



Evaluasi Performansi Propagasi LoRa E220-900T30D di Lingkungan Rural untuk Monitoring Turbin Angin Berbasis IoT

Indah Kurniawati^{1*}, Reynanda Bagus W.A¹, Ridho Akbar¹, M. Akmal Rais¹

¹Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Surabaya, Indonesia

Jalan Sutorejo 59 Surabaya

E-Mail*: indah.kurniawati@ft.um-surabaya.ac.id

ABSTRACT

Reliable wind turbine monitoring is essential to ensure performance and continuity of energy generation, particularly in remote and hard-to-access locations. Offline monitoring is considered inefficient because it requires shutting down turbine operations. The wind turbine in this study is planned to be deployed in the rural area of Bangkalan, Madura, where no prior research has investigated propagation channel modeling using LoRa as the communication medium. This research aims to evaluate the performance of the LoRa-based E220-900T30D network for IoT and Wireless Sensor Network (WSN) wind turbine monitoring in the rural environment of Bangkalan. Experiments were conducted at a frequency of 920 MHz with a 125 kHz bandwidth, Spreading Factor (SF) 7, and a transmit power of 30 dBm. The analyzed parameters include Received Signal Strength Indicator (RSSI) and Signal-to-Noise Ratio (SNR) over distances ranging from 10 m to 2699 m, as well as propagation modeling using log-distance regression and evaluation of shadowing standard deviation and variance. The measurement results show that RSSI decreases consistently with distance after entering the far-field region beyond 1 km, yielding a coefficient of determination $R^2 = 0.98$ and shadowing standard deviation and variance of 0.3 dB and 0.09, respectively. A path loss exponent of $n = 2.73$ indicates the dominance of line-of-sight propagation in the rural environment. This study successfully identifies the path loss exponent, determines the near-field boundary of the device, and obtains shadowing variance for wireless network design, while demonstrating the high accuracy of log-distance regression in RSSI prediction.

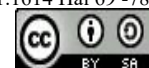
Keywords: LoRa, RSSI, SNR, exponent path loss, variance

ABSTRAK

Monitoring turbin angin secara handal diperlukan untuk menjamin kinerja dan kontinuitas pembangkitan energi, khususnya pada lokasi yang sulit dijangkau. Monitoring offline dinilai kurang efisien karena memerlukan penghentian operasi turbin. Turbin angin ini direncanakan untuk diletakkan di wilayah rural Bangkalan, Madura, dimana belum ada penelitian sebelumnya yang membahas pemodelan kanal propagasi dengan LoRa yang digunakan sebagai media komunikasi di daerah tersebut. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi performansi jaringan LoRa E220-900T30D sebagai media monitoring turbin angin berbasis IoT dan Wireless Sensor Network (WSN) di lingkungan rural Bangkalan, Madura. Pengujian dilakukan pada frekuensi 920 MHz dengan bandwidth 125 kHz, *spreading factor* (SF) 7, dan daya pancar 30 dBm. Parameter yang dianalisis meliputi Received Signal Strength Indicator (RSSI) dan Signal-to-Noise Ratio (SNR) pada jarak 10 m hingga 2699 m, serta pemodelan propagasi menggunakan regresi log-distance, dan evaluasi standar deviasi shadowing dan varians. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa RSSI menurun secara valid terhadap jarak setelah memasuki medan jauh diatas 1 km dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,98$ dan standar deviasi shadowing dan varians masing-masing adalah 0,3 dB dan 0,09. Nilai eksponen path loss $n = 2,73$ mengindikasikan dominasi lintasan langsung pada lingkungan rural. Penelitian ini berhasil mengidentifikasi nilai eksponen, mengidentifikasi batas medan dekat perangkat, dan menentukan nilai varians shadowing untuk perancangan jaringan nirkabel, serta menunjukkan akurasi regresi log-distance yang tinggi dalam prediksi RSSI.

Kata Kunci: LoRa, RSSI, SNR, eksponen path loss, varians

Naskah diterima 07 Januari 2026; Revisi 21 Februari 2026; Diterima 06 Maret 2026. Tanggal Publikasi 01 Maret 2026
Jurnal teknika berada pada lisensi Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License
DOI : 10.30736/jt.v18i1.1614 Hal 69 -78



1. PENDAHULUAN

Turbin angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang banyak diterapkan pada wilayah dengan potensi angin tinggi untuk mendukung penyediaan energi bersih dan berkelanjutan (Hamed & Alshare, 2022). Penggunaan turbin angin pada daerah-daerah tersebut terus meningkat sehingga diperlukan pemantauan agar turbin angin dapat selalu bekerja secara optimal. Sistem pemantauan turbin angin konvensional yang dilakukan secara offline memiliki keterbatasan karena mengharuskan penghentian operasi turbin, sehingga kurang efisien terutama pada lokasi yang sulit dijangkau (Maldonado-Correa et al., 2020). Sebagai alternatif, implementasi sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) dan *Wireless Sensor Network* (WSN) dipandang lebih efektif karena mampu memantau kondisi turbin secara real time tanpa menghentikan operasi (Black et al., 2021).

Dalam sistem IoT tersebut, berbagai sensor digunakan untuk memonitor parameter lingkungan seperti kecepatan angin, suhu, dan kelembapan, serta parameter mekanik dan elektrik turbin (Pandit et al., 2023). Data sensor dikumpulkan oleh node-node WSN kemudian diintegrasikan melalui gateway menuju server pusat. Tantangan utama pada wilayah rural adalah keterbatasan pilihan teknologi komunikasi nirkabel jarak jauh yang hemat energi dan andal. Teknologi *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) seperti LoRa (*Long-Range*) mendapatkan perhatian karena mampu menjangkau komunikasi jarak jauh dengan konsumsi daya rendah serta beroperasi pada pita frekuensi sub-GHz tanpa lisensi (Obiri & Shikunzi, 2023). LoRa diklaim memiliki jangkauan komunikasi lebih dari 10 km pada kondisi rural terbuka (Abdullah et al., 2022).

