



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Sistem Komunikasi Digital

#### 2.1.1 Pengertian Sistem Komunikasi Digital

Sistem komunikasi digital merupakan suatu sistem yang digunakan untuk mentransmisikan informasi dalam bentuk data digital dari sisi pengirim (*transmitter*) menuju sisi penerima (*receiver*) melalui suatu media transmisi. Informasi yang dikirim direpresentasikan dalam bentuk bit biner (0 dan 1), sehingga memungkinkan proses pengolahan, penyimpanan, maupun transmisi data dilakukan secara lebih efisien dibandingkan sistem komunikasi analog (Oliveira de Souza et al., 2023). Representasi digital tersebut juga memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap gangguan (*noise*), mempermudah penerapan teknik deteksi maupun koreksi kesalahan (*error detection* dan *error correction*), serta mendukung integrasi dengan berbagai sistem komunikasi modern.

Perkembangan sistem komunikasi digital didorong oleh meningkatnya kebutuhan masyarakat terhadap layanan komunikasi yang mampu mentransmisikan berbagai jenis informasi, seperti suara, gambar, video, maupun dokumen digital, dengan kecepatan tinggi dan tingkat keandalan yang baik. Seiring dengan berkembangnya teknologi jaringan nirkabel, sistem komunikasi digital tidak hanya dituntut memiliki kapasitas transmisi yang besar, tetapi juga harus mampu mempertahankan kualitas komunikasi pada kondisi kanal yang dipengaruhi oleh *Additive White Gaussian Noise*, interferensi, serta propagasi multipath yang menyebabkan terjadinya *Inter Symbol Interference* (ISI) (Bañacia et al., 2023). Oleh karena itu, berbagai teknik modulasi dan pemrosesan sinyal digital terus dikembangkan untuk meningkatkan performa sistem komunikasi modern.



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Pada prinsipnya, sistem komunikasi digital mengubah informasi dari sumber menjadi sinyal digital yang siap ditransmisikan melalui media komunikasi. Setelah melewati kanal transmisi, sinyal yang diterima akan diproses kembali sehingga informasi yang diterima memiliki kesesuaian semaksimal mungkin dengan informasi yang dikirimkan. Seluruh proses tersebut melibatkan beberapa tahapan, mulai dari pembentukan data, proses modulasi, transmisi melalui kanal, demodulasi, hingga proses rekonstruksi informasi pada sisi penerima.

Dalam beberapa dekade terakhir, implementasi sistem komunikasi digital berkembang pesat seiring munculnya teknologi *Software Defined Radio* (SDR). Berbeda dengan sistem radio konvensional yang sebagian besar fungsi komunikasinya direalisasikan menggunakan perangkat keras khusus, SDR memindahkan sebagian besar fungsi tersebut ke perangkat lunak sehingga sistem menjadi lebih fleksibel, mudah dikembangkan, serta mampu mendukung berbagai standar komunikasi hanya melalui perubahan konfigurasi perangkat lunak tanpa perlu melakukan modifikasi terhadap perangkat keras radio.

Penelitian ini mengimplementasikan sistem komunikasi digital berbasis SDR menggunakan Universal Software Radio Peripheral (USRP) NI-2920 sebagai perangkat pemancar (*transmitter*) dan RTL-SDR sebagai perangkat penerima (*receiver*). Seluruh proses pembangkitan sinyal digital, modulasi OFDM, proses decode, hingga analisis performansi dilakukan menggunakan MATLAB. Proses transmisi sinyal RF dilakukan melalui USRP Hardware Driver (UHD), sedangkan proses penerimaan sinyal dilakukan menggunakan `rtl_sdr.exe` tanpa memanfaatkan *MATLAB Hardware Support Package* (Halder et al., 2023). Sistem yang dikembangkan dirancang untuk mentransmisikan beberapa jenis data digital berupa gambar, audio, teks, dan dokumen, kemudian mengevaluasi kualitas transmisi berdasarkan parameter performansi yang sesuai dengan masing-masing jenis data.





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

### 2.1.2 Komponen Sistem Komunikasi Digital

Secara umum, sistem komunikasi digital terdiri atas beberapa komponen utama yang saling berhubungan sehingga membentuk suatu proses transmisi data secara utuh. Setiap komponen memiliki fungsi tertentu dalam memastikan informasi yang dikirimkan oleh *transmitter* dapat diterima kembali oleh *receiver* dengan tingkat kesalahan sekecil mungkin. Struktur dasar sistem komunikasi digital ditunjukkan melalui tahapan sumber informasi, pemrosesan sinyal pada sisi pengirim, media transmisi, serta pemrosesan sinyal pada sisi penerima.

Komponen utamanya adalah sumber informasi (*information source*), yaitu bagian yang menghasilkan data yang akan dikirimkan melalui sistem komunikasi. Data tersebut dapat berupa gambar, audio, teks, maupun dokumen digital sesuai kebutuhan aplikasi. Pada penelitian ini, sumber informasi terdiri atas beberapa jenis file multimedia yang digunakan sebagai data masukan untuk proses transmisi melalui sistem OFDM.

Komponen berikutnya adalah pemancar (*transmitter*) yang bertugas mengubah data digital menjadi sinyal yang siap ditransmisikan melalui kanal komunikasi. Pada sistem komunikasi digital modern, proses yang dilakukan pada sisi *transmitter* umumnya meliputi pembentukan bit data, pemetaan simbol menggunakan teknik modulasi digital, pembangkitan sinyal OFDM melalui proses *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT), penambahan *Cyclic Prefix* (CP), hingga pembentukan sinyal digital kompleks (*In-phase* dan *Quadrature*)(Xu & Guo, 2025). Seluruh proses tersebut bertujuan menghasilkan sinyal yang memiliki karakteristik sesuai dengan media transmisi yang digunakan.

Sinyal hasil proses modulasi kemudian dikirimkan melalui kanal komunikasi. Kanal komunikasi merupakan media yang menghubungkan *transmitter* dengan *receiver*, baik melalui kabel maupun media nirkabel. Pada sistem



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

komunikasi nirkabel, kualitas sinyal yang diterima dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti redaman propagasi, noise, interferensi, *Carrier Frequency Offset* (CFO), serta efek multipath yang dapat menyebabkan terjadinya *Inter Symbol Interference* (ISI). Oleh karena itu, pemilihan teknik modulasi dan metode sinkronisasi menjadi aspek penting dalam menjaga kualitas transmisi data (Herrera-Bustamante et al., 2022).

Selanjutnya, sinyal yang diterima akan diproses pada penerima (*receiver*). Tahapan pada sisi penerima merupakan kebalikan dari proses yang dilakukan pada sisi pemancar, yaitu meliputi sinkronisasi waktu dan frekuensi, penghapusan *Cyclic Prefix*, proses *Fast Fourier Transform* (FFT), demodulasi simbol, hingga rekonstruksi kembali data asli (Oliveira de Souza et al., 2023). Selain proses pemulihan informasi, sisi penerima juga umumnya melakukan evaluasi terhadap kualitas komunikasi menggunakan berbagai parameter performansi, seperti *Bit Error Rate* (BER), *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR), *Structural Similarity Index Measure* (SSIM), *Short-Time Objective Intelligibility* (STOI), maupun parameter lain yang disesuaikan dengan jenis data yang ditransmisikan (Oliveira de Souza et al., 2023).

Pada penelitian ini, komponen sistem komunikasi digital diimplementasikan menggunakan dua perangkat SDR yang memiliki fungsi berbeda. USRP NI-2920 digunakan sebagai perangkat pemancar untuk memancarkan sinyal OFDM melalui kanal nirkabel menggunakan UHD, sedangkan RTL-SDR digunakan sebagai perangkat penerima untuk merekam sinyal hasil transmisi. Data hasil perekaman kemudian diproses menggunakan MATLAB sehingga diperoleh kembali data berupa gambar, audio, teks, maupun dokumen. Selanjutnya, hasil dekode dianalisis menggunakan antarmuka *Graphical User Interface* (GUI) sehingga pengguna dapat melakukan evaluasi performansi sistem secara lebih mudah berdasarkan parameter kualitas yang dihasilkan.



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

### 2.1.3 Proses Transmisi Data pada Sistem Komunikasi Digital

Secara umum, proses transmisi dimulai dari pembentukan data digital pada sisi *transmitter*. Data yang akan dikirimkan terlebih dahulu diubah menjadi deretan bit biner sehingga dapat diproses oleh sistem komunikasi digital. Selanjutnya, bit-bit tersebut dipetakan menjadi simbol digital menggunakan teknik modulasi tertentu, seperti Binary Phase Shift Keying (BPSK), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), maupun Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM). Pemilihan teknik modulasi akan memengaruhi efisiensi spektrum, laju transmisi data, serta ketahanan sistem terhadap gangguan kanal komunikasi.

Pada sistem komunikasi berbasis OFDM, simbol hasil modulasi kemudian diproses menggunakan *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) sehingga terbentuk sejumlah subcarrier yang saling ortogonal. Setelah proses IFFT selesai, ditambahkan *Cyclic Prefix* (CP) pada setiap simbol OFDM untuk mengurangi pengaruh *Inter Symbol Interference* (ISI) akibat propagasi multipath (Masuyama et al., 2022). Penambahan CP juga membantu mempertahankan ortogonalitas antar subcarrier selama proses transmisi berlangsung.

Sinyal OFDM yang telah dibentuk selanjutnya dikonversi menjadi sampel kompleks (*In-phase* dan *Quadrature* atau IQ samples) sebelum dipancarkan melalui perangkat SDR. Pada penelitian ini, MATLAB digunakan untuk membangkitkan sinyal OFDM sekaligus menghasilkan file IQ dengan format .fc32. File tersebut kemudian dipancarkan oleh USRP NI-2920 menggunakan USRP Hardware Driver (UHD) melalui utilitas `tx_samples_from_file`. Pendekatan ini memungkinkan proses transmisi dilakukan tanpa menggunakan *MATLAB Hardware Support Package*, sehingga seluruh pengendalian perangkat keras dilakukan secara langsung oleh UHD.



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Selama proses propagasi melalui kanal komunikasi nirkabel, sinyal mengalami berbagai pengaruh, seperti redaman (*path loss*), derau, *Carrier Frequency Offset* (CFO), ketidaksesuaian waktu sinkronisasi, serta propagasi multipath. Gangguan-gangguan tersebut dapat menyebabkan perubahan amplitudo maupun fase sinyal sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya kesalahan bit pada sisi penerima. Oleh karena itu, proses sinkronisasi waktu dan frekuensi menjadi salah satu tahapan penting dalam sistem komunikasi OFDM agar proses demodulasi dapat dilakukan secara akurat.

Pada sisi *receiver*, sinyal RF diterima menggunakan RTL-SDR dan direkam dalam bentuk data IQ menggunakan utilitas `rtl_sdr.exe`. Selanjutnya, data hasil perekaman diproses menggunakan MATLAB untuk melakukan sinkronisasi frame, sinkronisasi frekuensi, penghapusan *Cyclic Prefix*, proses *Fast Fourier Transform* (FFT), demodulasi simbol, hingga rekonstruksi kembali data asli. Setelah seluruh proses selesai, sistem melakukan evaluasi terhadap kualitas transmisi menggunakan parameter performansi yang disesuaikan dengan jenis data yang dikirimkan. Untuk data berupa gambar digunakan parameter Bit Error Rate (BER), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), dan Structural Similarity Index Measure (SSIM), sedangkan data audio dianalisis menggunakan BER, Audio Signal-to-Noise Ratio (Audio SNR), dan Short-Time Objective Intelligibility (STOI). Untuk data teks dan dokumen digital digunakan parameter yaitu Word Error Rate/Character Error Rate (WER/CER) sehingga kualitas komunikasi dapat dievaluasi secara menyeluruh.

#### 2.1.4 Implementasi Sistem Komunikasi Digital pada Penelitian

Implementasi sistem komunikasi digital pada penelitian ini menggunakan konsep *Software Defined Radio* (SDR), yaitu sebagian besar fungsi komunikasi direalisasikan menggunakan perangkat lunak sehingga sistem memiliki fleksibilitas yang tinggi untuk dikembangkan. Berbeda dengan radio konvensional yang mengandalkan rangkaian perangkat keras khusus pada setiap fungsi komunikasi,





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

pendekatan SDR memungkinkan proses pembangkitan sinyal, modulasi, sinkronisasi, demodulasi, hingga analisis performansi dilakukan menggunakan perangkat lunak dengan memanfaatkan perangkat radio sebagai antarmuka frekuensi radio (*Radio Frequency Front-End*) (Oliveira de Souza et al., 2023).

Proses transmisi sinyal dilakukan menggunakan USRP Hardware Driver (UHD) melalui utilitas *tx\_samples\_from\_file*. Pendekatan ini dipilih karena memberikan kendali yang lebih fleksibel terhadap perangkat USRP tanpa bergantung pada *MATLAB Hardware Support Package*. Selain itu, penggunaan UHD juga memungkinkan integrasi yang lebih mudah dengan sistem komunikasi digital yang dikembangkan serta mendukung proses transmisi secara langsung menggunakan perangkat USRP.

Pengujian pada penelitian ini dilakukan menggunakan media transmisi nirkabel dengan variasi jarak antara perangkat pemancar dan penerima. Variasi jarak digunakan untuk mengevaluasi pengaruh kondisi propagasi terhadap performansi sistem komunikasi OFDM. Hasil pengujian selanjutnya dianalisis menggunakan beberapa parameter performansi sesuai dengan jenis data yang ditransmisikan. Implementasi tersebut menunjukkan bahwa penelitian ini tidak hanya berfokus pada simulasi algoritma OFDM pada MATLAB, tetapi juga mengimplementasikan sistem komunikasi digital secara nyata menggunakan perangkat SDR. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan mampu menggambarkan proses komunikasi digital mulai dari pembentukan data, transmisi melalui kanal nirkabel, hingga proses penerimaan dan analisis performansi berdasarkan hasil pengujian secara langsung.

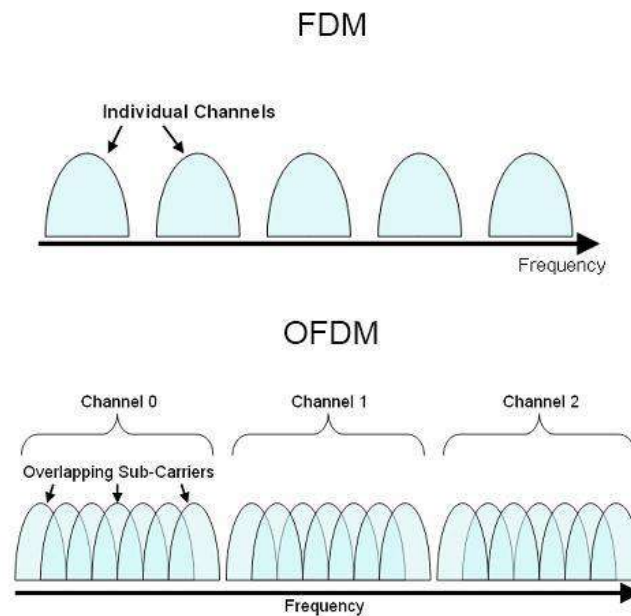
**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

## 2.2 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

### 2.2.1 Pengertian Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) merupakan salah satu teknik modulasi multicarrier yang membagi suatu kanal komunikasi menjadi sejumlah subcarrier yang saling ortogonal sehingga memungkinkan data ditransmisikan secara paralel. Berbeda dengan sistem *single carrier* yang mengirimkan seluruh data melalui satu frekuensi pembawa, OFDM membagi aliran data berkecepatan tinggi menjadi beberapa aliran data dengan kecepatan yang lebih rendah sebelum dipancarkan melalui subcarrier yang berbeda (Kampitakis, 2023). Pendekatan tersebut mampu meningkatkan efisiensi spektrum sekaligus mengurangi pengaruh *Inter Symbol Interference* (ISI) yang disebabkan oleh propagasi multipath pada kanal komunikasi nirkabel.



Gambar 2. 1 Carrier pada OFDM

(Sumber : <https://devopedia.org/images/article/150/9343.1551180817.jpg>)





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Implementasi OFDM pada sistem komunikasi digital umumnya memanfaatkan proses *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) pada sisi pemancar dan *Fast Fourier Transform* (FFT) pada sisi penerima. Penggunaan transformasi Fourier tersebut memungkinkan pembangkitan maupun pemisahan subcarrier dilakukan secara efisien menggunakan algoritma pemrosesan sinyal digital, sehingga kompleksitas implementasi menjadi lebih rendah dibandingkan apabila setiap subcarrier dibangkitkan secara individual.

Selain memiliki efisiensi spektrum yang tinggi, OFDM juga dikenal memiliki ketahanan yang baik terhadap gangguan propagasi multipath. Pada sistem komunikasi nirkabel, sinyal yang dipancarkan sering kali diterima melalui beberapa lintasan propagasi dengan waktu tempuh yang berbeda sehingga menyebabkan terjadinya *delay spread*. Kondisi tersebut berpotensi menimbulkan ISI yang mengakibatkan penurunan kualitas sinyal. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, setiap simbol OFDM dilengkapi dengan *Cyclic Prefix* (CP) yang berfungsi sebagai interval pelindung (*guard interval*) sehingga pengaruh multipath terhadap simbol utama dapat dikurangi secara signifikan.

Karakteristik tersebut menyebabkan OFDM menjadi salah satu teknik modulasi yang banyak diterapkan pada berbagai sistem komunikasi modern, seperti IEEE 802.11 (Wi-Fi), Long Term Evolution (LTE), dan 5G New Radio (NR). Meskipun masing-masing standar memiliki konfigurasi parameter yang berbeda, seluruhnya mengadopsi prinsip dasar OFDM berupa penggunaan subcarrier yang saling ortogonal, proses IFFT/FFT, serta penambahan *Cyclic Prefix* untuk meningkatkan keandalan komunikasi pada kanal nirkabel (Xu & Guo, 2025).

Pada penelitian ini, OFDM digunakan sebagai teknik modulasi utama untuk mentransmisikan data digital berupa gambar, audio, teks, dan dokumen menggunakan perangkat USRP NI-2920 sebagai *transmitter* dan RTL-SDR sebagai

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

*receiver*. Sistem yang dikembangkan mengadopsi prinsip dasar CP-OFDM yang digunakan pada berbagai standar komunikasi modern, namun parameter OFDM yang digunakan disesuaikan dengan kebutuhan implementasi penelitian. Seluruh proses pembangkitan sinyal, modulasi, serta demodulasi dilakukan menggunakan MATLAB, sedangkan proses transmisi sinyal RF dilakukan melalui USRP Hardware Driver (UHD) sehingga sistem mampu merealisasikan komunikasi OFDM menggunakan perangkat SDR.

### 2.2.2 Prinsip Kerja Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Secara umum, proses OFDM diawali dengan pembentukan data digital dari sumber informasi. Data tersebut kemudian dipetakan menjadi simbol kompleks menggunakan teknik modulasi digital, seperti BPSK, QPSK, maupun 16-QAM. Simbol hasil modulasi selanjutnya ditempatkan pada masing-masing subcarrier sesuai dengan konfigurasi sistem OFDM yang digunakan. Setelah seluruh subcarrier terisi, dilakukan proses *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) untuk mengubah representasi sinyal dari domain frekuensi menjadi domain waktu sehingga siap dipancarkan melalui kanal komunikasi.

Sebelum sinyal dipancarkan, setiap simbol OFDM ditambahkan *Cyclic Prefix* (CP), yaitu salinan sebagian sampel pada akhir simbol yang ditempatkan di bagian awal simbol (Garret Magalhaes, 2025). Penambahan CP bertujuan untuk mempertahankan ortogonalitas antar subcarrier ketika sinyal mengalami propagasi multipath serta mengurangi kemungkinan terjadinya ISI. Panjang CP harus disesuaikan dengan karakteristik kanal komunikasi sehingga mampu mengakomodasi *delay* yang terjadi selama proses transmisi.

Pada sisi penerima, sinyal OFDM terlebih dahulu melalui proses sinkronisasi untuk menentukan posisi awal simbol serta mengoreksi pergeseran frekuensi yang muncul selama proses transmisi. Setelah proses sinkronisasi selesai,





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

CP dihilangkan sehingga hanya simbol OFDM utama yang diproses lebih lanjut. Selanjutnya dilakukan proses *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk mengubah sinyal kembali ke domain frekuensi sehingga simbol pada masing-masing subcarrier dapat dipisahkan. Simbol tersebut kemudian didemodulasi sehingga diperoleh kembali data digital yang dikirimkan oleh sisi pemancar.

