

## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 Gap Penelitian

*Tabel 2.1 Research Gap*

| Peneliti / Tahun                            | Judul Penelitian                                                                            | Metode / Sistem                                                                        | Fokus Penelitian                                                                                                   | Hasil Penelitian Ini                                                                                                                        |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Firda, et al. (2022) [12].                  | Rancang Bangun Stasiun Cuaca Berbasis <i>Wireless Sensor Network</i> Dengan LoRa SX1278     | Pengujian dilakukan menggunakan sistem <i>Wireless Sensor Network</i> menggunakan LoRa | Memberikan data kondisi cuaca untuk keselamatan takeoff dan landing paralayang dengan memperhatikan parameter RSSI | RSSI menunjukkan kuat atau lemahnya sinyal yang diterima, Semakin jauh jarak antar node maka semakin kecil nilai dari RSSI yang dihasilkan. |
| Rahma Fadilla, et al (2025) [13]            | Sistem Komunikasi LoRa untuk Pemantauan Dini Toksisitas Air Danau pada Keramba Jaring Apung | Penerapan Mesh Network di setiap perangkat IoT yang terhubung melalui beberapa node    | Menjelaskan SNR sebagai ukuran standar kualitas sinyal.                                                            | SNR mengalami penurunan signifikan saat jarak semakin jauh mencapai nilai negatif.                                                          |
| Safira Tri Handini Ainul et al. (2025) [14] | Sistem Monitoring Daya Listrik untuk Konsumen di Lingkungan Perumahan Menggunakan           | Penelitian ini menguji kinerja sistem monitoring daya listrik menggunakan metode       | Konsumsi energi LoRa sangat rendah (efisien untuk baterai kecil)                                                   | Mengevaluasi konsumsi energi listrik secara real-time sesuai dengan yang diharapkan.                                                        |

| Peneliti / Tahun      | Judul Penelitian                                                                                                                                      | Metode / Sistem                                                               | Fokus Penelitian                                     | Hasil Penelitian Ini                                    |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                       | LoRa SX1278 dan <i>Internet of Things</i> Berbasis Node Red                                                                                           | penggabungan LoRa dan Internet of Things (IoT).                               |                                                      |                                                         |
| Penelitian ini (2026) | Analisis Efisiensi dan Losses Transmisi Data Modul LoRa pada Sistem Monitoring Turbin Angin di Laboratorium Terpadu Universitas Muhammadiyah Surabaya | Pengukuran langsung RSSI, SNR, <i>Packet Loss</i> , dan Efisiensi Energi LoRa | Belum ada penelitian serupa pada sistem turbin angin | Mengisi gap penelitian pada konteks LoRa + turbin angin |

Berdasarkan gap penelitian pada **Tabel 2.1**, terlihat bahwa penelitian berjudul Rancang Bangun Stasiun Cuaca Berbasis *Wireless Sensor Network* Dengan LoRa SX1278 berfokus pada parameter RSSI sebagai ukuran kualitas sinyal dalam kondisi cuaca takeoff dan landing pesawat. Meskipun penelitian ini berhasil memberikan data kondisi cuaca yang berguna, terdapat beberapa kekurangan yang menjadi gap penelitian. Penelitian ini tidak menganalisis parameter SNR secara mendalam, padahal SNR merupakan indikator penting untuk menilai kualitas komunikasi terutama pada kondisi lingkungan dengan tingkat noise yang tinggi. Selain itu, penelitian ini juga tidak membahas pengaruh variasi spreading factor terhadap kualitas sinyal, serta tidak menganalisis konsumsi daya perangkat node sensor sehingga belum dapat diketahui apakah sistem mampu beroperasi secara efisien menggunakan baterai dalam jangka panjang di lapangan terbuka.

Penelitian berikutnya dilakukan oleh Rahma Fadilla, et al. (2025) dengan judul Sistem Komunikasi LoRa untuk Pemantauan Dini Toksisitas Air Danau pada Keramba Jaring Apung. Penelitian ini telah menjelaskan

SNR sebagai ukuran standar kualitas sinyal dengan menerapkan topologi *Mesh Network* pada setiap perangkat IoT yang terhubung melalui beberapa node. Namun demikian, penelitian ini memiliki gap berupa tidak adanya analisis mendalam mengenai pengaruh jumlah hop pada topologi mesh terhadap nilai SNR dan delay secara spesifik. Pengukuran SNR hanya dilakukan pada kondisi LOS dan NLOS dengan jarak tertentu tanpa mengkaji pengaruh variasi *spreading factor* terhadap nilai SNR di setiap titik jarak. Selain itu, penelitian ini juga tidak mencakup analisis konsumsi daya node sensor yang dipasang di lingkungan perairan, padahal perangkat beroperasi di lokasi terpencil yang sangat bergantung pada baterai dan sulit dijangkau untuk pengisian daya ulang.

Adapun penelitian yang dilakukan oleh Safira Tri Handini Aimul, et al. (2025) berjudul Sistem Monitoring Daya Listrik untuk Konsumen di Lingkungan Perumahan Menggunakan LoRa SX1278 dan *Internet of Things* Berbasis Node Red telah mengevaluasi konsumsi energi LoRa sebagai teknologi yang sangat rendah daya dan efisien untuk baterai kecil. Akan tetapi, penelitian ini memiliki gap karena tidak menganalisis kualitas sinyal komunikasi LoRa berupa SNR dan RSSI secara mendetail pada berbagai kondisi lingkungan perumahan yang memiliki banyak halangan. Jangkauan pengujian LoRa hanya dilakukan hingga 150 meter pada kondisi LOS dan 80 meter pada kondisi NLOS, sehingga belum diketahui performansi sistem pada jarak yang lebih jauh untuk mencakup area perumahan yang lebih luas. Sistem yang dikembangkan juga belum mengintegrasikan mekanisme adaptive *spreading factor* sehingga efisiensi daya komunikasi belum dapat dioptimalkan secara dinamis berdasarkan kondisi jarak dan lingkungan yang berubah-ubah.