Pada penelitian ini digunakan modul LoRa karena karakteristik teknisnya yang sesuai untuk aplikasi monitoring turbin angin, antara lain sensitivitas penerima yang tinggi (hingga -124 dBm pada SF7), dukungan output daya pancar hingga 30 dBm, fleksibilitas pengaturan parameter seperti bandwidth, spreading factor, dan coding rate, serta konsumsi daya rendah pada mode operasi *sleep* dan *standby* (Dsa et al., 2024; Marquez & Calle, 2023). Keunggulan tersebut memungkinkan modul ini memberikan jangkauan komunikasi yang luas sekaligus hemat energi, serta integrasi mudah dengan mikrokontroler melalui antarmuka UART (Astutik, 2023; LoRa Alliance® Technical Committee, 2020). LoRa dengan tipe E220-900T30D ini disebut dapat digunakan sebagai media komunikasi hingga jarak 10 km (SEMTECH, 2016). Keunggulan-keunggulan ini menjadi sebab dipilihnya modul LoRa dibandingkan dengan modul komunikasi lain, seperti WiFi, Zigbee, Bluetooth, dan lain-lain.

Beberapa penelitian sebelumnya meneliti performansi LoRa pada lingkungan yang berbeda. Penelitian pada area urban menunjukkan bahwa struktur bangunan dan hambatan fisik menyebabkan penurunan nilai RSSI dan SNR serta memperpendek jangkauan efektif komunikasi LoRa (Edwin et al.,

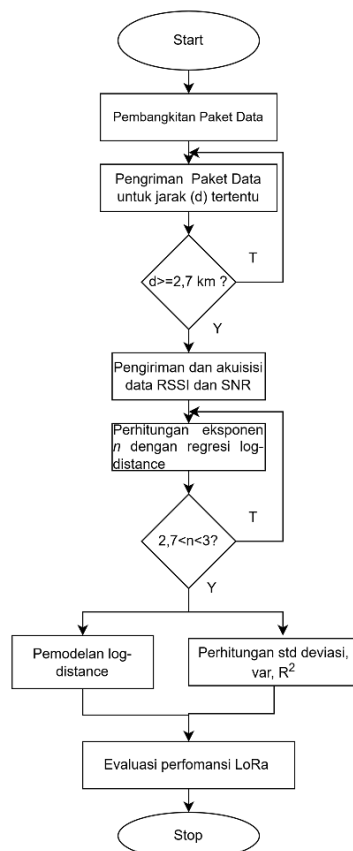
2022). (Guo et al., 2021; Mathe, 2023). Studi di wilayah rural Nepal menunjukkan variasi kondisi topografi berdampak pada fluktuasi nilai RSSI dan SNR, sehingga diperlukan optimasi parameter LoRa untuk mempertahankan stabilitas komunikasi (Marahatta et al., 2021). Di Indonesia, penelitian LoRa yang diterapkan pada monitoring pertanian dan sistem monitoring lingkungan kampus telah dilakukan untuk mengevaluasi kualitas sinyal terhadap jarak, namun fokusnya cenderung pada implementasi aplikasi dan belum secara khusus membahas karakterisasi propagasi modul LoRa E220-900T30D pada lingkungan persawahan (Irianto, 2022; Sari et al., 2022; Putra & Nugroho, 2023). Selain itu, telah dilakukan perhitungan eksponen pathloss untuk daerah kampus dan daerah urban (Fahrezi et al., 2024; Gonzalez et al., 2022; Yanziah et al., 2020). Namun belum ditemukan pengukuran kualitas propagasi jaringan LoRa di daerah persawahan di Bangkalan, Madura.

Berdasarkan tinjauan tersebut, terdapat kebutuhan untuk mengevaluasi performansi propagasi LoRa E220-900T30D di lingkungan rural dengan karakteristik persawahan, khususnya untuk mendukung sistem monitoring turbin angin berbasis IoT. Penelitian ini mengevaluasi kinerja propagasi modul tersebut di Kecamatan Socah, Bangkalan, Madura, dimana lokasi ini dipilih berdasarkan potensi angin yang diprediksi oleh Global Wind Atlas (Davis et al., 2023). Evaluasi dilakukan melalui pengukuran *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) pada jarak 0–2,7 km dengan menggunakan model propagasi *log-distance* untuk memprediksi pelemahan sinyal terhadap jarak. Dari persamaan regresi linier terhadap logaritmik jarak tersebut dihitung standar deviasi shadowing (σ), varians, dan *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) untuk mengetahui kualitas jaringan. Jika SNR besar, maka kualitas jaringan baik karena angka kehilangan paket kecil sedangkan SNR turun yang mengakibatkan peningkatan packet loss dan komunikasi sering terjadi masalah karena daya sinyal tertutup noise (Cortesi et al., 2023). Nilai SNR digunakan untuk menilai kualitas kanal komunikasi serta estimasi potensi kehilangan paket data yang terjadi akibat noise dan redaman sinyal (Pirri et al., 2025)(Milarokostas et al., 2023).