Keberhasilan proses OFDM sangat dipengaruhi oleh sinkronisasi waktu dan sinkronisasi frekuensi. Kesalahan sinkronisasi dapat menyebabkan hilangnya ortogonalitas antar subcarrier sehingga muncul *Inter Carrier Interference* (ICI) yang mengakibatkan peningkatan nilai *Bit Error Rate* (BER) (Security et al., 2025). Oleh karena itu, sebagian besar sistem OFDM modern memanfaatkan preamble sebagai sinyal pelatihan (*training sequence*) untuk membantu proses deteksi frame, sinkronisasi waktu, serta estimasi *Carrier Frequency Offset* (CFO) sebelum proses demodulasi dilakukan.

### 2.2.3 Struktur Simbol OFDM

Struktur simbol OFDM merupakan susunan elemen-elemen penyusun sinyal OFDM yang dibangkitkan sebelum ditransmisikan melalui kanal komunikasi. Setiap simbol OFDM terdiri atas sejumlah subcarrier yang membawa informasi hasil modulasi digital, seperti BPSK, QPSK, maupun 16-QAM (Sheriff Alimi et al., 2022). Selain subcarrier data, pada implementasi tertentu simbol OFDM juga dapat memuat *pilot subcarrier*, *null subcarrier*, serta *preamble* yang digunakan untuk mendukung proses sinkronisasi dan estimasi kanal pada sisi penerima.

Pada sistem OFDM, aliran data serial terlebih dahulu dikonversi menjadi beberapa aliran paralel (*Serial-to-Parallel Conversion*). Masing-masing aliran data kemudian dipetakan ke dalam subcarrier yang berbeda sehingga seluruh simbol dapat ditransmisikan secara bersamaan dalam satu periode simbol OFDM (Oliveira de Souza et al., 2023). Karena seluruh subcarrier bersifat ortogonal, spektrum



**Hak Cipta:**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

masing-masing subcarrier dapat saling bertumpang tindih tanpa menimbulkan interferensi selama sinkronisasi sistem tetap terjaga.

Pada penelitian ini, struktur simbol OFDM terdiri atas preamble, payload, dan Cyclic Prefix (CP). Payload memuat data digital berupa gambar, audio, teks, maupun dokumen yang telah dimodulasi menggunakan BPSK, QPSK, atau 16-QAM. Seluruh simbol kemudian diproses menggunakan IFFT untuk menghasilkan sinyal pada domain waktu sebelum dikirimkan melalui perangkat USRP NI-2920.

#### **2.2.4 Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) dan Fast Fourier Transform (FFT)**

Transformasi Fourier merupakan dasar utama dalam implementasi OFDM karena digunakan untuk mengubah representasi sinyal antara domain frekuensi dan domain waktu. Pada sisi pemancar digunakan Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) untuk membangkitkan simbol OFDM, sedangkan pada sisi penerima digunakan Fast Fourier Transform (FFT) untuk memisahkan kembali masing-masing subcarrier sehingga data asli dapat direkonstruksi (Oliveira de Souza et al., 2023).

IFFT digunakan untuk mengubah simbol hasil modulasi yang berada pada domain frekuensi menjadi sinyal pada domain waktu. Melalui proses ini, seluruh subcarrier dibangkitkan secara bersamaan sehingga menghasilkan sinyal multicarrier yang tetap mempertahankan sifat ortogonal antar subcarrier. Dibandingkan metode pembangkitan subcarrier secara individual, penggunaan algoritma IFFT memiliki kompleksitas komputasi yang jauh lebih rendah sehingga lebih efisien untuk diimplementasikan pada sistem komunikasi digital modern.

Hasil FFT berupa simbol kompleks yang selanjutnya diproses melalui tahap demodulasi untuk memperoleh kembali bit-bit informasi yang dikirimkan oleh sisi pemancar. Penggunaan pasangan transformasi IFFT dan FFT merupakan salah satu





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

alasan utama mengapa OFDM memiliki kompleksitas implementasi yang relatif rendah. Seluruh proses pembangkitan maupun pemisahan subcarrier dilakukan menggunakan algoritma transformasi Fourier tanpa memerlukan pembangkit frekuensi yang terpisah untuk setiap subcarrier (Jaloudi, 2025). Oleh karena itu, teknik OFDM dapat diterapkan secara efisien pada berbagai sistem komunikasi modern yang memanfaatkan pemrosesan sinyal digital.

## 2.3 Modulasi Digital

### 2.3.1 Binary Phase Shift Keying (BPSK)

Binary Phase Shift Keying (BPSK) merupakan teknik modulasi digital yang menggunakan dua kondisi fase pembawa berbeda untuk merepresentasikan satu bit informasi pada setiap simbol. Pada modulasi ini, perubahan bit dilakukan dengan mengubah fase sinyal pembawa sebesar  $180^\circ$ , sehingga hanya terdapat dua kemungkinan simbol yang dikirimkan (Volgushev & Fokin, 2022). Karena memiliki jumlah titik konstelasi yang paling sedikit, BPSK dikenal sebagai teknik modulasi digital yang paling sederhana dan memiliki ketahanan paling baik terhadap gangguan *noise* dibandingkan modulasi dengan orde yang lebih tinggi.

Konstelasi BPSK terdiri atas dua titik yang terletak pada sumbu *In-phase (I)*, masing-masing mewakili bit biner 0 dan 1. Jarak antar simbol yang relatif besar menyebabkan kemungkinan kesalahan deteksi simbol menjadi lebih kecil, sehingga BPSK mampu menghasilkan nilai BER yang rendah terutama pada kondisi *Signal-to-Noise Ratio (SNR)* yang rendah. Meskipun demikian, karena setiap simbol hanya membawa satu bit informasi, efisiensi spektrum BPSK relatif lebih rendah dibandingkan teknik modulasi lainnya.

Pada penelitian ini, BPSK digunakan sebagai modulasi dengan tingkat kompleksitas paling rendah untuk mengevaluasi performansi sistem OFDM. Hasil pengujian menggunakan BPSK menjadi acuan pembanding terhadap modulasi



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

QPSK dan 16-QAM berdasarkan parameter BER, kualitas data yang diterima, serta performansi sistem pada berbagai variasi jarak transmisi.

### 2.3.2 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) merupakan pengembangan dari modulasi BPSK dengan memanfaatkan empat kondisi fase pembawa yang berbeda sehingga setiap simbol mampu merepresentasikan dua bit informasi. Penggunaan empat titik konstelasi menyebabkan efisiensi spektrum QPSK meningkat dua kali lipat dibandingkan BPSK tanpa memerlukan penambahan bandwidth transmisi. Oleh karena itu, QPSK menjadi salah satu teknik modulasi yang banyak diterapkan pada berbagai sistem komunikasi digital modern.

Konstelasi QPSK terdiri atas empat simbol yang dipisahkan oleh sudut fase sebesar  $90^\circ$ . Setiap simbol mewakili kombinasi dua bit biner, yaitu 00, 01, 11, dan 10. Pada implementasi praktis, pemetaan simbol umumnya menggunakan metode Gray Coding, sehingga dua simbol yang berdekatan hanya berbeda satu bit. Pendekatan tersebut bertujuan mengurangi jumlah kesalahan bit apabila terjadi kesalahan identifikasi simbol pada sisi penerima.

Dibandingkan dengan BPSK, QPSK mampu meningkatkan laju data karena setiap simbol membawa dua bit informasi (Xu & Guo, 2025). Akan tetapi, jarak antar titik konstelasi menjadi lebih kecil sehingga sistem lebih sensitif terhadap gangguan *noise*. Oleh sebab itu, performansi QPSK umumnya berada di antara BPSK dan 16-QAM, baik dari segi efisiensi spektrum maupun ketahanan terhadap gangguan kanal.

### 2.3.3 16-Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM)

16-Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM) merupakan teknik modulasi digital yang mengombinasikan perubahan amplitudo dan fase sinyal





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

pembawa sehingga menghasilkan enam belas titik konstelasi yang berbeda. Setiap simbol pada modulasi 16-QAM mampu merepresentasikan empat bit informasi, sehingga memiliki efisiensi spektrum yang lebih tinggi dibandingkan BPSK maupun QPSK. Karakteristik tersebut menjadikan 16-QAM banyak digunakan pada sistem komunikasi yang membutuhkan laju transmisi data tinggi, seperti Wi-Fi, LTE, dan 5G.

Pada modulasi 16-QAM, informasi dikodekan melalui kombinasi empat level amplitudo pada komponen *In-phase (I)* dan empat level amplitudo pada komponen *Quadrature (Q)* sehingga terbentuk enam belas kombinasi simbol yang berbeda. Karena jumlah titik konstelasi lebih banyak, jarak antar simbol menjadi lebih kecil dibandingkan BPSK maupun QPSK (Manco et al., 2022). Akibatnya, modulasi 16-QAM memiliki sensitivitas yang lebih tinggi terhadap *noise*, kesalahan sinkronisasi, maupun gangguan kanal komunikasi. Meskipun lebih sensitif terhadap gangguan kanal, 16-QAM mampu meningkatkan kapasitas transmisi karena setiap simbol membawa empat bit informasi. Oleh karena itu, modulasi ini lebih sesuai digunakan pada kondisi kanal yang memiliki nilai SNR relatif tinggi sehingga peluang terjadinya kesalahan simbol dapat diminimalkan.

## 2.4 Universal Software Radio Peripheral (USRP)

### 2.4.1 Pengertian Universal Software Radio Peripheral (USRP)

Universal Software Radio Peripheral (USRP) merupakan perangkat SDR yang dirancang untuk merealisasikan berbagai sistem komunikasi digital dengan memanfaatkan kombinasi perangkat keras RF dan perangkat lunak pemrosesan sinyal. Perangkat ini menyediakan fungsi dasar radio berupa pembangkitan sinyal RF, penerimaan sinyal RF, konversi digital-ke-analog (*Digital to Analog Converter* atau DAC), konversi analog-ke-digital (*Analog to Digital Converter* atau ADC), serta pemrosesan sinyal menggunakan *Field Programmable Gate Array*

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

(FPGA)(Dhahbi et al., 2024). Sebagian besar proses pemrosesan sinyal tingkat tinggi, seperti modulasi, demodulasi, sinkronisasi, maupun analisis performansi dilakukan oleh komputer melalui perangkat lunak.



Gambar 2. 2 USRP NI 2920

(Sumber: <https://static-data2.manualslib.com/product-images/177/17668/1766720/200x200.jpg>)

Keunggulan utama USRP terletak pada kemampuannya untuk mendukung berbagai standar komunikasi melalui konfigurasi perangkat lunak. Dengan demikian, satu perangkat USRP dapat digunakan untuk mengimplementasikan berbagai sistem komunikasi digital tanpa memerlukan perubahan perangkat keras. Hal tersebut menjadikan USRP sebagai salah satu platform yang paling banyak digunakan dalam penelitian komunikasi digital berbasis SDR.

#### 2.4.2 Spesifikasi USRP NI-2920

USRP NI-2920 memiliki spesifikasi yang mendukung implementasi sistem komunikasi digital berbasis OFDM. Perangkat ini mampu bekerja pada rentang frekuensi yang luas dengan bandwidth yang dapat dikonfigurasi sesuai kebutuhan penelitian. Selain itu, perangkat dilengkapi dengan FPGA serta antarmuka Gigabit





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Ethernet sehingga mampu mendukung proses transmisi data digital berkecepatan tinggi.

Tabel 2. 1 Spesifikasi USRP NI 2920

| Parameter              | Nilai            |
|------------------------|------------------|
| Perangkat              | NI USRP-2920     |
| Frekuensi Operasi      | 433 MHz          |
| Rentang Frekuensi      | 50 MHz – 2.2 GHz |
| Laju Sampling Maksimum | 50 MS/s          |
| Bandwidth Maksimum     | 40 MHz (8-bit)   |
| Resolusi DAC           | 16-bit           |
| Jumlah Kanal TX        | 2 Channel        |
| Gain TX                | 0–31 dB          |

## 2.5 RTL-Software Defined Radio (RTL-SDR)

### 2.5.1 Pengertian RTL-SDR

RTL-SDR merupakan perangkat SDR berbasis chipset RTL2832U yang mampu menghasilkan sampel IQ digital dari sinyal RF yang diterima antena. Sampel IQ tersebut dapat diolah menggunakan berbagai perangkat lunak sehingga memungkinkan implementasi berbagai aplikasi komunikasi digital, seperti analisis spektrum, penerimaan sinyal satelit, ADS-B, radio amatir, hingga sistem komunikasi berbasis OFDM(Dziembowski et al., 2024). Karena menggunakan perangkat keras yang relatif sederhana, RTL-SDR menjadi salah satu platform SDR yang banyak digunakan untuk kegiatan penelitian dan pembelajaran di bidang komunikasi digital.

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 2. 3 RTL SDR V4

(Sumber: [https://www.rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2023/08/V4\\_sideways.jpg](https://www.rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2023/08/V4_sideways.jpg))

Keunggulan utama RTL-SDR terletak pada kemudahan penggunaan, dukungan komunitas *open-source* yang luas, serta kompatibilitas dengan berbagai sistem operasi dan perangkat lunak pemrosesan sinyal. Selain itu, perangkat ini dapat diintegrasikan dengan MATLAB melalui proses perekaman data IQ menggunakan utilitas eksternal, sehingga hasil penerimaan dapat dianalisis lebih lanjut menggunakan algoritma pemrosesan sinyal digital.

### 2.5.2 Arsitektur RTL-SDR

Secara umum, RTL-SDR terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu antena, RF tuner, RTL2832U, antarmuka USB, serta komputer sebagai perangkat pemrosesan sinyal. RF tuner bertugas memilih frekuensi kerja yang diinginkan serta melakukan proses *down-conversion* sehingga sinyal RF dapat diproses oleh chipset RTL2832U.

Chipset RTL2832U kemudian melakukan proses konversi sinyal menjadi sampel IQ digital sebelum mengirimkannya ke komputer melalui antarmuka USB. Selanjutnya, sampel IQ tersebut diproses menggunakan perangkat lunak untuk





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

melakukan berbagai fungsi komunikasi digital, seperti sinkronisasi, FFT, demodulasi, maupun analisis kualitas sinyal.

Berbeda dengan USRP yang memiliki FPGA untuk pemrosesan sinyal awal, sebagian besar proses pemrosesan pada RTL-SDR dilakukan oleh komputer. Oleh karena itu, kemampuan pemrosesan sangat dipengaruhi oleh spesifikasi komputer yang digunakan serta algoritma yang diimplementasikan pada perangkat lunak.

### 2.5.3 Spesifikasi RTL-SDR

Berikut spesifikasi RTL-SDR yang saat ini kita pakai:

Tabel 2. 2 Spesifikasi RTL SDR V4

| Spesifikasi                   | Nilai                               |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| Rentang Frekuensi             | 24 MHz hingga 1,766 GHz (perkiraan) |
| Resolusi ADC                  | 8 bit                               |
| Laju Sampling Maksimum        | Hingga 3,2 MS/s (bergantung model)  |
| Software yang Didukung        | Berbagai aplikasi SDR               |
| Konektor Antena               | MCX atau SMA (bergantung model)     |
| Catu Daya                     | USB 5 V                             |
| Kompatibilitas Sistem Operasi | Windows, Linux, macOS               |

### 2.6 Software Defined Radio (SDR)

#### 2.6.1 Pengertian Software Defined Radio

Software Defined Radio (SDR) merupakan teknologi sistem komunikasi radio yang mengimplementasikan sebagian besar fungsi pemrosesan sinyal melalui perangkat lunak (software), sehingga mampu menggantikan fungsi-fungsi yang sebelumnya dilakukan oleh perangkat keras (hardware). Pada sistem radio konvensional, proses seperti modulasi, demodulasi, penyaringan sinyal (filtering), pengkodean kanal, hingga sinkronisasi dilakukan menggunakan rangkaian elektronik khusus (Security et al., 2025). Sementara itu, pada SDR sebagian besar



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

proses tersebut dipindahkan ke dalam perangkat lunak sehingga konfigurasi sistem dapat diubah tanpa perlu melakukan modifikasi pada perangkat keras.

Penggunaan SDR memberikan fleksibilitas yang tinggi dalam pengembangan sistem komunikasi digital karena berbagai parameter sistem, seperti frekuensi kerja, bandwidth, teknik modulasi, hingga algoritma pemrosesan sinyal dapat diubah melalui perangkat lunak sesuai kebutuhan. Hal tersebut menjadikan SDR banyak dimanfaatkan dalam bidang penelitian, pendidikan, maupun pengembangan teknologi komunikasi modern karena mampu mempercepat proses implementasi dan pengujian berbagai sistem komunikasi.

Pada penelitian ini, teknologi SDR digunakan sebagai platform utama dalam implementasi sistem komunikasi OFDM. Perangkat NI USRP-2920 digunakan sebagai transmitter untuk membangkitkan dan memancarkan sinyal OFDM, sedangkan RTL-SDR Blog V4 digunakan sebagai receiver untuk menerima sinyal yang dipancarkan. Seluruh proses modulasi, demodulasi, pengkodean, serta evaluasi performa sistem dilakukan menggunakan MATLAB sehingga konfigurasi sistem dapat diubah secara fleksibel tanpa memerlukan perubahan pada perangkat keras.

## 2.6.2 Kelebihan dan Kekurangan Software Defined Radio

Teknologi Software Defined Radio memiliki beberapa kelebihan dibandingkan sistem radio konvensional. Salah satu keunggulan utamanya adalah fleksibilitas dalam melakukan konfigurasi sistem komunikasi karena perubahan parameter dapat dilakukan melalui perangkat lunak tanpa perlu mengganti perangkat keras. Selain itu, SDR mendukung implementasi berbagai teknik modulasi, protokol komunikasi, serta algoritma pemrosesan sinyal menggunakan satu platform yang sama. Kemampuan tersebut menjadikan SDR sangat sesuai digunakan untuk penelitian dan pengembangan sistem komunikasi digital.





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Disamping memiliki berbagai keunggulan, SDR juga memiliki beberapa keterbatasan. Kinerja sistem sangat dipengaruhi oleh kemampuan perangkat keras dan komputer yang digunakan, terutama pada proses pengolahan sinyal secara real-time. Selain itu, implementasi SDR memerlukan sinkronisasi yang baik antara perangkat keras dan perangkat lunak agar proses transmisi dan penerimaan data dapat berlangsung dengan optimal.

Pada penelitian ini, penggunaan SDR memberikan kemudahan dalam melakukan pengujian beberapa jenis modulasi, yaitu BPSK, QPSK, dan 16-QAM menggunakan konfigurasi perangkat yang sama. Hal tersebut memungkinkan proses evaluasi performa sistem dilakukan secara lebih fleksibel serta mempermudah pengembangan sistem komunikasi OFDM berbasis MATLAB.

## 2.7 MATLAB

### 2.7.1 Pengertian MATLAB

MATLAB merupakan perangkat lunak berbasis bahasa pemrograman yang dirancang untuk melakukan komputasi numerik menggunakan operasi matriks sebagai dasar pengolahannya (Hamplová et al., 2025). Selain digunakan untuk perhitungan matematis, MATLAB juga menyediakan fasilitas visualisasi data, pengolahan gambar, pemrosesan sinyal digital, kecerdasan buatan, serta simulasi berbagai sistem teknik.

Keunggulan MATLAB terletak pada kemudahan dalam mengembangkan algoritma, melakukan simulasi, serta mengintegrasikan berbagai toolbox sesuai kebutuhan penelitian. Oleh karena itu, MATLAB banyak digunakan sebagai platform penelitian pada bidang telekomunikasi, pengolahan sinyal digital, kontrol, dan sistem komunikasi modern.



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

### 2.7.2 MATLAB Communications Toolbox

Communications Toolbox merupakan salah satu toolbox pada MATLAB yang menyediakan berbagai fungsi untuk membangun dan menganalisis sistem komunikasi digital. Toolbox ini mendukung implementasi berbagai teknik modulasi digital, pengkodean kanal, pembentukan sinyal OFDM, sinkronisasi, hingga analisis performa komunikasi menggunakan berbagai parameter evaluasi.

Pada penelitian ini, Communications Toolbox dimanfaatkan untuk membangun sistem komunikasi OFDM, mengimplementasikan modulasi BPSK, QPSK, dan 16-QAM, melakukan proses transmisi dan penerimaan data, serta menghitung parameter performa sistem seperti BER, PSNR, SSIM, Audio SNR, STOI, CER, dan WER.

### 2.7.3 MATLAB App Designer

MATLAB App Designer merupakan fasilitas pengembangan Graphical User Interface (GUI) yang disediakan oleh MATLAB untuk membangun aplikasi berbasis antarmuka grafis. App Designer memungkinkan pengguna mengintegrasikan berbagai komponen antarmuka, seperti tombol, menu, grafik, dan panel visualisasi dengan program MATLAB dalam satu aplikasi.

