



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



JUDUL UTAMA

**Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Prediksi Kualitas Udara Berbasis
IoT Menggunakan Komunikasi *LoRa* dan *Long Short-Term Memory (LSTM)***

Sub Judul:

**Rancang Bangun *Node* Sensor Kualitas Udara Berbasis *IoT* dengan
Komunikasi *LoRa***

SKRIPSI

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Reza Fadhilah

2203431016

**PROGRAM STUDI INSTRUMENTASI DAN KONTROL
INDUSTRI**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA**

2026



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



**Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Prediksi Kualitas Udara Berbasis
IoT Menggunakan Komunikasi LoRa dan Long Short-Term Memory (LSTM)**

Sub Judul:

**Rancang Bangun Node Sensor Kualitas Udara Berbasis IoT dengan
Komunikasi LoRa**

SKRIPSI

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana
Terapan

Reza Fadhilah
2203431016

PROGRAM STUDI INSTRUMENTASI DAN KONTROL
INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA
2026



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama Mahasiswa : Reza Fadhilah
NIM : 2203431016
Program Studi : Instrumentasi dan Kontrol Industri
Judul Tugas Akhir : Rancang Bangun Sistem Monitoring dan
Prediksi Kualitas Udara Berbasis *IoT*
Menggunakan Komunikasi *LoRa* dan *Long Short-Term Memory (LSTM)*
Sub Judul Tugas Akhir : Rancang Bangun *Node* Sensor Kualitas Udara
Berbasis *IoT* dengan Komunikasi *LoRa*

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Depok, 12 Juni 2026

(Reza Fadhilah)

NIM . 2203431016



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

Skripsi di ajukan oleh :
Nama Mahasiswa : Reza Fadhilah
NIM : 2203431016
Program Studi : Instrumentasi dan Kontrol Industri
Judul Tugas Akhir : Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Prediksi Kualitas Udara Berbasis *IoT* Menggunakan Komunikasi *LoRa* dan *Long Short-Term Memory*

Telah diuji oleh tim penguji dalam Sidang Tugas Akhir pada 26 Juni 2026 dan dinyatakan **LULUS**.

Pembimbing 1

Pembimbing 2

Prihatin Oktivasari, S.Si., M.Si.

Yurixa Sakhinatul Putri, S.Si., M.T.

NIP. 197910062003122001

NIP. 199607072024062002

Depok, 26 Juni 2026

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Dr. Muric Dwiyaniti, S.T., M.T.

NIP. 197803312003122002



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga skripsi berjudul “Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Prediksi Kualitas Udara Berbasis *IoT* Menggunakan Komunikasi *LoRa* dan *Long Short-Term Memory (LSTM)*” dapat diselesaikan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Terapan pada Program Studi Instrumentasi dan Kontrol Industri, Politeknik Negeri Jakarta.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Murie Dwiyanti, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Jakarta.
2. Sulis Setiowati, S.Pd., M.Eng., selaku Kepala Program Studi Instrumentasi dan Kontrol Industri.
3. Prihatin Oktivasari, S.Si., M.Si dan Yurixa Sakhinatul Putri, S.Si., M.T, selaku dosen pembimbing.
4. Orang tua dan keluarga atas doa dan dukungannya.
5. Muhammad Alif Zul Ikhsan selaku kelompok tugas akhir saya
6. Adara Renala atas motivasi dan semangat yang diberikan.
7. Rekan-rekan mahasiswa angkatan 2022 Program Studi Instrumentasi dan Kontrol Industri.
8. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini.

Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya di bidang *Internet of Things*, komunikasi *LoRa*, dan prediksi kualitas udara.

Depok, 12 Juni 2026

(Reza Fadhillah)

NIM . 2203431016



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Rancang Bangun Node Sensor Kualitas Udara Berbasis IoT dengan Komunikasi LoRa

Abstrak

Pencemaran udara menjadi salah satu permasalahan lingkungan yang berdampak terhadap kesehatan manusia sehingga diperlukan sistem pemantauan kualitas udara yang mampu bekerja secara berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan merancang dan merealisasikan sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan komunikasi LoRa SX1278. Sistem terdiri dari sensor PMS5003 untuk mengukur PM1.0, PM2.5, dan PM10, sensor BMP280 untuk mengukur suhu dan tekanan udara, serta ESP32 sebagai pengendali utama. Data hasil pengukuran dikirimkan melalui LoRa menuju gateway dan ditampilkan pada dashboard monitoring berbasis web. Pengujian dilakukan terhadap performa sensor dan komunikasi LoRa berdasarkan parameter RSSI, SNR, Packet Delivery Ratio (PDR), dan Packet Loss pada kondisi Line of Sight (LOS) dan Non-Line of Sight (NLOS). Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu melakukan monitoring kualitas udara dan transmisi data dengan baik, serta menyajikan informasi kondisi lingkungan secara terintegrasi melalui dashboard monitoring.

Kata Kunci: BMP280, ESP32, IoT, Kualitas Udara, LoRa SX1278, Monitoring, PMS5003.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Design and Implementation of an IoT-Based Air Quality Sensor Node Using LoRa Communication

Abstract

Air pollution is one of the environmental problems that has an impact on human health, making a continuous air quality monitoring system necessary. This study aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based air quality monitoring system using LoRa SX1278 communication technology. The system consists of a PMS5003 sensor to measure PM1.0, PM2.5, and PM10 concentrations, a BMP280 sensor to measure temperature and air pressure, and an ESP32 microcontroller as the main controller. Measurement data are transmitted via LoRa to a gateway and displayed on a web-based monitoring dashboard. System testing was conducted to evaluate sensor performance and LoRa communication performance based on Received Signal Strength Indicator (RSSI), Signal-to-Noise Ratio (SNR), Packet Delivery Ratio (PDR), and Packet Loss parameters under Line of Sight (LOS) and Non-Line of Sight (NLOS) conditions. The test results show that the system is capable of performing air quality monitoring and data transmission effectively, while providing integrated environmental information through the monitoring dashboard..