2. METODE

WSN dalam memonitor turbin angin diatur oleh LoRa E220-900T30D sebagai transceiver yang berkomunikasi dengan end-node dan sistem gateway. Data yang dikirimkan oleh end-node diterima oleh gateway via LoRa connection, dan melalui gateway, data disimpan di LoRa network server melalui IP connection. End-node pada sistem ini adalah parameter-parameter yang dimonitor pada turbin angin, sedangkan gateway sebagai receiver terletak pada gedung yang direncanakan berjarak sekitar 5-10 km dari lokasi turbin angin. Hal pertama yang harus dilakukan agar pengoperasian LoRa sesuai dengan Peraturan Kementerian Komunikasi dan Digital Republik Indonesia adalah mengukur kualitas

jaringan komunikasi yang berupa RSSI dan SNR, dan memastikan bahwa daya pancar, bandwidth, dan frekuensi kerja sesuai dengan regulasi. Sedangkan diagram blok penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Pengukuran

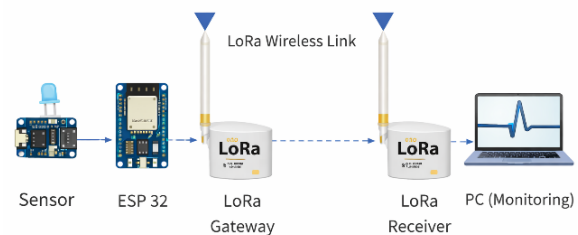
Pada Gambar 1 dapat dilihat bahwa penelitian ini dimulai dengan pembangkitan paket data hasil monitor turbin angin yang dikirimkan ke server melalui jaringan komunikasi LoRa dengan variasi jarak dari 100 m hingga 2,7 km. Data RSSI yang diperoleh dari pengukuran kemudian diolah untuk perhitungan SNR dan pemodelan Regresi Log-Distance untuk prediksi daya terima hingga 10 km. Selain itu, dihitung juga beberapa parameter kualitas jaringan lain yang dihitung seperti standar deviasi shadowing dan varians-nya, serta parameter statistik koefisien determinasi..

2.1 Peralatan Pengukuran

Peralatan yang dipergunakan dalam pengukuran kualitas jaringan LoRa dapat dilihat pada Gambar 2, dimana paket data sensor diproses dalam perangkat ESP 32 kemudian dikirimkan ke antena pemancar melalui LoRa gateway. Pada penerima, LoRa receiver menerima data untuk dimonitor oleh server. LoRa E220-900T30D bekerja pada frekuensi 920 MHz yang diizinkan digunakan di Indonesia, bandwidth 125 kHz dengan *Spreading factor* (SF) 7 dan air rate 2,4 kbps (Kementerian Komunikasi dan Informatika, 2019). SF 7 dipilih karena memberikan waktu transmisi terendah dan laju data tinggi. Selain

itu, SF ini juga paling hemat energi sehingga sesuai untuk sistem yang mengandalkan baterai (Marquez & Calle, 2023). Paket data yang dikirimkan memiliki baud rate 9600 yang mendukung pengiriman untuk jarak jauh.

Pada pengukuran kali ini daya pancar diatur sebesar 30 dBm atau 1 Watt. Antena yang digunakan untuk pemancar maupun penerima adalah magnetic router yang bekerja pada frekuensi 700 – 960 MHz dengan gain 5 dBi dan VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*) 1,5. Antena tersebut memiliki pola radasi omnidirectional dengan arah vertical. Antena magnetic router yang digunakan memiliki panjang 30 cm dan diletakkan pada tiang setinggi 3 m.



Gambar 2. Konfigurasi Pengukuran

2.2 Metode Pengukuran

Agar sistem monitoring turbin angin dengan komunikasi LoRa sesuai dengan regulasi, maka dilakukan pengukuran RSSI untuk mengetahui besar daya pancar yang diperlukan, kualitas jaringan yang ditentukan oleh besar SNR, dan besar path loss. Pengukuran ini dilakukan di area persawahan Socah, Bangkalan (-7.128263, 112.735679) yang menurut Global Wind Atlas memiliki mean power density 77 W/m². Nilai ini masih tergolong tinggi untuk proyek kecil. Oleh karena itu, turbin angin memungkinkan untuk dioperasikan di wilayah tersebut. Kondisi lokasi pengukuran yang berupa area persawahan dapat dilihat pada Gambar 4. Posisi antena pemancar (Tx) dan penerima (Rx) yang diletakkan pada ketinggian 3 meter sebagai salah satu syarat agar LoRa E220-900T30D mencapai jarak maksimum yang dapat dicapai. Posisi antena magnetic router pemancar tetap berada di tepi jalan sedangkan antena Rx bergerak tiap 100 m. Penggunaan antena setinggi 3 meter berdasarkan oengukuran RSSI sebelumnya, dimana RSSI tertinggi diperoleh pada ketinggian 3 meter, dibanding 1 m dan 2 m (Kurniawati et al., 2025).

Pengukuran RSSI dilakukan dengan mengirimkan paket data dari sensor. Komputer yang ada di penerima memonitor kondisi pengukuran melalui parameter RSSI dan status paket yang diterima. Untuk setiap jarak pengukuran, paket dikirimkan sebanyak tiga kali, kemudian dihitung nilai rata-rata RSSI-nya dan dikonversi dalam dBm. Skenario pengukuran dilakukan sebagai berikut : dalam satu sesi pengukuran, LoRa melakukan 10 kali pembacaan RSSI dengan interval antar sampling 1 detik, sehingga dalam 1 kali pengukuran diperoleh 10 data mentah. Karena pengukuran ini dilakukan 3 sesi,

maka diperoleh total 30 data RSSI. Setelah data RSSI untuk sesi pertama disimpan, maka proses pengiriman tersebut diulangi untuk sesi kedua dan ketiga, sehingga dalam tiga kali pengukuran diperoleh 90 data RSSI.

