
Prototipe Sistem Deteksi dan Pemetaan Lokasi Kerusakan Gardu Listrik Berbasis LoRa Dengan Algoritma K- Nearest Neighbor (KNN)

Nanta Fakhri Prebianto¹, Jul Fatri Ahmadianpal², Andika Saputra³

^{1,2}Politeknik Negeri Batam; JL. Ahmad Yani Batam Kota. Kota Batam. Kepulauan Riau. Indonesia, +62-778-469858

³Program Studi Teknologi Rekayasa Elektronika

e-mail: fajriahmadianpal9251@gmail.com, andikasaputra1270@gmail.com

Abstrak

Gardu distribusi listrik memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan dan kontinuitas penyaluran energi listrik. Gangguan pada gardu dapat menyebabkan pemadaman listrik sehingga diperlukan sistem monitoring dan deteksi dini yang lebih efektif. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sebuah prototipe sistem deteksi dan pemetaan lokasi kerusakan gardu listrik. Sistem menggunakan komunikasi LoRa sebagai media transmisi data dari beberapa node menuju gateway pusat. Setiap node terdiri dari ESP32, modul LoRa, power supply, serta switch ON/OFF sebagai simulasi kondisi gardu normal dan gangguan. Estimasi lokasi gardu dilakukan berdasarkan nilai Received Signal Strength Indicator (RSSI) yang diterima gateway dari masing-masing node. Algoritma K-Nearest Neighbor (KNN) digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi gardu serta memperkirakan lokasi gardu berdasarkan pola data RSSI. Hasil monitoring dan klasifikasi ditampilkan pada Human Machine Interface (HMI) berbasis web dashboard menggunakan protokol MQTT. Sistem ini diharapkan dapat menjadi solusi prototipe monitoring gardu yang mampu mendukung deteksi dan pemetaan lokasi gangguan secara otomatis dan real-time.

Kata kunci— K-Nearest Neighbor, LoRa, MQTT, IoT, Position System

Abstract

Electrical distribution substations play an important role in maintaining the stability and continuity of electrical power distribution. Faults in substations can cause power outages; therefore, an effective monitoring and early detection system is required. This research aims to design a prototype of an Internet of Things (IoT)-based system for detecting and mapping substation fault locations. The system uses LoRa communication as a data transmission medium from multiple nodes to a central gateway. Each node consists of an ESP32, LoRa module, power supply, and an ON/OFF switch used to simulate normal and fault conditions of the substation. Substation location estimation is performed using Received Signal Strength Indicator (RSSI) values received by the gateway from each node. The K-Nearest Neighbor (KNN) algorithm is applied to classify substation conditions and estimate substation locations based on RSSI data patterns. Monitoring and classification results are displayed through a web-based Human Machine Interface (HMI) dashboard using the MQTT protocol. This system is expected to become a prototype solution for automatic and real-time substation fault detection and location mapping.

Keywords— K-Nearest Neighbor, LoRa, MQTT, IoT, Position System

1. PENDAHULUAN

Stabilitas pasokan energi listrik sangat bergantung pada sistem distribusi tenaga listrik, khususnya gardu distribusi yang berfungsi menurunkan tegangan dari jaringan tegangan menengah ke jaringan tegangan rendah. Gangguan pada gardu dapat menyebabkan pemadaman listrik yang berdampak pada terganggunya aktivitas pelanggan serta menimbulkan kerugian operasional [1]. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan yang mampu mendeteksi kondisi gardu dan menentukan lokasi gangguan secara otomatis serta real-time.

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) memungkinkan proses monitoring dilakukan secara jarak jauh dengan memanfaatkan komunikasi nirkabel. Salah satu teknologi yang banyak digunakan adalah LoRa (Long Range) karena memiliki jangkauan komunikasi yang luas, konsumsi daya rendah, serta mampu bekerja pada lingkungan LPWAN (Low Power Wide Area Network) [2][3]. Dalam penelitian ini, nilai Received Signal Strength Indicator (RSSI) digunakan sebagai parameter untuk memperkirakan lokasi gardu berdasarkan kekuatan sinyal yang diterima gateway dari masing-masing node LoRa. Namun, nilai RSSI dapat berubah akibat jarak, hambatan, dan kondisi lingkungan, sehingga diperlukan metode klasifikasi untuk mengenali pola sinyal tersebut.