Meskipun demikian, hingga saat ini belum ditemukan penelitian yang secara spesifik menganalisis efisiensi dan losses modul LoRa pada sistem turbin angin. Padahal, turbin angin sebagai salah satu pembangkit energi terbarukan memiliki karakteristik fluktuatif terhadap kecepatan angin dan tegangan output, sehingga memerlukan sistem monitoring yang andal dengan efisiensi energi tinggi dan losses transmisi rendah. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk mengisi celah tersebut dengan melakukan analisis efisiensi dan losses pada modul LoRa di turbin angin UMSurabaya.

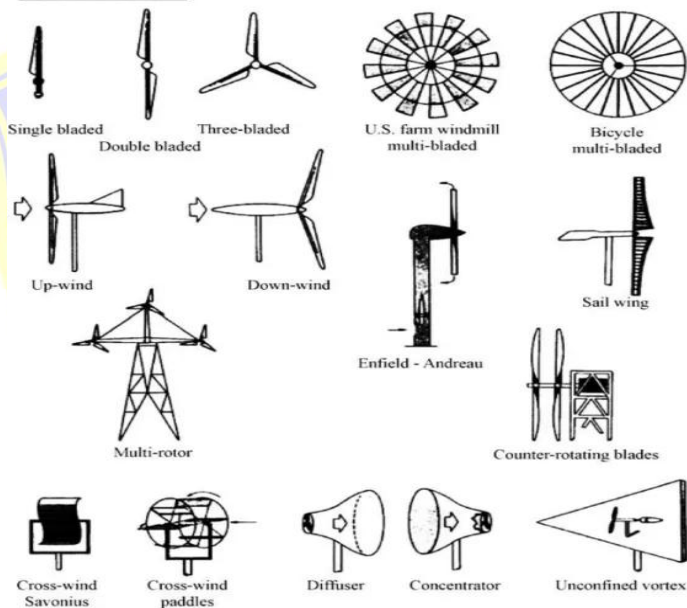
## 2.2 Turbin Angin

Turbin angin merupakan bentuk modern dari kincir angin yang berfungsi membangkitkan energi listrik. Prinsip kerjanya adalah hembusan angin yang memutar bilah turbin, kemudian putaran tersebut diteruskan ke rotor pada generator sehingga menghasilkan energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Efektivitas putaran bilah turbin dipengaruhi oleh penerapan teori aerodinamika dalam desain *blade* [15].

Turbin angin secara umum terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) dan Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV).

### 1. Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH).

Horizontal axis turbines

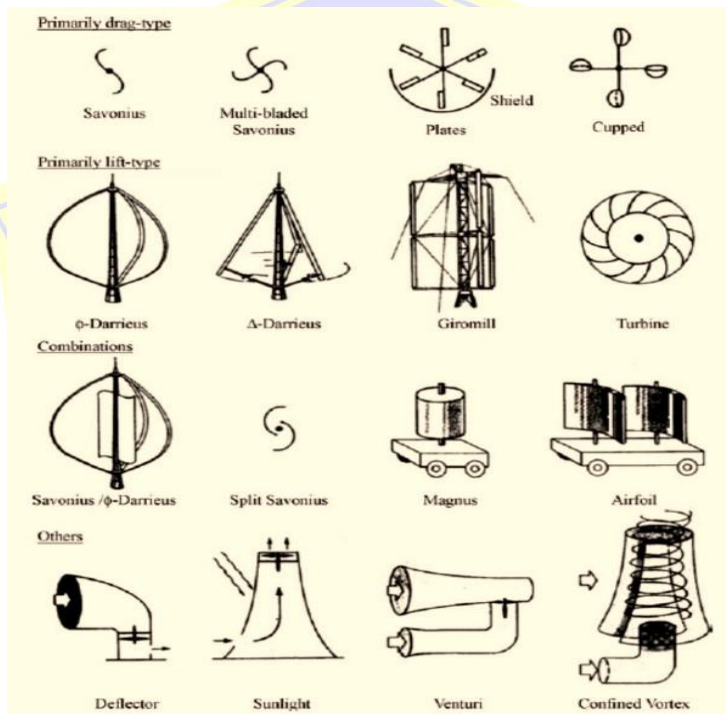


**Gambar 2.1** Turbin angin sumbu horizontal [16]

TASH memiliki poros rotor utama dan generator yang ditempatkan di puncak menara. Pada turbin skala kecil, arah rotor dikendalikan oleh baling-baling cuaca, sedangkan pada turbin besar digunakan sensor angin

yang terhubung dengan servo motor. Umumnya, TASH dilengkapi *gearbox* untuk meningkatkan putaran rotor. Untuk meminimalisir dampak turbulensi dari menara, bilah turbin dibuat kaku, dipasang di depan menara pada jarak tertentu, serta dimiringkan sedikit. Mayoritas TASH menggunakan desain *upwind* yang lebih andal, meskipun tipe *downwind* juga digunakan karena tidak membutuhkan mekanisme pengarah tambahan dan bilahnya dapat menekuk saat angin kencang sehingga mengurangi tekanan angin.

## 2. Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV).



**Gambar 2.2** Turbin Angin Sumbu Vertikal [16].

TASV memiliki poros rotor tegak lurus sehingga dapat menangkap angin dari berbagai arah tanpa memerlukan sistem pengarah. Keunggulan lainnya adalah generator dan *gearbox* dapat ditempatkan di dekat tanah, sehingga menara tidak perlu menopangnya dan perawatan lebih mudah

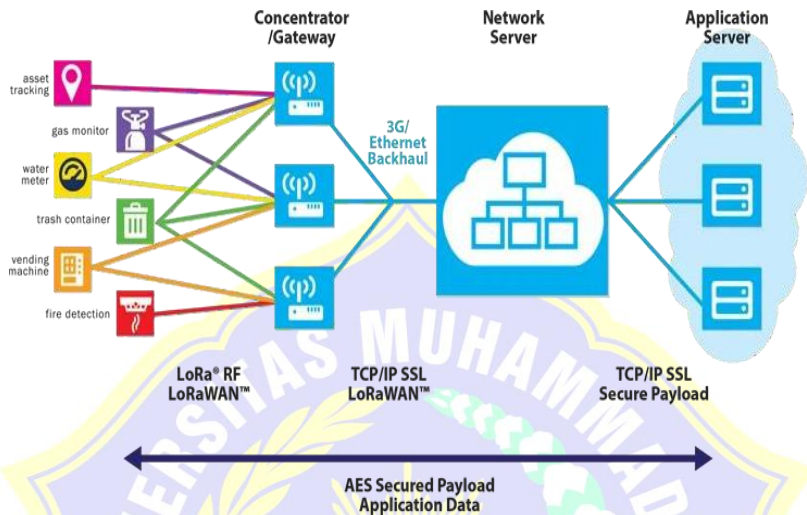
dilakukan. Namun, kelemahannya adalah putaran yang dihasilkan cenderung berdenyut serta berpotensi menimbulkan *drag*. Karena sulit dipasang di menara tinggi, TASV biasanya ditempatkan lebih dekat ke tanah atau di puncak atap bangunan. Kondisi ini membuat energi angin yang tersedia lebih kecil karena kecepatan angin di ketinggian rendah relatif pelan. Selain itu, aliran udara di dekat permukaan sering menimbulkan turbulensi yang dapat menimbulkan getaran, kebisingan, serta mempercepat kerusakan komponen seperti *bearing*. Untuk instalasi di atap bangunan, titik optimal pemasangan biasanya berada pada ketinggian sekitar 50% dari total tinggi bangunan, karena pada titik tersebut energi angin lebih maksimal dengan turbulensi yang minimal.

Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) sendiri dirancang untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik pada poros turbin, yang selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik oleh generator. Besarnya energi yang dihasilkan bergantung pada massa jenis udara, luas sapuan rotor (*swept area*), dan kecepatan angin yang mengenainya [17].

### **2.3 Modul LoRa (Long Range)**

LoRa merupakan modul komunikasi nirkabel yang berbasis *spread spectrum modulation* dan dirancang untuk memungkinkan transmisi data jarak jauh dengan konsumsi daya yang sangat rendah [18]. Teknologi ini banyak digunakan dalam sistem *Internet of Things (IoT)*, terutama pada aplikasi yang membutuhkan fungsi monitoring dan kontrol. LoRa memiliki sejumlah karakteristik penting, di antaranya jangkauan komunikasi yang luas, yaitu antara 2 hingga 15 km bergantung pada kondisi lingkungan, laju bit yang relatif kecil namun memadai untuk pengiriman data sensor seperti tegangan, arus, maupun kecepatan angin, serta ketahanan terhadap interferensi karena menggunakan teknik *chirp spread spectrum* yakni gelombang yang frekuensinya berubah secara linier seiring waktu (naik-chirp atau turun-chirp). Teknik ini memungkinkan sinyal menyebar ke lebar pita frekuensi yang lebih luas dibandingkan modulasi dasar, sehingga toleransi terhadap noise dan interferensi menjadi lebih tinggi [19].

### 2.3.1 Arsitektur Komunikasi LoRa



**Gambar 2.3** Arsitektur Komunikasi LoRa

(sumber : <https://cicicom.gr/pages/lora-wan/>)

Pada arsitektur komunikasi LoRaWAN, proses pertukaran data dimulai dari perangkat yang berada di sisi pengguna atau objek yang dipantau. Perangkat ini bertugas mengumpulkan informasi dari lingkungan sekitar dan mengirimkannya ke jaringan untuk diproses lebih lanjut. Oleh karena itu, komponen yang berperan sebagai penghasil data memiliki peranan yang sangat penting dalam menentukan kualitas dan keberhasilan komunikasi pada sistem LoRaWAN.

#### 2.3.1.1 End Device

merupakan perangkat yang berada pada lapisan paling bawah dalam arsitektur komunikasi LoRa dan berfungsi sebagai sumber data utama yang akan dikirimkan melalui jaringan. Pada gambar, end device direpresentasikan oleh berbagai perangkat IoT seperti sensor lokasi (*GPS tracker*), *water meter*, *smart meter*, *waste management sensor*, dan *fire detector*. Secara umum, *end device* terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu sensor, mikrokontroler, modul LoRa, antena, dan sumber daya berupa baterai atau catu daya.

Fungsi utama *end device* dalam sistem komunikasi LoRa adalah melakukan akuisisi data, pengolahan data, dan transmisi data. Ketiga proses tersebut berlangsung secara berurutan sehingga informasi yang diperoleh dari lingkungan dapat dikirimkan ke jaringan secara efektif dan efisien.

### 1. Akuisisi data

merupakan tahap awal yang dilakukan oleh end device untuk memperoleh informasi dari lingkungan atau objek yang dipantau. Proses ini dilakukan menggunakan sensor yang terhubung dengan mikrokontroler. Sensor akan mendeteksi dan mengukur parameter fisik tertentu, seperti suhu, kelembapan, tegangan, arus, kecepatan angin, maupun kecepatan putaran. Hasil pengukuran tersebut kemudian dikonversi menjadi sinyal listrik yang dapat dibaca oleh mikrokontroler.

### 2. Pengolahan data

Pada tahap ini, mikrokontroler melakukan proses pembacaan, pengolahan, dan pengemasan data yang berasal dari sensor. Pengolahan dapat berupa konversi satuan, perhitungan nilai rata-rata, penyaringan data (*filtering*), maupun penggabungan beberapa parameter sensor ke dalam satu paket data. Tujuan dari proses ini adalah menghasilkan informasi yang lebih akurat dan siap untuk ditransmisikan melalui jaringan komunikasi.

### 3. Transmisi data

yaitu proses pengiriman data yang telah diolah menuju gateway atau perangkat penerima menggunakan modul LoRa. Pada tahap ini, data dikemas menjadi paket informasi dan dimodulasi menggunakan teknik *Chirp Spread Spectrum (CSS)* sebelum dipancarkan melalui antena. Teknologi LoRa memungkinkan proses transmisi dilakukan pada jarak yang jauh dengan konsumsi daya yang rendah. Data yang berhasil dikirim kemudian diterima oleh gateway untuk diteruskan ke network server dan application server sehingga dapat ditampilkan kepada pengguna dalam bentuk informasi monitoring maupun analisis data.

Proses modulasi LoRa melibatkan parameter seperti *Spreading Factor (SF)*, *Bandwidth (BW)*, *Coding Rate (CR)*. Modulasi pada LoRa adalah proses pengubahan gelombang periodik tertentu menjadi sinyal yang mampu membawa informasi. Teknologi LoRa menerapkan modulasi CSS, dimana prinsip utamanya adalah menghasilkan frekuensi yang stabil dengan menggunakan sinyal sinusoidal yang frekuensinya meningkat atau menurun

seiring waktu untuk mengkodekan data. [20]. Dengan modulasi CSS ini, LoRa mampu mentransmisikan data dalam kondisi sinyal lemah (low SNR), memiliki toleransi interferensi, serta konsumsi daya yang relatif rendah dibanding modulasi konvensional, sehingga cocok digunakan dalam aplikasi *Internet of Things* (IoT) pada area terbatas konektivitasnya. Dalam proses modulasi LoRa, terdapat beberapa parameter penting yang memengaruhi kinerja sistem, antara lain:

- *Bandwidth (BW)*, merupakan parameter yang berperan untuk menentukan chip rate yang digunakan untuk mengirimkan data, Pada modulasi LoRa bandwidth diatur sebesar 125-,250,500-kHz.
- *Spreading Factor (SF)*, merupakan jumlah chip yang ada untuk merepresentasikan simbol. Semakin tinggi SF maka chip yang digunakan untuk merepresentasikan simbol lebih banyak. Nilai Spreading factor dapat diatur dengan rentang 7 hingga 12.
- *Code Rate (CR)*, digunakan untuk mengatasi packet error karena adanya interferensi, besaran nilai *coding rate* perlu disesuaikan dengan kondisi jalur pada proses transmisi data. Jika terdapat banyak interferensi/gangguan pada sebuah jalur maka nilai coding rate perlu ditingkatkan, namun meningkatnya nilai coding rate akan menambah durasi dari sebuah transmisi. Nilai yang dapat diatur sebesar 5 bit, 6 bit, 7 bit, atau 8 bit [21].

**Tabel 2.2 Coding Rate LoRa**

| Nilai CR       | 1   | 2   | 3   | 4   |
|----------------|-----|-----|-----|-----|
| Bit Redundansi | 1   | 2   | 3   | 4   |
| Coding Rate    | 4/5 | 4/6 | 4/7 | 4/8 |

$$CR = \frac{4}{4+n}.....(1)$$

Keterangan:

$CR$  = Coding Rate

$n$  = Bit Redundansi

- *Data Rate (DR)*, Data rate adalah kecepatan transmisi data yang dapat dikirimkan oleh perangkat LoRa dari transmitter ke receiver dalam satuan bit per detik (bps). Nilai data rate pada LoRa dipengaruhi oleh beberapa parameter komunikasi, yaitu *Spreading Factor (SF)*, *Bandwidth (BW)*, dan *Coding Rate (CR)* [22].

$$DR = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \times CR \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan:

$DR$  = Data Rate (bps)

$SF$  = Spreading Factor

$BW$  = Bandwidth

$CR$  = Coding Rate

### 2.3.1.2 Gateway / Concentrator

Gateway merupakan perangkat perantara yang menghubungkan jaringan LoRa dengan jaringan internet atau jaringan berbasis IP. Dalam arsitektur LoRa, gateway berfungsi sebagai jembatan komunikasi yang menerima paket data dari *end device* dan meneruskannya ke *Network Server* tanpa melakukan pengolahan atau interpretasi terhadap isi data tersebut. Pada gambar terlihat bahwa satu *end device* dapat terhubung dengan beberapa gateway secara bersamaan. Hal ini dimungkinkan karena LoRa menerapkan mekanisme komunikasi *broadcast*, di mana paket data yang dikirim oleh *end device* dipancarkan ke udara dan dapat diterima oleh seluruh gateway yang berada dalam jangkauan sinyalnya. Setelah menerima paket data, gateway hanya bertugas mengubah sinyal radio LoRa menjadi paket data berbasis IP dan meneruskannya ke *Network Server* melalui koneksi internet, seperti *Ethernet*, Wi-Fi, atau jaringan seluler. Dengan adanya kemampuan menerima data dari banyak *end device* secara simultan dan dukungan multi-gateway, sistem LoRa memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi karena peluang keberhasilan penerimaan paket data menjadi lebih besar serta risiko kehilangan data dapat diminimalkan.

### 2.3.1.3 Network Server

Network Server merupakan pusat pengelolaan jaringan LoRaWAN yang bertanggung jawab mengatur komunikasi antara gateway, *end node*, dan *application server*. Server ini melakukan autentikasi perangkat, memverifikasi integritas data, menghapus paket duplikat yang diterima dari beberapa gateway, serta mengelola parameter komunikasi melalui mekanisme *Adaptive Data Rate* (ADR). Selain itu, Network Server menentukan gateway terbaik untuk mengirimkan data balasan ke *end node* dan meneruskan data yang telah divalidasi ke Application Server. Dengan fungsi tersebut, Network Server menjadi komponen utama yang menjamin keamanan, efisiensi, dan keandalan komunikasi dalam jaringan LoRaWAN.

### 2.3.1.4 Application Server

Application Server merupakan lapisan dalam arsitektur LoRaWAN yang bertugas mengelola, mengolah, dan menyajikan data kepada pengguna. Data yang diterima dari Network Server akan diproses lebih lanjut, termasuk proses dekripsi *payload* aplikasi, penyimpanan ke dalam basis data, serta analisis sesuai dengan kebutuhan sistem. Selanjutnya, data tersebut dapat ditampilkan melalui berbagai antarmuka pengguna, seperti dashboard, grafik, tabel, maupun laporan, sehingga informasi yang diterima menjadi lebih mudah dipahami dan dimanfaatkan.

Selain berfungsi sebagai pusat pengolahan data, Application Server juga mendukung penyimpanan data historis untuk keperluan analisis jangka panjang, pemantauan tren, dan evaluasi kinerja sistem. Pada beberapa implementasi, Application Server dapat menjalankan fungsi tambahan seperti pengiriman notifikasi, pembuatan peringatan otomatis, integrasi dengan layanan pihak ketiga, serta penyediaan antarmuka pemrograman aplikasi (API) yang memungkinkan pertukaran data dengan sistem lain. Dengan demikian, Application Server berperan sebagai komponen yang menjembatani data hasil komunikasi LoRaWAN dengan kebutuhan pengguna akhir melalui penyajian informasi yang terstruktur, mudah diakses, dan bernilai guna.

### 2.3.1.5 Topologi Point to Point



**Gambar 2.4** Diagram Arsitektur Komunikasi LoRa Point to Point

Topologi Point-to-Point merupakan metode komunikasi yang menghubungkan satu perangkat *transmitter* secara langsung dengan satu perangkat *receiver* tanpa melalui gateway maupun server jaringan. Pada topologi ini, data yang dikirim oleh *end node* akan diterima langsung oleh node tujuan menggunakan komunikasi LoRa. Topologi Point-to-Point umumnya digunakan pada penelitian, sistem telemetri sederhana, dan aplikasi monitoring skala kecil karena memiliki konfigurasi yang lebih mudah serta biaya implementasi yang lebih rendah dibandingkan LoRaWAN. Pada sistem monitoring turbin angin berbasis modul LoRa, topologi ini memungkinkan data sensor dikirim langsung dari perangkat *transmitter* ke *receiver* untuk ditampilkan pada komputer atau sistem monitoring tanpa memerlukan infrastruktur jaringan tambahan.

## 2.4 Protokol Komunikasi Data

Format data pada sistem ini dibuat untuk mengatur susunan informasi yang dipertukarkan pada setiap tahap komunikasi, mulai dari pembacaan sensor pada Arduino Transmitter hingga data diterima pada sisi komputer melalui Data Streamer Excel. Terdapat empat format utama yang terlibat dalam proses ini, yaitu format payload sensor, format frame LoRa, format baris data lengkap pada Arduino Receiver, dan format frame UART.

### 2.4.1 Format Payload Sensor (Arduino Transmitter)

Keempat nilai sensor yang telah dikonversi oleh Arduino Mega digabungkan menjadi satu string payload tunggal berukuran 20 byte dengan karakter koma (,) sebagai pemisah antar field, sebelum diserahkan ke modul LoRa SX1278 melalui SPI. Pada **Tabel 2.3** menunjukkan susunan field pada payload sensor, dengan contoh nilai "150,12,3,0.85,4.2".

**Tabel 2.3** Format payload sensor (string, 20 byte, dipisah koma)

|                      |                                |                            |                                        |
|----------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------------|
| RPM<br>(contoh: 150) | Tegangan (V)<br>(contoh: 12.3) | Arus (A)<br>(contoh: 0.85) | Kecepatan Angin (m/s)<br>(contoh: 4.2) |
|----------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------------|

#### 2.4.2 Format Frame LoRa

Payload 20 byte yang diserahkan ke modul LoRa SX1278 melalui SPI selanjutnya dibungkus secara otomatis oleh modul menjadi satu frame lengkap sebelum dimodulasi menggunakan teknik Chirp Spread Spectrum (CSS) dan dipancarkan pada frekuensi 433 MHz. Pada **Tabel 2.4** menunjukkan susunan field pada frame LoRa.

**Tabel 2.4** Format frame LoRa yang dipancarkan modul SX1278

|                     |        |                   |              |
|---------------------|--------|-------------------|--------------|
| Preamble (8 simbol) | Header | Payload (20 byte) | CRC (16 bit) |
|---------------------|--------|-------------------|--------------|

#### 2.4.3 Format Baris Data Lengkap (Arduino Receiver)

Setelah frame diterima dan dinyatakan valid melalui pengecekan CRC, modul LoRa RX menyimpan nilai RSSI dan SNR pada register internalnya. Arduino Receiver kemudian mengambil payload 20 byte beserta nilai RSSI dan SNR melalui SPI, lalu menggabungkan ketiganya menjadi satu baris data lengkap. Pada **Tabel 2.5** menunjukkan susunan field pada baris data lengkap tersebut.

**Tabel 2.5** Format baris data lengkap pada Arduino Receiver

|                                                               |            |          |
|---------------------------------------------------------------|------------|----------|
| Payload Sensor (20 byte) RPM, Tegangan, Arus, Kecepatan Angin | RSSI (dBm) | SNR (dB) |
|---------------------------------------------------------------|------------|----------|

#### 2.4.4 Format Frame UART

Baris data lengkap dikirim dari Arduino Receiver ke chip USB-Serial CH340 melalui *Serial.println()*, yang mengirimkan data byte demi byte pada pin TX menggunakan protokol UART. Setiap byte dikemas dalam frame UART dengan susunan start bit, 8 bit data, dan stop bit, sesuai baud rate yang

ditentukan. Pada **Tabel 2.6** menunjukkan susunan frame UART untuk satu byte data.

**Tabel 2.6** Format frame UART untuk satu byte data

|                   |                  |                  |
|-------------------|------------------|------------------|
| Start Bit (1 bit) | Data Bit (8 bit) | Stop Bit (1 bit) |
|-------------------|------------------|------------------|

#### 2.4.5 Alur Menuju Data Streamer Excel

Chip CH340 mengonversi sinyal UART menjadi paket USB, yang kemudian dikenali oleh driver komputer sebagai Virtual COM Port (misalnya COM3). Melalui port inilah baris data lengkap pada **Tabel 2.5** diterima secara berurutan oleh komputer dan siap dibaca oleh Data Streamer Excel untuk ditampilkan dan disimpan dalam bentuk spreadsheet.

Dari **Tabel 2.3** hingga **Tabel 2.6** terlihat bahwa setiap tahap komunikasi data pada sistem ini memiliki format yang berbeda sesuai dengan protokol yang digunakan pada tahap tersebut, mulai dari penggabungan payload sensor, pembungkusan frame LoRa, penggabungan data hasil terima, hingga pengiriman serial melalui UART. Kesesuaian format inilah yang memastikan data hasil pengukuran sensor dapat sampai secara utuh dan dapat diinterpretasikan dengan benar pada Data Streamer Excel.

### 2.5 Parameter Kinerja LoRa

#### 2.5.1 RSSI (Received Signal Strength Indicator)

RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) adalah parameter yang digunakan untuk mengukur kekuatan sinyal yang diterima oleh modul penerima (*receiver*). Nilai RSSI biasanya dinyatakan dalam satuan *desibel-miliwatt* (dBm) dan semakin negatif angkanya, semakin lemah sinyal yang diterima. Misalnya, nilai RSSI -50 dBm menunjukkan sinyal yang lebih kuat dibandingkan dengan -100 dBm. Dalam komunikasi LoRa, RSSI berfungsi sebagai indikator kualitas kanal transmisi. Nilai RSSI yang tinggi (mendekati 0 dBm) menandakan bahwa sinyal dapat diterima dengan lebih andal, sedangkan nilai yang rendah menandakan potensi terjadinya *packet loss* atau penurunan throughput, nilai minimum RSSI adalah -120 dBm. Parameter ini sangat dipengaruhi oleh jarak transmisi, penghalang fisik (seperti bangunan atau pepohonan), serta kondisi cuaca di sekitar lingkungan komunikasi [23].

**Tabel 2.7 Standar RSSI [23].**

| KATEGORI     | RSSI (dBm)           |
|--------------|----------------------|
| Sangat Bagus | >-70 dBm             |
| Bagus        | -70 dBm s/d -85 dBm  |
| Sedang       | -86 dBm s/d -100 dBm |
| Buruk        | <-100 dBm            |

Rumus dasar perhitungan nilai RSSI dengan adalah sebagai berikut:

$$RSSI (dBm) = -(10n \log_{10} d + A) \dots \dots \dots (3)$$

Dimana:

$n$  adalah parameter loss yang dikelompokkan sesuai kondisi daerah pengukuran

$d$  adalah jarak dalam meter

$A$  adalah daya yang diterima dengan jarak antar 2 antena dengan jarak referensi [22].

### 2.5.2 SNR (Signal-to-Noise Ratio)

**Signal-to-Noise Ratio (SNR)** merupakan perbandingan antara kekuatan sinyal utama terhadap tingkat derau (noise) yang biasanya dinyatakan dalam satuan desibel (dB). Nilai SNR yang tinggi menunjukkan bahwa sinyal informasi yang diterima jauh lebih kuat dibandingkan dengan gangguan atau noise yang menyertainya, sehingga kualitas transmisi data menjadi lebih baik. Sebaliknya, nilai SNR yang rendah menandakan dominasi noise terhadap sinyal, yang dapat menurunkan akurasi penerimaan data. Secara umum, nilai SNR yang lebih besar dari 0 dB atau dengan rasio lebih dari 1:1 menunjukkan bahwa sinyal yang diterima memiliki kualitas lebih baik karena kandungan informasinya lebih dominan dibandingkan noise [24].

Rumus dasar :

$$SNR \text{ (dB)} = 10 \log 10 \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \dots \dots \dots (4)$$

Keterangan :

$P_{\text{signal}}$  = Daya Sinyal (dB)

$P_{\text{noise}}$  = Daya Noise (dB)

Seperti yang diketahui, dalam konektivitas jaringan nirkabel, para ahli menyatakan persyaratan SNR minimal 20 dB. Namun, berikut ini adalah persyaratan nilai SNR:

**Tabel 2.8** Kategori Nilai SNR [25].

| Nilai SNR        | Kategori      |
|------------------|---------------|
| > 40 dB          | Sangat Baik   |
| 25 dB – 40 dB    | Baik          |
| 15 dB – 25 dB    | Cukup         |
| 10 dB – 15 dB    | Rendah        |
| 5 dB – 10 dB     | Sangat Rendah |
| < 0 Db - Negatif | Buruk         |

### 2.5.3 Packet Loss

*Packet Loss* merupakan salah satu parameter penting dalam sistem komunikasi data yang menggambarkan kondisi hilangnya sebagian paket informasi selama proses transmisi dari pengirim ke penerima. Kondisi ini terjadi ketika satu atau lebih paket data gagal mencapai tujuan yang seharusnya, biasanya disebabkan oleh collision (tabrakan data) atau congestion (kemacetan lalu lintas data) pada jaringan komunikasi. Kehilangan paket ini dapat menurunkan kualitas layanan (*Quality of Service* / QoS) secara keseluruhan, karena setiap paket yang hilang harus dikirim ulang melalui proses retransmisi, yang pada akhirnya menambah beban jaringan dan meningkatkan waktu tunda.

Meskipun *bandwidth* yang tersedia secara teoritis mencukupi untuk aplikasi yang berjalan, tingginya tingkat *packet loss* tetap dapat menurunkan efisiensi jaringan, terutama pada aplikasi real-time seperti sistem monitoring, kontrol industri, atau komunikasi sensor nirkabel berbasis IoT. Dalam konteks sistem komunikasi LoRa, *packet loss* dapat disebabkan oleh faktor lingkungan seperti interferensi sinyal, jarak transmisi yang terlalu jauh, atau konfigurasi parameter komunikasi yang kurang optimal (misalnya *spreading factor* dan *bandwidth*). Oleh karena itu, pengendalian dan pemantauan *packet loss* menjadi penting untuk memastikan kestabilan dan keandalan sistem komunikasi data pada jaringan LoRa yang digunakan dalam pemantauan turbin angin maupun sistem energi terbarukan lainnya [26].

Presentase data yang tidak diterima :

$$Packet Loss = \frac{Paket\ dikirim - Paket\ diterima}{Paket\ dikirim} \times 100\% \dots \dots \dots (5)$$

**Tabel 2.9 Kategori Packet Loss [26]**

| Kategori Packet Loss | Packet Loss (%) | Indeks |
|----------------------|-----------------|--------|
| Sangat Bagus         | 0%              | 4      |
| Bagus                | 3%              | 3      |
| Sedang               | 15%             | 2      |
| Jelek                | 25%             | 1      |

#### 2.5.4 Time – on – Air (ToA)

Time-on-Air (ToA) merupakan total waktu yang dibutuhkan oleh modul LoRa untuk mengirimkan satu paket data secara lengkap melalui udara, mulai dari simbol pertama preamble hingga simbol terakhir payload. ToA sering juga disebut sebagai *packet duration* atau *airtime*. Semakin lama ToA, maka semakin lama radio aktif memancarkan sinyal, yang berarti konsumsi daya baterai semakin besar. Oleh karena itu, ToA menjadi salah satu parameter penting dalam perancangan sistem LoRa berbasis baterai [27].

#### 2.5.4.1 Perhitungan Time-on-Air (ToA) LoRa

Rumus Lengkap ToA:

- Waktu per Symbol ( $T_{Symbol}$ ) :

$$T_{Symbol} = \frac{2^{SF}}{BW} \dots\dots\dots(6)$$

- Durasi Preamble ( $T_{Preamble}$ ) :

$$T_{Preamble} = (n_{Preamble} + 4,25) \times T_{Symbol} \dots\dots\dots(7)$$

- Jumlah symbol Payload ( $n_{payload}$ ) :

$$n_{payload} = 8 + \max \left( \left\lceil \frac{8 \cdot PL - 4 \cdot SF + 28 + 16 \cdot CRC - 20 \cdot H}{4(SF - 2 \cdot DE)} \right\rceil X(CR + 4), 0 \right) \dots\dots\dots(8)$$

- Durasi Payload ( $T_{Payload}$ )

$$T_{Payload} = n_{payload} \times T_{Symbol} \dots\dots\dots(9)$$

- Total Time-on-Air ( $T_{Packet}$ )

$$T_{Packet} = T_{Preamble} + T_{Symbol} \dots\dots\dots(10)$$

**Tabel 2.10** Tabel Variabel Rumus ToA

| Simbol     | Keterangan                 | Nilai Umum                                        |
|------------|----------------------------|---------------------------------------------------|
| SF         | Spreading Factor           | 7-12                                              |
| BW         | Bandwidth                  | 125.000 / 250.000 / 500.000 Hz                    |
| PL         | Jumlah byte payload        | Sesuai Data                                       |
| CR         | Coding Rate                | 1=4/5, 2=4/6, 3=4/7, 4=4/8                        |
| H          | Header                     | 0=aktif, 1=tidak aktif                            |
| CRC        | Cyclic Redundancy Check    | 1=aktif, 0=tidak aktif                            |
| DE         | Low Data Rate Optimization | 1=aktif (wajib $SF \geq 11 + BW$ 125kHz), 0=tidak |
| n_preamble | Jumlah Simbol Preamble     | Default = 8                                       |

H=0, Dengan adanya header ini, node penerima dapat membaca konfigurasi paket secara otomatis tanpa perlu mengetahui terlebih dahulu pengaturan yang digunakan oleh pengirim. Mode ini merupakan mode default yang paling umum digunakan dalam sistem komunikasi LoRa.

H=1, Pada mode ini, header tidak dikirimkan sama sekali

CRC=0, tidak ada bit pengecekan kesalahan

CRC=1, ditambahkan 16 bit untuk deteksi kesalahan data.

DE=0, Tidak Perlu Aktif (SF7, SF8, SF9, SF10, SF11 atau SF12 dengan BW 250/500 kHz)

DE=1, Wajib Aktif ( SF11 dan SF12 dengan BW 125 kHz)

#### 2.5.4.2 Hubungan Time-on-Air (ToA)

Spreading Factor merupakan parameter yang menentukan jumlah simbol (*chirp*) yang digunakan untuk merepresentasikan setiap bit data. Nilai SF yang lebih tinggi menyebabkan durasi simbol menjadi lebih panjang sehingga proses transmisi membutuhkan waktu yang lebih lama. Akibatnya,

*Time-on-Air (ToA)* atau waktu yang diperlukan untuk mengirim satu paket data akan meningkat.

Karena modul LoRa tetap berada dalam kondisi transmisi selama periode yang lebih lama, energi yang digunakan selama proses pengiriman data juga menjadi lebih besar. Dengan kata lain, semakin tinggi nilai SF maka semakin besar konsumsi energi yang dibutuhkan untuk mengirimkan satu paket data.

Di sisi lain, peningkatan SF juga meningkatkan sensitivitas penerima (*receiver sensitivity*). Sensitivitas yang lebih tinggi memungkinkan *receiver* mendeteksi sinyal yang lebih lemah, sehingga jarak komunikasi dapat diperluas dan jangkauan sistem menjadi lebih jauh. Dengan demikian, terdapat *trade-off* dalam pemilihan nilai SF. Nilai SF rendah seperti SF7 menghasilkan data rate yang tinggi, waktu transmisi yang singkat, dan konsumsi energi yang lebih rendah, tetapi jangkauan komunikasi menjadi lebih terbatas. Sebaliknya, SF tinggi seperti SF12 memberikan jangkauan komunikasi yang lebih jauh dan ketahanan yang lebih baik terhadap gangguan, namun menyebabkan data rate menurun, *Time-on-Air* meningkat, dan konsumsi energi menjadi lebih besar [28].

## 2.6 Efisiensi Transmisi Data LoRa

Efisiensi transmisi data pada sistem LoRa adalah ukuran seberapa baik dan andal sebuah sistem LoRa dalam mengirimkan data dari node pengirim ke node penerima. Teknologi LoRa memiliki jangkauan jarak yang jauh dan konsumsi daya yang rendah, serta transmisi data yang aman, meskipun memiliki kecepatan data yang rendah.

### 2.6.1 Packet Delivery Ratio (PDR)

PDR adalah parameter yang mengukur persentase jumlah paket data yang berhasil diterima dibandingkan dengan jumlah paket yang dikirimkan. Semakin tinggi nilai PDR, semakin efisien sistem transmisi LoRa [22].

PDR dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$PDR (\%) = \frac{\text{Paket yang diterima}}{\text{Paket yang dikirim}} \times 100\% \dots \dots \dots (11)$$

## 2.7 Losses dalam Transmisi Data Wireless

sistem komunikasi nirkabel modern memanfaatkan gelombang elektromagnetik sebagai media penghantar informasi melalui udara, sehingga berbagai perangkat dapat terhubung dengan mudah dan tanpa kabel. Meskipun demikian, teknologi ini menghadapi permasalahan utama berupa tingginya atenuasi selama proses perambatan sinyal, yang berujung pada meningkatnya *path loss* atau rugi daya sinyal pada kanal nirkabel. *Path loss* merupakan berkurangnya kekuatan sinyal yang dikirimkan akibat proses propagasi di lingkungan nirkabel. Kondisi ini dapat dipengaruhi oleh sejumlah faktor, seperti jarak transmisi, objek penghalang, maupun interferensi. Ketika sinyal bergerak melalui ruang bebas, kekuatannya akan terus menurun akibat atenuasi, sehingga daya sinyal yang diterima menjadi lebih kecil. Penurunan tersebut dapat disebabkan oleh berbagai fenomena propagasi, termasuk rugi lintasan, *shadowing*, penyerapan, difraksi, refleksi, dan refraksi [29].

### 2.7.1 Path Loss

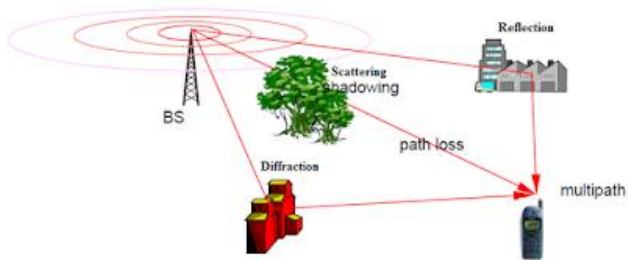
#### 1. Free Space Path Loss (FSPL)

Path loss merupakan bentuk kehilangan daya sinyal akibat perambatan gelombang radio dari pemancar ke penerima melalui ruang bebas (*free space*). Semakin jauh jarak antara kedua titik tersebut, semakin besar pula daya sinyal yang hilang. Dijelaskan menggunakan persamaan Free Space Path Loss (FSPL) sebagai berikut:

$$PL = 20 \log_{10} (f) + 20 \log_{10} (d) + 32.44 \dots \dots \dots (12)$$

Dimana, Jarak (d) dinyatakan dalam km, Frekuensi (f) dalam MHz, dan rugi lintasan (PL) dinyatakan dalam satuan desibel relatif terhadap mW (dBm) [30].

## 2. Fading



**Gambar 2.5** *multipath fading*

Selain karena jarak, sinyal juga dapat mengalami *fading* akibat pantulan dari objek seperti bangunan, pepohonan, dan tanah. Fenomena ini menyebabkan sinyal yang sampai ke penerima terdiri dari beberapa versi sinyal asli yang mengalami perbedaan fase dan waktu tempuh. Interferensi antara sinyal-sinyal pantulan ini dapat menyebabkan fluktuasi amplitudo sinyal yang diterima. Dalam konteks LoRa, meskipun modulasi CSS cukup tahan terhadap *multipath fading*, kondisi lingkungan dengan banyak penghalang tetap dapat memicu penurunan efisiensi energi karena modul harus meningkatkan SF atau *transmit power* untuk menjaga kestabilan komunikasi.

Kombinasi antara *path loss* dan *fading* menjelaskan mengapa jarak dan kondisi lingkungan memiliki pengaruh besar terhadap efisiensi transmisi LoRa. Semakin tinggi tingkat *path loss* dan *fading*, semakin banyak energi yang harus digunakan modul untuk menjaga kualitas sinyal dan mencegah kegagalan transmisi.

## 3. Interferensi dan Noise

Selain kehilangan sinyal karena propagasi, interferensi dan noise juga menjadi faktor signifikan yang memengaruhi losses pada transmisi data wireless.

Interferensi merupakan gangguan yang muncul akibat adanya sinyal lain pada frekuensi yang sama atau berdekatan dengan kanal kerja LoRa, sedangkan noise adalah sinyal acak yang berasal dari sumber alami maupun buatan yang menurunkan kualitas sinyal yang diterima.

### 2.7.2 Hubungan RSSI, SNR, Packet Loss, dan PDR

Dalam sistem komunikasi nirkabel, kualitas transmisi data tidak bisa dievaluasi hanya dari satu parameter saja. Ada empat parameter utama yang saling berkaitan erat dan membentuk rantai sebab-akibat, yaitu RSSI, SNR, Packet Loss, dan PDR. Memahami hubungan keempatnya sangat penting untuk menilai dan mengoptimalkan performa jaringan nirkabel secara menyeluruh.

RSSI adalah ukuran kekuatan sinyal yang diterima perangkat, dinyatakan dalam dBm. Semakin kuat sinyal yang diterima, semakin tinggi nilai RSSI-nya. Kekuatan sinyal ini dipengaruhi oleh jarak dan halangan fisik antara pengirim dan penerima. SNR menggambarkan seberapa jernih sinyal tersebut dibandingkan dengan derau di sekitarnya. SNR diperoleh dari selisih antara RSSI dan tingkat derau lingkungan. Jika RSSI tinggi tetapi derau juga tinggi, SNR tetap bisa buruk. SNR yang baik berarti sinyal mudah dibaca oleh penerima. Packet Loss adalah persentase paket data yang gagal sampai ke tujuan. Ketika SNR rendah, sinyal mudah terdistorsi sehingga banyak paket yang rusak atau hilang di tengah jalan. Semakin buruk SNR, semakin besar packet loss yang terjadi. PDR adalah kebalikan dari packet loss, mengukur berapa banyak paket yang berhasil diterima. Jika packet loss kecil, maka PDR akan tinggi, artinya jaringan bekerja dengan andal.

Hubungan sederhananya adalah sebagai berikut: sinyal yang kuat (RSSI tinggi) menghasilkan rasio sinyal terhadap derau yang baik (SNR tinggi), yang kemudian menekan jumlah paket yang hilang (Packet Loss rendah), sehingga hampir semua paket berhasil terkirim (PDR tinggi). Sebaliknya, jika sinyal lemah, seluruh rantai ini memburuk secara bersamaan. Secara keseluruhan, keempat parameter ini membentuk rantai hubungan yang linear dan logis: RSSI yang tinggi menghasilkan SNR yang baik, SNR yang baik menekan packet loss, dan packet loss yang rendah menghasilkan PDR yang tinggi.