

PENERAPAN ZIGBEE DALAM SISTEM MONITORING KUALITAS UDARA BERBASIS IOT

Raynaldhi Yoshua Sange¹⁾, Damar Widjaja²⁾

1) Program Studi Teknik Elektro Universitas Sanata Dharma

E-mail: 215114033@student.usd.ac.id

2) Program Studi Teknik Elektro Universitas Sanata Dharma

E-mail: damar@usd.ac.id

Abstrak

Untuk mengatasi pencemaran udara akibat gas CO, NO₂, dan partikel PM_{2.5} yang sulit dideteksi, penelitian ini bertujuan untuk menerapkan teknologi ZigBee dalam sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT). Sistem ini dibangun menggunakan dua node: transmitter yang dilengkapi Arduino Mega 2560, sensor MICS-6814 untuk CO dan NO₂, serta PMS5003 untuk PM_{2.5}, dan receiver yang menggunakan NodeMCU ESP8266. Data yang diperoleh dari sensor dikirimkan secara nirkabel melalui modul ZigBee dengan topologi point-to-point menuju node receiver, yang kemudian meneruskannya ke platform IoT Antares untuk visualisasi dan pemantauan jarak jauh. Hasilnya, sistem ini berhasil memonitor konsentrasi gas dan partikel debu secara efektif. Dalam penelitian ini, lingkungan kampus yang hijau mempunyai kualitas udara yang paling baik dengan parameter ISPU nilai CO = 2,675, NO₂ = 48,75 dan PM_{2.5} = 63,8. Sedangkan tempat pembuangan akhir mempunyai kualitas udara terburuk dengan parameter ISPU nilai CO = 94,5, NO₂ = 197,5 dan PM_{2.5} = 140,76. Pada aspek komunikasi, data memperlihatkan adanya korelasi terbalik antara baud rate dengan delay. Delay terbesar adalah 912 ms pada baud rate 1200 bps dengan jarak antara pemancar dan penerima 60 meter.

Kata kunci: ZigBee, Monitoring, Kualitas Udara, IoT.

Pendahuluan

Pencemaran udara merupakan masalah lingkungan global dan isu kesehatan masyarakat yang krusial [1]. Kondisi atmosfer yang terkontaminasi oleh berbagai unsur asing dan berbahaya, baik yang berasal dari sumber alami seperti letusan gunung berapi maupun dari aktivitas antropogenik seperti emisi kendaraan bermotor dan industri, dapat menyebabkan degradasi lingkungan dan dampak buruk pada kesehatan manusia, khususnya gangguan pernapasan [2]. Di Indonesia, kendaraan bermotor menjadi kontributor polusi udara terbesar, melepaskan residu gas beracun seperti karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), dan partikel halus PM_{2.5} yang berbahaya bagi sistem pernapasan [3]. Mengingat polusi udara sering kali tidak dapat dideteksi secara akurat oleh panca indra, upaya pemantauan kualitas udara menjadi sangat penting dan mendesak.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara. Liu et al. (2021) mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara dalam ruangan yang menggunakan mikrokontroler STM32F103C8T6 dan modul ZigBee untuk mendeteksi PM_{2.5}, CO₂, suhu, dan kelembaban [4]. Sementara itu, penelitian Rosa et al. (2020) berhasil membuat sistem pemantauan udara portabel dengan sensor MQ-7 dan MQ-135 untuk mendeteksi gas berbahaya seperti CO, CO₂, dan NO_x, meskipun sistem tersebut belum terintegrasi dengan teknologi IoT [5]. Penelitian lain, seperti yang dilakukan oleh Anisa dan Krisnadi (2020), berfokus pada sistem telemetri untuk wireless parking sensor menggunakan XBee Board [6]. Demikian pula, Sreelakshmi et al. (2018) merancang sistem pemantauan tanaman berbasis IoT yang memanfaatkan XBee S2C sebagai router untuk mengirimkan data sensor ke platform IoT [7]. Meskipun penelitian-penelitian terdahulu telah menunjukkan keberhasilan dalam pengembangan sistem pemantauan dan komunikasi data, masih terdapat celah, terutama dalam perancangan sistem pemantauan gas berbahaya di udara terbuka yang terintegrasi secara komprehensif dengan platform IoT untuk pengawasan jarak jauh.