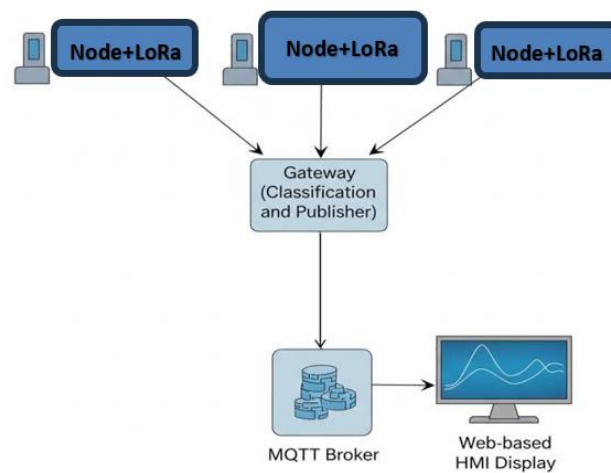
Algoritma K-Nearest Neighbor (KNN) dipilih karena memiliki metode sederhana, mudah diimplementasikan, dan cukup efektif dalam proses klasifikasi berbasis kemiripan data [4][5][6]. Pada sistem ini, data RSSI dari beberapa node gardu digunakan sebagai data latih untuk menentukan lokasi gardu berdasarkan kedekatan nilai RSSI terhadap data referensi yang telah disimpan sebelumnya. Selain melakukan klasifikasi lokasi gardu, sistem juga menampilkan status gardu dalam kondisi normal atau mati total.

Untuk mendukung monitoring secara online, sistem menggunakan protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) dengan metode publish-subscribe sebagai media komunikasi data antara gateway dan Web Dashboard [7]. Gateway bertindak sebagai publisher yang mengirimkan data hasil klasifikasi dan status gardu ke broker MQTT, sedangkan Web Dashboard bertindak sebagai subscriber yang menampilkan data secara real-time. Beberapa penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa MQTT efektif digunakan pada sistem monitoring berbasis IoT karena memiliki latensi komunikasi rendah dan penggunaan bandwidth yang ringan [8][9][10][11]. Dengan penerapan sistem ini, proses monitoring kondisi gardu dan pemetaan lokasi gangguan diharapkan dapat dilakukan dengan lebih cepat, efektif, dan mudah dipantau dari jarak jauh.

2. METODE PENELITIAN

Sistem yang dirancang pada penelitian ini dibagi menjadi dua sub sistem utama, yaitu sistem pemetaan lokasi gardu berbasis algoritma K-Nearest Neighbor (KNN) dan sistem monitoring berbasis web dashboard online menggunakan protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Sub sistem pemetaan lokasi berfungsi untuk mengolah data Received Signal Strength Indicator (RSSI) yang diterima gateway dari setiap node LoRa guna melakukan klasifikasi kondisi gardu serta estimasi lokasi gardu berdasarkan pola data yang telah dilatih menggunakan algoritma KNN.

Sementara itu, sub sistem monitoring web dashboard dirancang sebagai media pemantauan data secara real-time, sehingga informasi kondisi gardu, status node, serta hasil klasifikasi dapat ditampilkan dan dipantau secara online melalui antarmuka Human Machine Interface (HMI). Proses perancangan dilakukan secara terintegrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak untuk memastikan seluruh komponen sistem, mulai dari node LoRa, gateway, broker MQTT, database, hingga web dashboard, dapat bekerja secara sinkron, stabil, dan sesuai dengan fungsi yang direncanakan yang dapat di lihat pada gambar 1.



Gambar 1 Struktur Sistem Secara Keseluruhan

2.1 *K-Nearest Neighbor(KNN)*

K-Nearest Neighbor(KNN) merupakan algoritma supervised learning yang digunakan untuk melakukan klasifikasi berdasarkan kemiripan (jarak terdekat) antara data baru dan data pelatihan. Dalam sistem ini, algoritma KNN digunakan untuk mengklasifikasikan status gardu (misalnya aktif atau mati) berdasarkan pola RSSI yang dikirimkan dari node yang ada pada gardu. Algoritma ini dipilih karena kesederhanaannya, fleksibilitas dalam menangani data tidak terstruktur, serta kemampuannya bekerja baik dalam jumlah data yang tidak terlalu besar. Berdasarkan studi [12], penggunaan KNN untuk klasifikasi keandalan distribusi listrik menghasilkan akurasi tinggi, menjadikan algoritma ini relevan untuk aplikasi sistem monitoring gardu berbasis IoT.

Tabel 2 Contoh Training Data Klasifikasi

No	RSSI (dBm)	Lokasi Gardu
1	-85	Gardu A
2	-88	Gardu A
3	-91	Gardu A
4	-80	Gardu A
5	-75	Gardu B
6	-78	Gardu B
7	-84	Gardu B
8	-82	Gardu B
9	-72	Gardu C
10	-70	Gardu C
11	-74	Gardu C
12	-77	Gardu C

Pada Tabel 1 ditampilkan contoh data latih (training data) yang digunakan pada sistem klasifikasi lokasi gardu listrik berbasis algoritma K-Nearest Neighbor (KNN). Parameter yang digunakan dalam proses klasifikasi yaitu nilai Received Signal Strength Indicator (RSSI), yang menunjukkan kekuatan sinyal yang diterima gateway dari masing-masing node gardu. Perbedaan nilai RSSI dipengaruhi oleh jarak dan kondisi lokasi gardu terhadap gateway [13], sehingga nilai tersebut dapat digunakan sebagai penanda untuk mengidentifikasi lokasi node, seperti Gardu A, Gardu B, dan Gardu C.

Tabel 2 Contoh Hasil Klasifikasi Gardu

No	RSSI (dBm)	Lokasi Gardu (Aktual)
1	-86	Gardu A
2	-77	Gardu C
3	-71	Gardu C
4	-79	Gardu B

Tabel di atas menunjukkan contoh data uji (testing data) yang akan diklasifikasikan oleh sistem. diperoleh tiga tetangga terdekat dengan nilai RSSI masing- masing dari lokasi Gardu. Proses klasifikasi kemudian dilanjutkan dengan voting, yaitu memilih lokasi yang paling banyak muncul dari tiga tetangga tersebut., kemudian menentukan lokasi gardu berdasarkan tetangga terdekat, perhitungan jarak k 3 dengan selisih absolut.

$$extJarak = |extRSSI_{latih} - extRSSI_{uji}|$$

2. 1.1 Confusion Matrix

Isi dari confusion matrix umumnya dibagi ke dalam empat kategori utama, yaitu:

- True Positive (TP): Data aktual positif dan diprediksi positif.
- False Positive (FP): Data aktual negatif tetapi diprediksi sebagai positif.
- False Negative (FN): Data aktual positif tetapi diprediksi sebagai negatif.
- True Negative (TN): Data aktual negatif dan diprediksi negatif

2. 1.2 Akurasi (Accuracy)

Akurasi (Accuracy) adalah ukuran seberapa banyak prediksi yang benar dibandingkan dengan total seluruh data. Akurasi mencerminkan proporsi dari keseluruhan data yang berhasil diklasifikasikan dengan tepat oleh model. Rumusnya adalah:

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN}$$

2. 1.3 Presisi (Precision)

Presisi (Precision) menunjukkan seberapa banyak data yang diprediksi sebagai positif oleh model ternyata benar-benar positif. Semakin tinggi nilai presisi, maka semakin kecil kemungkinan model melakukan kesalahan dalam mengklasifikasikan data negatif sebagai positif (False Positive). Presisi dihitung dengan rumus:

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP}$$

2. 1.4 Presisi (Precision)

Presisi (Precision) menunjukkan seberapa banyak data yang diprediksi sebagai positif oleh model ternyata benar-benar positif. Semakin tinggi nilai presisi, maka semakin kecil kemungkinan model melakukan kesalahan dalam mengklasifikasikan data negatif sebagai positif (False Positive). Presisi dihitung dengan rumus:

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP}$$

2. 1.5 F1-Score

F1-Score adalah rata-rata harmonis antara presisi dan recall. F1-score digunakan saat dibutuhkan keseimbangan antara presisi dan recall, terutama ketika distribusi kelas tidak seimbang. F1-score berguna untuk memberikan gambaran yang seimbang terhadap performa model, terutama dalam kasus di mana kesalahan klasifikasi memiliki dampak.

Rumusnya:

$$F1-Score = \frac{Precision \cdot Recall}{dxPrecision + Recall}$$

2.2 *Message Queing Telemetry Transport(MQTT)*

MQTT adalah protokol komunikasi ringan berbasis publish-subscribe yang cocok untuk sistem dengan bandwidth rendah dan konsumsi daya minimal. Protokol ini mendukung komunikasi dua arah secara efisien dan digunakan secara luas pada perangkat IoT seperti ESP32. Dalam sistem ini, data dari sensor dikirimkan melalui MQTT ke broker HiveMQ dan diteruskan ke server serta Web Dashbord. Penelitian oleh [14] membuktikan bahwa penerapan MQTT over WebSocket pada sistem monitoring banjir dengan ESP32 dapat mengirimkan data secara real-time secara andal. Kemudahan integrasi dengan frontend berbasis JavaScript menjadikan MQTT sangat ideal untuk sistem monitoring berbasis web yang efisien.

2. 2.1 *Broker dan Topik MQTT*

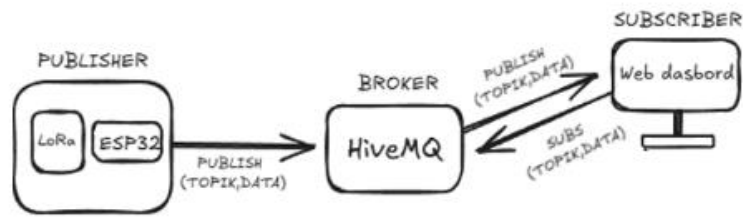
Sistem ini menggunakan public broker MQTT sebagai media komunikasi data antara perangkat ESP32, gateway, dan web dashboard. Proses komunikasi dilakukan menggunakan metode publish dan subscribe (pub/sub), di mana setiap perangkat ESP32 mengirimkan data ke topik MQTT tertentu sesuai jenis informasi yang dikirimkan. Topik tersebut digunakan untuk mengelompokkan data, seperti status gardu, nilai RSSI, serta data monitoring dari masing-masing node gardu. Data yang telah dipublish ke broker MQTT kemudian diterima (subscribe) oleh web dashboard untuk ditampilkan secara real-time[15], Dengan mekanisme ini, proses monitoring kondisi gardu dan pemetaan lokasi dapat dilakukan secara online, cepat, dan terintegrasi.

Tabel 3 Broker Serta Topik Yang Digunakan

<i>Broker</i>		<i>Topik</i>	<i>keterangan</i>
<i>HiveMQ</i>		sensor/pot1	Nilai tegangan dari Gardu A
<i>Jenis broker</i>	<i>Broker public</i>	sensor/pot2	Nilai tegangan dari Gardu B
<i>Port</i>	884	sensor/pot3	Nilai tegangan dari Gardu C
		sensor/rssi1	Nilai RSSI (sinyal) dari Gardu A
<i>Protokol</i>	<i>Websocket</i>	sensor/rssi2	Nilai RSSI (sinyal) dari Gardu B
		sensor/rssi3	Nilai RSSI (sinyal) dari Gardu C

2. 2.3 *Alur Protokol MQTT*

Untuk memahami cara kerja sistem monitoring gardu listrik yang dirancang, diperlukan pemahaman terhadap alur komunikasi data antar perangkat yang saling terhubung di dalam sistem. Proses komunikasi dimulai dari node pengirim yang mengirimkan data melalui jaringan LoRa menuju gateway, kemudian data diteruskan menggunakan protokol MQTT hingga ditampilkan pada web dashboard. Berikut merupakan diagram alur komunikasi data yang menggambarkan proses pengiriman, penerimaan, pengolahan, hingga penyimpanan data pada sistem monitoring gardu listrik secara terintegrasi.

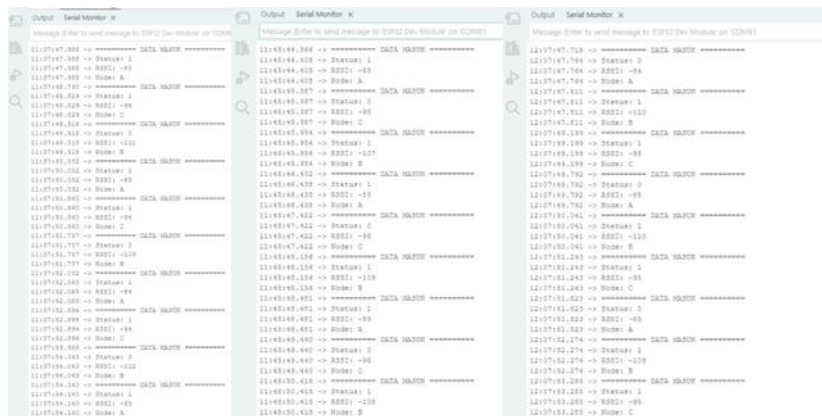


Gambar 2 Alur kerja protokol MQTT

Gambar 2 menunjukkan alur komunikasi data menggunakan protokol MQTT pada sistem monitoring gardu listrik. Data hasil klasifikasi yang diperoleh dari gateway akan dipublish ke broker MQTT melalui topik tertentu. Selanjutnya, broker MQTT akan meneruskan data tersebut kepada web dashboard yang telah melakukan subscribe pada topik yang sesuai. Dengan mekanisme publish dan subscribe ini, data monitoring dapat ditampilkan secara real-time pada web dashboard sesuai informasi yang diterima dari gateway.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Alat Dengan Algoritma KNN



Gambar 3 Serial Monitor Data Uji

Pada Gambar 3 terlihat data uji yang diterima sistem saat alat beroperasi secara real-time. Data tersebut berupa nilai RSSI yang dikirim oleh node gardu ke gateway melalui komunikasi LoRa. Nilai RSSI yang diterima kemudian diproses menggunakan algoritma K-Nearest Neighbor (KNN) dengan membandingkannya terhadap data latih yang telah disimpan sebelumnya. Berdasarkan hasil perhitungan KNN, sistem dapat mengklasifikasikan lokasi node gardu secara otomatis, seperti Gardu A, Gardu B, atau Gardu C. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma KNN dapat diterapkan dengan baik pada sistem monitoring gardu berbasis LoRa.

Tabel 4 Hasil Klasifikasi Gardu

No	RSSI	Lokasi
1	-85	GARDU A
2	-94	GARDU C
3	-111	GARDU B
4	-85	GARDU A

5	-94	GARDU C
6	-109	GARDU B
7	-84	GARDU A
8	-94	GARDU C
9	-112	GARDU B
10	-83	GARDU A
11	-85	GARDU A
12	-95	GARDU C
13	-107	GARDU B
14	-85	GARDU A
15	-95	GARDU C
16	-109	GARDU B
17	-85	GARDU A
18	-96	GARDU C
19	-108	GARDU B
20	-84	GARDU A
21	-110	GARDU B
22	-92	GARDU C
23	-85	GARDU A
24	-110	GARDU B
25	-95	GARDU C
26	-85	GARDU A
27	-109	GARDU B
28	-95	GARDU C

Berdasarkan tabel di atas, data yang ditampilkan merupakan hasil klasifikasi lokasi gardu listrik menggunakan algoritma K-Nearest Neighbor (KNN). Setiap nilai RSSI yang diterima melalui komunikasi LoRa diproses dan diklasifikasikan ke lokasi gardu yang sesuai, seperti Gardu A, Gardu B, atau Gardu C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu membedakan lokasi gardu berdasarkan karakteristik nilai RSSI yang diterima. Data pada tabel ini digunakan untuk menganalisis performa klasifikasi serta mengevaluasi tingkat akurasi sistem pemetaan lokasi gardu listrik yang telah dirancang.

1. Perhitungan Akurasi

$$Akurasi = \frac{\text{Gardu A} + \text{Gardu B} + \text{Gardu C}}{\text{jumlah seluruh data}} \times 100\%$$

Jumlah Prediksi = 3

Jumlah data = 28

$$Akurasi = \frac{10 + 9 + 9}{28} \times 100\%$$

$$Akurasi = 1 \times 100\%$$

$$Akurasi = 100\%$$

2. Precision

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

Gardu A nilai true positive (TP) adalah 10, nilai false (FP) adalah 0

$$Precision A = \frac{10}{10 + 0}$$

$$\textit{Precision A} = 1$$

$$\textit{Precision A} = 100\%$$

$$\textit{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}$$

Gardu B nilai true positive (TP) adalah 9, nilai false (FP) adalah 0

$$\textit{Precision B} = \frac{9}{9 + 0}$$

$$\textit{Precision B} = 1$$

$$\textit{Precision B} = 100\%$$

$$\textit{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}$$

Gardu C nilai true positive (TP) adalah 9, nilai false (FP) adalah 0

$$\textit{Precision C} = \frac{9}{9 + 0}$$

$$\textit{Precision C} = 1$$

$$\textit{Precision C} = 100\%$$

3. Recall

$$\textit{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$$

- Gardu A
Nilai True Positive (TP) = 10
Nilai False Negative (FN) = 0

$$\textit{Recall A} = \frac{10}{10 + 0}$$

$$\textit{Recall A} = 1$$

$$\textit{Recall A} = 100\%$$

- Gardu B
Nilai True Positive (TP) = 9
Nilai False Negative (FN) = 0

$$\textit{Recall B} = \frac{9}{9 + 0}$$

$$\begin{aligned} \text{Recall } B &= 1 \\ \text{Recall } B &= 100\% \end{aligned}$$

- Gardu C
 Nilai True Positive (TP) = 9
 Nilai False Negative (FN) = 0

$$\text{Recall } C = \frac{9}{9 + 0}$$

$$\text{Recall } C = 1$$

$$\text{Recall } C = 100\%$$

4. F1-Score

$$F1 - \text{Score} = \frac{2 \times (\text{Precision} \times \text{Recall})}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

- F1-Score Gardu A

$$F1 A = \frac{2 \times (1 \times 1)}{1 + 1}$$

$$F1 A = \frac{2}{2}$$

$$F1 A = 1 = 100\%$$

- F1-Score Gardu B

$$F1 B = \frac{2 \times (1 \times 1)}{1 + 1}$$

$$F1 B = \frac{2}{2}$$

$$F1 B = 1 = 100\%$$

- F1-Score Gardu C

$$F1 C = \frac{2 \times (1 \times 1)}{1 + 1}$$

$$F1 C = \frac{2}{2}$$

$$F1 C = 1 = 100\%$$

3.2 Rumus K-Nearest Neighbor (KNN)

Pada bagian ini dilakukan perhitungan algoritma K-Nearest Neighbor (KNN) untuk mengklasifikasikan lokasi gardu listrik berdasarkan nilai Received Signal Strength Indicator (RSSI) yang diterima oleh gateway. Perhitungan ini bertujuan untuk menunjukkan secara rinci tahapan klasifikasi yang dilakukan oleh sistem, mulai dari proses perhitungan jarak antara data uji dan data latih, pemilihan sejumlah tetangga terdekat, hingga penentuan lokasi gardu berdasarkan hasil voting mayoritas. Nilai K yang digunakan adalah 3, dengan pertimbangan untuk mengurangi pengaruh noise serta meningkatkan kestabilan hasil klasifikasi.

1. Data uji gardu A RSSI -89

$$\text{extjarak} = \text{extRSSIlatih} - \text{extRSSIuji}$$

$$\text{extjarak} = |-90 - (-89)|$$

$$\text{extjarak} = 1$$

$$\text{extjarak} = \text{extRSSIlatih} - \text{extRSSIuji}$$

$$\text{extjarak} = |-91 - (-89)|$$

$$\text{extjarak} = 2$$

$$\text{extjarak} = \text{extRSSIlatih} - \text{extRSSIuji}$$

$$\text{extjarak} = |-89 - (-89)|$$

$$\text{extjarak} = 0$$

$$\text{extjarak} = \text{extRSSIlatih} - \text{extRSSIuji}$$

$$\text{extjarak} = |-82 - (-89)|$$

$$\text{extjarak} = 7$$

$$\text{extjarak} = \text{extRSSIlatih} - \text{extRSSIuji}$$

$$\text{extjarak} = |-81 - (-89)|$$

$$\text{extjarak} = 8$$

$$\text{extjarak} = \text{extRSSIlatih} - \text{extRSSIuji}$$

$$\text{extjarak} = |-83 - (-89)|$$

$$\text{extjarak} = 6$$

Tiga jarak terkecil adalah 0,1,2 seluruhnya berasal dari gardu A, sehingga hasil klasifikasi adalah gardu A

2. Data uji gardu B RSSI -101

$$\text{extjarak} = \text{extRSSIlatih} - \text{extRSSIuji}$$

$$\text{extjarak} = |-104 - (-101)|$$

$$\text{extjarak} = 3$$

$$\text{extjarak} = \text{extRSSIlatih} - \text{extRSSIuji}$$

$$\text{extjarak} = |-102 - (-101)|$$

$$\text{extjarak} = 1$$

$$\text{extjarak} = \text{extRSSIlatih} - \text{extRSSIuji}$$

$$\text{extjarak} = |-103 - (-101)|$$

$$\text{extjarak} = 2$$

$$\text{extjarak} = \text{extRSSIlatih} - \text{extRSSIuji}$$

$$\text{extjarak} = |-105 - (-101)|$$

$$\text{extjarak} = 4$$

Tiga Jarak terkecil adalah 1,2,3 mayoritas berasal dari gardu B, sehingga Hasil Klasifikasi adalah gardu B

3. Data uji gardu RSSI -96

$$\begin{aligned} \text{extjarak} &= \text{extRSSIlatih} - \text{extRSSIuji} \\ \text{extjarak} &= |-95 - (-96)| \\ \text{extjarak} &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{extjarak} &= \text{extRSSIlatih} - \text{extRSSIuji} \\ \text{extjarak} &= |-96 - (-96)| \\ \text{extjarak} &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{extjarak} &= \text{extRSSIlatih} - \text{extRSSIuji} \\ \text{extjarak} &= |-97 - (-96)| \\ \text{extjarak} &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{extjarak} &= \text{extRSSIlatih} - \text{extRSSIuji} \\ \text{extjarak} &= |-98 - (-96)| \\ \text{extjarak} &= 2 \end{aligned}$$

Tiga nilai jarak terdekat, yaitu 0, 1, dan 1, seluruhnya berasal dari Gardu C sehingga hasil klasifikasi ditentukan sebagai Gardu C. Berdasarkan hasil pengujian, algoritma K-Nearest Neighbor (KNN) berhasil diterapkan untuk mengklasifikasikan dan memetakan lokasi gardu listrik berdasarkan nilai RSSI yang diterima gateway. Sistem mampu menentukan lokasi gardu dengan cukup baik melalui perbandingan data uji dan data latih, meskipun hasil klasifikasi masih dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan interferensi sinyal.

3.3 Hasil Perancangan Sistem MQTT dan Web Dashboard

Pengujian sistem MQTT dilakukan untuk mengevaluasi komunikasi data antara gateway LoRa, broker MQTT, dan Web Dashboard HMI. Pengujian meliputi proses publish–subscribe, kesesuaian data yang dikirim dan diterima, serta delay pengiriman data sebagai indikator performa sistem real-time. Pada sistem ini, gateway berperan sebagai publisher yang mengirimkan data hasil klasifikasi KNN ke broker HiveMQ menggunakan protokol MQTT over WebSocket Secure (WSS), sedangkan Web Dashboard bertindak sebagai subscriber yang menerima dan menampilkan data secara real-time.

Tabel 5 Pengujian Publisher Dan Subscriber

NO	Perangkat	MQTT	Topik MQTT	Jenis Data
1	Gateway ESP32	Publisher	sensor/pot1	Tegangan Gardu A
2	Gateway ESP32	Publisher	sensor/pot2	Tegangan Gardu B
3	Gateway ESP32	Publisher	sensor/pot3	Tegangan Gardu C
4	Gateway ESP32	Publisher	sensor/rssi1	RSSI Gardu A
6	Gateway ESP32	Publisher	sensor/rssi2	RSSI Gardu B
7	Gateway ESP32	Publisher	sensor/rssi3	RSSI Gardu C
8	Gateway ESP32	Subscriber	sensor/pot1 sensor/pot2 sensor/pot3 sensor/rssi1 sensor/rssi2 sensor/rssi3	Monitoring Semua data

Pengujian delay dilakukan untuk mengukur selisih waktu pengiriman data dari gateway hingga data diterima dan ditampilkan pada Web Dashboard. Waktu publish dicatat pada gateway menggunakan timestamp, sedangkan waktu penerimaan data dicatat pada sisi Web Dashboard sebagai waktu subscribe.

Tabel 6 Pengujian delay Publisher Dan Subscriber

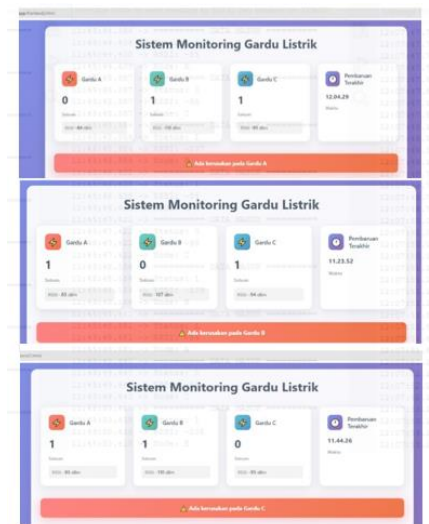
Topik MQTT	Waktu publish(ms)	Waktu Subscribe	Delay(ms)
Sensor/pot1	12.04.18	12.04.29	0,11
Sensor/pot2	12.04.18	12.04.29	0,11
Sensor/pot3	11.23.48	11.23.52	0,12
Sensor/pot1	11.23.48	11.23.52	0,12
Sensor/pot2	11.44.12	11.44.26	0,14
Sensor/pot3	11.44.12	11.44.26	0,14

Pengujian Kesesuaian Data Kirim dan Terima Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa data yang diterima oleh Web Dashboard identik dengan data yang dikirimkan oleh gateway, baik dari sisi nilai tegangan maupun RSSI.

Tabel 7 Penyesuaian Data Yang Terkirim dan Diterima

No	RSSI(Data kirim Gate way)	Data Yang Diterima	Keterangan
1	(1) -84 Gardu A -85 Gardu A	(1) -84 Gardu A -85 Gardu A	Sesuai
2	(1) -111 Gardu B -109 Gardu B	(1) -111 Gardu B -109 Gardu B	Sesuai
3	(1) -94 Gardu C -95 Gardu C	(1) -94 Gardu C -95 Gardu C	Sesuai

Hasil pengujian menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan antara data yang dikirim dan data yang diterima. Hal ini membuktikan bahwa mekanisme publish–subscribe MQTT berjalan dengan baik.



Gambar 4 Tampilan Data Pada Web Dashboard

Gambar 4 menunjukkan tampilan data pada web dashboard hasil pengujian sistem monitoring gardu listrik. Data yang ditampilkan meliputi lokasi gardu, nilai RSSI, status gardu, serta waktu pembaruan data secara real-time. Status gardu ditampilkan dalam bentuk nilai biner, yaitu nilai 1 menandakan gardu dalam kondisi normal atau hidup, sedangkan nilai 0 menunjukkan gardu dalam kondisi mati total. Informasi yang sama juga dapat dilihat melalui Serial Monitor sebagai hasil komunikasi data antara node gardu dan gateway menggunakan LoRa dan MQTT.

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini berhasil dirancang dan diimplementasikan sistem klasifikasi lokasi gardu listrik berbasis komunikasi LoRa menggunakan algoritma K-Nearest Neighbor (KNN). Sistem memanfaatkan nilai Received Signal Strength Indicator (RSSI) sebagai parameter klasifikasi untuk menentukan lokasi gardu. Berdasarkan hasil pengujian, algoritma KNN dengan nilai $K = 3$ mampu mengklasifikasikan lokasi Gardu A, B, dan C dengan baik berdasarkan kemiripan nilai RSSI terhadap data latih. Evaluasi menggunakan confusion matrix menunjukkan performa sistem yang baik dari sisi akurasi, presisi, recall, dan F1-score. Namun, pengujian masih terbatas pada jumlah node dan kondisi lingkungan tertentu sehingga diperlukan pengembangan dan pengujian lebih lanjut pada penelitian berikutnya.

5. SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, sistem klasifikasi lokasi gardu berbasis LoRa dan algoritma K-Nearest Neighbor (KNN) dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambah jumlah data latih dan data uji agar performa klasifikasi menjadi lebih stabil dan akurat. Selain menggunakan parameter RSSI, penelitian selanjutnya juga dapat menambahkan parameter lain seperti Signal to Noise Ratio (SNR) untuk meningkatkan akurasi sistem. Pengujian pada lingkungan yang lebih luas dan bervariasi perlu dilakukan untuk mengetahui performa komunikasi LoRa secara lebih menyeluruh. Selain itu, sistem dapat dikembangkan dengan penambahan fitur keamanan data MQTT serta integrasi peta digital (GIS) pada web dashboard agar visualisasi lokasi gardu menjadi lebih informatif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Sains dan Teknologi Indonesia, khususnya Program Studi Teknik Informatika, atas dukungan dan fasilitas yang diberikan selama proses penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Bapak Nanta Fakhri Prebianto selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta masukan selama proses penyusunan penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga artikel ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Sadli, F. Fajriana, W. Fuadi, E. Ermatita, and I. Pahendra, "Penerapan Model K-Nearest Neighbors Dalam Klasifikasi Kebutuhan Daya Listrik Untuk Masing-Masing Daerah Di Kota Lhokseumawe," *J. ECOTIPE*, vol. 5, no. 2, pp. 11–18, 2018, doi: 10.33019/ecotipe.v5i2.646.
 - [2] S. Kavetha, A. S. Ja'afar, M. Z. A. Aziz, A. A. M. Isa, M. S. Johal, and N. M. Z. Hashim, "Development of Location Estimation Algorithm Utilizing Rssi for Lora Positioning System," *J. Teknol.*, vol. 84, no. 1, pp. 97–105, 2022, doi:
-

-
- 10.11113/jurnalteknologi.v84.17153.
- [3] M. Misbahuddin, M. S. Iqbal, G. W. Wiriasto, L. Ahmad, S. I. Akbar, and M. Irwan, "Neural network performance based on backpropagation and LVQ as the LoRa RSS fingerprint algorithms for positioning in an open space," *J. Teknol. dan Sist. Komput.*, vol. 8, no. 2, pp. 121–126, 2020, doi: 10.14710/jtsiskom.8.2.2020.121-126.
- [4] S. Ramadana, M. Diono, M. Susantok, and S. Ahdan, "Indoor location tracking pegawai berbasis Android menggunakan algoritma k-nearest neighbor," *JITEL (Jurnal Ilm. Telekomun. Elektron. dan List. Tenaga)*, vol. 1, no. 1, pp. 51–58, 2021, doi: 10.35313/jitel.v1.i1.2021.51-58.
- [5] F. M. N. Akbar, "Metode KNN (K-Nearest Neighbor) untuk Menentukan Kualitas Air," *J. Tekno Kompak*, vol. 18, no. 1, p. 28, 2024, doi: 10.33365/jtk.v18i1.3241.
- [6] G. D. Prenata, "Klasifikasi Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik Di Pt. Pln (Persero) Up3 Surabaya Selatan Menggunakan Metode K-Nearest Neighbor (Knn)," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 11, no. 3s1, 2023, doi: 10.23960/jitet.v11i3s1.3397.
- [7] A. A. Sahifa, R. Setiawan, and M. Yazid, "Pengiriman Data Berbasis Internet of Things untuk Monitoring Sistem Hemodialisis Secara Jarak Jauh," *J. Tek. ITS*, vol. 9, no. 2, pp. 4–9, 2021, doi: 10.12962/j23373539.v9i2.55650.
- [8] Q. Hidayati, N. Jamal, and F. A. Bolang, "Sistem monitoring pada jaringan sensor banjir jalan raya menggunakan protokol MQTT," *JITEL (Jurnal Ilm. Telekomun. Elektron. dan List. Tenaga)*, vol. 2, no. 2, pp. 119–128, 2022, doi: 10.35313/jitel.v2.i2.2022.119-128.
- [9] Hafiih Asrofil Al Banna, Vikri Muhammad Gafar, Muhammad Darwis Mawardin, and Retno Hendrowati, "Perancangan Aplikasi Pemantauan Energi Listrik Berbasis Iot Dengan Protokol Mqtt," *J. Inform. dan Rekayasa Elektron.*, vol. 6, no. 2, pp. 203–213, 2023, doi: 10.36595/jire.v6i2.975.
- [10] R. F. Pratama, R. S. R. Wicaksono, and A. N. Pramudhita, "Perancangan Dan Implementasi Protokol Mqtt Pada Sistem Parkir Cerdas Berbasis Iot," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 11, no. 3, pp. 475–483, 2023, doi: 10.23960/jitet.v11i3.3191.
- [11] B. M. Susanto, E. S. J. Atmadji, and W. L. Brenkman, "Implementasi Mqtt Protocol Pada Smart Home Security Berbasis Web," *J. Inform. Polinema*, vol. 4, no. 3, pp. 201–205, 2018, doi: 10.33795/jip.v4i3.207.
- [12] H. J. Suryanto, A. R. C., and Y. Lukito, "Indoor Positioning System dengan Algoritma K-Means dan KNN," *J. Tek. Inform. dan Sist. Inf.*, vol. 2, no. 3, pp. 370–381, 2016, doi: 10.28932/jutisi.v2i3.518.
- [13] M. M. Kurniawan, K. Amron, and R. A. Siregar, "Analisis Karakteristik Transmisi LoRa pada Wilayah Perkotaan," *J. Pengemb. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 6, no. 8, pp. 3977–3986, 2022, [Online]. Available: <https://j-ptiik.ub.ac.id/index.php/j-ptiik/article/view/11483>
- [14] M. R. Annur, N. Hidayat, and A. A. Soebroto, "Implementasi Deteksi Hujan dan Banjir Secara Real Time Monitoring berbasis MQTT Over Websocket Menggunakan Modul ESP32," *... Teknol. Inf. dan Ilmu ...*, vol. 5, no. 4, pp. 1390–1397, 2021, [Online]. Available: <http://j-ptiik.ub.ac.id/index.php/j-ptiik/article/download/8840/4049>
- [15] 3391–3399.ika Kusumawardhana, Pramudya Mahardika, P. M., Hannats, M., & Ichsan, H. (2018). Implementasi Penyimpanan Data Sensor Nirkabel dengan MongoDB pada Lingkungan IOT Menggunakan Protokol MQTT. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer* (, M. Hannats, and H. Ichsan, "Implementasi Penyimpanan Data Sensor Nirkabel dengan MongoDB pada Lingkungan IOT Menggunakan Protokol MQTT," *J. Pengemb. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput. Univ. Brawijaya*, vol. 2, no. 9, pp. 3391–3399, 2018.
-