Keywords: *BMP280, ESP32, IoT, Kualitas Udara, LoRa SX1278, Monitoring, PMS5003.*



DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL.....	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	iv
KATA PENGANTAR	v
Abstrak	vi
Abstract	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR RUMUS	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan.....	4
1.4. Batasan Masalah.....	5
1.5. Luaran.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 State Of The Art	7
2.2 Dasar Teori.....	10
2.2.1 Sistem Monitoring Kualitas Udara.....	10
2.2.2 Partikulat Udara (PM1.0, PM2.5, dan PM10).....	11
2.2.3 Sensor PMS5003.....	12
2.2.4 Sensor BMP280	13
2.2.5 Mikrokontroler ESP32	14
2.2.6 <i>Internet of Things (IoT)</i>	15
2.2.7 <i>LoRa SX1278</i>	16
2.2.8 Solar Panel (Monocrystalline).....	17
2.2.9 Solar Charge Controller (SCC)	18
2.2.10 Aki 12V 12Ah.....	19

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB III PERANCANGAN DAN REALISASI	20
3.1 Rancangan Alat	20
3.1.1 Deskripsi Alat	21
3.1.2 Cara Kerja Alat	23
3.1.3 Spesifikasi Alat	24
3.1.4 Blok Diagram	25
3.1.5 Instrumen Pengujian.....	27
3.1.6 Desain Alat.....	29
3.1.7 Deskripsi Alat Sub-Sistem	30
3.1.8 Diagram Blok Sub-Sistem	30
3.2 Realisasi Alat.....	31
BAB IV PEMBAHASAN.....	34
4.1 Pengujian Sensor BMP280 dan PMS5003.....	34
4.1.1 Deskripsi Pengujian	34
4.1.2 Prosedur Pengujian	35
4.1.3 Komparasi Sensor BMP280.....	37
4.1.4 Komparasi Sensor PMS5003	38
4.2 Pengujian Komunikasi <i>LoRa</i>	39
4.2.1 Deskripsi Pengujian	39
4.2.2 Prosedur Pengujian	40
4.2.3 Pengujian Jangkauan Komunikasi <i>LoRa</i>	40
4.2.4 Pengujian Kinerja <i>LoRa</i>	42
4.2.5 Hasil dan Analisa Pengujian <i>LoRa</i>	44
4.3 Implementasi <i>Dashboard</i> Monitoring	45
BAB V PENUTUP.....	49
5.1 Kesimpulan.....	49
5.2 Saran	50
DAFTAR PUSTAKA	51
LAMPIRAN.....	53



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sensor PMS5003	12
Gambar 2.2 Sensor BMP280	13
Gambar 2.3 Mikrokontroler ESP32-S3.....	14
Gambar 2.4 Logo IOT	15
Gambar 2.5 LoRa SX1278.....	16
Gambar 2.6 Solar Panel (Monocrystalline).....	17
Gambar 2.7 Solar Charge Controller (SCC)	18
Gambar 2.8 Aki 12V 12Ah.....	19
Gambar 3. 1 Flowchart Rancangan Alat	21
Gambar 3. 2 Blok Diagram Sistem	25
Gambar 3. 3 Desain Alat.....	29
Gambar 3. 4 Diagram Blok Sub-Sistem.....	31
Gambar 3. 5 Transmitter	31
Gambar 3. 6 Receiver.....	33
Gambar 4. 1 Tampilan Dashboard Monitoring.....	46



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu	7
Tabel 3. 1 Spesifikasi Alat	24
Tabel 3. 2 Instrumen Pengujian	27
Tabel 3. 3 Komponen Alat Transmitter	32
Tabel 3. 4 Komponen Alat Receiver.....	33
Tabel 4. 1 Peralatan Pengujian.....	35
Tabel 4. 2 Data sensor BMP280 output Suhu.....	37
Tabel 4. 3 Data Sensor BMP280 output Tekanan Udara	37
Tabel 4. 4 Data Sensor PMS5003 Output PM 2.5 dengan Weather.com	38
Tabel 4. 5 Data Sensor PMS5003 Output PM 2.5 dengan BMKG.....	38
Tabel 4. 6 Deskripsi Pengujian LoRa	39
Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Jangkauan Komunikasi LoRa.....	41
Tabel 4. 8 Hasil Pengujian RSSI.....	42
Tabel 4. 9 Hasil Pengujian SNR	42
Tabel 4. 10 Hasil Pengujian PDR	43
Tabel 4. 11 Hasil Pengujian Packet Loss	44
Tabel 4. 12 Ringkasan Hasil Pengujian Kinerja LoRa Kondisi LOS	44
Tabel 4. 13 Ringkasan Hasil Pengujian Kinerja LoRa Kondisi NLOS	45

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR RUMUS

4.1 Rumus Presentase <i>Error</i>	37
4. 2 Rumus Presentase <i>Error</i>	38





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Daftar Riwayat Hidup.....	53
Lampiran 2 Program Node.....	54
Lampiran 3 Program Gateway	60
Lampiran 4 Dokumentasi Alat.....	67



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang semakin serius di berbagai negara, termasuk Indonesia. Pertumbuhan jumlah penduduk, perkembangan kawasan perkotaan, peningkatan aktivitas transportasi, serta perkembangan sektor industri menyebabkan emisi polutan ke atmosfer terus meningkat dari waktu ke waktu. Berbagai polutan udara seperti partikulat halus (PM1.0, PM2.5, dan PM10), karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), sulfur dioksida (SO₂), dan ozon (O₃) dapat menurunkan kualitas udara serta memberikan dampak negatif terhadap kesehatan manusia. Di antara berbagai jenis polutan tersebut, PM2.5 menjadi salah satu parameter yang paling diperhatikan karena ukurannya yang sangat kecil memungkinkan partikel masuk hingga ke bagian terdalam sistem pernapasan dan bahkan mencapai aliran darah, sehingga berpotensi menyebabkan gangguan pernapasan, penyakit kardiovaskular, hingga kematian dini (*WHO Global Air Quality Guidelines*, 2021).

Di Indonesia, permasalahan kualitas udara semakin kompleks seiring meningkatnya jumlah kendaraan bermotor dan aktivitas perkotaan. Emisi yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar kendaraan menjadi salah satu sumber utama pencemaran udara, khususnya partikulat halus yang berbahaya bagi kesehatan manusia. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2020, pemantauan kualitas udara perlu dilakukan secara berkala untuk mengetahui tingkat pencemaran udara dan memberikan informasi yang akurat kepada masyarakat (KLHK, 2020). Selain itu, karakteristik kualitas udara pada suatu lokasi dapat berbeda dengan lokasi lainnya karena dipengaruhi oleh aktivitas manusia, kondisi lingkungan, serta faktor meteorologi yang dinamis.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Perkembangan teknologi *Internet of Things (IoT)* memberikan peluang untuk membangun sistem pemantauan kualitas udara yang lebih efektif dan efisien. Teknologi *IoT* memungkinkan proses pengukuran, pengiriman, penyimpanan, dan visualisasi data dilakukan secara otomatis dan *real-time* sehingga memudahkan pengguna dalam memantau kondisi lingkungan dari jarak jauh (Hanum, 2023). Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa sistem monitoring kualitas udara berbasis *IoT* mampu menjadi alternatif yang lebih fleksibel dan ekonomis dibandingkan metode pemantauan konvensional (Dimiyati & Primajaya, 2024).