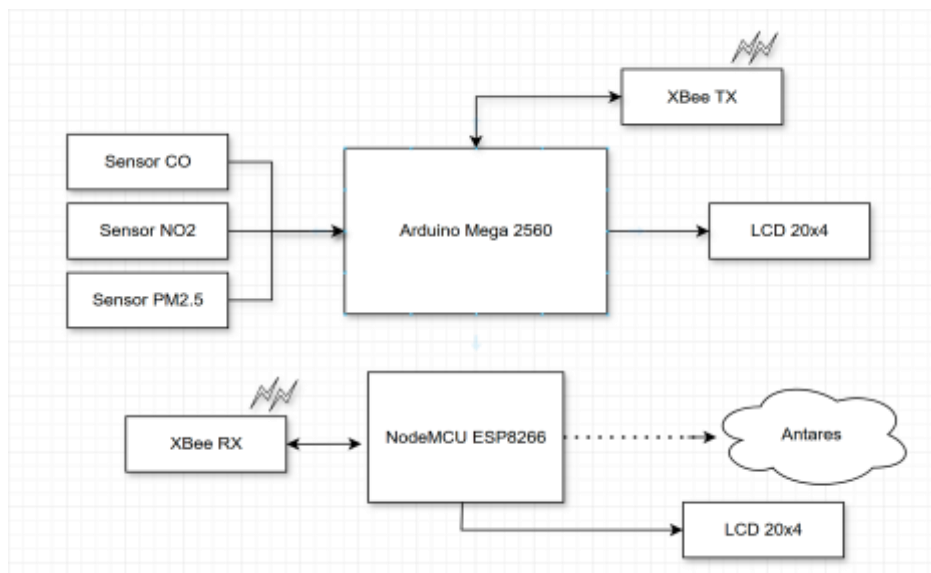
Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pengukur kadar gas CO, NO₂, dan partikel PM_{2.5} di udara yang dapat dipantau secara nirkabel melalui platform IoT. Sistem ini dirancang menggunakan arsitektur dua node, yaitu transmitter dan receiver. Node transmitter dilengkapi dengan mikrokontroler Arduino

Mega 2560 yang terintegrasi dengan sensor CO, NO₂, dan PM2.5 serta modul XBee untuk pengiriman data nirkabel. Sementara itu, node receiver menggunakan modul XBee dan NodeMCU ESP8266 yang mendukung koneksi WiFi, memungkinkan data yang diterima dari node transmitter untuk diunggah dan dimonitor melalui platform IoT Antares. Dengan demikian, sistem yang diusulkan ini diharapkan dapat menjadi solusi efektif untuk memantau kualitas udara secara real-time dan jarak jauh, memberikan data yang akurat dan dapat diakses kapan saja untuk mendukung pengambilan keputusan terkait lingkungan.

Metodologi Penelitian

Perancangan Hardware

Perancangan perangkat keras sistem ini mengadopsi arsitektur dua node, yaitu *Transmitter* dan *Receiver*, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1. Node *Transmitter* berfungsi sebagai unit akuisisi data, menggunakan Arduino Mega 2560 sebagai mikrokontroler utama untuk memproses data dari sensor PMS5003 (pendeteksi PM2.5) dan sensor MICS-6814 (pendeteksi gas CO dan NO₂) [8] [9]. Data yang telah diproses kemudian ditampilkan secara lokal pada LCD 20x4 dan secara bersamaan dikirimkan secara nirkabel melalui modul XBee S2C. Di sisi lain, Node *Receiver* menggunakan ESP8266 sebagai mikrokontroler, yang bertugas menerima data dari *Transmitter* melalui modul XBee S2C pasangannya. Data yang diterima selanjutnya ditampilkan pada LCD 20x4 dan diteruskan ke platform *Internet of Things* (IoT) Antares untuk pemantauan jarak jauh.