Angka yang keluar dari perangkat LoRa adalah berupa RSSI register 8 bit. RSSI register tersebut diubah dalam bentuk dBm dengan cara sebagaimana persamaan (1):

$$dBm = -(256 - RSSI) \quad (1)$$



Gambar 3. Lokasi Pengukuran

2.3 Pengolahan Data

Data RSSI dalam satuan dBm yang dihasilkan dari pengukuran dengan jarak 1 meter hingga 2699 meter digunakan untuk menentukan kualitas jaringan menurut klasifikasi kualitas jaringan LoRa berdasarkan Tabel 1. Parameter kualitas jaringan lain yang harus diperhatikan selain RSSI adalah *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) yang menyatakan rasio daya sinyal terhadap daya noise yang diterima. Dalam perhitungan ini, noise yang diperhatikan adalah noise floor sehingga SNR dinyatakan dalam persamaan (2) berikut:

$$SNR = (RSSI - N) \quad (2)$$

dengan N adalah noise yang dihitung sebagai nilai thermal noise ditambah noise figure dengan persamaan (3) berikut:

$$N = -174 + 10 \log_{10} B + NF \quad (3)$$

dengan N adalah noise figure dalam dBm, B adalah bandwidth sistem yang digunakan yaitu 125 kHz dan NF adalah noise figure yang dalam LoRa dipilih 6 dB.

Untuk mengetahui kondisi lingkungan yang mempengaruhi model propagasi yang dipergunakan untuk menentukan *Spreading factor* dan model komunikasi, maka diperlukan regresi *log-distance* antara RSSI dan logaritma jarak dalam meter. Hal ini disebabkan bahwa nilai RSSI mengalami penurunan terhadap logaritmik jarak yang dapat diprediksi secara regresi linier (Al-Shareeda et al., 2023). RSSI yang dipergunakan untuk regresi *log-distance* adalah RSSI yang diterima pada jarak yang sudah mencapai medan jauh (*far-field*) antena. Model regresi *log-distance* yang dipergunakan adalah sebagaimana persamaan (4) berikut:

$$RSSI(d) = a + b \log_{10} d \quad (4)$$

Dengan a dan b diperoleh dari nilai regresi linier dimana nilai Y adalah nilai RSSI (dBm) dan nilai X adalah $\log_{10} d$, dan d adalah jarak dalam meter. Selain nilai a dan b didapatkan juga nilai eksponen pathloss (n) yang didapatkan dari persamaan (5) berikut:

$$n = -\frac{b}{10} \quad (5)$$

dimana nilai n menentukan seberapa cepat daya sinyal melemah dengan bertambahnya jarak pada suatu lingkungan tertentu yang mempengaruhinya (Feng et al., 2019).

Untuk mengetahui seberapa besar nilai fluktuasi acak sinyal yang disebabkan oleh hambatan yang ada di lokasi pengukuran dihitung standar deviasi *shadowing* (σ) yang menunjukkan variasi penyimpangan data antara RSSI hasil pengukuran dan RSSI hasil pemodelan (Rappaport, 2002). Standar deviasi *shadowing* (σ) ini dihitung dengan persamaan berikut:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (6)$$

dengan y_i adalah nilai RSSI hasil pengukuran dan $\hat{y}_i$ adalah nilai RSSI hasil regresi.

Selanjutnya, untuk mengetahui seberapa besar penyebaran data RSSI pada garis regresi digunakan parameter varians, yang merupakan kuadrat dari σ .

Untuk mengetahui kesesuaian antara data dengan hasil regresi, parameter statistik yang digunakan untuk mengetahuinya yaitu koefisien determinasi (R^2). Koefisien determinasi (R^2) adalah nilai yang menunjukkan seberapa besar variasi data dapat dijelaskan oleh model regresi, yang dinyatakan dalam persamaan (7) berikut (Dananjaya et al., 2022):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

dengan N adalah jumlah data hasil pengukuran, dan y_i dan $\hat{y}_i$ sama dengan keterangan pada persamaan (6). dan $\bar{y}$ adalah rata-rata RSSI hasil pengukuran.

SF 7 yang digunakan pada pengukuran kali ini juga dihitung nilai Chip/symbol-nya untuk mengetahui nilai laju bit dan hubungannya dengan jarak pengukuran. Perhitungan ini ditujukan untuk mengetahui apakah SF 7 sesuai saat digunakan dalam mendukung propagasi gelombang radio di lokasi pengukuran. Chip/symbol dihitung dengan persamaan (8) berikut (Wu et al., 2021):

$$N = 2^{SF} \quad (8)$$

dengan N adalah jumlah chip per symbol dan SF adalah *spreading factor* (7 – 12). Dari nilai N ini dapat diturunkan laju bit yang dipergunakan berdasarkan

nilai SF, dengan persamaan (9) berikut (Wu et al., 2021):

$$R_b = SF \cdot \frac{B}{2^{SF}} \cdot CR \quad (9)$$

dengan R_b adalah laju bit (bps), SF adalah *spreading factor*, dan CR adalah coding rate. Untuk laju data yang tinggi CR yang dipergunakan adalah $\frac{4}{5}$.



Gambar 4. Antena pada Tx dan Rx

Penentuan kualitas jaringan LoRa untuk *Spreading factor* 7 berdasarkan nilai RSSI dan SNR adalah dapat dilihat pada Tabel 1 (Mathe, 2023):

Tabel 1. Kuat Sinyal dan Kualitas Jaringan LoRa

Indikator	RSSI (dBm)	SNR (dB)
Jelek	< -117	< 0
Sedang	$-117 < RSSI < -107$	$0 < SNR < 10$
Baik	> -107	> 10

3 PEMBAHASAN

Pengukuran karakteristik LoRa E220-900T30D di lokasi yang telah disebutkan tersebut dilaksanakan pada tanggal 27 Agustus 2025 pukul 09.00 – 15.00 WIB. Dari pengukuran tersebut dihasilkan nilai RSSI yang digunakan untuk mengukur SNR pada jarak 10 m – 2699 m. RSSI yang ditampilkan adalah RSSI rata-rata yang diperoleh dari pengukuran.

