

## Analisis dan Optimasi Kinerja Transmisi LoRa SX1278 Ra-02 untuk Sistem *Monitoring* Kualitas Air Berbasis *Internet of Things*

### *Analysis and Optimization of LoRa SX1278 Ra-02 Transmission Performance for an Internet of Things-Based Water Quality Monitoring System*

Isa Mahfudi<sup>1\*</sup>, Farida Arinie Soelistianto<sup>2</sup>, Adinda Aditya<sup>3</sup>, Yossy Dwi Meylinda<sup>4</sup>

<sup>1,3,4</sup>Program Studi Teknik Telekomunikasi, Jurusan Teknik Elektro  
Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No.9, Jatimulyo, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur  
65141, Indonesia.

<sup>2</sup>Program Studi Jaringan Telekomunikasi Digital, Jurusan Teknik Elektro  
Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No.9, Jatimulyo, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur  
65141, Indonesia.

\*Corresponding author: [isa\\_mahfudi@polinema.ac.id](mailto:isa_mahfudi@polinema.ac.id)

#### ABSTRAK

DOI:  
[10.30595/jrst.v10i1.28610](https://doi.org/10.30595/jrst.v10i1.28610)

#### Article information:

Received:  
30/10/2025

Revised:  
05/12/2025

Accepted:  
11/01/2026

Kualitas air merupakan indikator penting bagi kesehatan lingkungan, namun pemantauan secara konvensional masih terbatas dalam jangkauan dan efisiensi. Untuk mengatasi kendala tersebut, penelitian ini mengusulkan sistem monitoring kualitas air berbasis Internet of Things (IoT) dengan komunikasi jarak jauh menggunakan LoRa SX1278, dengan tujuan menganalisis pengaruh parameter fisik LoRa serta menentukan konfigurasi transmisi yang paling optimal untuk pemantauan kualitas air di lapangan. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan memvariasikan Spreading Factor, Bandwidth, Coding Rate, dan Transmit Power, sedangkan kinerja transmisi dievaluasi berdasarkan RSSI, SNR, Packet Delivery Ratio (PDR), dan delay, dengan data sensor dikirim secara real-time ke platform ThingSpeak untuk visualisasi dan validasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi SF9-BW125 kHz-CR4/7-TxPower +14 dBm memberikan performa terbaik dengan PDR 96-98%, delay 380-410 ms, dan konsumsi daya 82 mA; sementara pengujian lapangan menunjukkan sistem mampu beroperasi stabil hingga 300 meter pada kondisi LOS dan hingga 200 meter pada kondisi NLOS. Hasil ini menegaskan bahwa pengaturan parameter LoRa yang tepat mampu meningkatkan jangkauan, reliabilitas, dan efisiensi energi, sehingga konfigurasi tersebut direkomendasikan sebagai pengaturan optimal untuk sistem monitoring kualitas air berbasis IoT yang membutuhkan komunikasi jarak jauh yang andal dan hemat daya.

**Kata Kunci:** LoRa SX1278, *Internet of Things*, kualitas air, *Spreading Factor*, efisiensi energi.

#### ABSTRACT

*Water quality is a critical indicator of environmental health, yet conventional monitoring methods remain limited in coverage and efficiency. To address these limitations, this study proposes an Internet of Things (IoT)-*

based water quality monitoring system employing long-range communication using the LoRa SX1278 module, with the objective of analyzing the influence of LoRa physical parameters and determining the most optimal transmission configuration for field monitoring applications. The experimental method involved varying the Spreading Factor, Bandwidth, Coding Rate, and Transmit Power, while transmission performance was evaluated based on RSSI, SNR, Packet Delivery Ratio (PDR), and delay, with sensor data transmitted in real time to the ThingSpeak platform for visualization and validation. The results indicate that the configuration SF9-BW125 kHz-CR4/7-TxPower +14 dBm provides the best overall performance, achieving a PDR of 96–98%, a delay of 380–410 ms, and a power consumption of 82 mA; moreover, field testing demonstrated stable system operation up to 300 meters under Line-of-Sight (LOS) conditions and up to 200 meters under Non-Line-of-Sight (NLOS) conditions. These findings highlight that appropriate LoRa parameter tuning significantly enhances range, reliability, and energy efficiency, making the proposed configuration the optimal choice for IoT-based water quality monitoring systems requiring long-range, reliable, and low-power communication.

**Keywords:** Energy Efficiency, Internet of Things, LoRa SX1278, Spreading Factor, Water Quality.

## 1. PENDAHULUAN

Kualitas air merupakan salah satu indikator utama kesehatan ekosistem dan kesejahteraan manusia. Aktivitas industri, pertanian, serta limbah domestik menyebabkan peningkatan kadar logam berat dan bahan kimia berbahaya di perairan, yang berdampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat (Pires & Gomes, 2024)(Tang, Lin, & Tian, 2024)(Lal, Menon, Noble, & Arif, 2024). Berdasarkan laporan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), lebih dari 60% sungai di Indonesia mengalami penurunan mutu air akibat pencemaran(Widayati, 2023). Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan kualitas air yang mampu melakukan pengukuran parameter seperti *Total Dissolved Solids* (TDS), pH, suhu, dan konduktivitas secara real-time dan berkelanjutan (Jais et al., 2024)(Syed Taha, Abu Talip, Mohamad, Azizul Hasan, & Tengku Mohmed Noor Izam, 2024)(Jayaraman, Nagarajan, Partheeban, & Krishnamurthy, 2024).

Perkembangan *Internet of Things* (IoT) telah mendorong lahirnya sistem pemantauan kualitas air otomatis berbasis sensor yang terhubung ke jaringan (Forhad et al., 2024)(Prompt, Maithomklang, & Panya-isara, 2023)(Axiotidis, Konstantopoulou, & Sklavos, 2024). Sistem ini memungkinkan data dikumpulkan secara kontinu dan diunggah ke platform cloud untuk divisualisasikan dan dianalisis(Flores-Iwasaki et al., 2025)(Murti et al., 2024). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa sistem IoT berbasis mikrokontroler seperti Arduino dan NodeMCU dapat secara efektif mendeteksi perubahan kualitas air di sungai, waduk, maupun kolam budidaya (Malik et al.,

2023)(Alghamdi, Khairullah, & Mojamed, 2022). Namun, tantangan utama dalam penerapan sistem IoT di lapangan adalah keterbatasan infrastruktur komunikasi, terutama di daerah rural atau terpencil yang jauh dari jaringan seluler (Khairullah, Alghamdi, Al mojamed, & Zeadally, 2025).

Untuk mengatasi kendala tersebut, teknologi *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) seperti *Long Range* (LoRa) menjadi solusi yang menjanjikan (El Rachkidy, Guitton, & Kaneko, 2019)(El Rachkidy, Guitton, & Kaneko, 2018). LoRa bekerja pada lapisan fisik (PHY layer) menggunakan modulasi *Chirp Spread Spectrum* (CSS), yang memungkinkan transmisi data jarak jauh dengan konsumsi daya rendah(Pagano, Garlisi, Giuliano, Cattai, & Sapienza, 2024)(Krkljes et al., 2024). Teknologi ini telah banyak digunakan untuk aplikasi *smart environment*, *smart agriculture*, dan *water monitoring* karena kemampuannya menjangkau hingga beberapa kilometer dengan *bandwidth* sempit(Ali, Latiff, & Ismail, 2019)(Pratama, Kusuma, Mujiyanti, Schirhagl, & Nanta, 2024). Meskipun demikian, kinerja transmisi LoRa sangat bergantung pada pengaturan parameter seperti *Spreading Factor* (SF), *Bandwidth* (BW), *Coding Rate* (CR), dan *Transmit Power* (Boccardo, Daniele, Di Gennaro, Lofù, & Tedeschi, 2022).