Gambar 1. Diagram blok sistem

Implementasi Perhitungan ISPU

Setelah diakuisisi, data dari sensor terlebih dahulu melalui tahap pra-pemrosesan untuk mendapatkan nilai rata-rata. Nilai rata-rata ini kemudian dikonversi menjadi Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), yang bertujuan untuk menyajikan informasi kualitas udara ambien dalam format yang seragam dan mudah dipahami oleh masyarakat [10]. Kategori dan rentang nilai ISPU yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada standar yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kategori Indeks Standar Pencemaran Udara ISPU [10]

Rentang	Kategori	Penjelasan
1-50	Baik	Tingkat mutu udara yang sangat baik, tidak memberikan efek negatif terhadap manusia, hewan dan tumbuhan
51-100	Sedang	Tingkat mutu udara masih diterima pada kesehatan manusia, hewan dan tumbuhan.
101-200	Tidak Sehat	Tingkat mutu udara yang bersifat merugikan pada manusia, hewan dan tumbuhan.
201-300	Sangat Tidak Sehat	Tingkat mutu udara yang dapat meningkatkan resiko kesehatan pada sejumlah segmen populasi yang terpapar
301	Berbahaya	Tingkat mutu udara yang dapat merugikan kesehatan serius pada populasi dan perlu penanganan cepat.

Perhitungan ISPU dilakukan berdasarkan nilai ISPU batas atas, batas bawah, ambien batas atas, ambien batas bawah, dan konsentrasi ambien hasil pengukuran. Rumus dari perhitungan ISPU sebagai berikut [10]:

$$I = \frac{Ia - Ib}{Xa - Xb} (Xx - Xb) + Ib \quad (1)$$

dengan I adalah ISPU terhitung, Xa adalah konsentrasi ambien batas atas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ia adalah ISPU batas atas, Xb adalah konsentrasi ambien batas bawah ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ib adalah ISPU batas bawah, dan Xx adalah konsentrasi ambien nyata hasil pengukuran ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Hasil dan Pembahasan

Pengujian Sistem Pendeteksi gas dan partikel debu

Pengujian sistem dilakukan di tiga lokasi yang berbeda. Lokasi pertama dilakukan di lingkungan kampus, lokasi kedua adalah Tempat Pembuangan Akhir (TPA), dan lokasi ketiga adalah jalan raya. Metode pengambilan data pada setiap lokasi adalah pencatatan secara berkala dengan interval lima menit selama durasi dua jam. Dari proses tersebut, terkumpul sebanyak 24 data untuk setiap kondisi. Data yang diolah lebih lanjut merupakan nilai rata-rata yang dihitung dari keseluruhan data yang telah diakuisisi.

Tabel 2. Data di Lingkungan Kampus

	Hasil pengukuran ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	CO	NO2	PM2.5
Kampus	214	78	26
Jalan Raya	1747	181	104
Tempat Pembuangan Akhir	7549	1116	94

Pengujian pertama dilaksanakan di lingkungan Kampus 3 Universitas Sanata Dharma. Analisis terhadap data yang diperoleh menunjukkan bahwa kualitas udara di lokasi pengujian tergolong dalam kategori Sehat. Penentuan kategori ini didasarkan pada nilai rata-rata setiap parameter yang dihitung mengacu pada standar Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU).

Perhitungan ISPU pada rata – rata pengumpulan data CO

$$I = \frac{50 - 0}{4000 - 0} \times (214 - 0) + 0 \quad (2)$$

$$= \frac{50}{4000} \times 214 = 2,675 \quad (3)$$

Dalam Parameter ISPU nilai **2,675** masuk dalam kategori **Baik**.

Perhitungan ISPU pada rata – rata pengumpulan data NO2

$$I = \frac{50 - 0}{80 - 0} \times (78 - 0) + 0 \quad (4)$$

$$= \frac{50}{80} \times 78 = 48,75 \quad (5)$$

Dalam Parameter ISPU nilai **48,75** masuk dalam kategori **Baik**.

Perhitungan ISPU pada rata – rata pengumpulan data PM2.5

$$I = \frac{100 - 51}{55,4 - 15,6} \times (26 - 15,6) + 51 \quad (6)$$

$$= \frac{5049}{29,8} \times 10,4 + 51 = 63,8 \quad (7)$$

Dalam Parameter ISPU nilai **63,8** masuk dalam kategori **Sedang**.

Tingginya nilai PM2.5 ini diduga disebabkan oleh aktivitas pemotongan kayu dan tripleks oleh mahasiswa di area laboratorium saat penelitian ini dilakukan, yang berdekatan dengan lokasi pengambilan data.

Pengujian ketiga dilaksanakan di sebuah ruas jalan raya. Analisis terhadap data yang diperoleh menunjukkan bahwa kualitas udara di lokasi pengujian tergolong dalam kategori sedang. Dengan perhitungan yang sama seperti (2) dan (3) dalam Parameter ISPU nilai CO = **21,8375** masuk dalam kategori **Baik**. Dengan perhitungan yang sama seperti (4) dan (5) dalam Parameter ISPU nilai NO2 = **92,18** masuk dalam kategori **Sedang**. Dengan perhitungan yang sama seperti (6) dan (7) dalam Parameter ISPU nilai PM2.5 = **151,08** masuk dalam kategori **Tidak Sehat**. Tingginya nilai PM2.5 ini disebabkan oleh aktivitas pembakaran sampah oleh warga di sekitar lokasi pengambilan data, yang menjadi sumber emisi lokal pada saat pengukuran.

Pengujian kedua dilaksanakan di Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Analisis terhadap data yang berhasil dihimpun menunjukkan bahwa kualitas udara di lokasi pengujian tergolong dalam kategori Tidak Sehat. Dengan perhitungan yang sama seperti (2) dan (3) dalam Parameter ISPU nilai CO = **94,5** masuk dalam kategori **Sedang**. Dengan perhitungan yang sama seperti (4) dan (5) dalam Parameter ISPU nilai NO2 = **197,5** masuk dalam kategori **Tidak sehat** dan mendekati Sangat Tidak Sehat. Dengan perhitungan yang sama seperti (6) dan (7) dalam Parameter ISPU nilai PM2.5 = **140,76** masuk dalam kategori **Tidak Sehat**. Tingginya konsentrasi pada ketiga polutan tersebut sangat dipengaruhi oleh kondisi dan aktivitas di lingkungan Tempat Pembuangan Akhir (TPA).

Pengujian Delay berdasarkan Baud Rate dan Jarak

Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi *baud rate* terhadap *delay* transmisi data. Skenario pengujian melibatkan beberapa variasi jarak untuk mengamati performa pada kondisi yang berbeda, dengan parameter yang terlampir pada Tabel 5.

Tabel 3. Hasil Pengujian Delay berdasarkan Baud Rate

<i>Poin-to-poin</i> Zigbee (milidetik)						
Jarak	10 meter	20 meter	30 meter	40 meter	50 meter	60 meter
<i>Baud rate</i>						
1200 bps	57	55	65	54	811	912
2400 bps	57	59	66	63	566	679
4800 bps	60	58	51	58	117	57
9200 bps	58	61	56	58	58	62
19200 bps	57	53	57	85	85	86

Pengujian dalam penelitian ini dilaksanakan pada jarak 60 meter disebabkan oleh adanya keterbatasan area pengujian. Untuk memastikan validitas data yang diperoleh, proses akuisisi data pada setiap skenario pengujian diulang sebanyak sepuluh kali. Hasil pengujian *end-to-end delay* pada komunikasi *point-to-point* Zigbee, sebagaimana disajikan pada Tabel 5, menunjukkan bahwa nilai

delay tertinggi sebesar 912 milidetik pada penggunaan *baud rate* 1200 bps dengan jarak 60 meter.

Secara umum, data memperlihatkan adanya korelasi terbalik antara *baud rate* dengan waktu tunda, semakin tinggi *baud rate* yang digunakan, nilai *delay* cenderung semakin rendah dan stabil. Hal ini terlihat jelas ketika membandingkan fluktuasi signifikan pada *baud rate* rendah (1200 bps dan 2400 bps) dengan performa pada *baud rate* 9200 bps dan 19200 bps, di mana nilai *delay* secara konsisten berada pada level yang rendah dan stabil di seluruh rentang jarak pengujian (10 hingga 60 meter). Fenomena ini mengindikasikan bahwa pemilihan *baud rate* yang lebih tinggi lebih efektif dalam menekan latensi dan meningkatkan keandalan pengiriman data pada topologi jaringan yang diuji.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT dengan teknologi Zigbee telah berhasil diimplementasikan dan berfungsi secara efektif. Dalam penelitian ini, lingkungan kampus yang hijau mempunyai kualitas udara yang paling baik dengan parameter ISPU nilai CO = 2,675, NO₂ = 48,75 dan PM_{2,5} = 63,8. Sedangkan tempat pembuangan akhir mempunyai kualitas udara terburuk dengan parameter ISPU nilai CO = 94,5, NO₂ = 197,5 dan PM_{2,5} = 140,76. Pada aspek komunikasi, data memperlihatkan adanya korelasi terbalik antara baud rate dengan waktu tunda, semakin tinggi baud rate yang digunakan, nilai delay cenderung semakin rendah. Delay terkecil adalah 57 ms pada baud rate 1200 bps dengan jarak antara pemancar dan penerima 10 meter. Delay terbesar adalah 912 ms pada baud rate 1200 bps dengan jarak antara pemancar dan penerima 60 meter.

Daftar Pustaka

- [1] Sary, V. A., 2022, "Factors Causing Air Pollution and Its Impact on Public Health", *JUKEMA* 8(1), hlm. 60-64, 2022.
- [2] Tribun news "Bamsoet Apresiasi Motor Listrik BL-SEV 01 Sukses Touring Jakarta-Mandalika" [On-line]. Tersedia di: <https://www.tribunnews.com/mpr-ri/2021/10/12/bamsoet-apresiasi-motor-listrikbl-sev-01-sukses-touring-jakarta-mandalika> [20 Des 2024].
- [3] Sugianto, E. "Sistem Pemantauan Kualitas Udara" Tugas Akhir, Jurusan Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Widyatama Bandung, 2014
- [4] Liu, Z., Wang, G., Zhao, L., Yang, G., "Multi – Poin Indor Air Quality Monitoring Based on Internet of Things." *IEEE Access*, vol. 9, hlm. 70479-70492, 2021.
- [5] Rosa, A., Simon, B., Sherdy, K., 2020 "Sistem Pendeteksi Pencemar Udara Portabel Menggunakan Sensor MQ-7 dan MQ-135" 12(1), 2020.
- [6] Fitriawan, H., Cholifatul, R., Herlinawati, Purwiyanti, S., 2020, "Pengukuran RSSI Jaringan Sensor Nirkabel Berbasis ZigBee pada Berbagai Topologi" *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 16(2), hlm. 120-126, 2020.
- [7] M. Pardede, E. Hutajulu, dan B.V. Sundawa, "Sistem Monitoring Tempat Parkir Berbasis Arduino Mega dengan Modul Komunikasi Xbee Pro S2C," *Rekayasa*

- [8] Hakim, F. L., "Rancang Bangun Sistem Alat Monitoring Kualitas Udara" Skripsi. Program Studi Sistem Komputer, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Komputer Indonesia Bandung, 2023.
- [9] Prihantoro, E. J. Sulistiyanto., dan Efendi, M. F., "Perancangan Smart Klinik Berbasis Mikrokontroler Nodemcu Esp32" *JEECOM*, 3(2), 2021.
- [10] --, "Indeks Standar Pencemar Udara (Ispu) Sebagai Informasi Mutu Udara Ambien Di Indonesia" Tersedia di: <https://ditppu.menlhk.go.id/portal/read/indeks-standar-pencemar-udara-ispu-sebagai-informasi-mutu-udara-ambien-di-indonesia> Portal Direktorat Pengendalian Pencemaran Udara Ditjen PPKL KLHK [20 Des 2024].