Dalam sistem monitoring kualitas udara, sensor partikulat menjadi komponen utama yang menentukan kualitas data pengukuran. Salah satu sensor yang banyak digunakan adalah PMS5003 karena mampu mengukur konsentrasi PM1.0, PM2.5, dan PM10 secara *real-time* dengan biaya yang relatif rendah. Penelitian yang dilakukan oleh Suryantoro dan Kusriyanto (2023) menunjukkan bahwa sensor PMS5003 dapat digunakan untuk memantau konsentrasi PM2.5 secara kontinu dan memberikan hasil pengukuran yang memadai untuk aplikasi monitoring kualitas udara berbasis *IoT*.

Meskipun berbagai sistem monitoring kualitas udara telah berhasil dikembangkan, sebagian besar penelitian masih berfokus pada penyajian data kondisi udara saat ini tanpa kemampuan untuk memprediksi kondisi kualitas udara pada waktu mendatang. Padahal, konsentrasi PM2.5 dapat berubah secara dinamis akibat perubahan aktivitas manusia maupun kondisi lingkungan. Akibatnya, masyarakat dan pengelola lingkungan hanya memperoleh informasi setelah kualitas udara memburuk dan tidak memiliki cukup waktu untuk melakukan tindakan pencegahan. Penelitian yang dilakukan oleh Miranto dan Adnan (2023) menunjukkan bahwa sebagian besar sistem monitoring kualitas udara berbasis *IoT* masih berfungsi sebagai alat pemantauan *real-time* tanpa dilengkapi kemampuan prediksi.

Selain aspek monitoring, komunikasi data juga menjadi faktor penting dalam pengembangan sistem *IoT*. Sebagian besar sistem monitoring masih



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

menggunakan jaringan Wi-Fi atau seluler yang memiliki keterbatasan pada konsumsi daya dan jangkauan komunikasi. Teknologi LoRa (Long Range) menawarkan solusi komunikasi nirkabel dengan konsumsi daya rendah dan jangkauan yang luas sehingga sangat sesuai untuk aplikasi monitoring lingkungan yang membutuhkan pengiriman data secara berkala dalam area yang luas. Penelitian oleh Srinivas et al. (2023) menunjukkan bahwa teknologi *LoRaWAN* mampu mendukung sistem pemantauan kualitas udara secara *real-time* dengan konsumsi daya yang rendah serta cakupan komunikasi yang lebih luas dibandingkan teknologi komunikasi nirkabel konvensional..

Untuk meningkatkan kemampuan sistem monitoring kualitas udara, diperlukan metode prediksi yang mampu mempelajari pola perubahan konsentrasi partikulat berdasarkan data historis. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk prediksi data deret waktu adalah *Long Short-Term Memory (LSTM)*. Metode ini merupakan pengembangan dari *Recurrent Neural Network (RNN)* yang dirancang untuk mengatasi permasalahan *vanishing gradient* sehingga mampu mempelajari hubungan jangka panjang pada data temporal. Penelitian yang dilakukan oleh Liu et al. (2024) menunjukkan bahwa model *LSTM* memiliki kemampuan yang baik dalam memprediksi konsentrasi PM2.5 berdasarkan data historis kualitas udara serta mampu menghasilkan tingkat akurasi yang lebih baik dibandingkan beberapa metode prediksi konvensional.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan rancang bangun sistem monitoring dan prediksi kualitas udara berbasis *Internet of Things (IoT)* menggunakan sensor PMS5003, komunikasi *LoRa*, dan metode *Long Short-Term Memory (LSTM)*. Sistem yang dikembangkan mampu melakukan pengukuran konsentrasi PM1.0, PM2.5, dan PM10 secara *real-time*, mengirimkan data hasil pengukuran melalui jaringan *LoRa*, serta menghasilkan prediksi kualitas udara berdasarkan data historis yang diperoleh dari sensor. Hasil prediksi tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam sistem peringatan dini (*early warning system*) sehingga pengguna dapat memperoleh informasi mengenai potensi penurunan kualitas udara secara lebih cepat dan akurat.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a) Bagaimana merancang dan merealisasikan *node* sensor kualitas udara berbasis *Internet of Things (IoT)* yang mampu mengukur parameter PM1.0, PM2.5, PM10, suhu, dan tekanan udara?
- b) Bagaimana mengimplementasikan komunikasi *LoRa SX1278* sebagai media transmisi data antara *node* sensor dan *gateway* pada sistem monitoring kualitas udara?
- c) Bagaimana kinerja komunikasi *LoRa SX1278* pada sistem yang dirancang berdasarkan parameter *RSSI*, *SNR*, *Packet Delivery Ratio (PDR)*, dan *Packet Loss* pada kondisi *Line of Sight (LOS)* dan *Non-Line of Sight (NLOS)*?
- d) Bagaimana merancang *dashboard* monitoring yang mampu menyajikan data hasil pengukuran kualitas udara secara informatif dan mudah diakses?