Pengaturan parameter yang tidak optimal dapat menyebabkan penurunan *Packet Delivery Ratio* (PDR), peningkatan *Delay*, serta konsumsi daya berlebih pada node sensor (Essamlali, Nhaila, & El Khaili, 2024). Sejumlah penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa konfigurasi LoRa yang adaptif melalui mekanisme *Adaptive Data Rate*

(ADR) mampu menyeimbangkan jangkauan dan efisiensi energi (Bicamumakuba, Habineza, Samsuzzaman, Reza, & Chung, 2025)(Jabbar et al., 2024). Namun, sebagian besar sistem pemantauan kualitas air yang ada masih menggunakan konfigurasi default tanpa analisis performansi jaringan yang mendalam terhadap kondisi kanal yang bervariasi, seperti lingkungan sungai terbuka yang memiliki *multipath* dan gangguan sinyal yang tinggi.

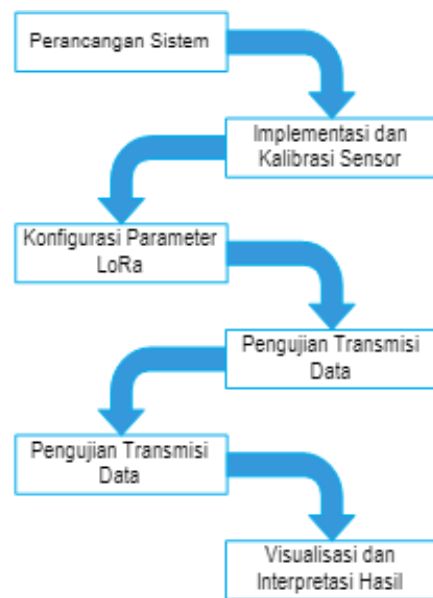
Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini berfokus pada analisis dan optimasi kinerja transmisi LoRa untuk sistem monitoring kualitas air berbasis *Internet of Things*. Penelitian ini akan menguji pengaruh variasi parameter *Spreading Factor*, *Bandwidth*, *Coding* dan *Transmit Power* terhadap kinerja transmisi data yang diukur melalui *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), *Packet Delivery Ratio* (PDR), dan *latency*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan konfigurasi parameter LoRa yang paling optimal untuk kondisi lingkungan sungai di Indonesia, sehingga sistem pemantauan kualitas air dapat beroperasi dengan jangkauan lebih luas, efisiensi energi lebih tinggi, dan keandalan transmisi yang lebih baik.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen dengan metode analisis parameter performansi jaringan LoRa, di mana setiap kombinasi parameter diuji pada kondisi lingkungan berbeda untuk memperoleh konfigurasi transmisi yang paling optimal. Tahapan penelitian secara umum ditunjukkan pada **Gambar 1**.

Berdasarkan Gambar 1, penelitian ini diawali dengan perancangan sistem monitoring kualitas air berbasis IoT yang terdiri dari dua bagian utama, yaitu node sensor (transmitter) dan gateway (receiver). Selanjutnya dilakukan kalibrasi sensor dengan membandingkan hasil pembacaan terhadap alat referensi untuk mendapatkan konstanta regresi linear  $y=a \cdot x+b$ , sehingga data yang dikirim merupakan nilai yang telah terkalibrasi. Tahap berikutnya adalah konfigurasi parameter LoRa pada lapisan fisik, meliputi *Spreading Factor*, *Bandwidth*, *Coding Rate*, dan *Transmit Power* melalui program di Arduino IDE. Pada tahap pengujian transmisi,

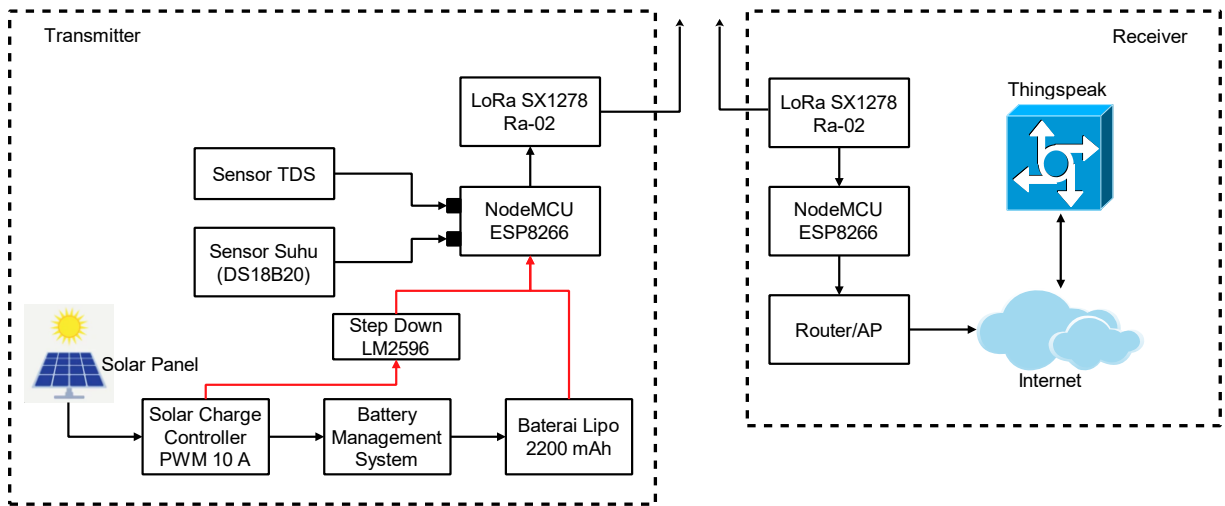
node sensor mengirimkan data secara periodik dengan berbagai kombinasi parameter LoRa. Nilai RSSI, SNR, jumlah paket terkirim ( $N_{sent}$ ), dan paket diterima ( $N_{recv}$ ) dicatat untuk analisis performa jaringan. Nilai *Packet Delivery Ratio* (PDR) dan *Delay* rata-rata dihitung untuk menentukan reliabilitas dan efisiensi transmisi. Tahapan terakhir meliputi analisis dan visualisasi hasil, di mana seluruh data dikirim ke ThingSpeak dan diekspor dalam format CSV untuk analisis lebih lanjut menggunakan Excel. Hasil analisis digunakan untuk menentukan konfigurasi LoRa yang paling optimal terhadap kondisi lingkungan sungai.



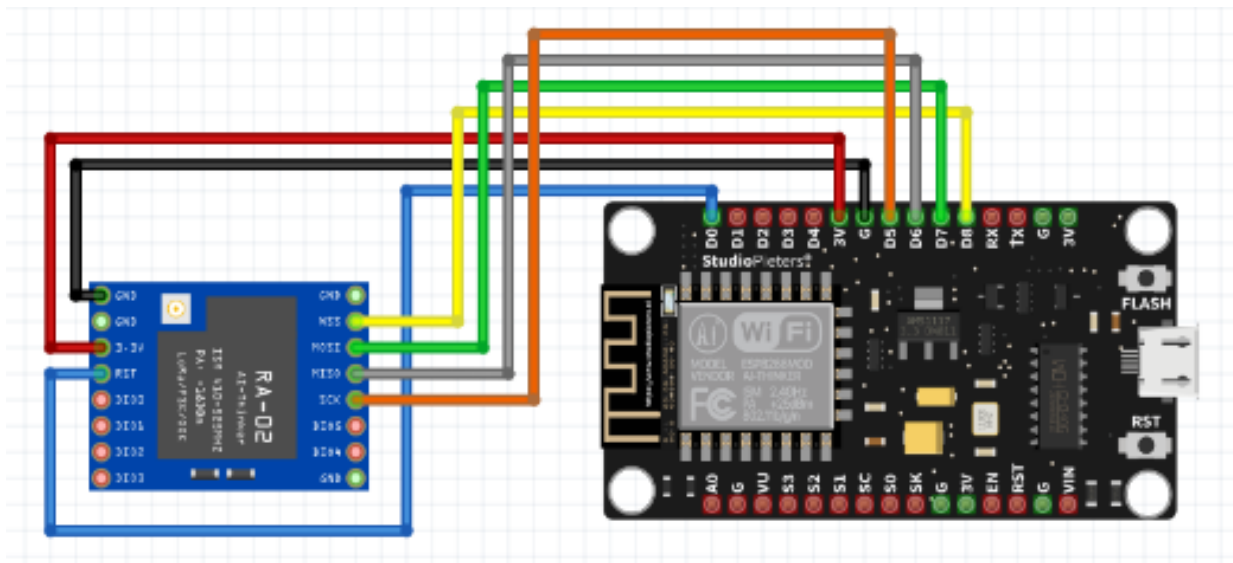
**Gambar 1.** Tahapan penelitian

### 2.1 Perancangan Sistem

Sistem monitoring kualitas air yang dikembangkan terdiri dari dua bagian utama, yaitu node sensor (transmitter) dan gateway (receiver). Node sensor menggunakan NodeMCU ESP8266 yang terhubung dengan sensor TDS dan sensor suhu DS18B20. Data hasil pengukuran dikirim melalui modul LoRa SX1278 Ra-02 menuju gateway. Gateway bertugas menerima data menggunakan LoRa yang sama, lalu meneruskan data ke platform ThingSpeak melalui koneksi Wi-Fi dan router untuk divisualisasikan secara real-time. Diagram blok sistem ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Diagram Blok Sistem Monitoring Kualitas Air Berbasis LoRa dan IoT



Gambar 3. Skema koneksi pin NodeMCU ESP8266 dengan LoRa SX1278 Ra-02

Proses kerja sistem dijelaskan sebagai berikut:

a. Akuisisi Data Sensor

NodeMCU membaca nilai sensor TDS (pin A0) dan suhu DS18B20 (pin D4) secara periodik. Nilai sensor dikalibrasi menggunakan persamaan linear (Mohd Jais et al., 2024):

$$y = \alpha \cdot x + b \quad (1)$$

di mana :

- $y$  = nilai hasil kalibrasi (misalnya, TDS dalam ppm),
- $x$  = nilai keluaran ADC dari sensor,
- $\alpha$  dan  $b$  = konstanta hasil regresi linear berdasarkan pengukuran pembandingan di laboratorium.

Sebagai contoh, hasil kalibrasi sensor TDS terhadap alat referensi menghasilkan persamaan:  $y = 0.85x + 12.6$ . Dengan demikian, jika sensor membaca nilai mentah

$x = 500$ , maka hasil kalibrasi menjadi:  $y = 0.85(500) + 12.6 = 437.6$  ppm. Nilai ini kemudian digunakan dalam sistem IoT untuk pengiriman data melalui LoRa ke *ThingSpeak*.

b. Transmisi Data melalui LoRa SX1278

Data hasil kalibrasi dikirimkan melalui modul LoRa SX1278 Ra-02 pada frekuensi 433 MHz. Modul ini dihubungkan ke mikrokontroler NodeMCU ESP8266 melalui antarmuka SPI (*Serial Peripheral Interface*) dengan konfigurasi pin sebagai berikut: SCK (D5), MISO (D6), MOSI (D7), NSS (D8), dan RST (D0) yang hal ini ditunjukkan pada **Gambar 3**.

c. Penerimaan Data di Gateway

Node gateway menggunakan modul LoRa SX1278 Ra-02 dengan parameter PHY yang identik dengan transmitter untuk memastikan sinkronisasi pada lapisan fisik. Setiap paket yang diterima diproses oleh NodeMCU ESP8266, yang mengekstraksi data, menampilkan hasil pada serial monitor, serta mencatat nilai RSSI dan SNR dari setiap paket menggunakan fungsi program berikut:

- `int rssi = LoRa.packetRssi();`
- `float snr = LoRa.packetSnr();`

d. Untuk mengukur reliabilitas komunikasi, jumlah paket yang diterima dihitung dan dibandingkan dengan jumlah paket terkirim menggunakan rumus(Hossinuzzaman & Dahnil, 2019):

$$PDR = \frac{N_{receive}}{N_{sent}} \times 100\% \quad (2)$$

Sebagai contoh, dalam satu sesi pengujian pada kondisi LOS dengan jarak 200 meter, dilakukan pengiriman 100 paket data dari node sensor menuju gateway. Dari hasil pengamatan, 96 paket berhasil diterima dengan baik di sisi penerima. Maka nilai *PDR* dapat dihitung sebagai berikut:

$$PDR = \frac{96}{100} \times 100\% = 96\%$$

e. Visualisasi dan Penyimpanan Data

Platform *ThingSpeak* digunakan untuk menampilkan data secara *real-time* serta menyimpan data historis yang digunakan

dalam analisis performa transmisi. Data yang dikirim dari gateway diunggah ke *ThingSpeak* channel melalui API key milik akun penelitian ini. Hasil pengukuran divisualisasikan dalam empat grafik:

- Grafik TDS (ppm) untuk memantau tingkat padatan terlarut,
- Grafik Suhu (°C) untuk memantau kondisi termal air,

Data historis pada *ThingSpeak* diunduh dalam format CSV untuk analisis lebih lanjut menggunakan Excel, di mana hubungan antara parameter (SF, BW, CR, TxPower) dan performa transmisi (RSSI, SNR, PDR, *Delay*) dievaluasi guna menentukan konfigurasi optimal.

**Tabel 1.** Variasi Parameter LoRa dan Tujuan Pengujian

Parameter	Variasi Nilai	Tujuan Pengujian
<i>Spreading Factor (SF)</i>	7, 9, 11	Menganalisis pengaruh SF terhadap jangkauan dan Delay transmisi
<i>Bandwidth (BW)</i>	125 kHz, 250 kHz	Menganalisis pengaruh BW terhadap throughput dan sensitivitas penerimaan
<i>Coding Rate (CR)</i>	4/5, 4/7	Menganalisis pengaruh CR terhadap reliabilitas dan ketahanan terhadap interferensi
<i>Transmit Power (TxPower)</i>	+10 dBm, +14 dBm	Menganalisis pengaruh daya pancar terhadap nilai RSSI dan kualitas sinyal

**2.2 Desain Eksperimen**

Penelitian ini menggunakan rancangan eksperimen *one-factor-at-a-time* (OFAT), di mana setiap parameter fisik LoRa diuji secara bergantian untuk menganalisis pengaruhnya terhadap kinerja transmisi. Empat parameter yang diuji meliputi *Spreading Factor*, *Bandwidth*,

*Coding Rate*, dan *Transmit Power*. Setiap variasi parameter diuji sebanyak 30 kali pengiriman paket pada kondisi *Line of Sight (LOS)* untuk memperoleh data RSSI, SNR, PDR, dan *Delay*. Variasi parameter dan tujuan pengujian dirangkum pada **Tabel 1**.

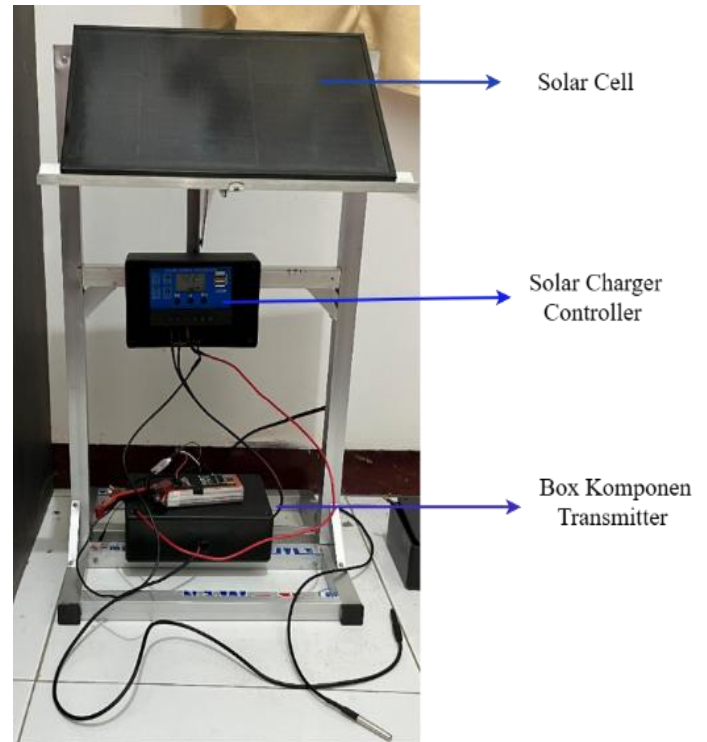
Pengaturan parameter transmisi tersebut dilakukan melalui fungsi-fungsi pada program *LoRa.h* pada Arduino IDE seperti ditunjukkan pada contoh berikut:

- `LoRa.setSpreadingFactor(9); // SF7-SF12`
- `LoRa.setSignalBandwidth(250E3); // 125E3 / 250E3 / 500E3`
- `LoRa.setCodingRate4(5); // 4/5 - 4/8`
- `LoRa.setTxPower(14); // +2 hingga +20 dBm`

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Implementasi Sistem Monitoring Kualitas Air

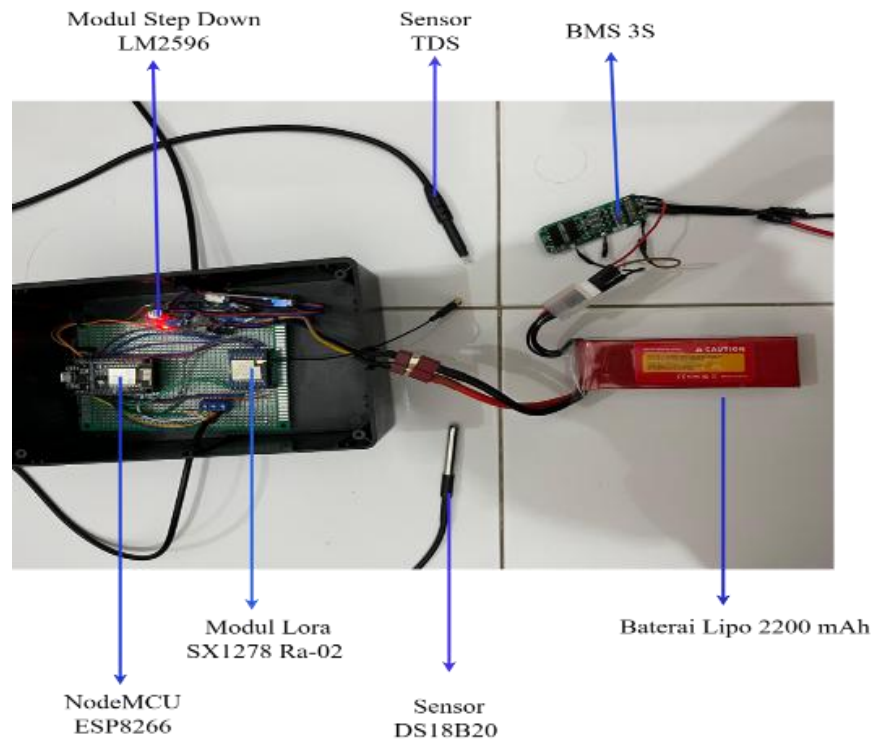
Sistem monitoring kualitas air berbasis IoT telah berhasil diimplementasikan menggunakan modul LoRa SX1278 Ra-02 sebagai media komunikasi data jarak jauh. Seluruh sistem dirancang agar dapat beroperasi secara mandiri dengan suplai daya dari panel surya, sehingga sistem tetap bekerja di lokasi terpencil tanpa bergantung pada jaringan listrik. Panel surya berfungsi sebagai sumber energi utama yang mengisi baterai melalui pengatur daya (*solar charge controller*). Baterai kemudian menyalurkan energi ke sistem sensor dan komunikasi LoRa yang beroperasi secara terus-menerus. Sistem ini menggunakan rangka aluminium ringan sebagai dudukan panel dan wadah kontrol, sehingga mudah dipindahkan ke lokasi pengukuran di lapangan. Integrasi antara panel surya dan perangkat elektronik dirancang agar efisien, dengan tegangan kerja stabil di sekitar 12,2 V seperti tertera pada layar kontrol daya. Hasil implementasi sistem yang terdiri dari panel surya, *solar charge controller* (SCC), dan baterai penyimpanan daya ditunjukkan pada **Gambar 4**.



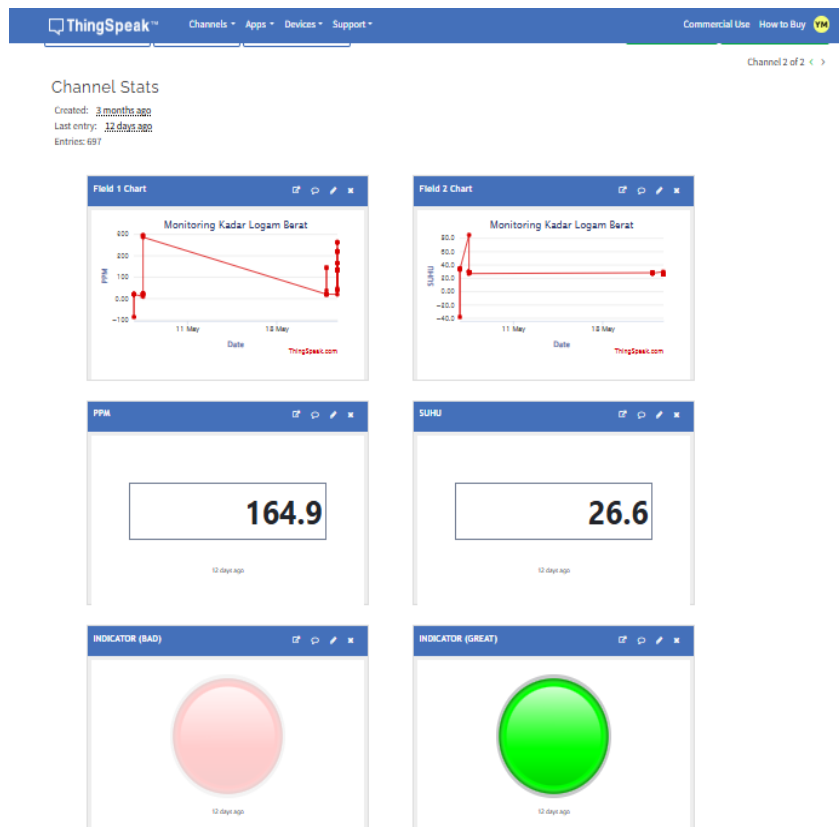
**Gambar 4.** Hasil implementasi sistem monitoring kualitas air berbasis IoT

Node sensor berfungsi untuk melakukan akuisisi data kualitas air dan mengirimkannya ke *gateway* menggunakan komunikasi LoRa. Perangkat ini terdiri dari NodeMCU ESP8266, modul LoRa SX1278, sensor TDS, dan sensor suhu DS18B20. Sumber daya node sensor berasal dari baterai Li-Po 3.7 V yang dapat diisi ulang melalui konverter daya DC dari sistem panel surya. Hasil implementasi Node sensor ditunjukkan pada **Gambar 5**.

Hasil pengujian akhir menunjukkan bahwa sistem monitoring kualitas air berbasis IoT yang dikembangkan telah berhasil mengirimkan data sensor secara *real-time* ke platform cloud ThingSpeak. Data yang dikirim meliputi nilai TDS yang dikonversi ke dalam satuan ppm (*part per million*), serta suhu air (°C) yang diperoleh dari sensor DS18B20. Hasil implementasi dashboard tampilan di thingspeak ditunjukkan pada **Gambar 6**.



Gambar 5. Hasil implementasi rangkaian Transmitter



Gambar 6. Tampilan dashboard ThingSpeak hasil monitoring kualitas air

Berdasarkan Gambar 6, memperlihatkan tampilan antarmuka (interface) ThingSpeak yang terdiri dari beberapa komponen utama:

- Grafik *Field 1* (PPM), menunjukkan hasil pembacaan nilai TDS dalam satuan ppm. Grafik memperlihatkan fluktuasi nilai TDS antara 100–200 ppm, yang merepresentasikan kadar padatan terlarut di air sungai selama periode pengamatan.
- Grafik *Field 2* (Suhu), menampilkan data suhu air yang relatif stabil di kisaran 26–27 °C, menunjukkan kondisi lingkungan yang konstan selama pengujian.
- Form nilai PPM dan Suhu, menampilkan pembacaan sensor terbaru yang dikirim oleh node sensor melalui LoRa ke gateway dan diteruskan ke cloud.
- Indikator Warna (BAD dan GREAT), merupakan fitur tambahan berbentuk indikator visual.
- Indikator hijau (“GREAT”) menyala ketika nilai TDS berada dalam rentang aman (<500 ppm) sesuai dengan standar baku mutu air bersih.
- Indikator merah (“BAD”) akan aktif bila nilai TDS melebihi ambang batas, menandakan air telah tercemar atau tidak layak konsumsi.

Dashboard ini memperlihatkan bahwa sistem berhasil melakukan proses akuisisi, transmisi, dan visualisasi data dengan baik. Setiap data yang diterima gateway secara otomatis diunggah ke cloud menggunakan API Key milik akun penelitian, dan dapat diakses melalui jaringan internet dari mana pun. Dari hasil pengamatan, sistem mampu mengirimkan data secara berkala dengan interval pengiriman 10 detik,

### 3.2 Pengujian Parameter LoRa (Analisis dan Optimasi)

Pengujian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh parameter fisik LoRa (PHY layer) terhadap kinerja transmisi data, meliputi: *Spreading Factor* (SF), *Bandwidth* (BW), *Coding Rate* (CR) dan *Transmit Power* (TxPower). Seluruh pengujian dilakukan pada kondisi LOS dengan jarak tetap 200 meter antara node sensor dan gateway. Parameter lain yang tidak diuji dijaga tetap, dengan konfigurasi dasar:

- Frekuensi operasi: 433 MHz
- *Bandwidth* (BW): 125 kHz
- *Coding Rate* (CR): 4/7
- *Transmit Power*: +14 dBm

- Jumlah paket uji: 30 paket per kombinasi parameter

#### 3.2.1 Pengaruh *Spreading Factor*

*Spreading Factor* mempengaruhi durasi simbol dan sensitivitas penerimaan sinyal. Hasil pengujian disajikan pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Hasil Pengujian Pengaruh *Spreading Factor* (SF) terhadap Kinerja Transmisi LoRa

SF	RSSI (dBm)	SNR (dB)	PDR (%)	Delay (ms)
7	-94	8.5	98	220
8	-97	9.1	97	290
9	-100	10.2	96	410
10	-104	11.0	95	580
11	-107	11.8	93	720

Nilai SF yang lebih tinggi meningkatkan sensitivitas penerimaan sinyal (SNR naik) namun memperpanjang waktu transmisi (*Delay* meningkat). Kombinasi SF9 memberikan performa paling seimbang antara PDR (96%) dan *Delay* (410 ms), sehingga dipilih sebagai konfigurasi optimal.

#### 3.2.2 Pengaruh *Bandwidth*

*Bandwidth* menentukan lebar spektrum frekuensi yang digunakan untuk modulasi sinyal, sehingga semakin besar nilai BW, semakin cepat laju transmisi data. Untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kinerja sistem, dilakukan pengujian dengan memvariasikan nilai *Bandwidth* pada tiga level, yaitu 125 kHz, 250 kHz, dan 500 kHz. Hasil pengujian ini ditunjukkan pada **Tabel 3**.

**Tabel 3.** Hasil pengujian pengaruh perubahan *Bandwidth*

BW (kHz)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	PDR (%)	Delay (ms)
125	-101	9.6	97	480
250	-98	8.2	95	320
500	-95	7.4	93	240

Hasil pengujian pada **Tabel 3**, menunjukkan bahwa variasi *Bandwidth* (BW) berpengaruh langsung terhadap RSSI, SNR, PDR, dan *Delay transmisi*. Pada BW 125 kHz, sistem

memiliki sensitivitas tinggi (RSSI -101 dBm, SNR 9.6 dB, PDR 97%), namun dengan *Delay* terbesar (480 ms) akibat proses simbol yang lebih panjang. Sebaliknya, BW 500 kHz meningkatkan throughput dan mempercepat transmisi (*Delay* 240 ms), tetapi menurunkan reliabilitas (PDR 93%) karena noise yang lebih besar. Kombinasi BW 250 kHz memberikan hasil paling seimbang (RSSI -98 dBm, PDR 95%, *Delay* 320 ms) sehingga cocok untuk transmisi real-time. Secara keseluruhan, BW 125 kHz direkomendasikan untuk komunikasi jarak jauh yang membutuhkan sensitivitas tinggi, sedangkan BW 250 kHz lebih efisien untuk sistem monitoring dengan kebutuhan latensi rendah.

### 3.2.3 Pengaruh Coding Rate

*Coding Rate (CR)* juga memiliki peranan penting dalam menentukan reliabilitas komunikasi LoRa. CR berfungsi untuk menambahkan bit redundansi pada proses transmisi data, sehingga penerima dapat mengoreksi kesalahan akibat gangguan atau noise selama propagasi sinyal. Dengan demikian, semakin besar nilai CR, maka semakin tinggi kemampuan koreksi error, namun waktu transmisi menjadi lebih lama. Untuk menganalisis pengaruhnya terhadap performa jaringan, dilakukan pengujian dengan variasi CR = 4/5, 4/6, 4/7, dan 4/8. Hasil pengujian ini ditunjukkan pada **Tabel 4**.

**Tabel 4.** Hasil pengujian pengaruh perubahan *Coding Rate*

CR	RSSI (dBm)	SNR (dB)	PDR (%)	Delay (ms)
4/5	-99	9.4	96	420
4/6	-101	10.1	97	460
4/7	-103	10.8	98	530
4/8	-105	11.5	96	620

Berdasarkan **Tabel 4**, menunjukkan bahwa peningkatan CR berpengaruh terhadap reliabilitas dan waktu transmisi sistem LoRa. Nilai PDR tertinggi (98%) diperoleh pada CR 4/7, yang menandakan sistem paling tahan terhadap interferensi dengan stabilitas sinyal terbaik (RSSI -103 dBm, SNR 10.8 dB). Namun, semakin besar CR menyebabkan *Delay* meningkat dari 420 ms (CR 4/5) menjadi 620 ms (CR 4/8) karena jumlah bit redundansi yang dikirim semakin banyak.

### 3.2.4 Pengaruh Transmit Power

Parameter *Transmit Power (TxPower)* merupakan faktor penting yang memengaruhi kualitas sinyal, jangkauan komunikasi, dan konsumsi daya pada sistem LoRa. Nilai TxPower menentukan kekuatan pancaran sinyal dari pemancar ke penerima, sehingga diperlukan analisis untuk memperoleh nilai yang paling efisien tanpa mengorbankan reliabilitas transmisi. Dalam pengujian ini, nilai TxPower divariasikan dari +8 dBm hingga +16 dBm, sedangkan parameter lain dijaga tetap menggunakan konfigurasi optimal sebelumnya. Arus konsumsi modul LoRa SX1278 (RA-02) diukur menggunakan multimeter digital yang dihubungkan secara seri pada jalur VCC selama proses transmisi untuk memperoleh rata-rata konsumsi daya pada setiap level TxPower. Hasil pengujian ini ditunjukkan pada **Tabel 5**.

**Tabel 5.** Hasil pengujian pengaruh perubahan transmit power

TxPower (dBm)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	PDR (%)	Delay (ms)	Konsumsi Daya (mA)
+8	-110	7.6	91	420	68
+10	-106	8.1	93	400	74
+12	-101	9.0	96	385	79
+14	-98	9.5	97	380	82
+16	-96	10.2	97	370	90

Berdasarkan **Tabel 5**, menunjukkan bahwa peningkatan TxPower berpengaruh langsung terhadap RSSI, rasio sinyal terhadap noise (SNR), dan reliabilitas transmisi (PDR). Ketika TxPower dinaikkan dari +8 dBm menjadi +14 dBm, nilai RSSI meningkat dari -110 dBm menjadi -98 dBm, dan PDR naik dari 91% menjadi 97%, menandakan kualitas komunikasi yang lebih stabil. Namun, peningkatan daya pancar juga menyebabkan kenaikan konsumsi arus dari 68 mA menjadi 82 mA, serta hanya memberikan perbaikan sinyal yang kecil pada level maksimum (+16 dBm). Dengan demikian, TxPower +14 dBm dipilih sebagai konfigurasi paling efisien karena memberikan keseimbangan antara kualitas sinyal yang baik (RSSI -98 dBm, PDR 97%) dan penggunaan daya yang masih hemat untuk sistem monitoring kualitas air berbasis LoRa.

### 3.2.5 Konfigurasi Optimal LoRa

Berdasarkan serangkaian pengujian parameter utama yang meliputi *Spreading Factor*, *Bandwidth*, *Coding Rate*, dan *Transmit Power*, diperoleh hasil bahwa masing-masing parameter memiliki pengaruh berbeda terhadap kinerja transmisi LoRa dalam hal RSSI, SNR, PDR, *Delay*, dan konsumsi daya. Oleh karena itu, diperlukan penentuan konfigurasi yang paling optimal untuk mencapai keseimbangan antara jangkauan, efisiensi energi, dan reliabilitas komunikasi pada sistem monitoring kualitas air berbasis *Internet of Things* (IoT).

Pemilihan parameter optimal dilakukan dengan mempertimbangkan kompromi terbaik antara performa sinyal dan efisiensi energi, berdasarkan hasil rata-rata pengujian dari setiap variasi parameter yang telah dilakukan sebelumnya. **Tabel 6** berikut menyajikan konfigurasi optimal LoRa yang diperoleh dari hasil analisis keseluruhan pengujian.

**Tabel 6.** Konfigurasi optimal LoRa berdasarkan hasil pengujian

Parameter	Nilai Optimal	Alasan Teknis	Hasil Kinerja
SF	9	Kompromi antara jangkauan dan <i>Delay</i>	PDR 96%, <i>Delay</i> 410 ms
BW	125 kHz	Sensitivitas tinggi, sinyal stabil	RSSI -100 dBm
CR	4/7	Tahan interferensi, reliabilitas tinggi	PDR 98%
TxPower	+14 dBm	RSSI kuat, efisiensi energi baik	RSSI -98 dBm, <i>Delay</i> 380 ms

Berdasarkan Tabel 6, menunjukkan bahwa konfigurasi SF9, BW125 kHz, CR4/7, dan TxPower +14 dBm memberikan performa terbaik secara keseluruhan. Kombinasi tersebut menghasilkan PDR rata-rata 96–98% dengan *Delay* 380–410 ms, menunjukkan keseimbangan antara jangkauan, stabilitas sinyal, dan efisiensi energi. Nilai SF9 memberikan kompromi optimal antara jangkauan dan waktu tunda, sedangkan

BW125 kHz menghasilkan sensitivitas tinggi dengan sinyal yang stabil pada kondisi lingkungan terbuka. Parameter CR4/7 terbukti paling tahan terhadap interferensi dan mendukung reliabilitas tinggi, sementara TxPower +14 dBm memberikan kekuatan sinyal yang baik dengan konsumsi daya yang masih efisien

### 3.2.6 Hasil Visualisasi Data Sensor

Setelah seluruh parameter transmisi LoRa diuji dan dikonfigurasi pada kondisi optimal, tahap selanjutnya adalah pengujian fungsional sistem monitoring kualitas air untuk memastikan kemampuan sistem dalam mengirim, menampilkan, dan menyimpan data sensor secara *real-time*. Pengujian dilakukan pada kondisi air alami di lingkungan terbuka dengan durasi pengamatan selama beberapa jam untuk menilai stabilitas pembacaan sensor dan keandalan transmisi data. Data yang terekam pada ThingSpeak selanjutnya diekspor dalam format CSV dan dirata-ratakan untuk memperoleh nilai parameter yang mewakili kondisi aktual selama pengujian. Rekapitulasi hasil pengujian sensor dan visualisasi data pada platform ThingSpeak disajikan pada **Tabel 7**.

**Tabel 7.** Rekapitulasi Hasil Pengujian Sensor pada Platform ThingSpeak

Parameter	Nilai Rata-rata	Satuan	Keterangan
TDS	164.9	ppm	Dalam batas aman (<500 ppm)
Suhu Air	26.6	°C	Stabil selama pengamatan
Indikator "GREAT"	Aktif (Hijau)	-	Air layak digunakan
Indikator "BAD"	Non-aktif (Merah)	-	Tidak ada pencemaran berat

Berdasarkan Tabel 7, visualisasi pada ThingSpeak menunjukkan sistem berhasil mengirim data dengan interval stabil 10 detik tanpa kehilangan paket signifikan. Hasil ini membuktikan integrasi antara NodeMCU – LoRa SX1278 – ThingSpeak bekerja dengan baik pada konfigurasi optimal.

### 3.3 Hasil pengujian lapangan berdasarkan jarak dan kondisi lingkungan

Untuk memvalidasi hasil optimasi, dilakukan pengujian lanjutan di lapangan dengan variasi jarak (50–350 m) dan dua kondisi propagasi, yaitu LOS dan NLOS. Konfigurasi parameter yang digunakan mengacu pada hasil optimasi, yaitu SF9–BW125–CR4/7–TxPower +14 dBm. Hasil pengujian lapangan ini ditunjukkan pada **Tabel 8**.

**Tabel 8.** Hasil Pengujian Pengaruh Jarak dan Kondisi Lingkungan terhadap Kinerja Transmisi LoRa

Jarak (m)	Kondisi	RSSI (dBm)	SNR (dB)	PDR (%)	Delay (ms)
50	LOS	-87	9.8	100	210
100	LOS	-92	9.2	99	250
150	LOS	-97	8.6	98	310
200	LOS	-100	7.9	96	390
250	LOS	-104	7.3	94	440
300	LOS	-109	6.5	90	520
350	LOS	-	-	-	-
150	NLOS	-107	5.2	84	610
200	NLOS	-112	4.8	78	700
250	NLOS	-	-	-	-

Berdasarkan Tabel 8, menunjukkan bahwa jarak dan kondisi lingkungan memiliki pengaruh signifikan terhadap performa transmisi LoRa. Pada kondisi LOS, sistem mampu beroperasi dengan stabil hingga jarak 300 meter, dengan nilai PDR  $\geq 90\%$  dan RSSI -109 dBm, sedangkan Delay meningkat secara bertahap seiring bertambahnya jarak karena waktu propagasi dan kemungkinan retransmisi yang lebih lama. Sebaliknya, pada kondisi NLOS, performa komunikasi menurun cukup drastis; pada jarak 200 meter, RSSI turun menjadi -112 dBm dan PDR hanya mencapai 78%, menunjukkan adanya efek redaman dan multipath akibat halangan seperti pepohonan dan bangunan. Dengan demikian, kondisi LOS pada jarak sekitar 200 meter dinilai paling ideal untuk implementasi sistem monitoring kualitas air berbasis LoRa karena memberikan keseimbangan antara jangkauan, reliabilitas, dan efisiensi energi.

### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan dan menganalisis sistem monitoring kualitas air berbasis Internet of Things (IoT) dengan menggunakan modul LoRa SX1278 Ra-02 sebagai media komunikasi jarak jauh. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap parameter fisik LoRa memiliki pengaruh signifikan terhadap performa transmisi. Spreading Factor memberikan kompromi antara jangkauan dan waktu tunda, Bandwidth 125 kHz menghasilkan sensitivitas penerimaan yang tinggi, Coding Rate 4/7 memberikan reliabilitas terbaik melalui kemampuan koreksi error, sedangkan Transmit Power +14 dBm menghasilkan kekuatan sinyal yang optimal dengan konsumsi daya yang efisien. Kombinasi parameter tersebut menghasilkan kinerja transmisi yang optimal dengan nilai PDR 96–98% dan delay rata-rata 380–410 ms, menunjukkan keseimbangan antara efisiensi energi dan stabilitas komunikasi.

Pengujian lapangan menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi secara stabil hingga jarak 300 meter dalam kondisi Line of Sight (LOS) dengan PDR  $\geq 90\%$ , sedangkan pada kondisi Non-Line of Sight (NLOS) terjadi penurunan performa akibat redaman dan multipath, namun komunikasi masih dapat dipertahankan hingga jarak 200 meter. Temuan ini menegaskan bahwa performa transmisi LoRa sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan jarak propagasi.

Dengan demikian, tujuan penelitian untuk menganalisis pengaruh parameter fisik LoRa serta menentukan konfigurasi paling optimal telah tercapai. Berdasarkan seluruh hasil pengujian, konfigurasi SF9–BW125 kHz–CR4/7–TxPower +14 dBm direkomendasikan sebagai pengaturan terbaik untuk sistem monitoring kualitas air berbasis IoT karena mampu memberikan keseimbangan optimal antara jangkauan komunikasi, reliabilitas transmisi, dan efisiensi energi pada lingkungan sungai.

### DAFTAR PUSTAKA

- Alghamdi, A. M., Khairullah, E. F., & Mojamed, M. M. Al. (2022). LoRaWAN Performance Analysis for a Water Monitoring and Leakage Detection System in a Housing Complex. *Sensors*, 22(19), 1–15. <https://doi.org/10.3390/s22197188>

- Ali, N. A. A., Latiff, N. A. A., & Ismail, I. S. (2019). Performance of LoRa network for environmental monitoring system in Bidong island Terengganu, Malaysia. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 10(11), 1–8. <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2019.0101117>
- Axiotidis, C., Konstantopoulou, E., & Sklavos, N. (2024). A wireless sensor network IoT platform for consumption and quality monitoring of drinking water. *Discover Applied Sciences*, 7(1). <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06384-1>
- Bicamumakuba, E., Habineza, E., Samsuzzaman, S., Reza, M. N., & Chung, S.-O. (2025). IoT-enabled LoRaWAN gateway for monitoring and predicting spatial environmental parameters in smart greenhouses: A review. *Precision Agriculture Science and Technology*, 7(1), 28–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.22765/pastj.20250003>
- Boccardo, P., Daniele, V., Di Gennaro, P., Lofù, D., & Tedeschi, P. (2022). Water quality prediction on a Sigfox-compliant IoT device: The road ahead of WaterS. *Ad Hoc Networks*, 126(November 2021), 102749. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2021.102749>
- El Rachkidy, N., Guitton, A., & Kaneko, M. (2018). Decoding Superposed LoRa Signals. *Proceedings - Conference on Local Computer Networks, LCN, 2018-October*(1), 184–190. <https://doi.org/10.1109/LCN.2018.8638253>
- El Rachkidy, N., Guitton, A., & Kaneko, M. (2019). Collision Resolution Protocol for Delay and Energy Efficient LoRa Networks. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 3(2), 535–551. <https://doi.org/10.1109/TGCN.2019.2908409>
- Essamlali, I., Nhaila, H., & El Khaili, M. (2024). Advances in machine learning and IoT for water quality monitoring: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(6), e27920. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27920>
- Flores-Iwasaki, M., Guadalupe, G. A., Pachas-Caycho, M., Chapa-Gonza, S., Mori-Zabarburú, R. C., & Guerrero-Abad, J. C. (2025). Internet of Things (IoT) Sensors for Water Quality Monitoring in Aquaculture Systems: A Systematic Review and Bibliometric Analysis. *AgriEngineering*, 7(3), 1–28. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7030078>
- Forhad, H. M., Uddin, M. R., Chakrovorty, R. S., Ruhul, A. M., Faruk, H. M., Kamruzzaman, S., ... Morshed, A. M. (2024). IoT based real-time water quality monitoring system in water treatment plants (WTPs). *Heliyon*, 10(23), e40746. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40746>
- Hossinuzzaman, M. D., & Dahnil, D. P. (2019). Enhancement of packet delivery ratio during rain attenuation for Long Range technology. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 10(10), 219–225. <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2019.0101031>
- Jabbar, W. A., Mei Ting, T., I. Hamidun, M. F., Che Kamarudin, A. H., Wu, W., Sultan, J., ... Ali, M. A. H. (2024). Development of LoRaWAN-based IoT system for water quality monitoring in rural areas. *Expert Systems with Applications*, 242(May 2022), 122862. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122862>
- Jais, N. A. M., Abdullah, A. F., Kassim, M. S. M., Karim, M. M. A., M, A., & Muhadi, N. 'Atirah. (2024). Improved accuracy in IoT-Based water quality monitoring for aquaculture tanks using low-cost sensors: Asian seabass fish farming. *Heliyon*, 10(8), e29022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29022>
- Jayaraman, P., Nagarajan, K. K., Partheeban, P., & Krishnamurthy, V. (2024). Critical review on water quality analysis using IoT and machine learning models. *International Journal of Information Management Data Insights*, 4(1), 100210. <https://doi.org/10.1016/j.ijime.2023.100210>
- Khairullah, E. F., Alghamdi, A. M., Al mojamed, M.

- M., & Zeadally, S. (2025). LoRaWAN-based smart water management IoT applications: a review. *Journal of Information and Telecommunication*, 9(3), 420–446. <https://doi.org/10.1080/24751839.2025.2458889>
- Krkljes, D. B., Kitic, G. V., Petes, C. M., Birgermajer, S. S., Stanojev, J. D., Bajac, B. M., ... Matovic, J. B. (2024). Multiparameter Water Quality Monitoring System for Continuous Monitoring of Fresh Waters. *IEEE Sensors Journal*, 24(7), 11246–11260. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3368560>
- Lal, K., Menon, S., Noble, F., & Arif, K. M. (2024). Low-cost IoT based system for lake water quality monitoring. *PLoS ONE*, 19(3 March), 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299089>
- Malik, P. K., Malik, P., Kumar, G. R., Sneha, Abraham, R., & Singh, R. (2023). Design and Implementation of a LoRa-Based Water Quality Monitoring System. *2023 3rd International Conference on Advancement in Electronics and Communication Engineering, AECE 2023*, (April 2024), 120–124. <https://doi.org/10.1109/AECE59614.2023.10428618>
- Mohd Jais, N. A., Abdullah, A. F., Mohd Kassim, M. S., Abd Karim, M. M., M, A., & Muhadi, N. 'Atirah. (2024). Improved accuracy in IoT-Based water quality monitoring for aquaculture tanks using low-cost sensors: Asian seabass fish farming. *Heliyon*, 10(8), e29022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29022>
- Murti, M. A., Saputra, A. R. A., Alinursafa, I., Ahmed, A. N., Yafouz, A., & El-Shafie, A. (2024). Smart system for water quality monitoring utilizing long-range-based Internet of Things. *Applied Water Science*, 14(4). <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02128-z>
- Pagano, A., Garlisi, D., Giuliano, F., Cattai, T., & Sapienza, F. C. (2024). SWI-FEED: Smart Water IoT Framework for Evaluation of Energy and Data in Massive Scenarios. *2024 IFIP Networking Conference, IFIP Networking 2024*, 583–585. <https://doi.org/10.23919/IFIPNetworking62109.2024.10619752>
- Pires, L. M., & Gomes, J. (2024). River Water Quality Monitoring Using LoRa-Based IoT. *Designs*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/designs8060127>
- Pratama, I. P. E. W., Kusuma, F. A., Mujiyanti, S. F., Schirhagl, R., & Nanta, T. L. (2024). Solar-based aerator with water quality monitoring in vannamei shrimp pond. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 14(5), 5048–5054. <https://doi.org/10.11591/ijece.v14i5.pp5048-5054>
- Prompt, S., Maithomklang, S., & Panya-isara, C. (2023). Design and Analysis Performance of IoT-Based Water Quality Monitoring System using LoRa Technology. *TEM Journal*, 12(1), 29–35. <https://doi.org/10.18421/TEM121-04>
- Syed Taha, S. N., Abu Talip, M. S., Mohamad, M., Azizul Hasan, Z. H., & Tengku Mohmed Noor Izam, T. F. (2024). Evaluation of LoRa Network Performance for Water Quality Monitoring Systems. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/app14167136>
- Tang, J., Lin, H., & Tian, Q. (2024). Design and realization of a water quality monitoring system based on the Internet of Things. *Water Practice and Technology*, 19(9), 3538–3554. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.222>
- Widayati, N. (2023). *Laporan Kinerja Direktorat Pengendalian Pencemaran Udara Direktorat Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan Tahun 2022. Direktorat Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan (Vol. 53)*. Retrieved from [https://tanamanpangan.pertanian.go.id/assets/front/uploads/document/LAKIN DJTP 2022\\_UPDATE ATAP \(2\).pdf](https://tanamanpangan.pertanian.go.id/assets/front/uploads/document/LAKIN DJTP 2022_UPDATE ATAP (2).pdf)