Tabel 2. Hasil Pengukuran RSSI dan Perhitungan SNR

No	Jarak (m)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Indikator
1	1	-93.67	23.63	Baik
2	36.261	-89.67	27.63	Baik
3	133.204	-93.33	23.97	Baik
4	239.227	-96.33	20.97	Baik
5	344.788	-96.00	21.30	Baik
6	448.686	-98.00	19.30	Baik
7	585.362	-98.33	18.97	Baik
8	669.480	-97.00	20.30	Baik
9	734.428	-97.67	19.63	Baik
10	818.022	-98.33	18.97	Baik
11	1004.591	-99.33	17.97	Baik
12	1151.855	-100.33	16.97	Baik
13	1300.212	-101.33	15.97	Baik
14	1415.444	-101.67	15.63	Baik
15	1565.002	-103.33	13.97	Baik

Tabel 2. (Lanjutan)

16	1689.112	-104.00	13.30	Baik
17	1823.104	-104.67	12.63	Baik
18	1944.638	-105.67	11.63	Baik
19	2073.880	-107.33	9.97	Sedang
20	2200.594	-107.67	9.63	Sedang
21	2332.184	-108.33	8.97	Sedang
22	2456.524	-109.33	7.97	Sedang
23	2580.673	-110.33	6.97	Sedang
24	2699.437	-111.67	5.63	Sedang

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa berdasarkan besar RSSI, nilai RSSI menurun terhadap jarak, dimana hal ini menunjukkan fenomena pelemahan daya pancar terhadap propagasi gelombang radio. Pada orde jarak 818 meter, nilai RSSI mencapai -98,33 dBm, sedangkan pada orde jarak 2200 meter, nilai RSSI mencapai -107 dBm. Berdasarkan interpretasi jaringan terhadap nilai RSSI, dapat dilihat bahwa hingga jarak 1900meter jaringan memiliki kualitas yang baik, sedangkan pada jarak mencapai lebih dari 2000 meter, kualitas jaringan mencapai katagori sedang menurut referensi yang ditampilkan pada Tabel 1. Nilai terakhir hasil pengukuran pada jarak 2699,437meter menunjukkan nilai -111,67 dBm masuk kriteria kualitas sedang. Nilai ini masih lebih besar daripada nilai sensitivitas penerima untuk SF 7 yaitu -123,75 dBm. Fenomena hasil yang sama juga diperlihatkan oleh hasil perhitungan SNR yang menunjukkan bahwa SNR memiliki kondisi yang baik hingga jarak mendekati 2000meter dan pada jarak lebih dari 2000meter hingga 2699meter, SNR memasuki kategori sedang. Hal ini juga didasarkan pada Tabel 1.

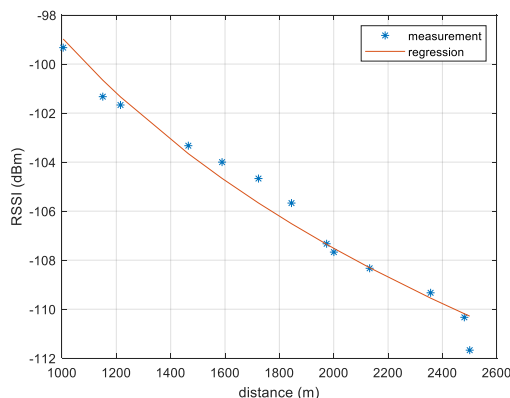
Kemudian, untuk mengetahui pengaruh karakteristik lingkungan terhadap mekanisme propagasi dilakukan regresi antara RSSI terhadap $\log_{10} d$ sebagaimana dalam persamaan (4). Persamaan (4) tersebut diperoleh dengan memasukkan nilai jarak (d) dan RSSI yang terdapat pada Tabel 2. Tetapi hasil pada tabel tersebut tidak seluruhnya digunakan untuk regresi log-distance dikarenakan adanya anomali pelemahan RSSI terhadap jarak. Pada jarak 100 m hingga 1000 m, RSSI hanya turun dari -93,33 dBm menjadi -99,33 dBm atau sekitar 6 dBm, dimana nilai ini terlalu kecil jika dibandingkan dengan teori pelemahan sinyal yang berbanding terbalik dengan kuadrat jarak (Parsons, 2000). Nilai n pada jarak ini sama dengan 0,63 yang jauh dari teori *log-distane* untuk daerah rural dimana $n \approx 2,7 - 3$ (Goldsmith, 2005). Hal ini terjadi disebabkan oleh daya pancar LoRa E220-900T30D yang tinggi yang memacu terjadinya saturasi receiver. Daya pancar yang tinggi menyebabkan terjadinya RSSI yang tidak stabil pada medan dekat karena kekuatan sinyalnya melebihi kapasitas sensitivitas penerima (Berto et al., 2021). Oleh karena itu, perhitungan model propagasi dilakukan untuk jarak lebih dari 1 km karena telah memasuki medan jauh.

Pelemahan yang lebih tajam terjadi ketika sinyal berada pada jarak 1 km hingga 2,7 km, yaitu sekitar 12 dBm menunjukkan nilai penurunan yang wajar dan sesuai dengan teori. Hasil perhitungan n menunjukkan nilai 2,73 yang sesuai dengan diatas. Nilai ini juga lebih besar jika dibandingkan pengukuran di area rural kampus yang menunjukkan nilai 2,23 – 2,43 (Anisah et al., 2023), dan 1,6 – 1,8 di daerah perkotaan yang padat (urban) (Susilo, 2024). Oleh karena itu, perhitungan regresi log-distance, standar deviasi shadowing, dan varians dilakukan pada jarak lebih dari 1 km atau 13 data terakhir, yang mengikuti nilai n yang valid. Perhitungan tersebut menghasilkan pemodelan RSSI sebagai berikut:

$$RSSI(d) = -13,3 - 27,33 \log_{10} d \quad (10)$$

dimana -13,3 dan -27,33 diperoleh dari nilai a dan b hasil regresi.

Hubungan antara RSSI hasil pengukuran pada persamaan (10) dan hasil regresi dapat dilihat pada Gambar 5 yang menunjukkan trend antara data pengukuran dengan kurva regresi. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai pengukuran mengikuti kurva hasil regresi. Selanjutnya dilakukan perhitungan σ dan R^2 sesuai dengan persamaan (6) dan (7) secara berurutan. Varians dihitung sebagai kuadrat dari σ .



Gambar 5. Hubungan antara RSSI hasil pengukuran dan hasil regresi

Nilai σ yang dihasilkan dari persamaan (6) adalah 0,3 dB yang mengindikasikan bahwa nilai tersebut sangat kecil. Nilai kecil tersebut mengindikasikan bahwa pada lokasi pengukuran tersebut tidak terjadi gangguan lain, selain faktor jarak. Lingkungan pengukuran juga menunjukkan kondisi LoS murni sesuai karakteristik persawahan yang terbuka tanpa adanya perubahan cuaca ataupun penghalang yang bersifat mobile. Sedangkan varians bernilai 0,09 yang juga bernilai kecil. Varians mengindikasikan adanya kestabilan data yang bersifat deterministik, yang menunjukkan bahwa pada jarak lebih dari 1 km, redaman sinyal sangat mudah diprediksikan dengan pemodelan kanal dan tidak terpengaruh oleh

gangguan sinyal yang bersifat acak. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 5, dimana pola hasil pengukuran mengikuti hasil pemodelan. Sedangkan nilai σ pada jarak kurang dari 1 km adalah 0,78 dB yang, walaupun masih dibawah 1 dB, menunjukkan bahwa nilai RSSI lebih tidak stabil jika dibandingkan jarak lebih dari 1 km. Pada jarak ini varians juga lebih besar, yaitu 0,5 yang menunjukkan hasil pengukuran yang tidak stabil akibat adanya saturasi receiver dan kemungkinan adanya interferensi ataupun gangguan lintasan jamak (*multipath*). Jika dibandingkan penelitian lain yang menghitung nilai σ , maka nilai ini lebih tinggi jika dibandingkan penelitian sejenis di perkebunan, yaitu 1,3 dB dan di wilayah pinggiran kota yang mencapai nilai 3,92 dB (El Chall et al., 2019; Hawelayuda & Wagyaana, 2024). Hal ini disebabkan lokasi pengukuran lebih terbuka tanpa tambahan halangan dan cuaca yang baik.

Koefisien determinasi antara nilai RSSI dan $\log_{10} d$ adalah 0,98 yang menunjukkan korelasi kuat antara RSSI dan $\log_{10} d$, sehingga mengindikasikan bahwa 98 % pelemahan sinyal didominasi oleh jarak, sisanya (2%) disebabkan shadowing, lintasan jamak, noise, dan ketidakpastian pengukuran. Hal ini menunjukkan bahwa perambatan gelombang radio didominasi oleh lintasan langsung atau *Line-of-Sight* (LoS) dan sedikit ditemukan lintasan pantul. Hal ini sesuai dengan nilai perhitungan eksponen *pathloss* (n) yang dihitung dengan Persamaan (5), yang sama dengan 2,73.

Jika mempertimbangkan kondisi kanal dengan SNR tinggi dan lintasan yang didominasi LoS, maka pemilihan SF 7 sudah sesuai untuk diterapkan sebagai mode komunikasi di area tersebut. SF 7 memiliki chip/symbol yang pendek jika dibanding SF yang lebih tinggi, yaitu sebesar 2^7 chip/symbol sesuai dengan persamaan (8). Chip/symbol yang pendek ini memiliki laju bit yang tinggi. Dengan menggunakan persamaan (9), untuk SF 7 dengan bandwidth 125 kHz diperoleh laju bit sebesar 5,5 kbps lebih tinggi daripada SF 10 dengan bandwidth yang sama, yaitu 980 bps. Demikian pula untuk *air-time*. *Air-time* adalah waktu yang diperlukan paket berada dalam kanal radio. Transmisi yang cepat memungkinkan *air-time* yang pendek. Sebagai perbandingan adalah SF 7 memiliki *air-time* yang lebih pendek daripada SF 10. Oleh karena itu, SF 7 memiliki *time-of-arrival* (ToA) lebih pendek sehingga lebih hemat energi.

Kinerja SF 7 untuk jarak yang lebih jauh dengan konfigurasi yang sama dapat diprediksikan menggunakan Gambar 5 dan persamaan (10). Nilai RSSI untuk jarak 10 km sesuai persamaan (10) adalah -122,62 dBm atau masuk kategori jelek. Tetapi nilai ini masih lebih besar daripada sensitivitas penerima yang dipergunakan. SNR pada jarak 10 km adalah -5,32 dB yang juga masuk kategori jelek. Dengan demikian untuk kondisi lingkungan rural, lintasan yang didominasi LoS, dengan sedikit lintasan jamak, dan sedikit efek shadowing menunjukkan bahwa LoRa E220-900T30D dengan *spreading factor* 7, bandwidth 125 kHz, dan daya pancar 20 dBm dapat

dipergunakan untuk monitoring turbin angin di area Socah, Bangkalan dengan jarak hingga 10 km, tetapi dengan kualitas sinyal yang jelek untuk jarak maksimal tersebut.

Untuk menjamin kualitas jaringan komunikasi hingga 10 km, dapat digunakan LoRa dengan SF yang lebih tinggi, yaitu 9 – 12. LoRa dengan SF yang lebih tinggi memiliki sensitivitas penerima yang lebih rendah sehingga bisa digunakan untuk jarak yang lebih jauh. Namun demikian, SF lebih tinggi memiliki kelemahan *air-time* yang lebih lama sehingga memerlukan energi yang lebih besar. Trade-off ini dapat dijadikan sebagai topik penelitian lanjutan dari penelitian ini, yaitu performansi LoRa dengan SF yang lebih tinggi dari 7.

4 KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil memodelkan karakteristik propagasi LoRa E220-900T30D (1 Watt) di area persawahan Indonesia. Hasil analisis menunjukkan bahwa model *Log-Distance Path Loss* sangat akurat pada rentang 1 km – 2,5 km dengan nilai eksponen path loss (n) sebesar 2,73 dan standar deviasi shadowing (σ) sebesar 0,3 dB dan varians sebesar 0,09. Nilai ini merepresentasikan penurunan sinyal yang stabil di lingkungan rural terbuka. Kontribusi ilmiah yang diperoleh adalah penetapan nilai eksponen pathloss dan varians shadowing sebagai referensi empiris baru untuk perencanaan jaringan LoRa daya tinggi di area persawahan, mengidentifikasi batas linieritas perangkat dimana terjadi saturasi receiver pada jarak kurang dari 1 km, dan penggunaan regresi log-distance untuk memprediksikan RSSI. Penelitian lanjutan yang disarankan adalah pengukuran Packet Delivery Rate (PDR), latency dan energi tiap node untuk SF lebih dari 7 untuk kondisi lingkungan dan cuaca yang lebih variatif, yang merupakan keterbatasan pada penelitian kali ini. Pada penelitian kali ini mengalami kendala dalam mendapatkan nilai PDR menggunakan fitur yang tersedia pada perangkat LoRa.

PENGAKUAN

Para penulis ingin mengucapkan terima kasih atas dukungan dari Majelis Dikti Litbang PP Muhammadiyah melalui Hibah Penelitian Dasar RisetMu Batch VII dengan Nomor Surat Kontrak 258.765/I.3/D/2025.

PUSTAKA

Abdullah, N. F., Alobaidy, H. A. H., & Nordin, R. (2022). *Wireless Airborne Iot Network For Rural Water Quality Monitoring. 2022 IEEE 20th Student Conference On Research And Development, Scored 2022*. <https://doi.org/10.1109/Scored57082.2022.9974083>

- Al-Shareeda, M. A., Alsadhan, A. A., Qasim, H. H., & Manickam, S. (2023). *Long Range Technology For Internet Of Things: Review, Challenges, And Future Directions. Bulletin Of Electrical Engineering And Informatics, 12*(6). <https://doi.org/10.11591/eei.v12i6.5214>
- Anisah, I., Wirawan, Suwadi, & Yuliana, M. (2023). *Experimental Results Of Lora Network Radio Propagation Modeling In Campus Area. 6th International Seminar On Research Of Information Technology And Intelligent Systems, ISRITI 2023 - Proceeding*. <https://doi.org/10.1109/ISRITI60336.2023.10467989>
- Astutik, L. Y. (2023). Studi Kinerja Jaringan Lora: Optimalisasi Dan Analisis Efisiensi Komunikasi Nirkabel. *Jurnal Sistem Komputer Dan Informatika (JSON), 5*(2). <https://doi.org/10.30865/json.v5i2.7147>
- Berto, R., Napoletano, P., & Savi, M. (2021). *A Lora-Based Mesh Network For Peer-To-Peer Long-Range Communication. Sensors, 21*(13). <https://doi.org/10.3390/s21134314>
- Black, I. M., Richmond, M., & Kolios, A. (2021). *Condition Monitoring Systems: A Systematic Literature Review On Machine-Learning Methods Improving Offshore-Wind Turbine Operational Management. International Journal Of Sustainable Energy, 40*(10). <https://doi.org/10.1080/14786451.2021.1890736>
- Cortesi, S., Vogt, C., & Magno, M. (2023). *Comparison Between An RSSI- And An MCPD-Based BLE Indoor Localization System. Computers, 12*(3). <https://doi.org/10.3390/computers12030059>
- Dananjaya, R. H., Sutrisno, S., & Fitriady, S. (2022). Penerapan *Artificial Neural Network (Ann)* Dalam Memprediksi Kapasitas Dukung Fondasi Tiang. *Matriks Teknik Sipil, 10*(4). <https://doi.org/10.20961/mateksi.v10i4.65034>
- Davis, N. N., Badger, J., Hahmann, A. N., Hansen, B. O., Mortensen, N. G., Kelly, M., Larsén, X. G., Olsen, B. T., Floors, R., Lizcano, G., Casso, P., Lacave, O., Bosch, A., Bauwens, I., Knight, O. J., Loon, A. P. Van, Fox, R., Parvanyan, T., Bo, S., ... Drummond, R. (2023). The Global Wind Atlas. *Bulletin Of The American Meteorological Society, 104*(8).
- Dsa, R. J., Rashmitha, & Rao, B. (2024). *Lora-Powered Iot Messaging System For Internet-Free Communication. International Journal For Research In Applied Science And Engineering Technology, 12*(4). <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.60126>
- Edwin, L., Lee, H. J., Ker, P. J., Jamaludin, M. Z., Akhmal Abu Bakar, M. A., Awang, R., & Yusuf, F. A. M. (2022). *Lora System With IOT Technology For Smart Agriculture System. 2022 IEEE 20th Student Conference On*

- Research And Development, Scored 2022.*
<https://doi.org/10.1109/Scored57082.2022.9974084>
- El Chall, R., Lahoud, S., & El Helou, M. (2019). *Lorawan Network: Radio Propagation Models And Performance Evaluation In Various Environments In Lebanon. IEEE Internet Of Things Journal*, 6(2).
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2906838>
- Fahrezi, F. M., Sulaiman, M. A., & Toni, T. (2024). Analisis Pengaruh Parameter Fisik Terhadap Jarak Jangkauan Dan Keandalan Data Lora SX1276. *Jurnal RESISTOR (Rekayasa Sistem Komputer)*, 7(3).
<https://doi.org/10.31598/Jurnalresistor.V7i3.1666>
- Feng, X., Yan, F., & Liu, X. (2019). *Study Of Wireless Communication Technologies On Internet Of Things For Precision Agriculture. Wireless Personal Communications*, 108(3).
<https://doi.org/10.1007/S11277-019-06496-7>
- Goldsmith, A. (2005). *Wireless Communications*, Cambridge University Press. In Cambridge University Press.
- Gonzalez, C., Gibeaux, S., Ponte, D., Espinosa, A., Pitti, J., & Nolot, F. (2022). *An Exploration Of Lora Network In Tropical Farming Environment. 2022 IEEE 2nd International Conference On Computer Communication And Artificial Intelligence, CCAI 2022.*
<https://doi.org/10.1109/CCAI55564.2022.9807765>
- Guo, Q., Yang, F., & Wei, J. (2021). *Experimental Evaluation Of The Packet Reception Performance Of Lora. Sensors (Switzerland)*, 21(4).
<https://doi.org/10.3390/S21041071>
- Hamed, T. A., & Alshare, A. (2022). *Environmental Impact Of Solar And Wind Energy-A Review. Journal Of Sustainable Development Of Energy, Water And Environment Systems*, 10(2).
<https://doi.org/10.13044/J.Sdewes.D9.0387>
- Hawelayuda, P., & Wagya, D. A. (2024). Perancangan Sistem Monitoring Kelembaban Tanah Dan Penyiraman Otomatis Berbasis Wireless Sensor Network Dengan Lora. *Sniv: Seminar Nasional Inovasi Vokasi*, 3(1).
- Irianto, K. D. (2022). *Performance Evaluation Of Lora In Farm Irrigation System With Internet Of Things. Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, And Control.*
<https://doi.org/10.22219/Kinetik.V7i4.1551>
- Kementerian Komunikasi Dan Informatika. (2019). Peraturan Direktur Jendral Sumberdaya Dan Perangkat POS Dan Informatika Nomor 3 Tahun 2019 Tentang Persyaratan Teknis Dan Alat Telomunikasi Low Power Wide Area (P. 6).
- Kurniawati, I., Akbar, R., & Astomo, R. B. (2025). *Characteristics Of UHF Propagation Channels Due To The Impact Of Vegetation On WSN In The Tropical Forests. Journal Of Telecommunication Electronics And Control Engineering (JTECE)*, 7(1).
<https://doi.org/10.20895/Jtece.V7i1.1494>
- Lora Alliance Technical Committee. (2020). *Lorawan Is Secure (But Implementation Matters). Lora Alliance Resource Hub.*
<https://lora-alliance.org/Resource-Hub/Lorawanr-Secure-Implementation-Matters>
- Maldonado-Correa, J., Martín-Martínez, S., Artigao, E., & Gómez-Lázaro, E. (2020). Using SCADA Data For Wind Turbine Condition Monitoring: A Systematic Literature Review. *Energies*, 13(12).
<https://doi.org/10.3390/En13123132>
- Marahatta, A., Rajbhandari, Y., Shrestha, A., Singh, A., Thapa, A., Gonzalez-Longatt, F., Korba, P., & Shin, S. (2021). *Evaluation Of A Lora Mesh Network For Smart Metering In Rural Locations. Electronics*, 10(6), 751.
<https://doi.org/10.3390/Electronics10060751>
- Marquez, L. E., & Calle, M. (2023). *Understanding Lora-Based Localization: Foundations And Challenges. IEEE Internet Of Things Journal*, 10(13).
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3248860>
- Mathe, C. (2023, November 16). *Monitor The Technical Equipment Of A Building Through Lorawan: A Solution To Wiring Issues.* Wattsense.
- Milarokostas, C., Tsolkas, D., Passas, N., & Merakos, L. (2023). *A Comprehensive Study On Lpwns With A Focus On The Potential Of Lora/Lorawan Systems. IEEE Communications Surveys And Tutorials*, 25(1).
<https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3229846>
- Obiri, N. M., & Shikunzi, H. (2023). *Long-Range Wide Area Network (Lora-WAN) Connectivity And Range Evaluation In A Rural Setting. International Journal Of Computer Applications*, 185(3).
<https://doi.org/10.5120/Ijca2023922699>
- Pandit, R., Astolfi, D., Hong, J., Infield, D., & Santos, M. (2023). *SCADA Data For Wind Turbine Data-Driven Condition/Performance Monitoring: A Review On State-Of-Art, Challenges And Future Trends. In Wind Engineering (Vol. 47, Number 2).*
<https://doi.org/10.1177/0309524X221124031>
- Parsons, J. D. (John D. (2000). *The Mobile Radio Propagation Channel: Second Edition (J. D. Parson, Ed.; Second Edition).* John Wiley And Sons.
- Pirri, M., Pirri, A., Leonardi, L., Bello, L. Lo, & Patti, G. (2025). *Comparative Assessment Of Adaptive Data Rate Algorithms For Lorawan Iot Applications.*
<https://doi.org/10.1109/Iwasi66786.2025.11122003>

- Rappaport, T. S. (2002). *Wireless Communications: Principles And Practice* (2nd Ed.). Prentice Hall PTR.
- SEMTECH. (2016). *Lora SX Datasheet*.
- Susilo, D. E. (2024). Simulasi Perencanaan Jaringan Long Range (Lora) Pada Area Kota Semarang Menggunakan Cloud Rf. *Power Elektronik : Jurnal Orang Elektro*, 12(3).
<https://doi.org/10.30591/Polektro.V12i3.5302>
- Wu, W., Wang, W., Wang, B., & Song, R. (2021). *Throughput Of Distributed Queueing-Based Lora For Long-Distance Communication. Eurasip Journal On Advances In Signal Processing*, 2021(1).
<https://doi.org/10.1186/S13634-021-00739-1>
- Yanziah, A., Soim, S., & Rose, M. M. (2020). Analisis Jarak Jangkauan Lora Dengan Parameter Rssi Dan Packet Loss Pada Area Urban. *Jurnal Teknologi Technoscientia*.
<https://doi.org/10.34151/Technoscientia.V13i1.3031>

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN