

BAB III METODEOLOGI

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mulai dari bulan Februari 2025 hingga Juni 2026 di Laboratorium Terpadu, Lantai 5, Universitas Muhammadiyah Surabaya. Pada penelitian ini dilakukan implementasi dan monitoring data sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) yang terhubung dengan sistem tenaga listrik menggunakan modul LoRa untuk menganalisis tingkat efisiensi dan *losses* pada proses transmisi data.

3.2 Jadwal Penelitian

Tabel 3.1 Tabel Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Bulan																			
		Februari				Maret				April				Mei				Juni			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.	Studi literatur																				
2.	Perancangan sistem pada LoRa																				
3.	Pengujian lapangan (Transmisi LoRa)																				
4.	Pengumpulan dan pengolahan data																				
5.	Analisis efisiensi dan losses																				
6.	Penyusunan laporan																				

3.3 Jenis dan Pendekatan Penelitian

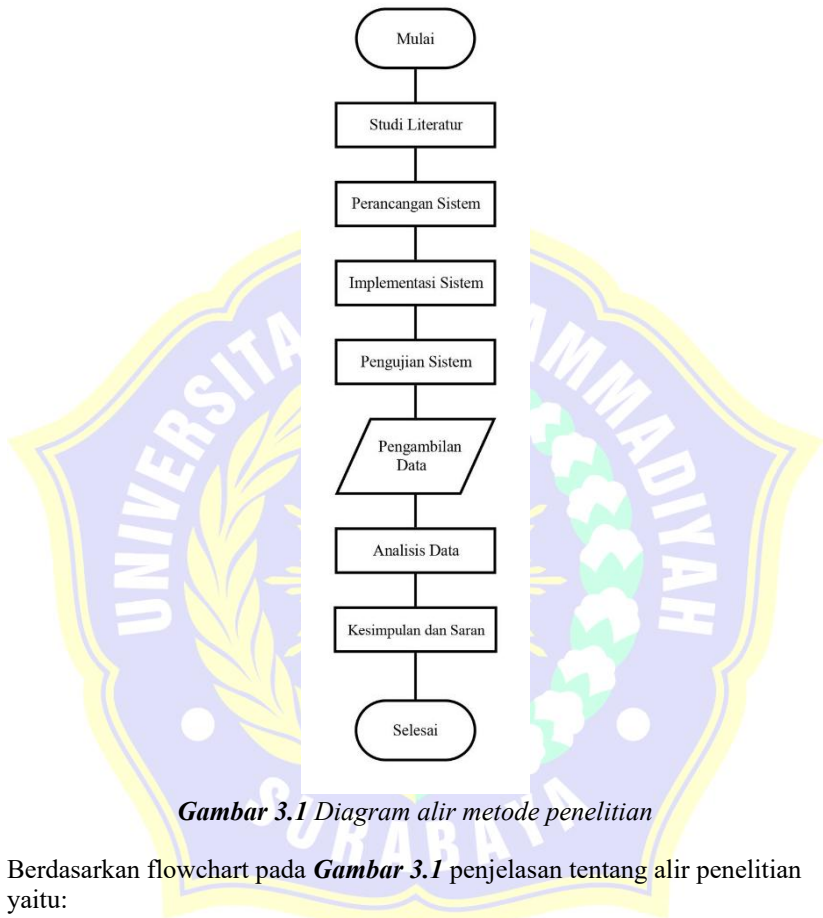
1. Jenis Penelitian : Eksperimen dan analisis kuantitatif.

Metode eksperimen dipilih karena penelitian ini melibatkan proses pengujian langsung pada perangkat untuk memperoleh data empiris terkait kinerja modul LoRa. Pendekatan kuantitatif digunakan karena seluruh hasil pengujian akan dianalisis menggunakan data numerik yang terukur, seperti nilai RSSI, SNR, Packet Loss, serta efisiensi transmisi data.

2. Pendekatan : Pengujian langsung terhadap modul LoRa pada sistem turbin angin untuk mengukur efisiensi transmisi dan losses data.

Dalam penelitian ini, pengujian dilakukan secara langsung pada modul LoRa yang diintegrasikan dengan sistem turbin angin. Perangkat dipasang pada node sensor di bagian turbin untuk mengumpulkan data dan kemudian mengirimkannya melalui LoRa menuju gateway. Melalui proses ini, peneliti dapat mengevaluasi tingkat efisiensi transmisi, kestabilan sinyal, dan persentase losses data yang terjadi pada kondisi operasional sebenarnya. Hasil pengujian tersebut kemudian dianalisis secara kuantitatif untuk mengetahui hubungan antara parameter transmisi LoRa dengan kualitas komunikasi yang dihasilkan. Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai performa LoRa pada sistem monitoring turbin angin serta menentukan konfigurasi parameter yang paling optimal.