1.3. Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan untuk:

- a) Merancang dan merealisasikan *node* sensor kualitas udara berbasis *Internet of Things (IoT)* yang mampu mengukur parameter PM1.0, PM2.5, PM10, suhu, dan tekanan udara
- b) Mengimplementasikan komunikasi *LoRa SX1278* sebagai media transmisi data antara *node* sensor dan *gateway* pada sistem monitoring kualitas udara.
- c) Menganalisis kinerja komunikasi *LoRa SX1278* berdasarkan parameter *RSSI*, *SNR*, *Packet Delivery Ratio (PDR)*, dan *Packet Loss* pada kondisi *Line of Sight (LOS)* dan *Non-Line of Sight (NLOS)*.
- d) Merancang dan mengembangkan *dashboard* monitoring yang mampu menyajikan data hasil pengukuran kualitas udara secara informatif dan mudah diakses oleh pengguna.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1.4. Batasan Masalah

Untuk menjaga fokus penelitian, berikut adalah batasan-batasan yang ditetapkan:

- a) Penelitian ini difokuskan pada pemantauan kualitas udara partikulat PM1.0, PM2.5, dan PM10, dengan prediksi jangka pendek hanya dilakukan pada parameter PM2.5 sebagai indikator utama kualitas udara.
- b) Pengambilan data dilakukan pada lokasi penelitian yang telah ditentukan dengan karakteristik lingkungan yang berbeda untuk memperoleh variasi data kualitas udara yang digunakan dalam proses analisis dan pemodelan.
- c) Sistem monitoring kualitas udara menggunakan sensor PMS5003 untuk pengukuran partikulat udara dan sensor BMP280 untuk pengukuran parameter lingkungan berupa suhu dan tekanan udara, di mana data dari BMP280 digunakan sebagai parameter pendukung dalam analisis dan pemodelan prediksi.
- d) Komunikasi data pada sistem *Internet of Things (IoT)* dibatasi menggunakan teknologi *LoRa (Long Range)* sebagai media komunikasi jarak jauh berdaya rendah.
- e) Analisis terhadap parameter PM1.0 dan PM10 dibatasi pada analisis deskriptif dan perbandingan antar lokasi, tanpa dilakukan pemodelan prediktif.
- f) Prediksi kualitas udara difokuskan pada prediksi jangka pendek (*short-term forecasting*) dengan horizon waktu satu langkah ke depan (*1-step ahead forecasting*) berdasarkan data historis yang telah dikumpulkan.
- g) Sistem peringatan dini (*early warning system*) yang dikembangkan dibatasi pada pemberian informasi peringatan berdasarkan hasil prediksi kualitas udara partikulat PM2.5.
- h) Penelitian ini tidak membahas secara mendalam aspek kebijakan lingkungan, analisis dampak kesehatan secara klinis, maupun kajian meteorologi lanjutan.

1.5. Luaran

Luaran yang ditargetkan dari penelitian ini meliputi:



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- a) Sistem monitoring kualitas udara partikulat berbasis *Internet of Things (IoT)* yang mampu mengukur dan mengirimkan data PM1.0, PM2.5, dan PM10 secara *real-time* menggunakan sensor PMS5003 dan komunikasi *LoRa*.
- b) Dataset kualitas udara yang diperoleh dari lokasi penelitian dan digunakan sebagai data pelatihan serta pengujian model prediksi PM2.5.
- c) Model prediksi kualitas udara jangka pendek berbasis *Long Short-Term Memory (LSTM)* dengan fokus pada prediksi konsentrasi PM2.5.
- d) Dokumentasi teknis sistem, meliputi diagram blok, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, serta alur kerja sistem.
- e) Laporan Tugas Akhir, yang memuat perancangan, implementasi, pengujian, analisis hasil, dan kesimpulan penelitian.

POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem monitoring kualitas udara yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Sistem monitoring kualitas udara berbasis *Internet of Things (IoT)* berhasil dirancang dan direalisasikan menggunakan sensor PMS5003 untuk mengukur konsentrasi partikulat PM1.0, PM2.5, dan PM10 serta sensor BMP280 untuk mengukur suhu dan tekanan udara. Sistem mampu melakukan pengambilan data secara *real-time*, sedangkan hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor bekerja dengan tingkat akurasi yang memadai sehingga layak digunakan sebagai sumber data pada sistem monitoring kualitas udara.
2. Komunikasi data menggunakan modul LoRa SX1278 berhasil diimplementasikan sebagai media transmisi antara node sensor dan gateway. Sistem mampu mengirimkan data hasil pengukuran secara nirkabel sehingga proses monitoring kualitas udara dapat berlangsung secara *real-time* dengan konsumsi daya yang rendah dan jangkauan komunikasi yang sesuai untuk kebutuhan penelitian.
3. Berdasarkan hasil pengujian Quality of Service (QoS), komunikasi LoRa SX1278 menunjukkan kinerja yang baik pada kondisi *Line of Sight (LOS)* maupun *Non-Line of Sight (NLOS)*. Parameter *RSSI*, *SNR*, *Packet Delivery Ratio (PDR)*, dan *Packet Loss* menunjukkan bahwa sistem masih mampu mempertahankan komunikasi data secara andal pada berbagai skenario pengujian, sehingga memenuhi kebutuhan transmisi data untuk aplikasi monitoring kualitas udara berbasis *IoT*.
4. *Dashboard* monitoring berhasil dirancang dan dikembangkan untuk menampilkan data hasil pengukuran kualitas udara secara *real-time* dalam bentuk indikator dan grafik historis yang mudah dipahami. *Dashboard* juga mampu menyajikan informasi kategori kualitas udara berdasarkan



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

parameter PM2.5 sehingga memudahkan pengguna dalam memantau kondisi lingkungan serta mendukung proses pengambilan keputusan secara lebih cepat.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Menambahkan sensor kualitas udara lainnya seperti sensor gas CO, CO₂, NO₂, dan SO₂ agar informasi kualitas udara yang diperoleh menjadi lebih lengkap.
2. Melakukan kalibrasi sensor menggunakan alat ukur standar atau stasiun pemantauan kualitas udara sebagai referensi untuk meningkatkan akurasi hasil pengukuran.
3. Mengembangkan sistem monitoring pada lebih banyak titik pengamatan sehingga dapat mencakup area pemantauan yang lebih luas.
4. Melakukan pengujian komunikasi *LoRa* pada jarak yang lebih jauh dan pada berbagai kondisi lingkungan untuk memperoleh karakteristik performa sistem yang lebih komprehensif.

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR PUSTAKA

- Ariyanto, A. S. S., Triwibowo, D. N., Ashari, I. A., & Haryono, R. C. S. (2026). *Implementasi dan Evaluasi Kinerja Sistem IoT Multi-Sensor Berbasis ESP32 untuk Pemantauan dan Peringatan Dini Lingkungan secara Real-Time*. 09(1), 118–125.
- Buelvas, J., Danny, M., Tob, D. P., & Aguirre, V. J. (2023). *Data Quality in IoT-Based Air Quality Monitoring Systems : a Systematic Mapping Study*.
- Dimiyati, A. N., & Primajaya, A. (2024). Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis *Internet Of Things (IoT)* Dengan Visualisasi Data Pada Aplikasi Amdroid (Studi Kasus : PT . SOUTH PACIFIC VISCOSE). *Journal: Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 13(3), 523–536.
- Duanaputri, R., Heryanto, I., & Firas, M. (2023). *Sistem Monitoring Online Dan Analisis Performansi Plts Panel Surya Monocrystalline 100 Wp Berbasis Web*. 10(1), 1–6.
- Hanum, L. (2023). *Rancang Bangun Pemantau Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbasis Internet Of Things*. 4(2), 619–624.
- Jabbar, W. A., Subramaniam, T., Emelio, A., Iqmal, M., Ib, S., Wu, W., & Oliveira, M. A. De. (2022). *Internet of Things LoRaWAN-Based IoT System Implementation for Long-Range Outdoor Air Quality Monitoring*. *Internet of Things*, 19(April), 100540. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100540>
- KLHK. (2020). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara*. 1–16.
- Kusuma, H. A., Suhendra, T., & Devendra, D. (2023). *Evaluating the Accuracy of BMP280 and BME280 Sensors for Sea Level in a Coastal Environment : A Field Study at Tanjung Siambang Pier*. 28(June), 189–202. <https://doi.org/10.14710/ik.ijms.28.2.189-202>
- Liu, Z., Ji, D., & Wang, L. (2024). OPEN PM 2 . 5 concentration prediction based on EEMD - ALSTM. *Scientific Reports*, 0123456789, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63620-9>



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Miranto, A., & Adnan, F. T. (2023). *Rancang Bangun Alat Pendeteksi Kualitas Udara Portable berbasis Internet of Things (IoT)*. 9(2).

Srinivas, Madhuri, & Sravani. (2023). *Data Science and IoT Management System LoRaWAN-Assisted Real-Time Air Quality Surveillance for Smart Cities*. 2(4), 1–5.

Suryantoro, H., & Medilla Kusriyanto. (2023). *Edisi Khusus 2023 Hery Suryantoro dan Medilla Kusriyanto Edisi Khusus 2023 Hery Suryantoro dan Medilla Kusriyanto*. 4887, 88–96.

WHO global air quality guidelines. (2021).





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

LAMPIRAN



Lampiran 1 Daftar Riwayat Hidup Penulis bernama Reza Fadhilah, lahir di Kebumen pada 28 September 2003. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara bersaudara. Latar belakang pendidikan formal penulis dimulai di SDN 01 Kedoya Utara, lulus pada tahun 2016. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMPN 75 Jakarta, lulus pada tahun 2019. Selanjutnya menempuh pendidikan di SMK Telkom Jakarta, lulus pada tahun 2022

Setelah menyelesaikan pendidikan menengah, penulis melanjutkan studi ke jenjang Sarjana Terapan (S.Tr.) di Politeknik Negeri Jakarta, Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Instrumentasi dan Kontrol Industri pada tahun 2022. Selama masa perkuliahan, penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan akademik maupun nonakademik untuk mengembangkan kompetensi di bidang instrumentasi, otomasi, dan sistem kontrol industri. Penulis dapat dihubungi melalui email rezalalan30@gmail.com

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Lampiran 2 Program Node

```

/*
 * =====
 * ESP32 LoRa Air Quality Monitor — Multi-Node TX
 * Mendukung Node 1 & Node 2
 * =====
 */

#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>
#include <LoRa.h>

// UBAH DI SINI: 1 untuk Node 1, 2 untuk Node 2
#define NODE_ID 1
// =====

// ===== Macro helper: buat string "Node X" dari NODE_ID =====
#define _STR(x)  #x
#define STR(x)  _STR(x)
#define NODE_LABEL "Node " STR(NODE_ID)

// ===== LCD 20x4 =====
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

// ===== PIN PMS5003 (Serial2) =====
#define RX_PIN 16
#define TX_PIN 17
HardwareSerial pmsSerial(2);

// ===== PIN LoRa =====
#define LORA_SS 5
#define LORA_RST 14
#define LORA_DIO0 2

// ===== LoRa Setting =====
#define LORA_FREQ 433E6
#define LORA_SF 7
#define LORA_BW 125E3
#define LORA_CR 5
#define LORA_SYNCWORD 0x12

// ===== Anti-collision: offset waktu kirim per node (ms) =====
// Node 1 → offset 0 ms
// Node 2 → offset 500 ms

```



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
// Jika NODE_ID ditambah, tambahkan entri baru di sini.
#define NODE_TX_OFFSET ((NODE_ID - 1) * 500)

// ===== Interval kirim (ms) — minimum 5000 agar ada margin cukup =====
#define TX_INTERVAL_MS 5000UL

// ===== Moving Average Filter Setting =====
// Window size = 5, diterapkan pada PM1.0, PM2.5, dan PM10
// tepat setelah data mentah dibaca dari PMS5003 dan sebelum
// data digunakan untuk LoRa TX & tampilan LCD.
#define MA_WINDOW 5

Adafruit_BMP280 bmp;

// ===== PMS5003 Data (RAW - langsung dari sensor) =====
uint16_t pm1Raw = 0;
uint16_t pm25Raw = 0;
uint16_t pm10Raw = 0;

// ===== PMS5003 Data (FILTERED - hasil Moving Average) =====
// Variabel pm1, pm25, pm10 ini yang dipakai oleh seluruh program
// (LoRa TX, LCD, Serial log) sehingga struktur program lain
// tidak perlu diubah sama sekali.
uint16_t pm1 = 0;
uint16_t pm25 = 0;
uint16_t pm10 = 0;
bool pmsOk = false;

// ===== Buffer Moving Average Filter =====
uint16_t bufPM1[MA_WINDOW] = {0};
uint16_t bufPM25[MA_WINDOW] = {0};
uint16_t bufPM10[MA_WINDOW] = {0};

uint8_t idxPM1 = 0, idxPM25 = 0, idxPM10 = 0;
uint32_t sumPM1 = 0, sumPM25 = 0, sumPM10 = 0;
uint8_t countPM1 = 0, countPM25 = 0, countPM10 = 0;

unsigned long seq = 0;

// ===== Timer (millis-based, non-blocking) =====
unsigned long lastSendTime = 0;

// ===== Fungsi Moving Average Filter =====
// Menghitung rata-rata bergerak dari MA_WINDOW data terakhir.
// Dipakai terpisah untuk PM1.0, PM2.5, dan PM10 (buffer berbeda-beda).
uint16_t movingAverageFilter(uint16_t newValue, uint16_t *buffer, uint8_t *idx,
```



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

uint32_t *sum, uint8_t *count) {
*sum -= buffer[*idx]; // buang nilai lama yang akan digantikan
buffer[*idx] = newValue; // simpan nilai baru ke buffer
*sum += newValue; // tambahkan nilai baru ke total
*idx = (*idx + 1) % MA_WINDOW;
if (*count < MA_WINDOW) (*count)++; // hitung jumlah data valid (saat awal < window)
return (uint16_t)(*sum / *count);
}

// ===== Fungsi Baca PMS5003 =====
void readPMS() {
static uint8_t buffer[32];
static uint8_t idx = 0;

while (pmsSerial.available()) {
uint8_t ch = pmsSerial.read();

if (idx == 0 && ch != 0x42) continue;
if (idx == 1 && ch != 0x4D) { idx = 0; continue; }

buffer[idx++] = ch;

if (idx >= 32) {
idx = 0;

uint16_t checksum = 0;
for (uint8_t i = 0; i < 30; i++) checksum += buffer[i];
uint16_t pktCsum = (buffer[30] << 8) | buffer[31];

if (checksum == pktCsum) {
// ===== Data RAW (asli) dari sensor =====
pm1Raw = (buffer[10] << 8) | buffer[11];
pm25Raw = (buffer[12] << 8) | buffer[13];
pm10Raw = (buffer[14] << 8) | buffer[15];

// ===== Filtering: Moving Average (window = 5) =====
// Dilakukan tepat di sini, sebelum data dipakai untuk
// LoRa TX, LCD, maupun Serial log.
pm1 =
movingAverageFilter(pm1Raw, bufPM1, &idxPM1, &sumPM1, &countPM1);
pm25 = movingAverageFilter(pm25Raw, bufPM25, &idxPM25, &sumPM25,
&countPM25);
pm10 = movingAverageFilter(pm10Raw, bufPM10, &idxPM10, &sumPM10,
&countPM10);

pmsOk = true;

```



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

    } else {
      pmsOk = false;
    }
  }
}

// ===== Setup =====
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("Memulai " NODE_LABEL " ...");

  // ===== Serial PMS5003 =====
  pmsSerial.begin(9600, SERIAL_8N1, RX_PIN, TX_PIN);

  Wire.begin(21, 22);

  // ===== LCD =====
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Air Monitor " NODE_LABEL); // dinamis, tanpa hardcode
  delay(1000);

  // ===== BMP280 =====
  if (!bmp.begin(0x76)) {
    lcd.clear();
    lcd.print("BMP280 ERROR!");
    Serial.println("[ " NODE_LABEL "] BMP280 tidak ditemukan!");
    while (1);
  }
  Serial.println("[ " NODE_LABEL "] BMP280 OK!");

  // ===== LoRa =====
  LoRa.setPins(LORA_SS, LORA_RST, LORA_DIO0);
  if (!LoRa.begin(LORA_FREQ)) {
    lcd.clear();
    lcd.print("LoRa ERROR!");
    Serial.println("[ " NODE_LABEL "] LoRa gagal!");
    while (1);
  }
  LoRa.setSpreadingFactor(LORA_SF);
  LoRa.setSignalBandwidth(LORA_BW);
  LoRa.setCodingRate4(LORA_CR);
  LoRa.setSyncWord(LORA_SYNCWORD);
  LoRa.enableCrc();

```



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
Serial.println("[ " NODE_LABEL " ] LoRa TX siap!");

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("LoRa & BMP OK!");

// ===== Warmup PMS =====
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("PMS Status: ON    ");
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("Warming up...    ");

// ===== Offset antar node: node 2 menunggu lebih lama saat boot =====
// Ini memisahkan waktu kirim pertama agar tidak tabrakan.
Serial.printf("[ " NODE_LABEL " ] Applying TX offset: %d ms\n", NODE_TX_OFFSET);
delay(2000 + NODE_TX_OFFSET);
lcd.clear();

// lastSendTime direset setelah offset selesai
lastSendTime = millis();

Serial.println("[ " NODE_LABEL " ] TX Siap (PMS AKTIF)!");
lcd.print("TX Siap! " NODE_LABEL);
}

// ===== Loop =====
void loop() {
  readPMS();

  if (millis() - lastSendTime >= TX_INTERVAL_MS) {
    lastSendTime = millis();

    // ===== Baca sensor =====
    float suhu  = bmp.readTemperature();
    float tekanan = bmp.readPressure() / 100.0F;

    // ===== Bangun payload (format wajib tidak berubah) =====
    seq++;
    String data = String("ID:") + String(NODE_ID) +
                  ",SEQ:" + String(seq) +
                  ",PM1:" + String(pm1) +
                  ",PM25:" + String(pm25) +
                  ",PM10:" + String(pm10) +
                  ",SUHU:" + String(suhu, 2) +
                  ",TEK:" + String(tekanan, 2);

    // ===== Kirim LoRa (satu kali, beginPacket-endPacket) =====
```



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

LoRa.beginPacket();
LoRa.print(data);
LoRa.endPacket(); // blocking; tidak ada double-send

// ===== Tampil LCD =====
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("PM1 : "); lcd.print(pm1); lcd.print(" ug/m3");

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("PM2.5: "); lcd.print(pm25); lcd.print(" ug/m3");

lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("PM10 : "); lcd.print(pm10); lcd.print(" ug/m3");

lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("T:"); lcd.print(suhu, 1); lcd.print("C ");
lcd.print("P:"); lcd.print(tekanan, 0); lcd.print("hPa ");
lcd.print(pmsOk ? "[OK]" : "[??]");

// ===== Serial Log =====
Serial.println("=====");
Serial.printf("[\" NODE_LABEL \"] SEQ : %lu\n", seq);
Serial.printf("[\" NODE_LABEL \"] PM1.0 : %d ug/m3\n", pm1);
Serial.printf("[\" NODE_LABEL \"] PM2.5 : %d ug/m3\n", pm25);
Serial.printf("[\" NODE_LABEL \"] PM10 : %d ug/m3\n", pm10);
Serial.println("---- Moving Average Filter (PM2.5) ----");
Serial.printf("[\" NODE_LABEL \"] PM2.5 Raw : %d ug/m3\n", pm25Raw);
Serial.printf("[\" NODE_LABEL \"] PM2.5 Filtered : %d ug/m3\n", pm25);
Serial.println("-----");
Serial.printf("[\" NODE_LABEL \"] Suhu : %.2f C\n", suhu);
Serial.printf("[\" NODE_LABEL \"] Tekanan : %.2f hPa\n", tekanan);
Serial.printf("[\" NODE_LABEL \"] PMS : %s\n", pmsOk ? "OK" :
"ERROR/WAITING");
Serial.printf("[\" NODE_LABEL \"] Payload : %s\n", data.c_str());
Serial.println("=====");
}
}

```



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 3 Program Gateway

```

/*
=====
* ESP32-S3 LoRa Gateway — Multi-Node RX → Firebase
* Mendukung Node 1 & Node 2 (dan node tambahan lainnya)
* Packet Loss & PDR dihitung TERPISAH per node
=====
*/

#include <Arduino.h>
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <WiFi.h>
#include <Firebase_ESP_Client.h>
#include <addons/TokenHelper.h>
#include "time.h"

// ===== WiFi & Firebase =====
#define WIFI_SSID "ERT"
#define WIFI_PASSWORD "00000000"
#define API_KEY "AIzaSyA9gm442-ck7TRyd4TDceq5gA_vuI7xU2M"
#define DATABASE_URL "https://monitoring-debu-d2304-default-rtdb.asia-southeast1.firebaseio.com/"

// ===== NTP (WIB = UTC+7) =====
const char* ntpServer = "id.pool.ntp.org";
const long gmtOffset_sec = 25200;
const int daylightOffset_sec = 0;

// ===== PIN LoRa ESP32-S3 =====
#define LORA_SCK 12
#define LORA_MISO 13
#define LORA_MOSI 11
#define LORA_SS 10
#define LORA_RST 9
#define LORA_DIO0 14

// ===== LoRa Setting (harus sama dengan semua node) =====
#define LORA_FREQ 433E6
#define LORA_SF 7
#define LORA_BW 125E3
#define LORA_CR 5
#define LORA_SYNCWORD 0x12

// ===== Interval reconnect WiFi (non-blocking) =====
#define WIFI_CHECK_INTERVAL 30000UL

```



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
// ===== Jumlah node maksimum yang didukung =====
#define MAX_NODES 10

// ===== Statistik per node =====
struct NodeStats {
    unsigned long lastSeq      = 0;
    unsigned long receivedPacket = 0;
    unsigned long lostPacket   = 0;
    float      pdr              = 100.0;
    float      packetLoss       = 0.0;
    bool       active           = false;
};

NodeStats nodeStats[MAX_NODES + 1]; // index 1-10 = Node 1-10 (index 0 tidak dipakai)

FirebaseData fbdo;
FirebaseData fbdo2;
FirebaseAuth auth;
FirebaseConfig config;

unsigned long lastWifiCheck = 0;
bool ntpSynced = false;

// ===== Timestamp NTP =====
String getTimeString() {
    struct tm timeinfo;
    if (!getLocalTime(&timeinfo)) return "0000-00-00 00:00:00";
    char buf[20];
    strftime(buf, sizeof(buf), "%Y-%m-%d %H:%M:%S", &timeinfo);
    return String(buf);
}

// ===== Parse nilai dari string berlabel =====
// Contoh: extractValue("ID:2,SEQ:5,...", "SEQ:", " ,PM1:") → "5"
String extractValue(const String& src, const String& key, const String& nextKey) {
    int idx = src.indexOf(key);
    if (idx == -1) return "0";
    idx += key.length();
    if (nextKey == "") return src.substring(idx);
    int idxEnd = src.indexOf(nextKey, idx);
    if (idxEnd == -1) return src.substring(idx);
    return src.substring(idx, idxEnd);
}

// ===== Reconnect WiFi non-blocking =====
```



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
void checkWiFi() {
    if (millis() - lastWifiCheck < WIFI_CHECK_INTERVAL) return;
    lastWifiCheck = millis();

    if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        Serial.println("[WiFi] Koneksi terputus, mencoba reconnect...");
        WiFi.disconnect();
        WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD);
    } else {
        if (!ntpSynced) {
            struct tm timeinfo;
            if (getLocalTime(&timeinfo)) {
                ntpSynced = true;
                Serial.println("[NTP] Resync OK: " + getTimeString());
            }
        }
    }
}

// ===== Update statistik packet loss per node =====
void updateNodeStats(int nodeId, unsigned long seq) {
    if (nodeId < 1 || nodeId > MAX_NODES) return;

    NodeStats& ns = nodeStats[nodeId];

    if (ns.active && seq > ns.lastSeq + 1) {
        unsigned long gap = seq - ns.lastSeq - 1;
        ns.lostPacket += gap;
        Serial.printf("[Gateway] Node %d: %lu paket hilang (SEQ %lu → %lu)\n",
            nodeId, gap, ns.lastSeq, seq);
    }

    ns.lastSeq = seq;
    ns.receivedPacket++;
    ns.active = true;

    unsigned long total = ns.receivedPacket + ns.lostPacket;
    if (total > 0) {
        ns.pdr = (ns.receivedPacket * 100.0f) / total;
        ns.packetLoss = (ns.lostPacket * 100.0f) / total;
    }
}

// ===== Klasifikasi AQI PM2.5 (ISPU Indonesia) =====
String classifyPM25(int pm25) {
    if (pm25 <= 15) return "Baik";
```



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

else if (pm25 <= 65) return "Sedang";
else if (pm25 <= 150) return "Tidak Sehat";
else if (pm25 <= 250) return "Sangat Tidak Sehat";
else
    return "Berbahaya";
}

// ===== SETUP =====
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    Serial.println("\n=== Memulai Gateway ESP32-S3 ===");

    // ===== 1. LoRa =====
    SPI.begin(LORA_SCK, LORA_MISO, LORA_MOSI, LORA_SS);
    LoRa.setPins(LORA_SS, LORA_RST, LORA_DIO0);

    if (!LoRa.begin(LORA_FREQ)) {
        Serial.println("[LoRa] GAGAL! Cek wiring.");
        while (1);
    }
    LoRa.setSpreadingFactor(LORA_SF);
    LoRa.setSignalBandwidth(LORA_BW);
    LoRa.setCodingRate4(LORA_CR);
    LoRa.setSyncWord(LORA_SYNCWORD);
    LoRa.enableCrc();
    Serial.println("[LoRa] RX siap menerima data!");

    // ===== 2. WiFi =====
    WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD);
    Serial.print("[WiFi] Menghubungkan");

    int wifiTimeout = 0;
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && wifiTimeout < 20) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
        wifiTimeout++;
    }

    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
        Serial.println("\n[WiFi] Terhubung: " + WiFi.localIP().toString());
    } else {
        Serial.println("\n[WiFi] Gagal sementara. Akan dicoba ulang otomatis.");
    }

    // ===== 3. NTP =====
    configTime(gmtOffset_sec, daylightOffset_sec, ntpServer);
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {

```



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

Serial.println("[NTP] Sinkronisasi...");
struct tm timeinfo;
int ntpRetry = 0;
while (!getLocalTime(&timeinfo) && ntpRetry < 10) {
    delay(500);
    ntpRetry++;
}
if (ntpRetry < 10) {
    ntpSynced = true;
    Serial.println("[NTP] OK: " + getTimeString());
} else {
    Serial.println("[NTP] Gagal sinkronisasi.");
}
}

// ===== 4. Firebase =====
config.api_key          = API_KEY;
config.database_url      = DATABASE_URL;
config.token_status_callback = tokenStatusCallback;

if (Firebase.signUp(&config, &auth, "", "")) {
    Serial.println("[Firebase] Sign-up anonymous OK");
} else {
    Serial.println("[Firebase] Sign-up gagal: " +
String(config.signer.signupError.message.c_str()));
}

Firebase.begin(&config, &auth);
Firebase.reconnectWiFi(true);

Serial.println("=== Gateway Beroperasi Penuh ===\n");
lastWifiCheck = millis();
}

// ===== LOOP =====
void loop() {
    checkWiFi();

    int packetSize = LoRa.parsePacket();
    if (!packetSize) return; // tidak ada paket, langsung kembali

    // ===== Baca payload =====
    String inString = "";
    while (LoRa.available()) {
        inString += (char)LoRa.read();
    }

```



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
// ===== Parsing =====
int      nodeID = extractValue(inString, "ID:", ",SEQ:").toInt();
unsigned long seq  = extractValue(inString, "SEQ:", ",PM1:").toInt();
int      pm1      = extractValue(inString, "PM1:", ",PM25:").toInt();
int      pm25     = extractValue(inString, "PM25:", ",PM10:").toInt();
int      pm10     = extractValue(inString, "PM10:", ",SUHU:").toInt();
float    suhu     = extractValue(inString, "SUHU:", ",TEK:").toFloat();
float    tekanan  = extractValue(inString, "TEK:", "").toFloat();
int      rssi     = LoRa.packetRssi();
float    snr      = LoRa.packetSnr();
String   waktu    = getTimeString();

// Validasi nodeID
if (nodeID < 1 || nodeID > MAX_NODES) {
  Serial.printf("[Gateway] NodeID tidak valid (%d), paket diabaikan.\n", nodeID);
  Serial.printf("  Raw: %s\n", inString.c_str());
  return;
}

// ===== Update statistik per node =====
updateNodeStats(nodeID, seq);
NodeStats& ns = nodeStats[nodeID];

String status = classifyPM25(pm25);

// ===== Serial Log =====
Serial.println("=====");
Serial.printf("[%s] DATA DARI NODE %d\n", waktu.c_str(), nodeID);
Serial.printf("Raw      : %s\n", inString.c_str());
Serial.printf("PM1.0    : %d ug/m3\n", pm1);
Serial.printf("PM2.5    : %d ug/m3\n", pm25);
Serial.printf("PM10     : %d ug/m3\n", pm10);
Serial.printf("Suhu     : %.2f C\n", suhu);
Serial.printf("Tekanan  : %.2f hPa\n", tekanan);
Serial.printf("Status   : %s\n", status.c_str());
Serial.printf("RSSI     : %d dBm\n", rssi);
Serial.printf("SNR      : %.2f dB\n", snr);
Serial.printf("SEQ      : %lu\n", seq);
Serial.printf("Diterima : %lu paket\n", ns.receivedPacket);
Serial.printf("Hilang   : %lu paket\n", ns.lostPacket);
Serial.printf("PDR      : %.2f %%\n", ns.pdr);
Serial.printf("Loss     : %.2f %%\n", ns.packetLoss);
Serial.println("=====");

// ===== Kirim ke Firebase =====
```



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

if (WiFi.status() == WL_CONNECTED && Firebase.ready()) {

    FirebaseJson json;
    json.set("node_id",      nodeID);
    json.set("pm1",          pm1);
    json.set("pm25",         pm25);
    json.set("pm10",         pm10);
    json.set("suhu",         suhu);
    json.set("tekanan",      tekanan);
    json.set("status",      status);
    json.set("rssi",         rssi);
    json.set("snr",          snr);
    json.set("seq",          (int)seq);
    json.set("last_seq",     (int)ns.lastSeq);
    json.set("received_packet", (int)ns.receivedPacket);
    json.set("lost_packet",  (int)ns.lostPacket);
    json.set("pdr",          ns.pdr);
    json.set("packet_loss",  ns.packetLoss);
    json.set("waktu",        waktu);

    // Path Firebase menggunakan nodeID integer → "node_1", "node_2", dst.
    String pathMonitoring = "/monitoring/node_" + String(nodeID);
    String pathLog        = "/log_data/node_" + String(nodeID);

    // 1. Realtime (overwrite) → data terkini per node
    if (Firebase.RTDB.setJSON(&fbdo, pathMonitoring, &json)) {
        Serial.println("[Firebase] " + pathMonitoring + " → OK");
    } else {
        Serial.println("[Firebase] " + pathMonitoring + " GAGAL: " + fbdo.errorReason());
    }

    // 2. Histori (push) → log timestamped per node
    if (Firebase.RTDB.pushJSON(&fbdo2, pathLog, &json)) {
        Serial.println("[Firebase] " + pathLog + " → OK");
    } else {
        Serial.println("[Firebase] " + pathLog + " GAGAL: " + fbdo2.errorReason());
    }

} else {
    Serial.println("[Firebase] WiFi/Firebase belum siap, data dilewati.");
}
}

```

Lampiran 4 Dokumentasi Alat



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA