunakan sensor MQ-135 dan DHT11 yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32 serta platform Blynk. Sistem mampu menampilkan dan mengirimkan data parameter CO_2, CO, suhu, dan kelembapan secara daring pada beberapa lokasi di sekitar kawasan industri Pekalongan. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa sebagian besar lokasi memiliki konsentrasi CO_2 pada rentang 400–800 ppm dan konsentrasi CO di bawah 9 ppm. Namun, pada beberapa titik tertentu terdeteksi lonjakan signifikan, seperti nilai maksimum CO_2 sebesar 2002 ppm di PT Textile dan suhu hingga 42°C di PT Kusuma. Temuan ini menunjukkan adanya variasi kualitas udara antar

lokasi yang dipengaruhi oleh aktivitas industri dan kondisi mikroklimat setempat.

Secara umum, sistem yang dikembangkan mampu membedakan kondisi udara relatif bersih dan udara di sekitar kawasan industri berdasarkan variasi nilai parameter yang terukur. Kontribusi penelitian ini terletak pada implementasi sistem monitoring kualitas udara berbiaya rendah yang dapat digunakan sebagai alat pemantauan awal (early monitoring) kondisi lingkungan industri berbasis IoT.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada aspek kalibrasi sensor yang belum dibandingkan secara langsung dengan alat ukur standar profesional, sehingga evaluasi difokuskan pada analisis komparatif antar lokasi. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan kalibrasi lanjutan terhadap alat referensi bersertifikat serta pengambilan data secara kontinu dalam periode waktu yang lebih panjang guna memperoleh analisis tren kualitas udara yang lebih komprehensif.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ucapkan terima kasih kepada Ibu Elvinda Bendra Agustina atas bimbingan dan dukungannya selama proses pengerjaan proyek IoT ini.

Daftar Pustaka:

[1] S. A. Zahara, A. R. S. Siregar and Marniati, "Analisis Mendalam Bahaya Polusi Udara dan Upaya Pencegahan Preventif yang Efektif," *Antigen: Jurnal Kesehatan Masyarakat dan Ilmu Gizi,* vol. 3, no. 3, pp. 186-199, 2025.

[2] World Health Organization, "Ambient (outdoor) air pollution," WHO, 24 Oktober 2024. [Online]. Available: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-%28outdoor%29-air-quality-and-health?utm_. [Accessed 14 February 2026].

[3] Muhaniroh and R. Syech, "Analisis Pengaruh Suhu Udara, Curah Hujan, Kelembaban Udara dan Kecepatan Angin Terhadap Arah Penyebaran dan Akumulasi Particulate Matter (Pm10): Studi Kasus Kota Pekanbaru," *Komunikasi Fisika Indonesia,* vol. Volume 18, no. Nomor 1, pp. 48-57, 2021.

[4] A. Goshua, C. Akdis and K. C. Nadeau, "World Health Organization Global Air Quality Guideline Recommendations: Executive Summary," *Allergy,* vol. 77, no. 7, p. 1955, 2022.

[5] B. Hoffmann, H. Boogaard, A. d. Nazelle, Z. J. Andersen, M. Abrasom, M. Brauer, B. Brunekreef, F. Forastiere, W. Huang, H. Kan, J. D. Kaufman, K. Katsouyanni, M. Kryzanowski and N. Kuenzli, "WHO Air Quality Guidelines 2021-Aiming for Healthier Air for all: A Joint Statement by Medical, Publik Health, Scientific Societies and Patient Representative Organisations," *International Journal of Public Health Commentary,* vol. 66, no. 1, pp. 1-4, 2021.

[6] A. Aziz, M. Rafif, S. F. Nurjihan and B. Nixon, "Sistem Pemantauan Kualitas Udara Portable Menggunakan GPS Berbasis Internet of Things," *Journal Of Communications, Antennas and Propagation,* vol. 6, no. 2, pp. 325-331, 2025.

[7] P. Yushananta, "Very Low-Cost, Internet of Things (IoT) Air Quality Monitoring Platform," *Jurnal Aisyah: Jurnal Ilmu Kesehatan,* vol. 8, no. 2, pp. 441-446, 2023.

[8] M. G. Al-Faris and Z. R. S. Elsi, "Air Quality Monitoring System Based Internet Of Things," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence,* vol. 4, no. 2, p. 669=673, 2024.

[9] R. Muttaqin, W. S. W. Prayitno, N. E. setyaningsih and U. Nurbaiti, "Rancang Bangun Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Iot (Internet Of Things) dengan Sensor DHT11 dan Sensor MQ135," *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan,* vol. 6, no. 2, pp. 102-115, 2024.

[10] M. Erik, F. Nurdiyanto and R. Hidayat, "AeroSenseMonitor: Integrasi Sensor DHT11 dan MQ-135 untuk Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Arduino Uno," *Jurnal Komputer dan Elektro Sains,* vol. 2, no. 2, pp. 8-11, 2024.

[11] A. J. Taufiq, L. Hayat, B. Muchtasjar, Iskahar, D. G. Romandolo and R. B. Amarudin, "Sistem Monitoring Polusi Udara Berbasis Sensor MQ-135 Untuk Deteksi Gas CO_2 Dan CO: Studi Kasus Di Lingkungan Perkotaan," *Techno,* vol. 25, no. 2, pp. 131-138, 2024.

[12] L. A. Faturrahman, B. F. Tanjung and Y. Saragih, "Sistem Monitoring dan Deteksi Dini Kualitas udara Berbasis Internet Of Things," *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elekro Terapan),* vol. 13, no. 3, pp. 1830-1837, 2024.

[13] W. B. Bagye and M. Ashari, "Sistem infoormasi xx," *Misi,* pp. 14-20, 2018.

[14] F. A. Habibi and U. Zaky, "Sistem Monitorin Kualitas Udara dan Optimasi Sensor Menggunakan Internet Of Things Berbasis Android," *Jurnal Informatika Teknologi dan Sains (JINTEKS),* vol. 7, no. 2, pp. 650-658, 2025.

[15] R. Hidayati, K. Sari, Y. Halawa, A. T. A. and M. A. Harits, "Sistem Pemantauan Kualitas Udara secara Real-Time menggunakan ESP32 dan Teknologi IoT," *Djtechno: Jurnal Teknologi Informasi,* vol. 5, no. 2, pp. 232-245, 2024.