3.4 Diagram Alir Metode Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir metode penelitian

Berdasarkan flowchart pada **Gambar 3.1** penjelasan tentang alir penelitian yaitu:

1. Mulai Penelitian, menandai tahap awal dimulainya kegiatan penelitian, termasuk penentuan tujuan, batasan masalah, dan ruang lingkup penelitian yang akan dilaksanakan.
2. Studi Literatur, mempelajari teori, konsep dasar, serta penelitian terdahulu yang berkaitan dengan teknologi LoRa, efisiensi energi, dan *losses* transmisi data sebagai landasan dalam merumuskan arah penelitian.

3. Perancangan Sistem, menyusun rancangan sistem komunikasi LoRa yang meliputi perancangan rangkaian *hardware*, dan penentuan parameter pengujian yang akan digunakan.
4. Implementasi Sistem, merealisasikan hasil rancangan menjadi sistem nyata melalui proses perakitan komponen, pemrograman mikrokontroler, serta integrasi sensor dengan modul LoRa agar sistem dapat berfungsi sesuai tujuan.
5. Pengujian Sistem melakukan pengujian terhadap performa sistem LoRa yang telah dibangun. Parameter yang diuji mencakup jangkauan sinyal (RSSI, SNR), dan konsumsi daya pada saat transmisi data.
6. Pengumpulan Data, mengumpulkan data hasil pengujian, seperti nilai RSSI, SNR, *packet loss*, dan konsumsi daya, sebagai dasar dalam proses analisis performa sistem.
7. Analisis Data :
 - Mengolah data hasil pengujian.
 - Menilai hubungan antara daya konsumsi, jarak transmisi, dan efisiensi energi.
8. Kesimpulan dan Saran, menyimpulkan hasil penelitian berdasarkan analisis yang telah dilakukan, serta memberikan saran untuk pengembangan dan penyempurnaan sistem di masa mendatang.
9. Selesai Penelitian, tahap akhir yang menandai berakhirnya seluruh rangkaian penelitian setelah tujuan berhasil dicapai dan seluruh proses telah dilaksanakan.

3.5 Perancangan Sistem

3.5.1 Deskripsi Sistem Monitoring pada Turbin Angin

Sistem monitoring turbin angin ini dirancang untuk memperoleh data operasional turbin secara real-time melalui beberapa sensor pendukung. Sensor anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan angin sebagai acuan utama dalam mengetahui potensi energi yang tersedia untuk menggerakkan turbin. Selain itu, sensor RPM berfungsi memonitor kecepatan putaran turbin, sehingga dapat dianalisis bagaimana respon turbin terhadap perubahan kondisi angin di lapangan. Untuk mengetahui hasil konversi energi yang dihasilkan, sistem juga dilengkapi sensor tegangan dan arus yang bertugas memantau output listrik dari turbin, sehingga perhitungan daya keluaran dapat dilakukan secara akurat.

Seluruh data dari sensor kemudian diproses oleh mikrokontroler Arduino Mega. Mikrokontroler ini bertindak sebagai pusat kendali yang mengumpulkan, membaca, dan mengolah nilai sensor sebelum dikirimkan ke perangkat penerima. Data yang telah diproses selanjutnya dikirim melalui modul komunikasi LoRa SX1278, yang dipilih karena konsumsi dayanya rendah dan memiliki jangkauan transmisi yang jauh. Pada sistem ini digunakan topologi komunikasi *point-to-point*, di mana node *transmitter* yang terpasang pada turbin mengirimkan data secara langsung ke gateway *receiver* tanpa perantara. Melalui mekanisme ini, data hasil pengukuran dapat diterima dan dianalisis untuk memantau performa turbin angin, sekaligus menjadi dasar dalam mengukur efisiensi transmisi dan tingkat *losses* pada komunikasi menggunakan LoRa.

3.5.2 Diagram Blok Sistem

Alur kerja sistem dimulai dari tahap akuisisi data, yaitu ketika sensor yang terpasang pada turbin angin melakukan proses pembacaan parameter fisis, seperti kecepatan angin, arah angin, atau nilai lain yang dibutuhkan dalam proses monitoring. Sensor bekerja secara kontinu untuk mendeteksi perubahan nilai pada lingkungan dan menghasilkan sinyal keluaran berupa data analog atau digital. Data hasil pembacaan tersebut kemudian dikirim menuju mikrokontroler Arduino sebagai pusat pengendali sistem.

Pada tahap berikutnya, Arduino menerima data sensor dan melakukan pemrosesan awal (*pre-processing*), yang meliputi pengolahan sinyal, konversi data serta penyusunan format data agar dapat dikirimkan dengan baik melalui media komunikasi nirkabel. Arduino memastikan bahwa data berada dalam format yang sesuai, ringkas, dan dapat dibaca oleh sistem penerima. Setelah proses pemrosesan selesai, data diteruskan menuju modul LoRa Transmitter melalui jalur komunikasi serial.

Selanjutnya, LoRa Transmitter berfungsi sebagai perangkat pemancar yang akan mengirimkan data hasil pembacaan sensor ke perangkat penerima menggunakan gelombang radio melalui jaringan nirkabel. Data ditransmisikan menggunakan teknik *spread spectrum* khas LoRa sehingga proses komunikasi tetap stabil meskipun terdapat hambatan pada lingkungan komunikasi.

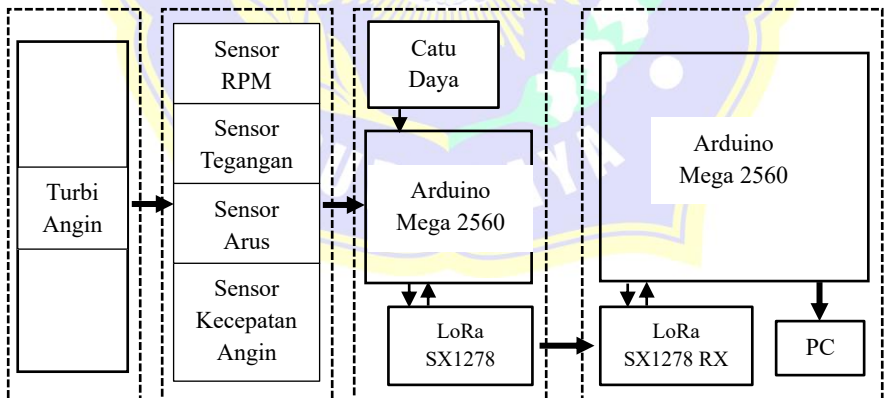
Data yang dipancarkan LoRa kemudian diterima oleh LoRa *receiver* pada sisi penerima. Pada tahap ini, LoRa *receiver* akan melakukan proses demodulasi dan menerjemahkan kembali sinyal radio menjadi data digital yang dapat

diolah lebih lanjut. Setelah berhasil diterima, data diteruskan menuju server atau komputer menggunakan media komunikasi kabel atau antarmuka serial untuk dianalisis.

Pada sisi akhir sistem, server/PC menjalankan proses monitoring dan analisis, meliputi penampilan data (kecepatan angin, RPM, tegangan, dan arus) secara *real-time*. Server menampilkan data hasil pengukuran agar mudah diamati oleh pengguna. Selain itu, pada tahap ini dilakukan analisis efisiensi transmisi data dan perhitungan *losses*, seperti PL, penurunan RSSI, dan perubahan nilai SNR selama proses pengiriman. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui seberapa efektif sistem LoRa dalam mentransmisikan data pada kondisi lingkungan tertentu. Dengan demikian, keseluruhan proses mampu memberikan informasi yang komprehensif mengenai performa sistem monitoring berbasis LoRa pada turbin angin, mulai dari pembacaan sensor hingga evaluasi kualitas transmisi data.

Untuk merealisasikan alur kerja sistem yang telah dijelaskan tersebut, digunakan beberapa komponen utama yang saling terintegrasi guna mendukung proses akuisisi data, pengolahan, hingga transmisi secara nirkabel. Adapun komponen yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 3.2** sebagai berikut :

Pemasangan komponen dengan memasang setiap perangkat seperti pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Diagram Blok Sistem Perancangan

1. Turbin Angin

Turbin angin berfungsi sebagai sumber energi mekanik dengan memanfaatkan hembusan angin untuk memutar bilah turbin. Energi kinetik dari angin kemudian dikonversi menjadi energi listrik melalui putaran poros yang terhubung ke generator. Untuk mengetahui performa turbin, beberapa parameter penting dipantau selama proses konversi energi berlangsung, yaitu kecepatan angin menggunakan sensor *anemometer*, kecepatan putaran turbin (RPM) menggunakan sensor *optocoupler*, serta tegangan dan arus keluaran dari generator. Seluruh data hasil pengukuran tersebut kemudian dikirim menuju Arduino Mega untuk dibaca, diproses, dan selanjutnya digunakan sebagai dasar analisis kinerja turbin dan sistem monitoring secara keseluruhan.

2. Mikrokontroler (Arduino Mega)

Mikrokontroler Arduino Mega berperan sebagai pusat kendali (*brain of system*) yang mengatur seluruh proses monitoring pada turbin angin. Arduino bertugas menerima data baik analog maupun digital dari setiap sensor yang terpasang pada sistem, kemudian melakukan serangkaian pengolahan seperti konversi nilai ADC, kalibrasi pembacaan, hingga perhitungan parameter penting seperti daya dan energi keluaran turbin angin. Setelah data diolah dan divalidasi, Arduino menyusunnya ke dalam format paket data yang siap untuk ditransmisikan. Selanjutnya, paket data tersebut dikirimkan ke modul LoRa SX1278 melalui antarmuka komunikasi serial seperti SPI (*Serial Peripheral Interface*) atau UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*). untuk diteruskan ke gateway. Dengan fungsi ini, Arduino Mega memastikan bahwa proses akuisisi, pengolahan, dan pengiriman data berlangsung terstruktur dan berjalan secara *real-time*.

3. Modul LoRa SX1278 (Transmitter)

Modul LoRa SX1278 berfungsi sebagai pemancar data nirkabel jarak jauh (*transmitter*) yang mengirimkan paket data hasil pembacaan sensor dari node turbin menuju perangkat *receiver*. Proses komunikasi dilakukan menggunakan frekuensi 433–915 MHz, yang termasuk dalam rentang frekuensi rendah sehingga mampu menjangkau jarak transmisi yang luas dengan konsumsi daya yang rendah. Pada penelitian ini, modul LoRa menjadi komponen inti dalam proses pengiriman data karena kinerjanya akan dianalisis berdasarkan parameter RSSI, SNR, dan PL untuk menentukan

tingkat efisiensi transmisi dan besarnya *losses* yang terjadi selama pengiriman data.

4. Modul LoRa SX1278 (Receiver)

Pada sisi penerima, modul LoRa berfungsi untuk menerima paket data yang dikirimkan oleh transmitter dari turbin angin. Setiap data yang masuk akan diverifikasi melalui proses pengecekan integritas paket, termasuk pemeriksaan *CRC (Cyclic Redundancy Check)* untuk memastikan tidak terjadi kerusakan data selama pengiriman. Selain itu, penerima juga melakukan pengukuran terhadap kekuatan dan kualitas sinyal yang diterima. Parameter utama yang direkam yaitu RSSI yang menunjukkan seberapa kuat sinyal diterima di sisi *receiver*, SNR yang menggambarkan kualitas sinyal terhadap tingkat *noise*, serta *Packet Loss*. Ketiga parameter ini menjadi dasar dalam menganalisis efisiensi komunikasi LoRa dan besarnya *losses* yang terjadi pada sistem monitoring turbin angin.

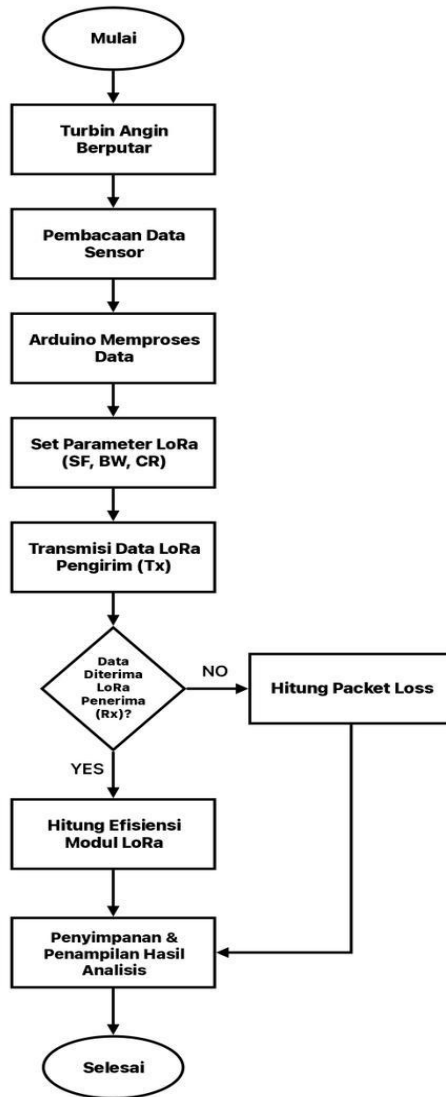
5. Server atau PC Monitoring

Server atau PC Monitoring berperan sebagai pusat pengolahan dan visualisasi data setelah informasi diterima oleh modul LoRa pada sisi penerima. Pemrograman sistem monitoring pada PC dilakukan dengan menggunakan *Visual Studio 2019*. Pemrograman dilakukan untuk menampilkan data yang diterima oleh server yang terhubung melalui port *USB*. Data yang diteruskan dari receiver kemudian disimpan ke dalam *database* seperti *MySQL* atau file *log* berformat *CSV (Comma Separated Values)* sebagai arsip pemantauan. Selanjutnya, server menampilkan grafik dan tren perubahan parameter turbin angin meliputi kecepatan angin, putaran turbin, tegangan, dan arus melalui *dashboard* pemantauan secara *real-time*. Selain itu, perangkat ini juga digunakan untuk menghitung efisiensi sistem dan mengidentifikasi gangguan komunikasi berdasarkan analisis parameter seperti RSSI, SNR, dan PL. Dengan demikian, server tidak hanya berfungsi sebagai alat penyimpanan, tetapi juga menjadi pusat analisis dan visualisasi untuk mendukung evaluasi kinerja sistem secara keseluruhan..

3.5.3 Tujuan Kinerja Sistem

1. Mengetahui efisiensi transmisi modul LoRa pada aplikasi monitoring turbin angin, menilai seberapa efisien modul LoRa dalam mentransmisikan data sensor turbin (kecepatan angin, RPM, tegangan, arus) dengan mengukur besaran energi yang dikonsumsi per transmisi dan energi per bit (*Joule/bit*) pada berbagai kondisi operasional.
2. Menganalisis *losses* transmisi terhadap jarak pengiriman, mengevaluasi hubungan antara jarak transmisi dan indikator kualitas komunikasi termasuk RSSI, SNR, dan PL dengan tujuan mengidentifikasi pola degradasi sinyal dan ambang jarak operasional di mana reliability turun signifikan.
3. Memberikan rekomendasi konfigurasi LoRa yang optimal, menentukan kombinasi parameter LoRa yang meminimalkan konsumsi daya sambil mempertahankan tingkat keandalan transmisi yang layak untuk monitoring turbin angin, serta menyusun panduan pengaturan untuk implementasi lapangan.

3.6 Diagram Alir Sistem Kerja



Gambar 3.3 Flowchart Sistem Kerja

1. Proses dimulai ketika sistem diaktifkan (Mulai) dan turbin angin mulai berputar sesuai dengan kondisi angin yang ada. Putaran turbin ini kemudian menghasilkan data yang akan dipantau melalui serangkaian sensor. Setelah itu, sistem melakukan pembacaan data sensor, seperti kecepatan angin, putaran turbin, atau parameter lain yang dibutuhkan.
2. Selanjutnya, Arduino memproses data hasil pembacaan sensor untuk memastikan data tersebut siap dikirim. Setelah data diproses, sistem mengatur parameter komunikasi LoRa, yaitu Spreading Factor (SF), Bandwidth (BW), dan Coding Rate (CR), agar proses transmisi sesuai dengan kebutuhan jarak dan kualitas sinyal.
3. Kemudian dilakukan transmisi data menggunakan modul LoRa pengirim (Tx) menuju modul LoRa penerima (Rx). Pada tahap berikutnya dilakukan pengecekan: apakah data berhasil diterima oleh LoRa penerima (Rx). Jika data tidak diterima, maka sistem akan menghitung nilai packet loss sebagai indikator kualitas transmisi. Hasil perhitungan packet loss kemudian digunakan untuk dianalisis dan disimpan bersama data lainnya.
4. Jika data berhasil diterima, maka sistem akan melanjutkan untuk menghitung efisiensi modul LoRa, berdasarkan perbandingan antara jumlah data terkirim dan data diterima.
5. Tahap berikutnya adalah penyimpanan dan penampilan hasil analisis, yang dapat berupa laporan performa jaringan dan efisiensi pengiriman data LoRa. Setelah seluruh proses selesai, sistem menuju tahap akhir (Selesai).

3.7 Variabel Penelitian dan Parameter Pengukuran

3.7.1 Variabel Bebas

Tabel 3.2 Variabel Bebas Pengujian LoRa

Variabel	Satuan	Keterangan
Jarak	Meter	Jarak antara perangkat transmitter dan receiver yang digunakan selama pengujian.
SF	-	Parameter LoRa yang menentukan jumlah chip per simbol.
BW	kHz	Lebar pita frekuensi yang digunakan dalam transmisi LoRa.
CR	-	Rasio koreksi kesalahan (<i>Forward Error Correction</i>) yang digunakan untuk meningkatkan keandalan transmisi data.

3.7.2 Variabel Terikat

Tabel 3.3 Variabel Terikat Pengujian LoRa

Variabel	Satuan	Keterangan
RSSI	dBm	Kekuatan sinyal yang diterima oleh receiver dari transmitter.
SNR	dB	Perbandingan antara daya sinyal yang diterima terhadap tingkat noise.
Packet Loss	%	Persentase paket data yang gagal diterima dibandingkan jumlah paket yang dikirim.
PDR	%	Persentase paket data yang berhasil diterima oleh receiver dibandingkan dengan jumlah paket yang dikirim oleh transmitter.

3.7.3 Variabel Kontrol

Tabel 3.4 Variabel Kontrol Pengujian LoRa

Variabel	Satuan	Keterangan
Frekuensi LoRa	433 MHz	Frekuensi yang digunakan oleh modul LoRa selama pengujian. Nilai frekuensi dijaga tetap untuk menghindari pengaruh perubahan frekuensi terhadap kualitas komunikasi.
Transmit Power	17 dBm	Besar daya yang digunakan modul LoRa untuk memancarkan sinyal. Nilainya dibuat tetap agar perubahan RSSI, SNR, dan packet loss hanya dipengaruhi oleh jarak dan Spreading Factor.
Antena LoRa	12 dBi	Antena yang digunakan pada sisi transmitter dan receiver selama pengujian.

3.8 Hipotesis Penelitian

H1 - Pengaruh Jarak terhadap RSSI dan SNR pada Kondisi LOS

Semakin bertambahnya jarak transmisi dari 10 meter hingga 300 meter pada kondisi LOS, nilai RSSI dan SNR yang diterima oleh *receiver* akan semakin menurun, karena sinyal mengalami pelemahan daya akibat fenomena free space path loss yang meningkat seiring bertambahnya jarak, sementara tingkat noise pada kanal komunikasi relatif tetap sehingga rasio sinyal terhadap noise menjadi semakin kecil.

H2 - Pengaruh Jarak terhadap RSSI dan SNR pada Kondisi NLOS

Semakin bertambahnya jarak transmisi dari 10 meter hingga 300 meter pada kondisi Non-Line of Sight (NLOS), nilai RSSI dan SNR yang diterima akan mengalami penurunan yang lebih besar dibandingkan kondisi LOS pada jarak yang sama, karena adanya halangan fisik berupa bangunan atau objek lain yang menyebabkan pelemahan sinyal tambahan akibat efek difraksi, pantulan, dan penyerapan sinyal, serta menimbulkan multipath fading dan interferensi tambahan yang meningkatkan komponen noise pada penerima.

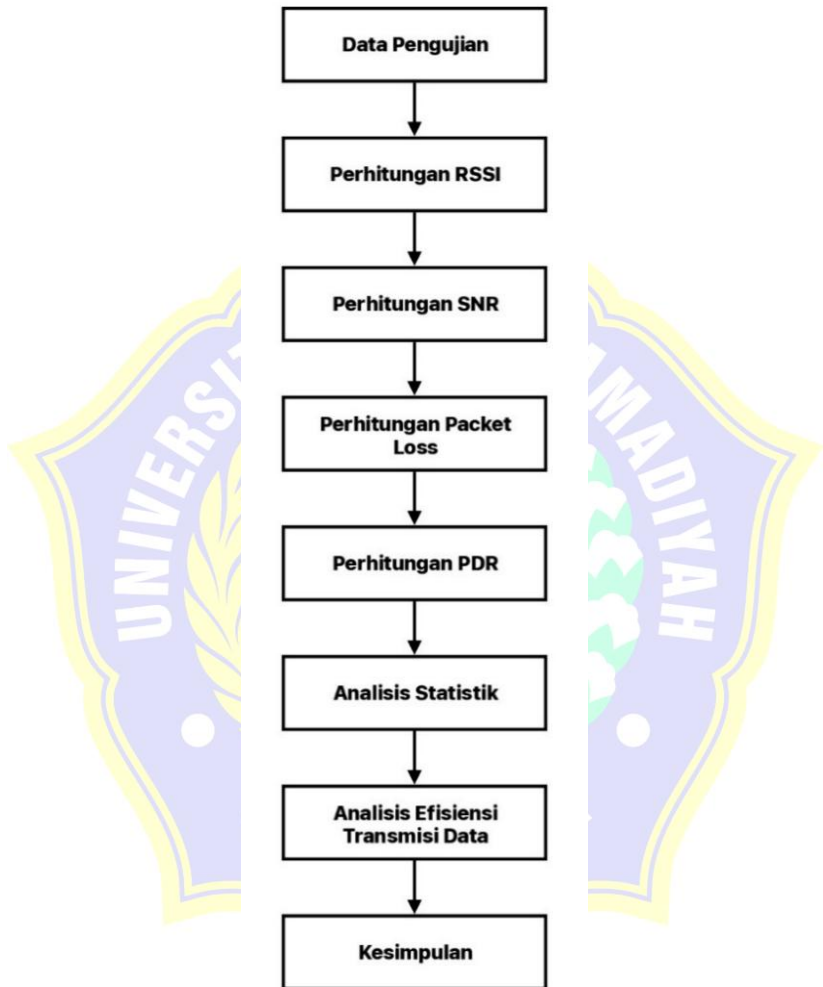
H3 - Pengaruh Penurunan RSSI dan SNR terhadap Packet Loss

Semakin rendah nilai RSSI dan SNR yang diterima akibat bertambahnya jarak transmisi pada kondisi LOS maupun NLOS, maka tingkat Packet Loss akan semakin meningkat, karena sinyal yang diterima berada di bawah ambang batas sensitivitas penerima LoRa sehingga node penerima tidak mampu mendekodekan paket data dengan benar dan paket dinyatakan hilang atau gagal diterima.

H4 – Efisiensi Transmisi Data LoRa Menurun Seiring Bertambahnya Jarak Komunikasi

Ketika jarak komunikasi semakin jauh, daya sinyal yang diterima akan semakin kecil sehingga nilai RSSI dan SNR cenderung menurun. Penurunan kualitas sinyal tersebut dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya kesalahan transmisi dan packet loss. Akibatnya, jumlah data yang berhasil diterima dibandingkan dengan data yang dikirim menjadi berkurang. Pada jarak yang lebih jauh sering diperlukan penggunaan parameter komunikasi yang lebih konservatif, seperti *Spreading Factor* yang lebih tinggi, yang menyebabkan waktu transmisi (*time-on-air*) dan konsumsi energi meningkat.

3.9 Flowchart Analisis Data



Gambar 3.4 Flowchart Analisa Data Pengujian LoRa

Flowchart terdiri dari delapan tahapan yang dilakukan secara berurutan mulai dari pengumpulan data pengujian hingga penarikan kesimpulan, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 3.4**. Penyusunan alur kerja ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap proses analisis dilakukan secara terstruktur dan konsisten, sehingga hasil yang diperoleh dapat menjawab rumusan masalah penelitian secara komprehensif. Setiap tahapan dalam flowchart ini memiliki peran dan fungsi yang saling berkaitan satu sama lain, di mana hasil dari setiap tahapan menjadi masukan (input) bagi tahapan berikutnya, sehingga apabila terdapat kekurangan atau ketidaksesuaian pada salah satu tahapan, maka hal tersebut akan berdampak pada keakuratan hasil analisis pada tahapan-tahapan selanjutnya dan urutan pelaksanaannya tidak dapat dilakukan secara acak atau dibalik.

Secara garis besar, kedelapan tahapan tersebut dapat dikelompokkan ke dalam tiga fase utama, yaitu fase pengumpulan data yang terdiri dari tahap Data Pengujian sebagai fondasi awal seluruh proses analisis, fase pengolahan parameter yang terdiri dari empat tahap perhitungan yaitu Perhitungan RSSI, Perhitungan SNR, Perhitungan Packet Loss, dan Perhitungan PDR di mana data mentah hasil pengujian diolah menjadi nilai-nilai parameter yang terukur, serta fase analisis dan interpretasi yang terdiri dari tahap Analisis Statistik, Analisis Efisiensi Transmisi Data, dan diakhiri dengan tahap Kesimpulan di mana seluruh nilai parameter yang telah diperoleh dianalisis secara mendalam untuk menghasilkan pemahaman dan kesimpulan akhir penelitian.

Adapun penjelasan dari masing-masing tahapan dalam flowchart tersebut yang ditunjukkan pada **Gambar 3.4** adalah sebagai berikut.

1. Data Pengujian, yaitu tahap pengumpulan seluruh data mentah hasil pengukuran sistem komunikasi LoRa yang telah dilakukan pada berbagai variasi Spreading Factor (SF7, SF9, dan SF12) pada kondisi Line of Sight (LOS) dan Non-Line of Sight (NLOS) di berbagai titik jarak pengujian. Data pengujian ini menjadi fondasi utama dari seluruh proses analisis yang akan dilakukan pada tahapan-tahapan berikutnya, sehingga keakuratan dan kelengkapan data pada tahap ini sangat menentukan kualitas hasil analisis secara keseluruhan.
2. Perhitungan RSSI, yaitu proses pengolahan data kekuatan sinyal yang diterima (Received Signal Strength Indicator) dari seluruh

hasil pengujian. Pada tahap ini, nilai RSSI yang tercatat pada setiap titik jarak dan setiap kombinasi Spreading Factor serta kondisi propagasi dihitung dan dirata-ratakan untuk mendapatkan representasi kekuatan sinyal yang diterima secara statistik. Nilai RSSI yang diperoleh kemudian digunakan sebagai salah satu indikator kualitas sinyal yang akan dianalisis lebih lanjut pada tahapan analisis statistik.

3. Perhitungan SNR, yaitu proses pengolahan data rasio sinyal terhadap noise (Signal to Noise Ratio) dari seluruh hasil pengujian. Sama seperti perhitungan RSSI, nilai SNR pada setiap titik jarak dan kombinasi parameter dihitung dan dirata-ratakan untuk mendapatkan gambaran yang representatif mengenai kualitas kanal komunikasi LoRa. Nilai SNR ini bersama dengan nilai RSSI akan digunakan untuk menganalisis sejauh mana kualitas sinyal mempengaruhi efisiensi transmisi data pada tahapan selanjutnya.
4. Perhitungan Packet Loss, yaitu proses menghitung persentase jumlah paket data yang gagal diterima oleh node penerima dibandingkan dengan total paket yang dikirimkan oleh node pengirim. Packet Loss dihitung menggunakan rumus selisih antara paket yang dikirim dan paket yang diterima dibagi total paket yang dikirim kemudian dikalikan 100%, dan hasilnya dikelompokkan berdasarkan variasi Spreading Factor dan kondisi propagasi pada setiap titik jarak pengujian.
5. Perhitungan PDR, yaitu proses menghitung Packet Delivery Ratio yang merupakan kebalikan dari Packet Loss. PDR dihitung menggunakan rumus jumlah paket yang berhasil diterima dibagi total paket yang dikirim kemudian dikalikan 100%, dan merupakan parameter utama yang digunakan sebagai dasar penilaian efisiensi transmisi data pada penelitian ini. Nilai PDR yang tinggi mengindikasikan sistem yang efisien, sedangkan nilai PDR yang rendah mengindikasikan adanya permasalahan pada kualitas transmisi.
6. Analisis Statistik, yaitu tahap pengolahan data secara statistik yang meliputi tiga pendekatan analisis, yaitu analisis deskriptif untuk menggambarkan karakteristik data secara umum melalui nilai rata-rata, minimum, maksimum, dan standar deviasi, analisis korelatif untuk mengukur tingkat keeratan hubungan antar variabel seperti hubungan antara jarak dengan RSSI, SNR, Packet Loss, dan PDR, serta analisis regresi linear untuk membangun model matematis yang menggambarkan hubungan prediktif antara variabel bebas

(jarak) dengan variabel terikat (RSSI, SNR, Packet Loss, PDR). Analisis Efisiensi Transmisi Data, yaitu tahap analisis yang menggunakan seluruh hasil perhitungan dan analisis statistik sebelumnya untuk menilai seberapa efisien sistem komunikasi LoRa dalam mentransmisikan data pada berbagai kombinasi Spreading Factor dan kondisi propagasi. Pada tahap ini, PDR digunakan sebagai parameter utama penilaian efisiensi, yang dikombinasikan dengan nilai Time on Air (ToA) untuk menentukan konfigurasi Spreading Factor yang paling optimal dari sisi keberhasilan pengiriman data maupun efisiensi waktu dan energi transmisi.

7. Kesimpulan, yaitu tahap penarikan kesimpulan dari seluruh rangkaian analisis yang telah dilakukan. Pada tahap ini, seluruh temuan dari perhitungan RSSI, SNR, Packet Loss, PDR, analisis statistik, dan analisis efisiensi transmisi data dirangkum dan disintesis untuk menjawab tujuan penelitian, yaitu mengetahui pengaruh jarak dan kondisi propagasi terhadap kualitas komunikasi LoRa serta menentukan konfigurasi Spreading Factor yang paling efisien untuk implementasi sistem monitoring berbasis LoRa pada wind turbine 100W.

3.10 Prosedur Pengujian

3.10.1 Pengujian Transmisi Data pada Kondisi LOS (*Line-of-Sight*)

Pengujian pada kondisi LOS (*Line-of-Sight*) dimulai pada jarak 10 m dan ditingkatkan sampai dengan batas jarak maksimum dimana server tidak dapat menerima data dari *node sensor* yang dikirimkan oleh *transmitter* pada jarak tersebut.

Skenario pengambilan data akan dilakukan dengan cara :

1. Menentukan lokasi pengujian antara *transmitter* dan *receiver* dengan jarak transmisi 10 m, 50 m, 100 m sampai *receiver* tidak dapat menerima data.
2. Melakukan konfigurasi LoRa (SF, BW, CR).
3. Mengirimkan data sensor dari sisi *transmitter* ke sisi *receiver*.
4. Merekam hasil RSSI, dan SNR
5. Mengukur konsumsi daya saat transmisi (menggunakan power meter).
6. Menghitung efisiensi transmisi LoRa, packet loss, dan PDR.

3.10.2 Pengujian Transmisi Data pada Kondisi NLOS (*Non Line-of-Sight*)

Pengujian pada kondisi NLOS dilakukan dengan skenario yang sama dengan pengujian pada kondisi LOS. Tetapi, pada kondisi NLOS pengujian dilakukan pada lokasi dimana server dan node sensor terhalang oleh objek. Pengujian ini dilakukan untuk menguji pengaruh penghalang terhadap transmisi dari komunikasi LoRa. Pada pengujian di kondisi NLOS, peningkatan jarak yang dilakukan pada tiap percobaan sama yaitu 10, 50, 100 m sampai dimana server tidak dapat menerima data dari *node sensor* yang dikirimkan oleh *transmitter* pada jarak tersebut..