Pada penelitian ini, MATLAB App Designer digunakan untuk membangun GUI Receiver sebagai media visualisasi hasil pengujian. GUI yang dikembangkan mampu menampilkan hasil penerimaan data gambar, audio, dan teks, parameter evaluasi sistem, diagram konstelasi, grafik BER terhadap jarak, serta menyediakan fasilitas untuk mengeksport hasil pengujian ke dalam format CSV yang selanjutnya digunakan pada website monitoring.





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

## 2.8 Parameter Evaluasi

### 2.8.1 Bit Error Rate (BER)

Bit Error Rate (BER) merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur tingkat kesalahan bit yang terjadi selama proses transmisi data (Dahal, 2024). BER dihitung sebagai perbandingan antara jumlah bit yang diterima secara salah terhadap jumlah seluruh bit yang dikirimkan.

Rumus BER ditunjukkan pada Persamaan berikut

$$BER = \frac{N_{error}}{N_{total}}$$

Rumus 2. 1 BER

Semakin kecil nilai BER, maka semakin baik kualitas sistem komunikasi. Nilai BER sebesar 0 menunjukkan bahwa seluruh data berhasil diterima tanpa kesalahan.

### 2.8.2 Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)

Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas gambar hasil penerimaan dengan membandingkan gambar asli terhadap gambar hasil rekonstruksi (Horé & Ziou, 2023). Nilai PSNR dinyatakan dalam satuan desibel (dB).

Rumus PSNR ditunjukkan pada Persamaan berikut

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j) - K(i,j)]^2$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{MAX^2}{MSE} \right)$$

Rumus 2. 2 PSNR

Semakin besar nilai PSNR menunjukkan bahwa kualitas gambar semakin baik.

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

### 2.8.3 Structural Similarity Index Measure (SSIM)

Structural Similarity Index Measure (SSIM) merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur tingkat kemiripan struktur antara gambar asli dan gambar hasil penerimaan(Horé & Ziou, 2023).

Nilai SSIM berada pada rentang 0 sampai 1.

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}$$

Rumus 2. 3 SSIM

Semakin mendekati 1 menunjukkan bahwa gambar hasil penerimaan semakin mirip dengan gambar asli.

### 2.8.4 Audio Signal-to-Noise Ratio (Audio SNR)

Audio Signal-to-Noise Ratio (Audio SNR) merupakan parameter yang digunakan untuk membandingkan daya sinyal audio terhadap daya noise yang muncul selama proses transmisi(Horé & Ziou, 2023).

Rumus Audio SNR ditunjukkan pada Persamaan berikut

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right)$$

Rumus 2. 4 Audio SNR

Semakin besar nilai Audio SNR menunjukkan kualitas audio yang semakin baik.

### 2.8.5 Short-Time Objective Intelligibility (STOI)

Short-Time Objective Intelligibility (STOI) merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur tingkat keterpahaman suara setelah proses transmisi(Rai et al., 2024).

$$STOI = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N d_j$$

Rumus 2. 5 STOI





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Data dapat dikatakan bagus jika nilai STOI mendekati 1.

### 2.8.6 Character Error Rate (CER)

Character Error Rate (CER) digunakan untuk mengukur tingkat kesalahan karakter pada data teks hasil penerimaan(Rai et al., 2024).

Rumus CER ditunjukkan pada Persamaan berikut

$$CER = \frac{S + D + I}{N}$$

Rumus 2. 6 CER

Semakin kecil nilai CER menunjukkan kualitas data teks yang semakin baik.

### 2.8.7 Word Error Rate (WER)

Word Error Rate (WER) merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur tingkat kesalahan kata pada data teks hasil penerimaan(Michailidis et al., 2024).

Rumus WER ditunjukkan pada Persamaan berikut

$$WER = \frac{S + D + I}{N}$$

Rumus 2. 7 WER

Semakin kecil nilai WER menunjukkan bahwa data teks hasil penerimaan semakin mendekati data asli.



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

## **BAB III**

### **PERENCANAAN DAN REALISASI**

#### **3.1 Rancangan Alat**

##### **A. Deskripsi Alat**

Sistem yang dirancang merupakan sistem komunikasi digital berbasis Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) yang diimplementasikan menggunakan konsep Software Defined Radio (SDR). Sistem menggunakan perangkat NI USRP-2920 sebagai transmitter dan RTL-SDR Blog V4 sebagai receiver yang beroperasi pada frekuensi 433 MHz. Proses pembangkitan dan pemrosesan sinyal dilakukan menggunakan MATLAB, sedangkan proses transmisi dan penerimaan sinyal memanfaatkan USRP Hardware Driver (UHD) serta utility rtl\_sdr.exe sehingga tidak memerlukan MATLAB Hardware Support Package.

Sistem dirancang untuk mentransmisikan tiga jenis data, yaitu gambar, audio, dan file teks. Pengguna memilih jenis modulasi yang akan digunakan, yaitu BPSK, QPSK, atau 16-QAM, kemudian memilih file yang akan dikirim melalui Graphical User Interface (GUI) pada sisi transmitter. File yang dipilih selanjutnya dikonversi menjadi deretan bit (bitstream) sebagai data masukan pada sistem OFDM.

Bitstream kemudian dipetakan menjadi simbol sesuai dengan modulasi yang dipilih menggunakan Gray Mapping. Simbol hasil modulasi diproses pada blok OFDM yang meliputi pembentukan simbol OFDM, proses Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) berukuran 64 titik, serta penambahan Cyclic Prefix (CP) sepanjang 16 sampel. Sampel kompleks I dan Q yang dihasilkan disimpan dalam format .fc32 dan dipancarkan menggunakan perangkat NI USRP-2920 melalui utilitas tx\_samples\_from\_file pada frekuensi kerja 433 MHz.





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Pada sisi receiver, sinyal diterima menggunakan RTL-SDR Blog V4 dan direkam dalam bentuk data IQ menggunakan utilitas rtl\_sdr.exe. Data hasil perekaman selanjutnya diproses di MATLAB melalui tahapan sinkronisasi frame, estimasi dan koreksi Carrier Frequency Offset (CFO), penghapusan Cyclic Prefix (CP), proses Fast Fourier Transform (FFT), serta demodulasi sesuai modulasi yang digunakan hingga diperoleh kembali data asli.

Seluruh hasil pengujian ditampilkan melalui GUI pada sisi receiver sebagai media monitoring dan analisis performa sistem. GUI menampilkan informasi file yang diterima, jenis modulasi, ukuran data, jumlah frame OFDM, waktu transmisi, throughput, serta parameter evaluasi sesuai jenis data yang dikirim. Untuk data gambar ditampilkan nilai Bit Error Rate (BER), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), dan Structural Similarity Index Measure (SSIM). Untuk data audio ditampilkan BER, Audio Signal-to-Noise Ratio (Audio SNR), dan Short-Time Objective Intelligibility (STOI). Sementara untuk data teks ditampilkan BER, Character Error Rate (CER), dan Word Error Rate (WER). Selain itu, GUI juga menampilkan diagram konstelasi simbol, spektrum sinyal, serta hasil rekonstruksi data sehingga kualitas proses transmisi dapat diamati secara langsung.

## **B. Cara Kerja Alat**

Secara umum sistem bekerja melalui tahapan berikut.

1. Pengguna memilih mode transmisi berupa BPSK, QPSK, 16QAM, atau Adaptive melalui GUI transmitter.
2. Pengguna memilih file yang akan dikirim menggunakan fasilitas browse file. Sistem mendukung pengiriman data berupa gambar, audio, dan file teks (.txt).
3. Sistem membaca file yang dipilih, menghitung ukuran berkas, payload bit, total bit, serta jumlah frame OFDM yang akan dibangkitkan.



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4. Bitstream hasil konversi ditambahkan CRC-16 sebagai mekanisme pendeteksian kesalahan, kemudian diproses menggunakan Forward Error Correction (FEC) Repetition Code untuk meningkatkan keandalan transmisi.
5. Apabila pengguna memilih mode Adaptive, transmitter terlebih dahulu membangkitkan dan mengirimkan paket uji (test packet) menggunakan modulasi BPSK.
6. Receiver menerima paket uji, menghitung nilai BER, kemudian mengirimkan hasil pengukuran tersebut kepada transmitter melalui komunikasi TCP sebagai kanal kontrol.
7. Data utama dipetakan menjadi simbol modulasi menggunakan Gray Mapping sesuai modulasi yang dipilih.
8. Simbol dibentuk menjadi frame OFDM menggunakan IFFT 64 titik, ditambahkan empat subcarrier pilot, 48 subcarrier data, serta Cyclic Prefix sepanjang 16 sampel.
9. Sampel kompleks IQ hasil modulasi disimpan dalam format .fc32, kemudian dipancarkan menggunakan NI USRP-2920 melalui utilitas `tx_samples_from_file`.
10. RTL-SDR Blog V4 menerima sinyal RF pada frekuensi 433 MHz dan merekam data IQ menjadi file .bin menggunakan utilitas `rtl_sdr.exe`.
11. MATLAB membaca data IQ hasil perekaman, melakukan sinkronisasi waktu dan frekuensi, menghilangkan Cyclic Prefix, melakukan FFT, demodulasi, decode FEC, pemeriksaan CRC, dan merekonstruksi data menjadi file hasil penerimaan.
12. Sistem menghitung parameter performansi berupa BER, throughput, waktu transmisi, serta parameter kualitas sesuai jenis data, yaitu PSNR dan SSIM untuk gambar, Audio-SNR dan STOI untuk audio, serta CER dan WER untuk data teks.





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

13. Seluruh hasil pengujian ditampilkan pada GUI receiver dalam bentuk informasi file, parameter performansi, diagram konstelasi, perbandingan data transmisi dan penerimaan, serta grafik BER terhadap jarak pengujian. Data hasil pengujian juga disimpan secara otomatis ke dalam file CSV untuk proses analisis.

**C. Spesifikasi Alat**

Spesifikasi alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi perangkat keras (hardware) dan perangkat lunak (software) yang mendukung proses implementasi sistem komunikasi OFDM berbasis Software Defined Radio (SDR). Spesifikasi tersebut ditampilkan pada Tabel berikut:

**A. Spesifikasi Software**

*Tabel 3. 1 Spesifikasi Software*

| Komponen                   | Fungsi                         |
|----------------------------|--------------------------------|
| MATLAB                     | Pemrosesan sinyal OFDM dan GUI |
| UHD (USRP Hardware Driver) | Pengiriman sample ke USRP      |
| GUI App Designer           | Pengembangan GUI               |

**B. Spesifikasi Hardware**

*Tabel 3. 2 Spesifikasi Hardware*

| Komponen    | Spesifikasi    |
|-------------|----------------|
| Transmitter | USRP NI-2920   |
| Receiver    | RTL SDR V4     |
| Antena      | Antena 433 Mhz |

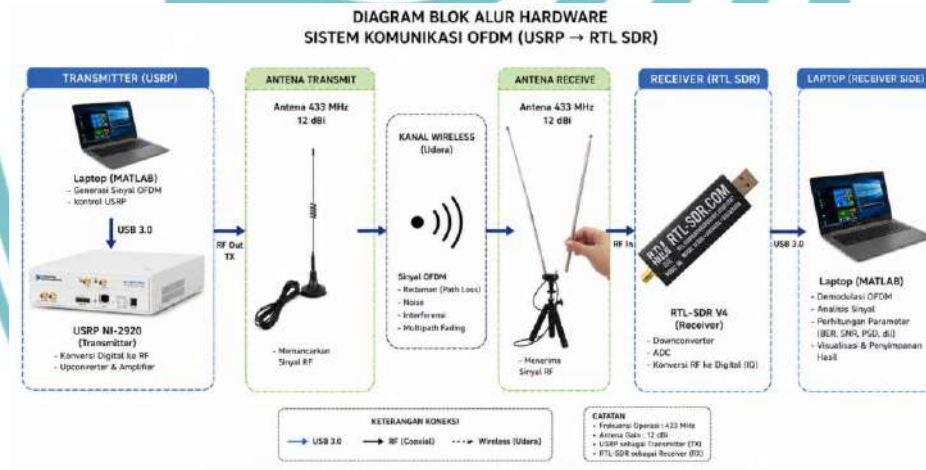
### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

|             |                   |
|-------------|-------------------|
| Komputer TX | Laptop Lenovo V15 |
| Komputer RX | Laptop HP 14s     |

### D. Diagram Blok

Dibawah ini merupakan diagram blok sistem yang menggambarkan alur kerja komunikasi OFDM yang dimulai dari input data berupa file gambar atau audio yang dikonversi menjadi bit, kemudian dimodulasi menggunakan berbagai skema modulasi dan diproses dengan teknik OFDM sebelum dikirim melalui USRP sebagai transmitter. Sinyal yang ditransmisikan diterima oleh RTL-SDR sebagai receiver, kemudian diproses kembali melalui tahapan demodulasi dan rekonstruksi data hingga diperoleh kembali data asli.



Gambar 3. 1 Diagram Blok Sistem

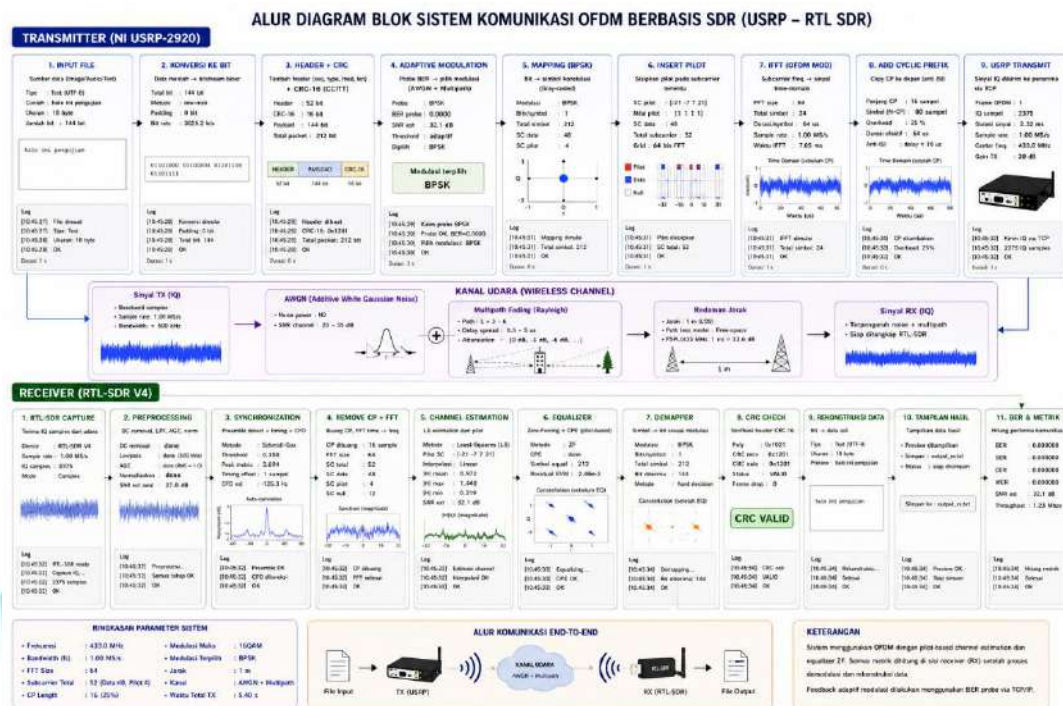
### E. Rancangan Sistem OFDM

Rancangan sistem OFDM yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar dibawah ini.



## Hak Cipta:

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3. 2 Rancangan Sistem

Sistem komunikasi pada penelitian ini dirancang menggunakan metode Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) yang diimplementasikan pada perangkat Software Defined Radio (SDR). Sistem menggunakan NI USRP-2920 sebagai transmitter dan RTL-SDR Blog V4 sebagai receiver yang beroperasi pada frekuensi 433 MHz. Sistem dirancang untuk mentransmisikan tiga jenis data, yaitu gambar, audio, dan file teks melalui media komunikasi nirkabel dengan menyediakan dua mode transmisi, yaitu Fixed dan Adaptive.

Pada sisi transmitter, pengguna terlebih dahulu memilih jenis data, mode modulasi, jarak pengujian, serta data yang akan dikirim melalui antarmuka GUI. Data masukan kemudian dikonversi menjadi bitstream biner (source encoding). Selanjutnya sistem membentuk paket data dengan menambahkan header yang berisi informasi pengiriman serta Cyclic Redundancy Check (CRC-16) sebagai mekanisme pendeteksian kesalahan. Pada mode Adaptive, transmitter terlebih



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

dahulu mengirimkan probe packet menggunakan modulasi BPSK untuk mengestimasi kualitas kanal. Receiver kemudian mengestimasi kualitas kanal berdasarkan sinyal yang diterima dan mengirimkan hasil estimasi tersebut kembali ke transmitter melalui komunikasi TCP/IP. Berdasarkan hasil estimasi tersebut, transmitter secara otomatis memilih modulasi yang paling sesuai, yaitu BPSK, QPSK, atau 16-QAM. Pada mode Fixed, jenis modulasi ditentukan langsung oleh pengguna tanpa melalui proses adaptasi.

Bitstream selanjutnya dipetakan menjadi simbol modulasi menggunakan Gray Mapping, kemudian disusun ke dalam subcarrier OFDM dengan menyisipkan pilot pada posisi subcarrier yang telah ditentukan untuk keperluan estimasi kanal. Simbol OFDM kemudian dibentuk melalui proses Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) berukuran 64 titik, dilanjutkan dengan penambahan Cyclic Prefix (CP) sepanjang 16 sampel untuk mengurangi pengaruh Inter Symbol Interference (ISI). Sampel kompleks In-phase (I) dan Quadrature (Q) yang dihasilkan selanjutnya dipancarkan menggunakan perangkat NI USRP-2920 melalui kanal komunikasi nirkabel yang dipengaruhi oleh Additive White Gaussian Noise (AWGN) dan multipath fading.

Pada sisi receiver, sinyal diterima menggunakan RTL-SDR Blog V4 dalam bentuk sampel IQ (In-phase dan Quadrature). Selanjutnya dilakukan sinkronisasi yang mencakup deteksi preamble, sinkronisasi waktu (timing synchronization), serta estimasi dan koreksi Carrier Frequency Offset (CFO). Setelah sinkronisasi berhasil, Cyclic Prefix (CP) dihilangkan, kemudian dilakukan proses Fast Fourier Transform (FFT) untuk mengembalikan sinyal ke domain frekuensi. Tahap berikutnya adalah Channel Estimation menggunakan simbol pilot dan proses Equalizer berbasis Zero-Forcing (ZF) untuk mengurangi pengaruh distorsi kanal sebelum dilakukan demapping simbol menjadi bitstream. Bitstream hasil demapping kemudian diverifikasi menggunakan CRC-16 untuk memastikan





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

integritas data sebelum direkonstruksi kembali menjadi file asli berupa gambar, audio, atau teks.

Setelah proses rekonstruksi selesai, sistem melakukan evaluasi performa komunikasi pada sisi receiver. Parameter evaluasi yang dihitung disesuaikan dengan jenis data yang dikirim. Untuk seluruh jenis data dihitung Bit Error Rate (BER), Signal-to-Noise Ratio (SNR), dan throughput. Untuk data gambar dihitung Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) dan Structural Similarity Index Measure (SSIM). Untuk data audio dihitung Short-Time Objective Intelligibility (STOI), sedangkan untuk data teks dihitung Character Error Rate (CER) dan Word Error Rate (WER). Seluruh hasil evaluasi ditampilkan pada GUI receiver sebagai indikator kualitas sistem komunikasi OFDM berbasis SDR yang telah dirancang.

#### **F. Rancangan GUI Receiver**

GUI Receiver dirancang menggunakan MATLAB App Designer sebagai antarmuka utama untuk melakukan proses penerimaan, pengolahan, dan analisis hasil transmisi secara terintegrasi. GUI dikembangkan agar pengguna dapat melakukan proses decoding, menampilkan hasil penerimaan, serta menganalisis performa sistem komunikasi OFDM secara lebih mudah melalui satu tampilan.

GUI menyediakan fasilitas penyaringan data berdasarkan jenis modulasi, jenis data, dan jarak pengujian. Setelah proses decoding selesai, GUI menampilkan informasi berkas yang meliputi nama file, ukuran berkas, payload bit, total bit, jumlah frame OFDM, waktu transmisi, throughput efektif, efisiensi frame, modulasi yang digunakan, dan jarak pengujian.

Sebagai media analisis performa, GUI menampilkan parameter evaluasi sesuai dengan jenis data yang diterima, yaitu BER untuk seluruh jenis data, PSNR dan SSIM untuk gambar, Audio-SNR dan STOI untuk audio, serta CER dan WER

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

untuk data teks. Selain itu, GUI juga menampilkan perbandingan data hasil transmisi dan penerimaan, diagram konstelasi sinyal hasil demodulasi, serta grafik hubungan BER terhadap jarak pengujian sehingga pengguna dapat melakukan analisis kualitas sistem komunikasi secara lebih komprehensif.

*Tabel 3. 3 Rancangan GUI*

| Komponen            | Fungsi                                                            |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Dropdown Modulasi   | Memilih modulasi BPSK, QPSK, atau 16-QAM.                         |
| Dropdown Jenis Data | Memilih data gambar, audio, atau teks.                            |
| Dropdown Jarak      | Memilih variasi jarak pengujian.                                  |
| Tombol Decode       | Menjalankan proses decoding data hasil penerimaan.                |
| Tombol Export CSV   | Menyimpan hasil pengujian ke file CSV.                            |
| Panel Parameter     | Menampilkan nilai BER, PSNR, SSIM, Audio SNR, STOI, CER, dan WER. |
| Diagram Konstelasi  | Menampilkan sebaran simbol hasil demodulasi.                      |
| Grafik BER          | Menampilkan hubungan nilai BER terhadap jarak.                    |

### 3.2 Realisasi Alat

#### A. Realisasi Sistem OFDM

Realisasi sistem dilakukan menggunakan beberapa modul program yang dipisahkan berdasarkan fungsi transmitter, receiver, dan fungsi umum (common). Seluruh algoritma OFDM, meliputi pembentukan paket data, modulasi, penyisipan pilot, pembentukan simbol OFDM, sinkronisasi, estimasi kanal, equalisasi, demodulasi, rekonstruksi data, serta perhitungan metrik performa direalisasikan





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

menggunakan MATLAB tanpa memanfaatkan MATLAB Hardware Support Package. Pemisahan modul tersebut bertujuan agar struktur program lebih terorganisasi dan sesuai dengan alur kerja sistem yang dirancang.

Pada sisi transmitter, data yang dipilih pengguna diproses melalui tahapan konversi menjadi bitstream, penambahan header dan CRC, pemilihan modulasi, pemetaan simbol, penyisipan pilot, proses Inverse Fast Fourier Transform (IFFT), serta penambahan Cyclic Prefix (CP). Sampel kompleks In-phase (I) dan Quadrature (Q) hasil modulasi OFDM kemudian dikirimkan menuju receiver menggunakan komunikasi TCP/IP sebagai representasi proses transmisi melalui kanal komunikasi nirkabel.

Pada sisi receiver, data IQ yang diterima diproses secara berurutan melalui tahapan pre-processing, sinkronisasi, penghapusan Cyclic Prefix (CP), Fast Fourier Transform (FFT), Channel Estimation, Equalizer, demapping simbol, pemeriksaan CRC, dan rekonstruksi data hingga diperoleh kembali file asli. Setelah proses rekonstruksi selesai, sistem menghitung parameter performa komunikasi sesuai dengan jenis data yang dikirim, kemudian menampilkan seluruh hasil proses dan metrik evaluasi pada GUI receiver.

## **B. Implementasi Jenis Data**

Sistem mendukung tiga kategori data, yaitu:

### **1. Data gambar**

File gambar dikonversi menjadi bitstream dan direkonstruksi kembali pada sisi penerima. Kualitas hasil transmisi dianalisis menggunakan parameter BER, PSNR, dan SSIM.



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2. Data audio

File audio direpresentasikan dalam bentuk bit, kemudian dikembalikan menjadi sinyal audio pada sisi receiver. Evaluasi dilakukan menggunakan BER, Audio-SNR, dan STOI.

3. Data teks dan dokumen

File .txt maupun .doc/.docx diperlakukan sebagai data byte sehingga dapat ditransmisikan melalui sistem OFDM. Untuk file teks dan dokumen ini digunakan parameter BER, Character Error Rate (CER), dan Word Error Rate (WER).

**C. Realisasi GUI Receiver**

1. Tujuan Pembuatan GUI Receiver

GUI (Graphical User Interface) Receiver merupakan antarmuka utama yang dikembangkan untuk mempermudah proses penerimaan, pengolahan, dan analisis sinyal pada sistem komunikasi Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) berbasis Software Defined Radio (SDR). Sebelum GUI dikembangkan, seluruh proses pengujian dilakukan melalui Command Window MATLAB dengan menjalankan setiap file program secara manual. Metode tersebut kurang efisien karena pengguna harus mengingat urutan eksekusi program serta melakukan analisis hasil secara terpisah.

Pengembangan GUI Receiver bertujuan untuk mengintegrasikan seluruh proses penerimaan sinyal ke dalam satu aplikasi yang mudah dioperasikan. Melalui GUI ini, pengguna dapat melakukan proses decoding sinyal hasil penerimaan, memilih jenis modulasi, menampilkan diagram konstelasi, memutar sinyal audio hasil transmisi, serta melihat berbagai parameter evaluasi sistem komunikasi secara otomatis. Parameter yang ditampilkan meliputi Bit Error Rate (BER), Peak Signal-





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

to-Noise Ratio (PSNR), Structural Similarity Index Measure (SSIM), Audio Signal-to-Noise Ratio (Audio-SNR), Short-Time Objective Intelligibility (STOI), Character Error Rate (CER), dan Word Error Rate (WER).

Selain sebagai media pengoperasian sistem, GUI juga berfungsi sebagai media visualisasi hasil pengujian sehingga pengguna dapat mengevaluasi performa komunikasi OFDM secara langsung tanpa harus membuka setiap script MATLAB secara terpisah. Dengan adanya GUI Receiver, proses pengujian menjadi lebih terstruktur, waktu analisis menjadi lebih singkat, dan hasil pengujian lebih mudah didokumentasikan untuk keperluan penelitian.

## 2. Struktur Program MATLAB

Program GUI Receiver dibangun menggunakan MATLAB dengan pendekatan modular, yakni setiap fungsi utama dipisahkan ke dalam file (.m) yang memiliki tugas tertentu sehingga proses pengembangan maupun pemeliharaan program menjadi lebih mudah dilakukan. Seluruh file tersebut saling terhubung untuk membentuk sistem komunikasi OFDM yang lengkap mulai dari proses pembangkitan sinyal, transmisi, penerimaan, decoding, hingga visualisasi hasil pengujian.

### 1. Struktur Folder Program

Direktori utama program MATLAB terdiri atas beberapa file utama dan folder pendukung yang digunakan untuk mengimplementasikan sistem komunikasi OFDM berbasis SDR. Struktur direktori program ditunjukkan sebagai berikut.

```
|
├── TX_GUI.m
├── RX_GUI_TCP.m
├── README.md
└── ofdmlib.m
```



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
|
|   └─ common/
|   |   └─ config.m
|   |   └─ crc16.m
|   |   └─ utils.m
|   |   └─ ...
|   └─ tx/
|       └─ tx_bitstream.m
|       └─ tx_packetizer.m
|       └─ tx_mapper.m
|       └─ tx_insert_pilot.m
|       └─ tx_ofdm_modulator.m
|       └─ tx_add_cp.m
|       └─ ...
|   └─ rx/
|       └─ rx_capture.m
|       └─ rx_preprocess.m
|       └─ rx_sync.m
|       └─ rx_channel_est.m
|       └─ rx_equalizer.m
|       └─ rx_demapper.m
|       └─ rx_reconstruct.m
|       └─ rx_metrics.m
|       └─ ...
|   └─ data/
|   └─ captures/
|   └─ results/
```

Folder tx berisi seluruh fungsi yang digunakan pada sisi transmitter, mulai dari pembentukan bitstream hingga pembentukan simbol OFDM sebelum proses





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

transmisi. Folder rx berisi seluruh fungsi pada sisi receiver, meliputi akuisisi data, pre-processing, sinkronisasi, estimasi kanal, equalisasi, demodulasi, rekonstruksi data, dan evaluasi performa sistem. Folder common berisi fungsi-fungsi umum yang digunakan bersama oleh transmitter dan receiver, seperti konfigurasi sistem, utilitas, serta perhitungan CRC. Folder data digunakan untuk menyimpan file masukan yang akan ditransmisikan, folder captures digunakan untuk menyimpan data hasil penerimaan selama proses pengujian, sedangkan folder results digunakan untuk menyimpan hasil rekonstruksi data, grafik, diagram konstelasi, dan hasil evaluasi sistem.

2. Struktur File Program

Setiap file pada sistem memiliki fungsi yang berbeda sesuai dengan proses komunikasi OFDM yang dijalankan. Hubungan antar file tersebut ditunjukkan pada Tabel berikut

Tabel 3. 4 Struktur Program Matlab

| Nama File       | Fungsi                                                                                                                                                                                       |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TX_GUI.m        | Menyediakan antarmuka GUI pada sisi transmitter, mengelola pemilihan data, konfigurasi sistem, serta menjalankan seluruh proses transmisi OFDM.                                              |
| RX_GUI_TCP.m    | Menyediakan antarmuka GUI pada sisi receiver, menerima data, menjalankan proses penerimaan OFDM, dan menampilkan hasil rekonstruksi serta parameter evaluasi.                                |
| common/config.m | Menyimpan parameter utama sistem OFDM, seperti ukuran FFT, panjang Cyclic Prefix, posisi pilot, frekuensi kerja, dan parameter komunikasi lainnya.                                           |
| common/crc16.m  | Melakukan pembangkitan dan pemeriksaan Cyclic Redundancy Check (CRC-16) untuk mendeteksi kesalahan data.                                                                                     |
| tx/             | Berisi fungsi-fungsi pada sisi transmitter, meliputi konversi data menjadi bitstream, pembentukan paket, pemetaan simbol, penyisipan pilot, pembentukan simbol OFDM, serta proses transmisi. |
| rx/             | Berisi fungsi-fungsi pada sisi receiver, meliputi akuisisi data,                                                                                                                             |

### Hak Cipta :

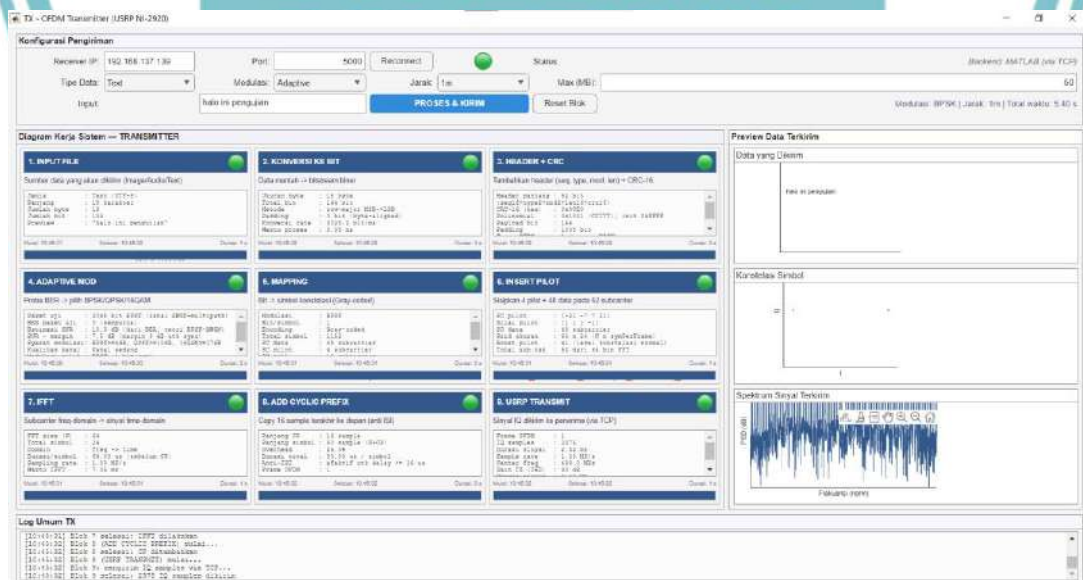
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

| Nama File | Fungsi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ofdmlib.m | pre-processing, sinkronisasi, penghapusan Cyclic Prefix, FFT, Channel Estimation, Equalizer, demapping, rekonstruksi data, dan perhitungan parameter evaluasi.<br>Befungsi sebagai wrapper atau kompatibilitas terhadap pemanggilan fungsi lama sehingga tetap dapat digunakan tanpa mengubah keseluruhan struktur program yang telah ada. |

## 3. Antarmuka GUI

### 1. Tampilan Halaman GUI

Tampilan utama GUI Receiver dirancang sebagai pusat kendali seluruh proses penerimaan sinyal OFDM. Seluruh parameter pengujian, visualisasi sinyal, dan hasil evaluasi ditampilkan pada satu jendela sehingga pengguna tidak perlu membuka beberapa program secara terpisah. Desain antarmuka dibuat sederhana agar mudah dipahami serta mempermudah proses pengoperasian sistem selama pengujian berlangsung.



Gambar 3. 3 Realisasi GUI

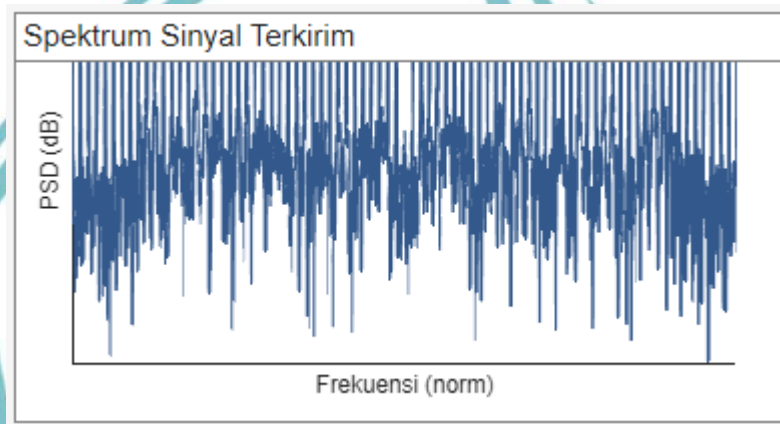


**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2. Spektrum Sinyal

Panel visualisasi digunakan untuk menampilkan spektrum sinyal OFDM yang akan ditransmisikan dalam bentuk Power Spectral Density (PSD) terhadap frekuensi ternormalisasi. Visualisasi ini digunakan untuk mengamati distribusi daya sinyal pada setiap subcarrier OFDM sehingga pengguna dapat memverifikasi bahwa sinyal telah terbentuk dengan benar.



Gambar 3. 4 Spektrum Sinyal

3. Panel Parameter Evaluasi

Panel ini menampilkan seluruh parameter evaluasi yang digunakan dalam penelitian. Parameter tersebut meliputi BER untuk mengevaluasi kesalahan bit, PSNR dan SSIM untuk mengevaluasi kualitas gambar, Audio-SNR dan STOI untuk mengevaluasi kualitas audio, serta CER dan WER untuk mengevaluasi akurasi data teks. Seluruh parameter diperbarui secara otomatis setelah proses decoding selesai dilakukan sehingga pengguna dapat langsung mengetahui performa sistem komunikasi OFDM.

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

| 11. BER & METRIK                            |                |
|---------------------------------------------|----------------|
| BER, PSNR, SSIM, STOI, CER, WER, Throughput |                |
| BER                                         | : 0 (sempurna) |
| SER                                         | : 0.0000       |
| CER                                         | : 0.000        |
| WER                                         | : 0.000        |
| SNR estimate                                | : 22.1 dB      |

Gambar 3. 5 Parameter

| Ringkasan Metrik Evaluasi (dari RX) |          |            |            |             |            |          |          |
|-------------------------------------|----------|------------|------------|-------------|------------|----------|----------|
| BER                                 | SER      | PSNR       | SSIM       | SNR         | STOI       | CER      | WER      |
| Sempurna                            | Sempurna | [Unit: dB] | [Unit: dB] | Sangat Baik | [Unit: dB] | Sempurna | Sempurna |

Gambar 3. 6 Ringkasan Metrik Evaluasi

## 4. Alur Kerja GUI Receiver

### 1. Inisialisasi Program

GUI dijalankan dengan mengeksekusi file RX\_GUI\_TCP.m. Pada tahap ini sistem membentuk seluruh komponen antarmuka, seperti tombol kontrol, panel proses, panel visualisasi, area hasil rekonstruksi data, serta panel metrik evaluasi. Selain itu, sistem juga melakukan inisialisasi parameter komunikasi dan konfigurasi penerimaan yang digunakan selama proses decoding.

### 2. Penerimaan Data

Setelah GUI dijalankan, receiver menerima data hasil transmisi dari transmitter. Data yang diterima berupa sampel IQ (In-phase dan Quadrature) yang selanjutnya diproses sebagai masukan pada tahapan penerimaan OFDM.





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

### 3. Proses Penerimaan OFDM

Data IQ diproses secara bertahap melalui proses pre-processing yang meliputi penghilangan komponen DC (DC removal), Low Pass Filter (LPF), Automatic Gain Control (AGC), dan normalisasi sinyal. Selanjutnya dilakukan proses sinkronisasi, penghapusan Cyclic Prefix (CP), Fast Fourier Transform (FFT), Channel Estimation menggunakan simbol pilot, Equalizer, demapping simbol, pemeriksaan Cyclic Redundancy Check (CRC-16), hingga rekonstruksi data menjadi file asli berupa gambar, audio, atau teks.

### 4. Perhitungan Parameter Evaluasi

Setelah proses rekonstruksi selesai, sistem menghitung parameter performa komunikasi sesuai dengan jenis data yang diterima. Parameter yang dihitung meliputi Bit Error Rate (BER), Signal-to-Noise Ratio (SNR), dan throughput. Untuk data gambar dihitung Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) dan Structural Similarity Index Measure (SSIM), untuk data audio dihitung Short-Time Objective Intelligibility (STOI), sedangkan untuk data teks dihitung Character Error Rate (CER) dan Word Error Rate (WER).

### 5. Visualisasi Hasil

Hasil proses penerimaan ditampilkan pada GUI receiver melalui panel visualisasi dan panel metrik. Panel visualisasi menampilkan diagram konstelasi hasil equalisasi serta hasil rekonstruksi data sesuai dengan jenis file yang diterima. Sementara itu, panel metrik menampilkan nilai parameter evaluasi yang telah dihitung sehingga pengguna dapat mengevaluasi kualitas sistem komunikasi OFDM secara langsung.



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

## 5. Implementasi Program GUI Receiver

### 1. Implementasi RX\_GUI\_TCP.m

File RX\_GUI\_TCP.m merupakan program utama yang digunakan untuk membangun antarmuka Graphical User Interface (GUI) pada sisi receiver. Program ini berfungsi sebagai pusat kendali seluruh proses penerimaan data pada sistem komunikasi OFDM berbasis Software Defined Radio. Melalui GUI ini, pengguna dapat melakukan proses penerimaan data dari transmitter, menjalankan proses decoding, menampilkan hasil rekonstruksi, serta melihat parameter evaluasi sistem secara langsung. Selain itu, GUI juga menyediakan visualisasi setiap tahapan proses receiver sehingga memudahkan pengguna dalam memantau proses penerimaan data.

Proses implementasi diawali dengan melakukan inisialisasi direktori kerja dan konfigurasi sistem. Potongan program berikut menunjukkan proses tersebut.

```
setup_paths();

server = [];
pollTimer = [];
c = ofdm_config();

blk = struct();
metricCards = struct();

recvState = 'HEADER';
headerBuf = uint8([]);
metaBuf = uint8([]);
iqBuf = [];
```





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Potongan program di atas digunakan untuk melakukan inisialisasi seluruh komponen yang diperlukan oleh GUI receiver. Fungsi `setup_paths()` digunakan untuk menambahkan seluruh folder program ke dalam MATLAB Path sehingga seluruh modul pada folder common, tx, dan rx dapat dipanggil tanpa menentukan lokasi file secara manual. Selanjutnya fungsi `ofdm_config()` digunakan untuk memuat parameter konfigurasi sistem OFDM, seperti ukuran FFT, panjang Cyclic Prefix (CP), posisi pilot, frekuensi kerja, dan parameter komunikasi lainnya.

Variabel server digunakan untuk menyimpan objek komunikasi TCP/IP, sedangkan `pollTimer` digunakan untuk melakukan pemantauan data yang diterima secara berkala. Variabel `recvState`, `headerBuf`, `metaBuf`, dan `iqBuf` digunakan untuk mengelola proses penerimaan paket data secara bertahap mulai dari pembacaan header hingga penerimaan sampel IQ. Setelah proses inisialisasi selesai, program membangun seluruh komponen antarmuka GUI menggunakan objek `uifigure`, `uipanel`, dan `uigriddlayout`.

## 2. Implementasi Modul Receiver

Proses utama penerimaan sinyal OFDM tidak lagi dilakukan secara langsung pada file GUI, tetapi dipisahkan ke dalam beberapa modul pada folder rx. Pemisahan ini bertujuan agar struktur program lebih modular, mudah dipelihara, serta memudahkan proses pengembangan sistem.

Salah satu fungsi utama pada sisi receiver adalah `rx_full_chain.m`, yang berfungsi menjalankan keseluruhan proses decoding OFDM.

```
function [frames, diag_] = rx_full_chain(iq)
```

```
[frames, diag_] = rx_core_decode(iq, true);
```



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

end

Fungsi tersebut menerima masukan berupa sampel IQ hasil penerimaan sinyal OFDM. Selanjutnya fungsi `rx_core_decode()` dipanggil untuk menjalankan seluruh tahapan decoding, mulai dari pre-processing, sinkronisasi, penghapusan Cyclic Prefix (CP), Fast Fourier Transform (FFT), Channel Estimation, Equalizer, demapping simbol, pemeriksaan CRC, hingga rekonstruksi data. Selain menghasilkan data hasil decoding, fungsi ini juga menghasilkan informasi visualisasi (`diag_`) yang digunakan untuk memperbarui tampilan GUI receiver.

Proses sinkronisasi sinyal dilakukan menggunakan modul `rx_sync.m`. Modul ini bertugas menentukan posisi awal frame OFDM sehingga proses FFT dapat dilakukan pada posisi simbol yang tepat. Sinkronisasi yang baik sangat berpengaruh terhadap keberhasilan proses demodulasi karena kesalahan penentuan awal frame dapat menyebabkan meningkatnya nilai Bit Error Rate (BER).

Setelah sinkronisasi selesai, data diproses menggunakan modul `rx_channel_est.m` untuk melakukan estimasi kanal berdasarkan simbol pilot yang telah disisipkan pada sisi transmitter. Hasil estimasi kanal kemudian digunakan oleh modul `rx_equalizer.m` untuk mengurangi pengaruh distorsi kanal menggunakan metode Zero-Forcing (ZF).

Tahapan berikutnya dilakukan oleh modul `rx_unpack.m` yang bertugas mengubah simbol hasil demodulasi menjadi bitstream serta melakukan pemeriksaan Cyclic Redundancy Check (CRC-16). Apabila data dinyatakan valid, modul `rx_reconstruct.m` akan merekonstruksi bitstream menjadi file asli sesuai jenis data yang diterima, yaitu gambar, audio, atau file teks.

Selanjutnya parameter performa komunikasi dihitung menggunakan modul `rx_compute_metrics.m`. Modul ini menghitung berbagai parameter evaluasi, seperti





## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Bit Error Rate (BER), Signal-to-Noise Ratio (SNR), throughput, Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Structural Similarity Index Measure (SSIM), Short-Time Objective Intelligibility (STOI), Character Error Rate (CER), dan Word Error Rate (WER) sesuai dengan jenis data yang diterima. Seluruh hasil perhitungan kemudian ditampilkan pada panel metrik GUI receiver sebagai indikator performa sistem komunikasi OFDM berbasis SDR.





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

## BAB IV PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil implementasi dan pengujian sistem komunikasi Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) berbasis Software Defined Radio (SDR) menggunakan perangkat USRP-2920 sebagai transmitter dan RTL-SDR sebagai receiver. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem dalam mentransmisikan tiga jenis data, yaitu gambar, audio, dan teks menggunakan tiga skema modulasi digital, yaitu Binary Phase Shift Keying (BPSK), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), dan 16-Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM).

Evaluasi performa sistem dilakukan dengan mengukur beberapa parameter, yaitu Bit Error Rate (BER), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Structural Similarity Index Measure (SSIM), Audio Signal-to-Noise Ratio (Audio-SNR), Short-Time Objective Intelligibility (STOI), Character Error Rate (CER), dan Word Error Rate (WER). Selain itu dilakukan pula analisis terhadap diagram konstelasi, perubahan BER terhadap jarak, serta perbandingan kualitas data sebelum dan sesudah proses transmisi.

Berikut parameter yang kita pakai saat ini:

| Parameter         | Nilai     |
|-------------------|-----------|
| Frekuensi Carrier | 433 MHz   |
| Sample Rate       | 1 MS/s    |
| FFT Size          | 64        |
| Cyclic Prefix     | 16 sampel |
| Data Subcarrier   | 48        |





## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

| Parameter          | Nilai              |
|--------------------|--------------------|
| Pilot Subcarrier   | 4                  |
| Pilot Symbol       | [1 1 1 -1]         |
| Modulasi           | BPSK, QPSK, 16-QAM |
| Mode Transmisi     | Fixed dan Adaptive |
| Channel Estimation | Pilot-based        |
| Equalizer          | Zero-Forcing (ZF)  |
| CRC                | CRC-16             |

### 1. Perhitungan Payload Bit

Sebagai contoh perhitungan teoritis digunakan data gambar berukuran 64 Kb yang digunakan pada pengujian.

Ukuran file

$$64 \text{ KB} = 64 \times 1024 = 65536 \text{ Byte}$$

Karena,

$$1 \text{ Byte} = 8 \text{ Bit}$$

Maka,

$$\text{Payload} = 65536 \times 8 = 524288 \text{ bit}$$



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Hasil tersebut sama dengan informasi payload bits yang ditampilkan pada GUI.

2. Perhitungan Waktu Transmisi

Pada sistem OFDM yang digunakan, satu simbol OFDM terdiri atas 64 titik FFT dan CP sepanjang 16 sample sehingga total setiap simbol adalah

$$64 + 16 = 80$$

Dengan sample rate sebesar

$$1 \text{ Ms/s} = 10^6 \text{ sample/s}$$

Maka, durasi satu simbol OFDM adalah

$$T_{sym} = \frac{80}{10^6} = 80 \mu s$$

Selanjutnya, total waktu transmisi bergantung pada jumlah frame OFDM yang dibangkitkan selama proses pengiriman data.

3. Perhitungan Troughput

Troughput menggunakan persamaan

$$\text{Troughput} = \frac{\text{Jumlah Bit}}{\text{Waktu Transmisi}}$$

Berdasarkan Hasil Pengujian, jumlah bit adalah 530216 bit dengan waktu transmisi

$$237.1 \text{ ms} = 0.2371 \text{ s}$$





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Sehingga

$$\text{Troughput} = \frac{530216}{0.2371} = 2.24 \times 10^6 \text{ bit/s}$$

Atau

$$\text{Troughput} = 2.24 \text{ Mbps}$$

#### 4.1 Pengujian Sistem Menggunakan Modulasi BPSK

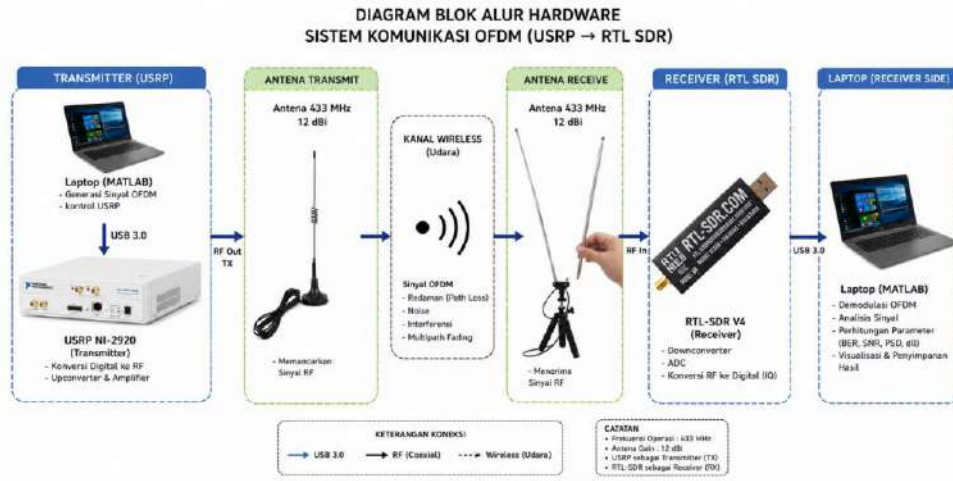
##### 4.1.1 Deskripsi Pengujian

###### A. Tujuan Pengujian

Pengujian menggunakan modulasi Binary Phase Shift Keying (BPSK) dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem komunikasi Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) yang telah dirancang menggunakan perangkat Software Defined Radio (SDR), yaitu USRP sebagai transmitter dan RTL-SDR sebagai receiver. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mentransmisikan tiga jenis data, yaitu gambar, audio, dan teks pada berbagai variasi jarak transmisi.

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 1 Diagram Blok

Selain itu, pengujian bertujuan untuk menganalisis pengaruh pertambahan jarak terhadap kualitas transmisi berdasarkan parameter Bit Error Rate (BER), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Structural Similarity Index Measure (SSIM), Audio Signal-to-Noise Ratio (Audio SNR), Short-Time Objective Intelligibility (STOI), Character Error Rate (CER), dan Word Error Rate (WER). Hasil pengujian ini selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi performa modulasi BPSK sebelum dibandingkan dengan modulasi QPSK dan 16-QAM.

Tabel 4. 1 Alat dan Spesifikasi Pengujian

| No | Perangkat          | Spesifikasi     |
|----|--------------------|-----------------|
| 1  | Laptop Transmitter | Lenovo V15 ADA  |
| 2  | Laptop Receiver    | HP 14s          |
| 3  | Transmitter (TX)   | NI USRP-2920    |
| 4  | Receiver (RX)      | RTL-SDR Blog V4 |
| 5  | Meteran            | 10 Meter        |



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

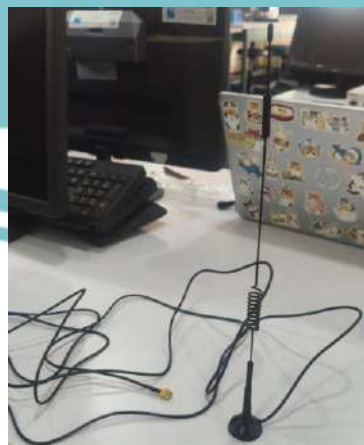
| No | Perangkat    | Spesifikasi      |
|----|--------------|------------------|
| 6  | Antena       | 433 MHz          |
| 7  | Kabel LAN    | CAT 7            |
| 8  | Konektor LAN | Gigabit Ethernet |

**A. Alat dan Spesifikasi Pengujian**

Pengujian sistem komunikasi OFDM menggunakan modulasi BPSK dilakukan menggunakan hardware, software, serta konfigurasi sistem yang telah dirancang pada tahap implementasi. Seluruh pengujian menggunakan konfigurasi yang sama sehingga perbedaan hasil yang diperoleh dipengaruhi oleh karakteristik modulasi dan variasi jarak transmisi.



Gambar 4. 2 RTL SDR V4



Gambar 4. 3 Antena TX

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 4 Antena RX



Gambar 4. 5 Kabel LAN dengan konektor



Gambar 4. 6 USRP yang dipakai



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 7 Meteran

Seluruh hardware digunakan selama proses pengujian tanpa adanya perubahan konfigurasi sehingga hasil pengujian dapat dibandingkan secara langsung untuk setiap variasi modulasi dan jarak transmisi.

**B. Konfigurasi Sistem**

Konfigurasi sistem pada pengujian ini menggunakan sistem komunikasi Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) dengan modulasi Binary Phase Shift Keying (BPSK). Pengujian dilakukan pada mode Fixed BPSK, sehingga seluruh data dikirim menggunakan modulasi BPSK tanpa melalui proses pemilihan modulasi secara adaptif. Data yang dikirim berupa gambar, audio, dan teks dipilih melalui antarmuka GUI transmitter, kemudian dikonversi menjadi bitstream (source encoding). Selanjutnya data ditambahkan mekanisme Forward Error Correction (FEC) menggunakan Repetition Code serta Cyclic Redundancy Check (CRC-16) sebagai mekanisme pendeteksian kesalahan sebelum diproses pada sistem OFDM.

Bitstream hasil pengkodean kemudian dipetakan menjadi simbol modulasi BPSK menggunakan Gray Mapping. Simbol hasil modulasi selanjutnya diproses pada blok OFDM yang meliputi pembentukan simbol OFDM, Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) berukuran 64 titik, serta penambahan Cyclic Prefix (CP) sepanjang 16 sampel. Sampel kompleks I



**Hak Cipta:**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

dan Q yang dihasilkan disimpan dalam format .fc32 dan dipancarkan menggunakan perangkat NI USRP-2920 melalui utilitas UHD tx\_samples\_from\_file pada frekuensi kerja 433 MHz.

Pada sisi penerima, sinyal diterima menggunakan RTL-SDR Blog V4 dan direkam dalam bentuk data IQ. Data hasil perekaman kemudian diproses di MATLAB melalui tahapan sinkronisasi frame, estimasi dan koreksi Carrier Frequency Offset (CFO), penghapusan Cyclic Prefix (CP), Fast Fourier Transform (FFT), demodulasi BPSK, decode FEC, serta pemeriksaan CRC hingga diperoleh kembali data asli. Setelah proses penerimaan selesai, sistem secara otomatis menghitung parameter evaluasi berupa Bit Error Rate (BER), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Structural Similarity Index Measure (SSIM), Audio Signal-to-Noise Ratio (Audio-SNR), Short-Time Objective Intelligibility (STOI), Character Error Rate (CER), Word Error Rate (WER), waktu transmisi, dan throughput sesuai dengan jenis data yang dikirim.

Modulasi BPSK digunakan sebagai konfigurasi pembanding karena setiap simbol hanya merepresentasikan satu bit informasi dengan dua kemungkinan perubahan fasa, yaitu  $0^\circ$  dan  $180^\circ$ . Karakteristik tersebut menjadikan BPSK memiliki ketahanan terhadap noise yang lebih baik dibandingkan modulasi orde yang lebih tinggi, meskipun memiliki efisiensi spektral yang lebih rendah.

**C. Skenario Pengujian**

Pengujian dilakukan untuk mengetahui performa sistem komunikasi OFDM menggunakan modulasi BPSK dalam mentransmisikan data gambar, audio, dan teks pada beberapa variasi jarak. Selama proses pengujian, seluruh konfigurasi hardware, software, dan parameter OFDM dipertahankan tetap agar hasil yang diperoleh hanya dipengaruhi oleh perubahan jarak transmisi.





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Pengujian dilaksanakan pada lingkungan outdoor dengan kondisi Line of Sight (LOS), yaitu posisi transmitter dan receiver saling berhadapan tanpa adanya penghalang di antara keduanya. Variasi jarak yang digunakan meliputi 1 meter, 5 meter, 10 meter, 15, dan 20 meter. Pada setiap jarak dilakukan pengiriman tiga jenis data, yaitu gambar berformat JPG, audio berformat MP3, dan file teks.

Setiap jenis data dikirim menggunakan modulasi BPSK dengan konfigurasi sistem yang sama. Setelah proses transmisi selesai, sistem secara otomatis menampilkan hasil penerimaan beserta parameter evaluasi yang digunakan untuk menilai kualitas data. Pengujian gambar dievaluasi menggunakan parameter BER, PSNR, dan SSIM. Pengujian audio menggunakan parameter BER, Audio SNR, dan STOI, sedangkan pengujian teks menggunakan parameter BER, CER, dan WER.

Seluruh pengujian dilakukan secara bertahap dimulai dari jarak terdekat hingga jarak terjauh. Pada setiap variasi jarak dilakukan pengamatan terhadap kualitas data yang diterima serta pencatatan seluruh parameter hasil pengujian. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk menganalisis pengaruh penambahan jarak terhadap performa sistem komunikasi OFDM menggunakan modulasi BPSK.

#### 4.1.2 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut.

1. Menjalankan program transmitter menggunakan file TX\_GUI.m pada MATLAB hingga antarmuka Graphical User Interface (GUI) transmitter berhasil ditampilkan.

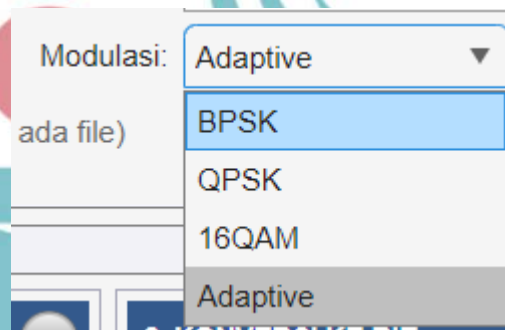
**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
>> TX_GUI
TX_GUI
TX_GUI
```

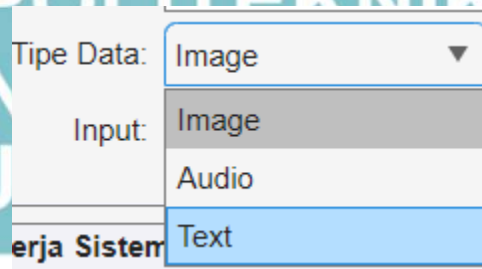
Gambar 4. 8 Laptop TX berhasil memancar

2. Memilih mode transmisi Fixed dan menentukan modulasi BPSK sebagai teknik modulasi yang digunakan selama proses pengujian.



Gambar 4. 9 Memilih Modulasi

3. Memilih jenis data yang akan dikirim berupa gambar, audio, atau teks.



Gambar 4. 10 Memilih Jenis Data

4. Program transmitter melakukan proses pembentukan paket data yang meliputi konversi data menjadi bitstream, penambahan header dan CRC-16, pemetaan simbol menggunakan modulasi BPSK, penyisipan pilot,



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

proses Inverse Fast Fourier Transform (IFFT), serta penambahan Cyclic Prefix (CP).

5. Sinyal OFDM dipancarkan menggunakan NI USRP-2920 pada frekuensi kerja 433 MHz menuju perangkat receiver.
6. Menerima sinyal menggunakan RTL-SDR pada sisi receiver.

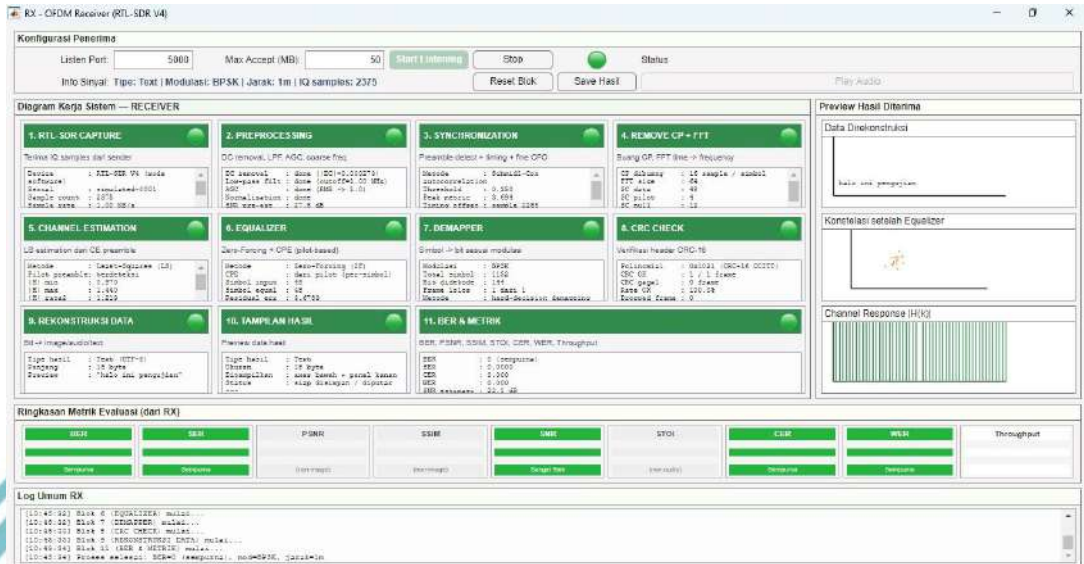
```
Log Umum RX
[10:48:32] Blok 6 (EQUALIZER) mulai...
[10:48:32] Blok 7 (DEMAPPER) mulai...
[10:48:33] Blok 8 (CRC CHECK) mulai...
[10:48:33] Blok 9 (REKONSTRUKSI DATA) mulai...
[10:48:34] Blok 11 (BER & METRIK) mulai...
[10:48:34] Proses selesai: BER=0 (sempurna), mod=BPSK, jarak=1m
```

Gambar 4. 11 RTL SDR berhasil menerima sinyal

7. Receiver menerima sinyal menggunakan RTL-SDR Blog V4, kemudian data IQ diproses melalui tahapan pre-processing, sinkronisasi, penghapusan Cyclic Prefix (CP), Fast Fourier Transform (FFT), Channel Estimation, Equalizer, demapping simbol BPSK, pemeriksaan CRC-16, serta rekonstruksi data menjadi file asli.
8. Menampilkan hasil pengujian pada GUI MATLAB.
9. Menghitung nilai BER, PSNR, SSIM, Audio-SNR, STOI, CER, dan WER.

## Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 12 GUI Terbuka

### 4.1.3 Data Hasil Pengujian

Subbab ini menyajikan hasil pengujian sistem komunikasi OFDM menggunakan modulasi BPSK berdasarkan variasi jarak transmisi, yaitu 1 meter, 5 meter, 10 meter, 15 meter, 20 meter, dan 25 meter. Pengujian dilakukan terhadap tiga jenis data, yaitu gambar, audio, dan teks. Setiap hasil pengujian dievaluasi menggunakan parameter yang disesuaikan dengan karakteristik masing-masing jenis data.

Pada pengujian gambar digunakan parameter Bit Error Rate (BER), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), dan Structural Similarity Index Measure (SSIM). Pengujian audio menggunakan parameter BER, Audio Signal-to-Noise Ratio (Audio SNR), dan Short-Time Objective Intelligibility (STOI). Sementara itu, pengujian teks dievaluasi menggunakan parameter BER, Character Error Rate (CER), dan Word Error Rate (WER). Hasil pengujian tersebut disajikan pada subbab berikut.





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

**a. Hasil Transmisi Data Gambar**

Pengujian gambar dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mempertahankan kualitas gambar setelah proses transmisi menggunakan modulasi BPSK. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan gambar hasil penerimaan terhadap gambar asli menggunakan parameter BER, PSNR, dan SSIM. Nilai hasil pengujian pada setiap variasi jarak ditunjukkan pada Tabel berikut:

Tabel 4. 2 Hasil Gambar BPSK

| Jarak (m) | BER                  | PSNR (dB) | SSIM  |
|-----------|----------------------|-----------|-------|
| 1         | 0                    | 50.0      | 1.000 |
| 5         | $2.6 \times 10^{-1}$ | 50.0      | 1.000 |
| 10        | $7.4 \times 10^{-1}$ | 50.0      | 1.000 |
| 15        | $1.3 \times 10^{-2}$ | 19.3      | 0.909 |
| 20        | $3.8 \times 10^{-1}$ | 4.6       | 0.126 |

## Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 13 Pengiriman BPSK Image

Berdasarkan Tabel 4.2, pada jarak 1 meter sistem mampu merekonstruksi data gambar dengan sangat baik. Hal ini ditunjukkan oleh nilai BER sebesar 0, PSNR sebesar 50,0 dB, dan SSIM sebesar 1,000. Nilai tersebut menunjukkan bahwa gambar hasil penerimaan identik dengan gambar asli tanpa terjadinya kesalahan bit selama proses transmisi.

Pada jarak 5 meter dan 10 meter, nilai BER meningkat menjadi  $2,6 \times 10^{-1}$  dan  $7,4 \times 10^{-1}$ . Meskipun demikian, nilai PSNR tetap sebesar 50,0 dB dan SSIM sebesar 1,000, yang menunjukkan bahwa kualitas gambar hasil rekonstruksi masih sangat baik. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kesalahan bit yang terdeteksi belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kualitas visual gambar yang diterima.

Pada jarak 15 meter, nilai BER sebesar  $1,3 \times 10^{-2}$  dengan PSNR sebesar 19,3 dB dan SSIM sebesar 0,909. Penurunan nilai PSNR dan SSIM menunjukkan bahwa kualitas gambar mulai mengalami degradasi





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

akibat pengaruh kanal komunikasi, meskipun gambar masih dapat dikenali dengan baik.

Pada jarak 20 meter, kualitas transmisi mengalami penurunan yang lebih besar. Nilai BER tercatat sebesar  $3,8 \times 10^{-1}$ , sedangkan PSNR turun menjadi 4,6 dB dan SSIM menjadi 0,126. Nilai tersebut menunjukkan bahwa gambar hasil rekonstruksi mengalami distorsi yang cukup signifikan sehingga tingkat kemiripannya terhadap gambar asli menjadi rendah.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa performa sistem komunikasi OFDM dengan modulasi BPSK dipengaruhi oleh kondisi kanal selama proses transmisi. Meskipun variasi nilai BER pada setiap jarak tidak menunjukkan pola yang sepenuhnya meningkat, nilai PSNR dan SSIM cenderung menurun pada jarak yang lebih jauh. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas rekonstruksi gambar dipengaruhi tidak hanya oleh jarak transmisi, tetapi juga oleh kondisi kanal komunikasi seperti noise, multipath, dan interferensi yang terjadi selama pengujian.

**b. Hasil Transmisi Data Audio**

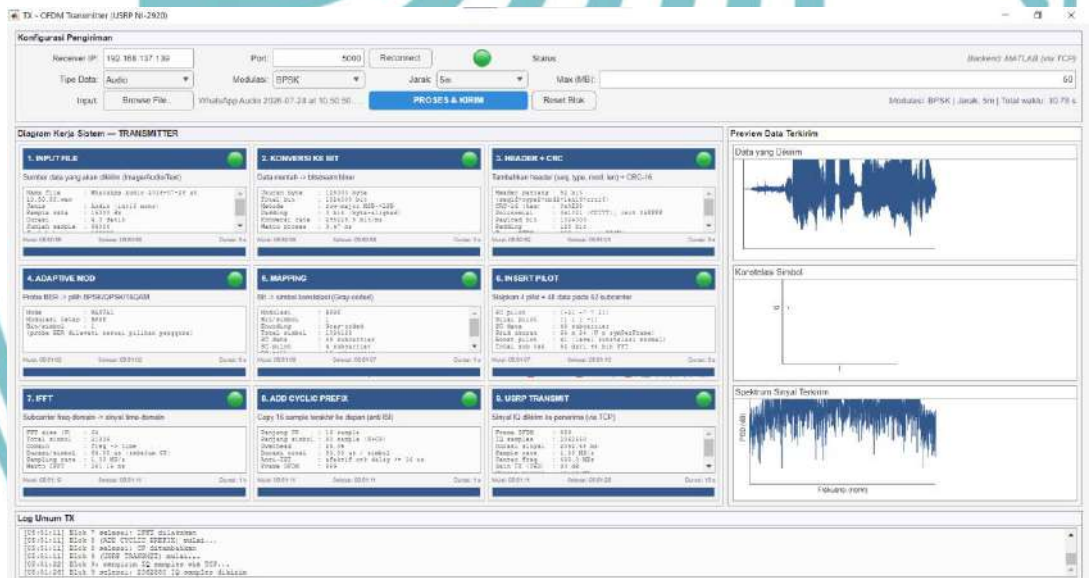
Pengujian audio dilakukan untuk mengetahui kualitas sinyal audio yang diterima setelah proses transmisi menggunakan modulasi BPSK. Evaluasi dilakukan menggunakan parameter BER, Audio SNR, dan STOI. Hasil pengujian pada setiap variasi jarak ditunjukkan pada Tabel berikut:

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Tabel 4. 3 Hasil Audio BPSK

| Jarak (m) | BER                  | Audio SNR (dB) | STOI  |
|-----------|----------------------|----------------|-------|
| 1         | $2.1 \times 10^{-1}$ | Inf            | 1.000 |
| 5         | $4.8 \times 10^{-1}$ | 1.7            | 0.427 |
| 10        | $4.8 \times 10^{-1}$ | -0.1           | 0.030 |
| 15        | —                    | 0.0            | 0.000 |
| 20        | —                    | 0.0            | 0.000 |



Gambar 4. 14 Pengiriman BPSK Audio

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.3, kualitas audio terbaik diperoleh pada jarak 1 meter dengan nilai BER sebesar  $2,1 \times 10^{-1}$ , Audio SNR bernilai Inf, dan STOI sebesar 1,000. Nilai STOI sebesar 1,000 menunjukkan bahwa sinyal audio hasil penerimaan memiliki tingkat keterpahaman yang sangat baik dan identik dengan sinyal audio





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

asli, sedangkan nilai Audio SNR yang bernilai Inf menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara sinyal referensi dan sinyal hasil penerimaan.

Pada jarak 5 meter, nilai BER meningkat menjadi  $4,8 \times 10^{-1}$ , sedangkan Audio SNR menurun menjadi 1,7 dB dan STOI menjadi 0,427. Hasil ini menunjukkan bahwa kualitas audio mulai mengalami penurunan sehingga tingkat keterpahaman suara menjadi lebih rendah dibandingkan pada jarak 1 meter.

Pada jarak 10 meter, nilai BER tetap sebesar  $4,8 \times 10^{-1}$ , sedangkan Audio SNR turun menjadi -0,1 dB dan STOI menjadi 0,030. Nilai STOI yang mendekati nol menunjukkan bahwa audio hasil penerimaan sudah sangat sulit dipahami akibat meningkatnya pengaruh kanal komunikasi terhadap sinyal yang diterima.

Pada jarak 15 meter dan 20 meter, audio tidak berhasil direkonstruksi sehingga nilai BER tidak dapat dihitung. Selain itu, nilai Audio SNR sebesar 0,0 dB dan STOI sebesar 0,000 menunjukkan bahwa sistem tidak lagi mampu mempertahankan kualitas audio pada jarak tersebut.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa kualitas transmisi audio menggunakan modulasi BPSK mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak transmisi.



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

**c. Hasil Transmisi Data Teks**

Pengujian teks dilakukan untuk mengetahui tingkat keberhasilan sistem dalam mempertahankan informasi karakter dan kata selama proses transmisi menggunakan modulasi BPSK. Evaluasi dilakukan menggunakan parameter BER, CER, dan WER. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel berikut:

Tabel 4. 4 Hasil Teks BPSK

| Jarak (m) | BER                  | CER   | WER   |
|-----------|----------------------|-------|-------|
| 1         | $2,1 \times 10^{-3}$ | 0.000 | 0.000 |
| 5         | $1.1 \times 10^{-2}$ | 0.078 | 0.429 |
| 10        | —                    | 1.000 | 1.000 |
| 15        | —                    | 1.000 | 1.000 |
| 20        | —                    | 1.000 | 1.000 |
| 25        | —                    | 1.000 | 1.000 |



## Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 15 Hasil GUI Receiver BPSK Text

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.4, data teks dapat diterima dengan baik pada jarak 1 meter dengan nilai BER sebesar  $2,1 \times 10^{-3}$ , CER sebesar 0,000, dan WER sebesar 0,000. Nilai tersebut menunjukkan bahwa seluruh karakter dan kata berhasil diterima tanpa mengalami kesalahan selama proses transmisi.

Pada jarak 5 meter, nilai BER meningkat menjadi  $1,1 \times 10^{-2}$ , sedangkan nilai CER dan WER masing-masing sebesar 0,078 dan 0,429. Hasil ini menunjukkan bahwa mulai terjadi kesalahan pada sebagian karakter dan kata yang diterima, meskipun sebagian besar isi teks masih dapat dikenali.

Pada jarak 10 meter hingga 25 meter, data teks tidak berhasil direkonstruksi sehingga nilai BER tidak dapat dihitung. Selain itu, nilai CER dan WER mencapai 1,000 yang menunjukkan bahwa seluruh karakter dan kata hasil penerimaan mengalami kesalahan sehingga isi teks tidak dapat dibaca dengan benar.



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

#### 4.1.4 Analisis Data dan Evaluasi

Hasil pengujian sistem komunikasi OFDM menggunakan modulasi BPSK dianalisis berdasarkan parameter yang diperoleh pada pengiriman data gambar, audio, dan teks. Analisis dilakukan untuk mengetahui pengaruh pertambahan jarak terhadap kualitas transmisi serta mengevaluasi kemampuan modulasi BPSK dalam mempertahankan integritas data yang dikirim. Parameter yang dianalisis meliputi BER, PSNR, SSIM, Audio SNR, STOI, CER, dan WER.

##### A. Analisis Hasil Pengujian Gambar

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.5, kualitas gambar hasil transmisi menggunakan modulasi BPSK menunjukkan perubahan pada setiap variasi jarak pengujian. Pada jarak 1 meter diperoleh nilai BER sebesar 0, PSNR sebesar 50,0 dB, dan SSIM sebesar 1,000. Nilai tersebut menunjukkan bahwa gambar hasil penerimaan identik dengan gambar asli tanpa adanya kesalahan selama proses transmisi sehingga kualitas rekonstruksi dapat dikatakan sangat baik.

Pada jarak 5 meter nilai BER meningkat menjadi  $2,6 \times 10^{-1}$ , sedangkan nilai PSNR dan SSIM tetap sebesar 50,0 dB dan 1,000. Meskipun terjadi peningkatan nilai BER, kualitas visual gambar masih belum mengalami penurunan yang signifikan sehingga gambar hasil rekonstruksi tetap menyerupai gambar asli. Pada jarak 10 meter nilai BER kembali meningkat menjadi  $7,4 \times 10^{-1}$ , sedangkan nilai PSNR dan SSIM masih tetap sebesar 50,0 dB dan 1,000. Hasil tersebut menunjukkan bahwa gambar masih dapat direkonstruksi dengan baik berdasarkan parameter kualitas gambar.

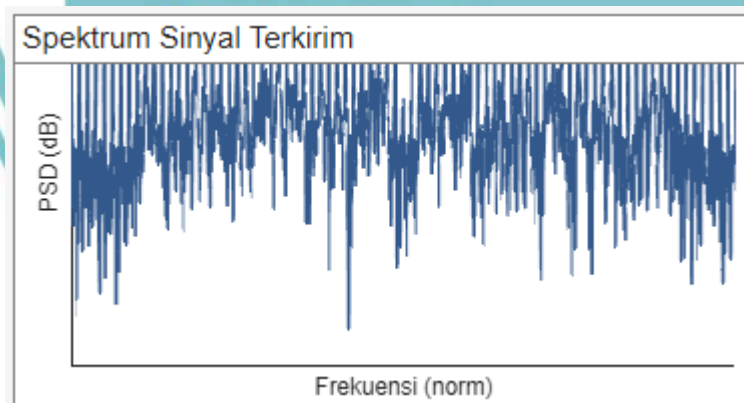


**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Penurunan kualitas gambar mulai terlihat pada jarak 15 meter dengan nilai BER sebesar  $1,3 \times 10^{-2}$ , PSNR sebesar 19,3 dB, dan SSIM sebesar 0,909. Nilai tersebut menunjukkan bahwa gambar mulai mengalami penurunan kualitas, meskipun objek utama masih dapat dikenali. Pada jarak 20 meter performa sistem mengalami penurunan yang lebih signifikan dengan nilai BER sebesar  $3,8 \times 10^{-1}$ , PSNR sebesar 4,6 dB, dan SSIM sebesar 0,126. Nilai PSNR dan SSIM yang rendah menunjukkan bahwa gambar hasil rekonstruksi mengalami distorsi yang cukup besar sehingga tingkat kemiripannya terhadap gambar asli menurun secara signifikan.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa kualitas gambar dipengaruhi oleh kondisi kanal komunikasi selama proses transmisi. Variasi nilai BER pada setiap jarak tidak menunjukkan pola yang sepenuhnya meningkat, namun nilai PSNR dan SSIM cenderung menurun pada jarak yang lebih jauh. Hal tersebut menunjukkan bahwa penurunan kualitas gambar tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah kesalahan bit, tetapi juga oleh pengaruh noise, multipath, serta kondisi kanal selama proses transmisi.

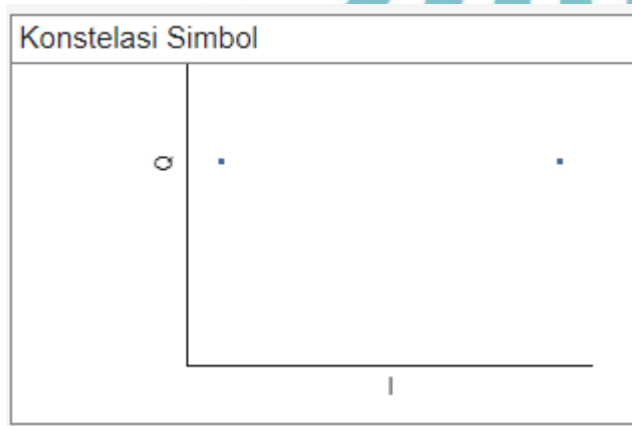


Gambar 4. 16 Spektrum Sinyal Terkirim BPSK

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Spektrum sinyal pada Gambar 4.16 menunjukkan distribusi daya sinyal OFDM yang dipancarkan menggunakan modulasi BPSK pada domain frekuensi. Distribusi daya terlihat tersebar pada subcarrier OFDM dengan pola yang relatif merata sehingga menunjukkan bahwa proses pembentukan simbol OFDM, penyisipan pilot, dan transformasi IFFT telah berjalan dengan baik sebelum sinyal dipancarkan melalui perangkat NI USRP-2920. Visualisasi spektrum ini digunakan untuk memastikan bahwa sinyal yang dikirim memiliki karakteristik frekuensi yang sesuai dengan konfigurasi sistem OFDM.



Gambar 4. 17 Diagram Konstelasi BPSK

Diagram konstelasi pada Gambar 4.17 menunjukkan hasil demodulasi sinyal BPSK pada sisi receiver. Titik-titik konstelasi masih terkonsentrasi pada dua posisi simbol yang mewakili logika biner 0 dan 1 sehingga proses demodulasi dapat dilakukan dengan baik. Meskipun terdapat sedikit penyebaran titik akibat pengaruh derau dan kondisi kanal komunikasi, distribusi simbol masih berada di sekitar posisi ideal sehingga data masih dapat dikenali dengan benar oleh receiver.





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

**B. Analisis Hasil Pengujian Audio**

Hasil Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.6, kualitas audio hasil transmisi menggunakan modulasi BPSK mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak transmisi. Pada jarak 1 meter diperoleh nilai BER sebesar  $2,1 \times 10^{-1}$ , Audio SNR bernilai Inf, dan STOI sebesar 1,000. Nilai STOI sebesar 1,000 menunjukkan bahwa audio hasil penerimaan memiliki tingkat keterpahaman yang sangat baik, sedangkan nilai Audio SNR yang bernilai Inf menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara sinyal audio asli dan sinyal audio hasil penerimaan.

Pada jarak 5 meter nilai BER meningkat menjadi  $4,8 \times 10^{-1}$ , sedangkan Audio SNR menurun menjadi 1,7 dB dan STOI menjadi 0,427. Penurunan nilai Audio SNR dan STOI menunjukkan bahwa kualitas audio mulai mengalami penurunan sehingga tingkat keterpahaman suara menjadi lebih rendah dibandingkan pada jarak sebelumnya.

Pada jarak 10 meter nilai BER tetap sebesar  $4,8 \times 10^{-1}$ , sedangkan Audio SNR turun menjadi -0,1 dB dan STOI menjadi 0,030. Nilai STOI yang mendekati nol menunjukkan bahwa audio hasil penerimaan sudah sangat sulit dipahami karena kualitas sinyal yang diterima mengalami penurunan akibat pengaruh kanal komunikasi.

Pada jarak 15 meter dan 20 meter data audio tidak berhasil direkonstruksi sehingga nilai BER tidak dapat dihitung. Selain itu, nilai Audio SNR sebesar 0,0 dB dan STOI sebesar 0,000 menunjukkan bahwa sistem tidak lagi mampu mempertahankan kualitas audio pada



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

jarak tersebut sehingga informasi suara yang dikirim tidak dapat diterima dengan baik.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa kualitas transmisi audio menggunakan modulasi BPSK dipengaruhi oleh kondisi kanal komunikasi. Bertambahnya jarak transmisi menyebabkan penurunan kualitas audio yang ditunjukkan oleh meningkatnya nilai BER pada jarak awal pengujian, menurunnya nilai Audio SNR dan STOI, serta kegagalan sistem dalam merekonstruksi data audio pada jarak yang lebih jauh akibat pengaruh noise, pelemahan sinyal, dan multipath selama proses transmisi.

### C. Analisis Hasil Pengujian Teks

Berdasarkan hasil pengujian data teks pada Tabel 4.7, proses transmisi menggunakan modulasi BPSK menghasilkan performa yang sangat baik pada jarak 1 meter dengan nilai BER sebesar 0, CER sebesar 0,000, dan WER sebesar 0,000. Nilai tersebut menunjukkan bahwa seluruh karakter dan kata berhasil diterima dengan benar tanpa adanya kesalahan sehingga informasi yang dikirim dapat direkonstruksi secara utuh pada sisi receiver.

Pada jarak 5 meter mulai terjadi peningkatan kesalahan yang ditunjukkan oleh nilai BER sebesar  $1,1 \times 10^{-2}$ , CER sebesar 0,078, dan WER sebesar 0,429. Meskipun data teks masih dapat diterima, sebagian karakter dan kata mengalami perubahan akibat kesalahan selama proses transmisi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kualitas penerimaan mulai menurun, namun isi teks masih dapat dipahami.





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Mulai jarak 10 meter hingga 25 meter, data teks tidak berhasil direkonstruksi sehingga nilai BER tidak dapat dihitung. Selain itu, nilai CER dan WER mencapai 1,000. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa seluruh karakter dan kata hasil penerimaan mengalami kesalahan sehingga informasi yang dikirim tidak lagi dapat dipahami dengan benar. Hasil ini menunjukkan bahwa kualitas transmisi data teks mengalami penurunan yang signifikan pada jarak yang lebih jauh akibat pengaruh kondisi kanal komunikasi.

**D. Evaluasi Modulasi BPSK**

Berdasarkan seluruh hasil pengujian dapat diketahui bahwa modulasi BPSK memberikan performa terbaik pada jarak 1 meter. Pada jarak tersebut, data gambar berhasil diterima dengan nilai BER sebesar 0, PSNR sebesar 50,0 dB, dan SSIM sebesar 1,000. Data audio menghasilkan nilai STOI sebesar 1,000 dengan Audio SNR bernilai Inf, sedangkan data teks berhasil diterima tanpa kesalahan dengan nilai BER, CER, dan WER sebesar 0. Hasil tersebut menunjukkan bahwa modulasi BPSK mampu mempertahankan kualitas transmisi dengan sangat baik pada kondisi kanal yang masih optimal.

Seiring bertambahnya jarak transmisi, performa sistem mulai mengalami penurunan. Pada pengujian gambar, kualitas rekonstruksi mulai menurun pada jarak 15 meter yang ditunjukkan oleh penurunan nilai PSNR dan SSIM. Pada pengujian audio, nilai STOI dan Audio SNR mengalami penurunan mulai jarak 5 meter, sedangkan pada jarak 15 meter hingga 20 meter data audio tidak lagi berhasil direkonstruksi. Pada pengujian teks, peningkatan kesalahan mulai



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

terlihat pada jarak 5 meter, kemudian pada jarak 10 meter hingga 25 meter data teks tidak lagi dapat direkonstruksi sehingga nilai CER dan WER mencapai 1,000.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa modulasi BPSK memiliki ketahanan yang baik terhadap gangguan kanal pada jarak pendek. Namun, peningkatan jarak transmisi menyebabkan kualitas sinyal yang diterima menurun akibat pengaruh noise, pelemahan sinyal, dan multipath. Kondisi tersebut mengakibatkan meningkatnya tingkat kesalahan selama proses penerimaan sehingga kualitas data hasil rekonstruksi juga mengalami penurunan.

## 4.2 Pengujian Sistem Menggunakan Modulasi QPSK

### 4.2.1 Deskripsi Pengujian

#### A. Tujuan Pengujian

Pengujian menggunakan modulasi Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem komunikasi Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) menggunakan perangkat Software Defined Radio (SDR), yaitu NI USRP-2920 sebagai transmitter dan RTL-SDR Blog V4 sebagai receiver. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mentransmisikan data gambar, audio, dan teks pada beberapa variasi jarak transmisi.

Selain itu, pengujian bertujuan untuk mengetahui pengaruh pertambahan jarak terhadap kualitas transmisi berdasarkan parameter Bit Error Rate (BER), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Structural Similarity Index Measure (SSIM), Audio Signal-to-Noise Ratio (Audio





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

SNR), Short-Time Objective Intelligibility (STOI), Character Error Rate (CER), dan Word Error Rate (WER). Hasil pengujian modulasi QPSK selanjutnya digunakan untuk membandingkan performanya dengan modulasi BPSK dan 16-QAM.

**B. Alat dan Spesifikasi Pengujian**

Hardware sistem yang digunakan pada pengujian modulasi QPSK sama dengan konfigurasi yang telah dijelaskan pada Subbab 4.1.1 bagian B. Seluruh konfigurasi dipertahankan tetap selama proses pengujian sehingga perbedaan hasil yang diperoleh dipengaruhi oleh karakteristik modulasi QPSK dan variasi jarak transmisi.

**C. Konfigurasi Sistem**

Konfigurasi sistem pada pengujian ini menggunakan sistem komunikasi Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) dengan modulasi Quadrature Phase Shift Keying (QPSK). Pengujian dilakukan pada mode Fixed QPSK, sehingga seluruh data dikirim menggunakan modulasi QPSK tanpa melalui proses pemilihan modulasi secara adaptif. Data yang dikirim berupa gambar, audio, dan teks dipilih melalui antarmuka GUI transmitter, kemudian dikonversi menjadi bitstream (source encoding). Selanjutnya, sistem menambahkan header paket dan Cyclic Redundancy Check (CRC-16) sebagai mekanisme pendeteksian kesalahan sebelum data diproses pada sistem OFDM.

Bitstream hasil pengkodean kemudian dipetakan menjadi simbol modulasi QPSK menggunakan Gray Mapping. Simbol hasil modulasi selanjutnya diproses pada blok OFDM yang meliputi penyisipan pilot,



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

pembentukan simbol OFDM, Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) berukuran 64 titik, serta penambahan Cyclic Prefix (CP) sepanjang 16 sampel. Sinyal OFDM kemudian dipancarkan menggunakan perangkat NI USRP-2920 pada frekuensi kerja 433 MHz.

Pada sisi penerima, sinyal diterima menggunakan RTL-SDR Blog V4 dalam bentuk data IQ. Data hasil penerimaan selanjutnya diproses di MATLAB melalui tahapan preprocessing, sinkronisasi frame, penghapusan Cyclic Prefix (CP), Fast Fourier Transform (FFT), estimasi kanal (channel estimation), equalisasi (equalizer), demodulasi QPSK, pemeriksaan CRC, serta rekonstruksi data hingga diperoleh kembali informasi sesuai dengan data yang dikirim. Setelah proses penerimaan selesai, sistem secara otomatis menghitung parameter evaluasi berupa Bit Error Rate (BER), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Structural Similarity Index Measure (SSIM), Audio Signal-to-Noise Ratio (Audio SNR), Short-Time Objective Intelligibility (STOI), Character Error Rate (CER), Word Error Rate (WER), waktu transmisi, dan throughput sesuai dengan jenis data yang dikirim.

Modulasi QPSK digunakan pada pengujian ini karena setiap simbol merepresentasikan dua bit informasi melalui empat kemungkinan perubahan fasa. Dibandingkan dengan BPSK, QPSK memiliki efisiensi spektral yang lebih tinggi karena mampu mengirimkan dua bit pada setiap simbol, sehingga laju transmisi data menjadi lebih besar tanpa meningkatkan lebar pita yang digunakan. Namun, karena jarak antar titik konstelasi lebih rapat dibandingkan BPSK, modulasi QPSK lebih sensitif terhadap pengaruh noise dan gangguan kanal sehingga memerlukan kualitas kanal yang lebih baik untuk mempertahankan performa sistem.





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

#### D. Skenario Pengujian

Skenario pengujian yang digunakan pada modulasi QPSK sama dengan skenario pengujian pada modulasi BPSK sebagaimana telah dijelaskan pada Subbab 4.1.1 bagian D. Pengujian dilakukan menggunakan konfigurasi hardware, software, dan parameter sistem yang sama sehingga hasil pengujian yang diperoleh dapat dibandingkan secara langsung dengan modulasi BPSK.

Pengujian dilaksanakan pada lingkungan outdoor dengan kondisi Line of Sight (LOS). Variasi jarak yang digunakan meliputi 1 meter, 5 meter, 10 meter, 15 meter, dan 20 meter. Pada setiap variasi jarak dilakukan pengiriman tiga jenis data, yaitu gambar, audio, dan teks menggunakan modulasi QPSK. Seluruh proses pengujian dilakukan secara bertahap mulai dari jarak terdekat hingga jarak terjauh dengan konfigurasi sistem yang tetap.

Setelah proses transmisi selesai, sistem secara otomatis menampilkan hasil penerimaan beserta parameter evaluasi sesuai dengan jenis data yang diuji. Pengujian gambar dievaluasi menggunakan parameter BER, PSNR, dan SSIM, pengujian audio menggunakan parameter BER, Audio SNR, dan STOI, sedangkan pengujian teks menggunakan parameter BER, CER, dan WER. Hasil pengujian tersebut selanjutnya digunakan untuk menganalisis pengaruh pertambahan jarak terhadap performa sistem komunikasi OFDM menggunakan modulasi QPSK.



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

#### 4.2.2 Prosedur Pengujian

Pengujian modulasi QPSK dilakukan menggunakan prosedur yang sama seperti pengujian modulasi BPSK, namun konfigurasi modulasi pada sistem diubah menjadi QPSK. Tahapan pengujian dilakukan sebagai berikut.

1. Menjalankan program transmitter menggunakan file TX\_GUI.m.
2. Memilih mode Fixed QPSK sebagai metode modulasi pada sistem komunikasi OFDM.
3. Memilih jenis data yang akan ditransmisikan berupa gambar, audio, atau teks melalui antarmuka GUI transmitter.
4. Melakukan proses pembentukan paket data yang meliputi konversi data menjadi bitstream, penambahan header dan CRC-16, pemetaan bit menggunakan modulasi QPSK, penyisipan pilot, proses Inverse Fast Fourier Transform (IFFT), serta penambahan Cyclic Prefix (CP).
5. Memancarkan sinyal OFDM menggunakan perangkat NI USRP-2920 pada frekuensi kerja 433 MHz.
6. Menerima sinyal menggunakan RTL-SDR Blog V4 yang terhubung dengan laptop receiver.
7. Menjalankan proses penerimaan menggunakan program RX\_GUI\_TCP.m yang meliputi preprocessing, sinkronisasi, penghapusan Cyclic Prefix (CP), Fast Fourier Transform (FFT), estimasi kanal (channel estimation), equalisasi (equalizer), demodulasi QPSK, pemeriksaan CRC, dan rekonstruksi data.
8. Menampilkan hasil penerimaan pada GUI MATLAB yang meliputi data hasil rekonstruksi, spektrum sinyal, diagram konstelasi, serta parameter evaluasi sesuai dengan jenis data yang dikirim.
9. Menghitung nilai BER, PSNR, SSIM, Audio SNR, STOI, CER, WER, waktu transmisi, dan throughput secara otomatis.





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Proses tersebut diulangi pada setiap variasi jarak pengujian sehingga diperoleh data yang dapat digunakan untuk menganalisis pengaruh jarak terhadap performa sistem komunikasi menggunakan modulasi QPSK.

#### 4.2.3 Data Hasil Pengujian

Subbab ini menyajikan hasil pengujian sistem komunikasi OFDM menggunakan modulasi QPSK berdasarkan variasi jarak transmisi, yaitu 1 meter, 5 meter, 10 meter, 15 meter, dan 20 meter. Pengujian dilakukan terhadap tiga jenis data, yaitu gambar, audio, dan teks. Setiap hasil pengujian dievaluasi menggunakan parameter yang disesuaikan dengan karakteristik masing-masing jenis data.

Pada pengujian gambar digunakan parameter Bit Error Rate (BER), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), dan Structural Similarity Index Measure (SSIM). Pengujian audio menggunakan parameter BER, Audio Signal-to-Noise Ratio (Audio SNR), dan Short-Time Objective Intelligibility (STOI). Sementara itu, pengujian teks dievaluasi menggunakan parameter BER, Character Error Rate (CER), dan Word Error Rate (WER). Hasil pengujian untuk setiap jenis data disajikan pada subbab berikut.

##### a. Hasil Transmisi Data Gambar

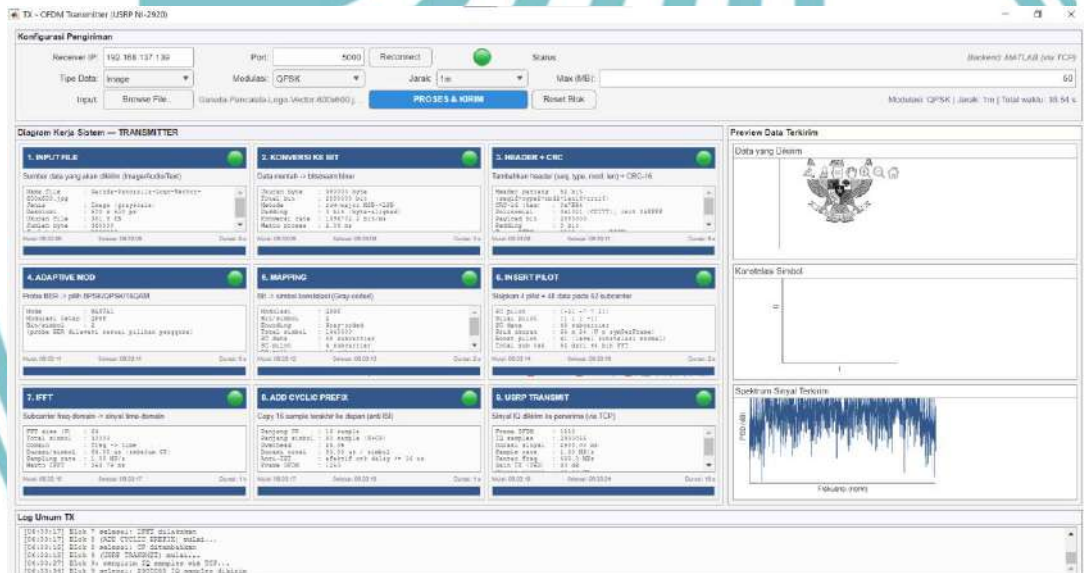
Pengujian gambar dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mempertahankan kualitas gambar setelah proses transmisi menggunakan modulasi QPSK. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan gambar hasil penerimaan terhadap gambar asli menggunakan parameter BER, PSNR, dan SSIM. Hasil pengujian pada setiap variasi jarak ditunjukkan pada Tabel berikut:

## Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Tabel 4. 5 Hasil Gambar QPSK

| Jarak (m) | BER                  | PSNR (dB) | SSIM  |
|-----------|----------------------|-----------|-------|
| 1         | $2,1 \times 10^{-4}$ | 40.7      | 0.987 |
| 5         | $3,3 \times 10^{-1}$ | 5.6       | 0.160 |
| 10        | $7,1 \times 10^{-1}$ | 1.6       | 0.003 |
| 15        | $7,5 \times 10^{-1}$ | 1.6       | 0.001 |
| 20        | —                    | 1.6       | 0.000 |



Gambar 4. 18 Pengiriman QPSK Image

Berdasarkan Tabel di atas, kualitas gambar yang diterima masih tergolong baik pada jarak 1 meter dengan nilai BER sebesar  $2,1 \times 10^{-4}$ , PSNR sebesar 40,7 dB, dan SSIM sebesar 0,987. Seiring bertambahnya jarak transmisi, nilai BER meningkat, sedangkan nilai PSNR dan SSIM mengalami penurunan yang menunjukkan menurunnya kualitas gambar





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

hasil penerimaan. Pada jarak 20 meter sistem tidak lagi menghasilkan nilai BER, sementara nilai PSNR dan SSIM yang sangat rendah menunjukkan bahwa gambar hasil rekonstruksi mengalami penurunan kualitas yang signifikan.

**b. Hasil Transmisi Data Audio**

Pengujian audio dilakukan untuk mengetahui kualitas sinyal audio yang diterima setelah proses transmisi menggunakan modulasi QPSK. Evaluasi dilakukan menggunakan parameter BER, Audio SNR, dan STOI. Hasil pengujian pada setiap variasi jarak ditunjukkan pada Tabel berikut:

Tabel 4. 6 Hasil Audio QPSK

| Jarak (m) | BER                  | Audio SNR (dB) | STOI  |
|-----------|----------------------|----------------|-------|
| 1         | $2,5 \times 10^{-4}$ | 16.7           | 0.915 |
| 5         | $2,4 \times 10^{-1}$ | -4.1           | 0.213 |
| 10        | $4,7 \times 10^{-1}$ | -0.4           | 0.018 |
| 15        | —                    | 0.0            | 0.000 |
| 20        | —                    | 0.0            | 0.000 |

## Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 19 Pengiriman QPSK Audio

Berdasarkan Tabel diatas, kualitas audio terbaik diperoleh pada jarak 1 meter dengan nilai BER yang rendah, Audio SNR sebesar 16,7 dB, dan STOI sebesar 0,915. Bertambahnya jarak transmisi menyebabkan kualitas audio menurun yang ditandai dengan meningkatnya nilai BER serta menurunnya nilai Audio SNR dan STOI. Pada jarak 15 meter hingga 20 meter audio tidak lagi dapat diterima dengan baik sehingga nilai STOI menjadi 0.

### c. Hasil Transmisi Data Teks

Pengujian teks dilakukan untuk mengetahui tingkat keberhasilan sistem dalam mempertahankan informasi karakter dan kata setelah proses transmisi menggunakan modulasi QPSK. Evaluasi dilakukan menggunakan parameter BER, CER, dan WER. Hasil pengujian pada setiap variasi jarak ditunjukkan pada Tabel berikut:

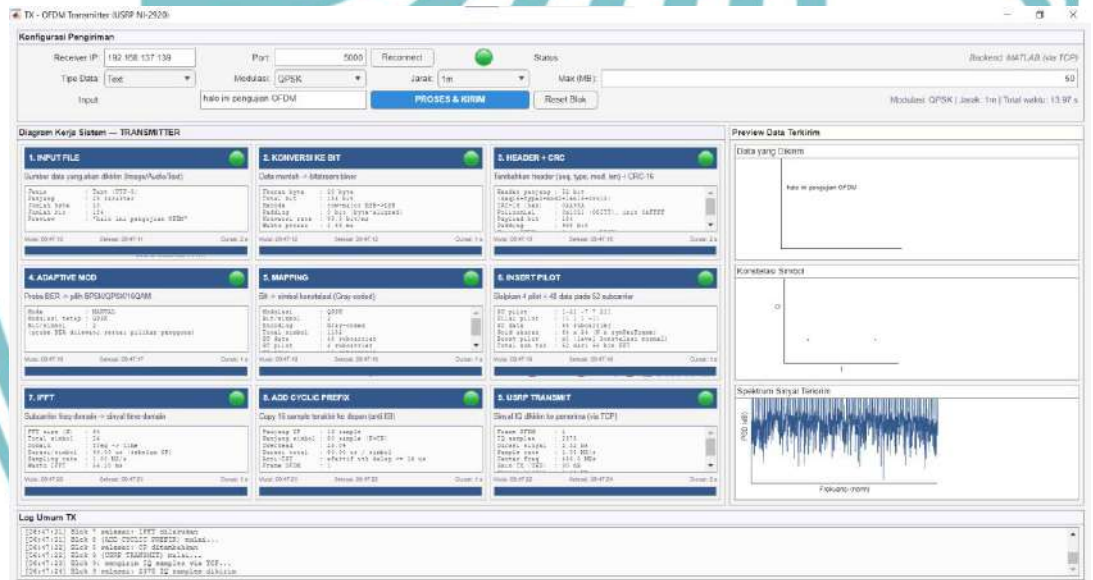


**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Tabel 4. 7 Hasil Text QPSK

| Jarak (m) | BER                  | CER   | WER   |
|-----------|----------------------|-------|-------|
| 1         | 0                    | 0.000 | 0.000 |
| 5         | $3.5 \times 10^{-2}$ | 0.256 | 0.929 |
| 10        | —                    | 1.000 | 1.000 |
| 15        | —                    | 1.000 | 1.000 |
| 20        | —                    | 1.000 | 1.000 |



Gambar 4. 20 Hasil GUI Receiver QPSK

Berdasarkan Tabel diatas, data teks dapat diterima dengan baik pada jarak 1 meter dengan nilai BER, CER, dan WER sebesar 0. Pada jarak 5 meter mulai terjadi peningkatan kesalahan karakter dan kata yang ditunjukkan oleh meningkatnya nilai CER dan WER. Mulai jarak 10 meter

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

hingga 20 meter nilai CER dan WER mencapai 1,000, yang menunjukkan bahwa data teks hasil penerimaan tidak lagi dapat dikenali dengan baik.

#### 4.2.4 Analisis Data dan Evaluasi

Hasil pengujian sistem komunikasi OFDM menggunakan modulasi QPSK dianalisis berdasarkan parameter yang diperoleh pada pengiriman data gambar, audio, dan teks. Analisis dilakukan untuk mengetahui pengaruh pertambahan jarak terhadap kualitas transmisi serta mengevaluasi kemampuan modulasi QPSK dalam mempertahankan integritas data yang dikirim. Parameter yang dianalisis meliputi BER, PSNR, SSIM, Audio SNR, STOI, CER, dan WER.

##### A. Analisis Hasil Pengujian Gambar

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel sebelumnya, kualitas gambar yang diterima mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak transmisi. Pada jarak 1 meter diperoleh nilai BER sebesar  $2,1 \times 10^{-4}$ , PSNR sebesar 40,7 dB, dan SSIM sebesar 0,987. Nilai tersebut menunjukkan bahwa gambar hasil penerimaan masih memiliki kualitas yang sangat baik dan hanya mengalami sedikit kesalahan selama proses transmisi.

Ketika jarak ditingkatkan menjadi 5 meter, nilai BER meningkat menjadi  $3,3 \times 10^{-1}$ , sedangkan nilai PSNR dan SSIM menurun menjadi 5,6 dB dan 0,160. Kondisi ini menunjukkan bahwa kualitas gambar mulai mengalami penurunan akibat meningkatnya kesalahan bit selama proses transmisi. Pada jarak 10 meter dan 15 meter, penurunan kualitas semakin terlihat dengan meningkatnya nilai BER serta

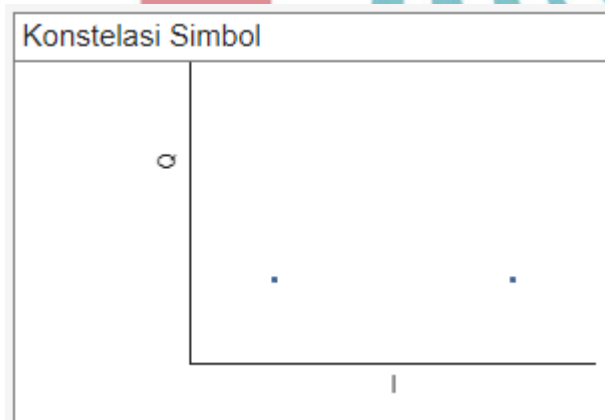


**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

menurunnya nilai SSIM hingga mendekati nol. Akibatnya, gambar hasil penerimaan mulai kehilangan detail dan sulit dikenali.

Pada jarak 20 meter sistem tidak lagi menampilkan nilai BER, sedangkan nilai PSNR tetap berada pada kisaran 1,6 dB dan SSIM bernilai 0. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa gambar tidak lagi dapat direkonstruksi dengan baik karena sebagian besar informasi mengalami kerusakan selama proses transmisi.

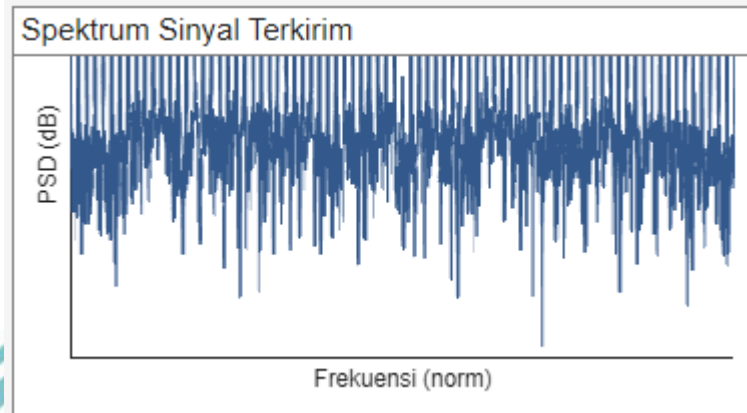


Gambar 4. 21 Konstelasi QPSK

Konstelasi pada Gambar 4.21 menunjukkan hasil penerimaan sinyal menggunakan modulasi QPSK. Titik-titik simbol masih terkumpul di sekitar posisi simbol yang diharapkan sehingga proses demodulasi masih dapat dilakukan dengan baik. Penyebaran titik yang relatif kecil menunjukkan bahwa gangguan kanal masih rendah dan kesalahan simbol yang terjadi masih sedikit. Kondisi ini sesuai dengan hasil pengujian pada jarak dekat yang menghasilkan nilai BER rendah serta kualitas data yang masih baik.

#### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 22 Diagram Konstelasi QPSK

Spektrum sinyal pada Gambar 4.22 menunjukkan distribusi daya sinyal pada domain frekuensi. Energi sinyal tersebar pada pita frekuensi yang digunakan dengan pola spektrum yang relatif merata. Hal ini menunjukkan bahwa sinyal OFDM-QPSK berhasil dipancarkan dan diterima pada bandwidth yang telah ditentukan. Meskipun terdapat fluktuasi amplitudo akibat pengaruh kanal dan noise, sinyal masih dapat diterima dengan baik sehingga proses transmisi data tetap berlangsung secara optimal.

#### B. Analisis Hasil Pengujian Audio

Hasil pengujian audio menunjukkan bahwa kualitas sinyal yang diterima menurun seiring bertambahnya jarak transmisi. Pada jarak 1 meter diperoleh nilai BER sebesar  $2,5 \times 10^{-4}$ , Audio SNR sebesar 16,7 dB, dan STOI sebesar 0,915. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kualitas audio masih sangat baik dan isi suara masih dapat dipahami dengan jelas.

Pada jarak 5 meter nilai BER meningkat menjadi  $2,4 \times 10^{-1}$ , sedangkan Audio SNR menurun menjadi -4,1 dB dan STOI menjadi





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

0,213. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa gangguan selama proses transmisi mulai memengaruhi kualitas audio sehingga tingkat keterpahaman suara ikut menurun. Pada jarak 10 meter kualitas audio kembali mengalami penurunan yang ditunjukkan oleh meningkatnya nilai BER serta nilai STOI yang mendekati nol.

Pada jarak 15 meter hingga 20 meter sistem tidak lagi menghasilkan nilai BER, sedangkan Audio SNR dan STOI bernilai 0. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa audio tidak lagi dapat direkonstruksi dengan baik sehingga informasi suara yang dikirim tidak dapat dipahami pada sisi penerima.

### C. Analisis Hasil Pengujian Teks

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.14, transmisi data teks menggunakan modulasi QPSK menghasilkan performa yang sangat baik pada jarak 1 meter dengan nilai BER, CER, dan WER sebesar 0. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa seluruh karakter dan kata berhasil diterima tanpa kesalahan.

Pada jarak 5 meter mulai terjadi peningkatan kesalahan dengan nilai BER sebesar  $3.5 \times 10^{-2}$ , CER sebesar 0,256, dan WER sebesar 0,929. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sebagian karakter dan kata mengalami perubahan sehingga informasi yang diterima tidak lagi sama dengan data asli.

Mulai jarak 10 meter hingga 20 meter nilai CER dan WER mencapai 1,000. Kondisi ini menunjukkan bahwa seluruh karakter dan kata mengalami kesalahan pembacaan sehingga data teks tidak lagi dapat dikenali dengan baik oleh sistem penerima.



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

#### D. Evaluasi Modulasi QPSK

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, modulasi QPSK mampu mentransmisikan data gambar, audio, dan teks dengan baik pada jarak pendek. Pada jarak 1 meter seluruh jenis data masih dapat diterima dengan kualitas yang baik, meskipun nilai BER pada gambar dan audio tidak lagi bernilai nol seperti pada modulasi BPSK.

Seiring bertambahnya jarak transmisi, kualitas seluruh jenis data mengalami penurunan yang ditunjukkan oleh meningkatnya nilai BER serta menurunnya nilai PSNR, SSIM, Audio SNR, dan STOI. Pada pengujian teks, nilai CER dan WER juga meningkat hingga mencapai 1,000 pada jarak 10 meter. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan jarak memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap kualitas transmisi menggunakan modulasi QPSK.

Secara keseluruhan, modulasi QPSK masih mampu mempertahankan kualitas transmisi gambar hingga jarak 15 meter, sedangkan kualitas audio mulai mengalami penurunan yang signifikan setelah jarak 10 meter. Pada transmisi teks, peningkatan kesalahan karakter dan kata mulai terlihat pada jarak 5 meter dan terus meningkat hingga data tidak lagi dapat dikenali pada jarak berikutnya. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa modulasi QPSK memiliki efisiensi spektral yang lebih tinggi dibandingkan BPSK, namun kualitas transmisi tetap dipengaruhi oleh penambahan jarak dan kondisi kanal selama proses komunikasi.





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

## 4.3 Pengujian Sistem Menggunakan Modulasi 16-QAM

### 4.3.1 Deskripsi Pengujian

#### A. Tujuan Pengujian

Pengujian menggunakan modulasi 16-Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM) dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem komunikasi Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) menggunakan perangkat Software Defined Radio (SDR), yaitu NI USRP-2920 sebagai transmitter dan RTL-SDR Blog V4 sebagai receiver. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mentransmisikan data gambar, audio, dan teks pada beberapa variasi jarak transmisi.

Selain itu, pengujian bertujuan untuk mengetahui pengaruh pertambahan jarak terhadap kualitas transmisi berdasarkan parameter Bit Error Rate (BER), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Structural Similarity Index Measure (SSIM), Audio Signal-to-Noise Ratio (Audio SNR), Short-Time Objective Intelligibility (STOI), Character Error Rate (CER), dan Word Error Rate (WER). Hasil pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi performa sistem komunikasi OFDM menggunakan modulasi 16-QAM pada berbagai variasi jarak transmisi.

#### B. Alat dan Spesifikasi Pengujian

Hardware, software, dan parameter sistem yang digunakan pada pengujian modulasi 16-QAM sama dengan konfigurasi yang telah dijelaskan pada Subbab 4.1.1 bagian B. Seluruh konfigurasi dipertahankan tetap selama proses pengujian sehingga perubahan hasil



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

yang diperoleh dipengaruhi oleh karakteristik modulasi 16-QAM dan variasi jarak transmisi.

**C. Konfigurasi Sistem**

Konfigurasi sistem pada pengujian ini menggunakan sistem komunikasi Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) dengan modulasi 16-Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM). Pengujian dilakukan pada mode Fixed 16-QAM, sehingga seluruh data dikirim menggunakan modulasi 16-QAM tanpa melalui proses pemilihan modulasi secara adaptif. Data yang dikirim berupa gambar, audio, dan teks dipilih melalui antarmuka GUI transmitter, kemudian dikonversi menjadi bitstream (source encoding). Selanjutnya, sistem menambahkan header paket dan Cyclic Redundancy Check (CRC-16) sebagai mekanisme pendeteksian kesalahan sebelum data diproses pada sistem OFDM.

Bitstream hasil pengkodean kemudian dipetakan menjadi simbol modulasi 16-QAM menggunakan Gray Mapping. Simbol hasil modulasi selanjutnya diproses pada blok OFDM yang meliputi penyisipan pilot, pembentukan simbol OFDM, Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) berukuran 64 titik, serta penambahan Cyclic Prefix (CP) sepanjang 16 sampel. Sinyal OFDM kemudian dipancarkan menggunakan perangkat NI USRP-2920 pada frekuensi kerja 433 MHz.

Pada sisi penerima, sinyal diterima menggunakan RTL-SDR Blog V4 dalam bentuk data IQ. Data hasil penerimaan selanjutnya diproses di MATLAB melalui tahapan preprocessing, sinkronisasi frame, penghapusan Cyclic Prefix (CP), Fast Fourier Transform (FFT), estimasi kanal (channel estimation), equalisasi (equalizer), demodulasi





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

16-QAM, pemeriksaan CRC, serta rekonstruksi data hingga diperoleh kembali informasi sesuai dengan data yang dikirim. Setelah proses penerimaan selesai, sistem secara otomatis menghitung parameter evaluasi berupa Bit Error Rate (BER), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Structural Similarity Index Measure (SSIM), Audio Signal-to-Noise Ratio (Audio SNR), Short-Time Objective Intelligibility (STOI), Character Error Rate (CER), Word Error Rate (WER), waktu transmisi, dan throughput sesuai dengan jenis data yang dikirim.

Modulasi 16-QAM digunakan pada pengujian ini karena setiap simbol merepresentasikan empat bit informasi sehingga mampu meningkatkan efisiensi spektral dan laju transmisi data dibandingkan modulasi BPSK dan QPSK. Namun, karena jarak antar titik konstelasi lebih rapat, modulasi 16-QAM lebih sensitif terhadap pengaruh noise dan gangguan kanal. Oleh karena itu, modulasi ini memerlukan kualitas kanal yang lebih baik agar proses demodulasi dan rekonstruksi data dapat berlangsung secara optimal.

#### D. Skenario Pengujian

Skenario pengujian yang digunakan pada modulasi 16-QAM sama dengan skenario pengujian pada modulasi BPSK sebagaimana telah dijelaskan pada Subbab 4.1.1 bagian D. Pengujian dilakukan menggunakan konfigurasi hardware, software, dan parameter sistem yang sama sehingga hasil pengujian yang diperoleh dapat dibandingkan secara langsung dengan modulasi lainnya.

Pengujian dilaksanakan pada lingkungan outdoor dengan kondisi Line of Sight (LOS). Variasi jarak yang digunakan meliputi 1 meter, 5 meter, 10 meter, 15 meter, dan 20 meter. Pada setiap variasi jarak



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

dilakukan pengiriman tiga jenis data, yaitu gambar, audio, dan teks menggunakan modulasi 16-QAM. Seluruh proses pengujian dilakukan secara bertahap mulai dari jarak terdekat hingga jarak terjauh dengan konfigurasi sistem yang tetap.

Setelah proses transmisi selesai, sistem secara otomatis menampilkan hasil penerimaan beserta parameter evaluasi sesuai dengan jenis data yang diuji. Pengujian gambar dievaluasi menggunakan parameter BER, PSNR, dan SSIM, pengujian audio menggunakan parameter BER, Audio SNR, dan STOI, sedangkan pengujian teks menggunakan parameter BER, CER, dan WER. Hasil pengujian tersebut selanjutnya digunakan untuk menganalisis pengaruh pertambahan jarak terhadap performa sistem komunikasi OFDM menggunakan modulasi 16-QAM.

#### 4.3.2 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian modulasi 16-QAM dilakukan menggunakan tahapan yang sama dengan pengujian BPSK dan QPSK. Perbedaannya hanya terletak pada konfigurasi modulasi yang digunakan pada sistem OFDM. Tahapan pengujian dilakukan sebagai berikut.

1. Menjalankan program transmitter menggunakan file TX\_GUI.m.
2. Memilih mode Fixed 16-QAM sebagai teknik modulasi pada sistem komunikasi OFDM.
3. Memilih jenis data yang akan ditransmisikan berupa gambar, audio, atau teks melalui antarmuka GUI transmitter.
4. Melakukan proses pembentukan paket data yang meliputi konversi data menjadi bitstream, penambahan header dan CRC-16, pemetaan bit menggunakan modulasi 16-QAM, penyisipan pilot, proses



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Inverse Fast Fourier Transform (IFFT), serta penambahan Cyclic Prefix (CP).

5. Memancarkan sinyal OFDM menggunakan perangkat NI USRP-2920 pada frekuensi kerja 433 MHz.

6. Menerima sinyal menggunakan RTL-SDR Blog V4 yang terhubung dengan laptop receiver.

7. Menjalankan proses penerimaan menggunakan program RX\_GUI\_TCP.m yang meliputi preprocessing, sinkronisasi, penghapusan Cyclic Prefix (CP), Fast Fourier Transform (FFT), estimasi kanal (channel estimation), equalisasi (equalizer), demodulasi 16-QAM, pemeriksaan CRC, dan rekonstruksi data.

8. Menampilkan hasil penerimaan pada GUI MATLAB yang meliputi data hasil rekonstruksi, spektrum sinyal, diagram konstelasi, serta parameter evaluasi sesuai dengan jenis data yang dikirim.

9. Menghitung nilai BER, PSNR, SSIM, Audio SNR, STOI, CER, WER, waktu transmisi, dan throughput secara otomatis.

Seluruh tahapan tersebut diulangi pada setiap variasi jarak pengujian sehingga diperoleh data yang dapat digunakan untuk menganalisis performa sistem komunikasi menggunakan modulasi 16-QAM.

#### 4.3.3 Data Hasil Pengujian

Subbab ini menyajikan hasil pengujian sistem komunikasi OFDM menggunakan modulasi 16-QAM berdasarkan variasi jarak transmisi, yaitu 1 meter, 5 meter, 10 meter, 15 meter, dan 20 meter. Pengujian dilakukan terhadap tiga jenis data, yaitu gambar, audio, dan teks. Setiap hasil pengujian dievaluasi menggunakan parameter yang disesuaikan dengan karakteristik masing-masing jenis data.



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Pada pengujian gambar digunakan parameter Bit Error Rate (BER), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), dan Structural Similarity Index Measure (SSIM). Pengujian audio menggunakan parameter BER, Audio Signal-to-Noise Ratio (Audio SNR), dan Short-Time Objective Intelligibility (STOI). Sementara itu, pengujian teks dievaluasi menggunakan parameter BER, Character Error Rate (CER), dan Word Error Rate (WER). Hasil pengujian untuk setiap jenis data disajikan pada subbab berikut.

**a. Hasil Transmisi Data Gambar**

Pengujian gambar dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mempertahankan kualitas gambar setelah proses transmisi menggunakan modulasi 16-QAM. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan gambar hasil penerimaan terhadap gambar asli menggunakan parameter BER, PSNR, dan SSIM. Hasil pengujian pada setiap variasi jarak ditunjukkan pada Tabel berikut:

Tabel 4. 8 Hasil Gambar 16 QAM

| Jarak (m) | BER                  | PSNR (dB) | SSIM  |
|-----------|----------------------|-----------|-------|
| 1         | $1,2 \times 10^{-2}$ | 24.5      | 0.744 |
| 5         | $2,1 \times 10^{-1}$ | 9.0       | 0.243 |
| 10        | $6,6 \times 10^{-1}$ | 2.1       | 0.015 |
| 15        | $7,2 \times 10^{-1}$ | 1.6       | 0.001 |
| 20        | —                    | 1.6       | 0.000 |



## Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 23 Hasil GUI Receiver 16 QAM Image

Berdasarkan Tabel diatas, kualitas gambar terbaik diperoleh pada jarak 1 meter. Seiring bertambahnya jarak transmisi, nilai BER meningkat sedangkan nilai PSNR dan SSIM mengalami penurunan.

## b. Hasil Transmisi Data Audio

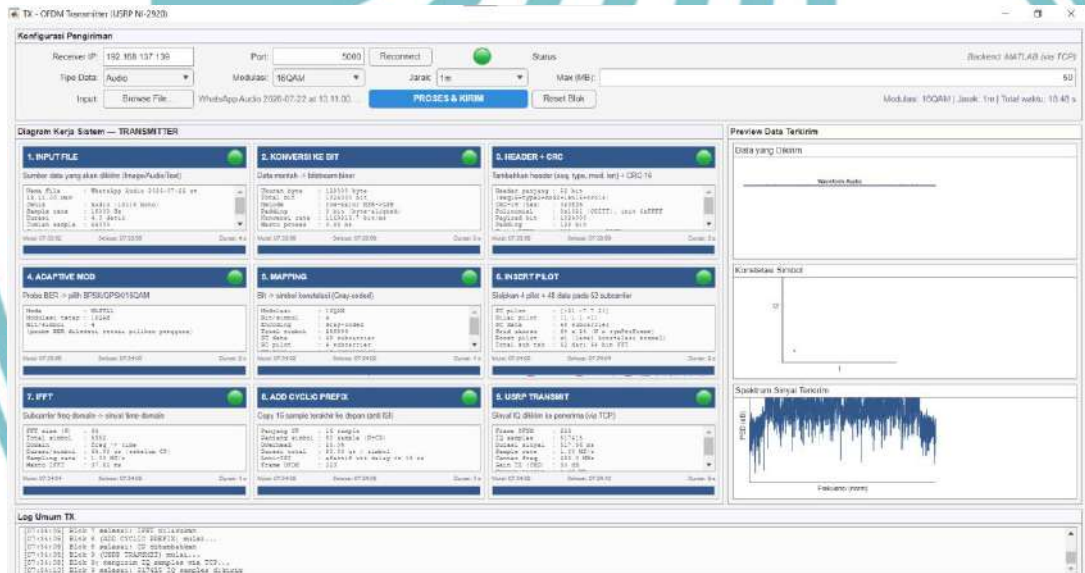
Pengujian audio dilakukan untuk mengetahui kualitas sinyal audio yang diterima setelah proses transmisi menggunakan modulasi 16-QAM. Evaluasi dilakukan menggunakan parameter BER, Audio SNR, dan STOI. Hasil pengujian pada setiap variasi jarak ditunjukkan pada Tabel berikut:

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Tabel 4. 9 Hasil Audio 16 QAM

| Jarak (m) | BER                  | Audio SNR (dB) | STOI  |
|-----------|----------------------|----------------|-------|
| 1         | $3,9 \times 10^{-2}$ | -1.1           | 0.557 |
| 5         | $3,2 \times 10^{-1}$ | -6.3           | 0.082 |
| 10        | $4,9 \times 10^{-1}$ | -0.6           | 0.028 |
| 15        | —                    | 0.0            | 0.000 |
| 20        | —                    | 0.0            | 0.000 |



Gambar 4. 24 Hasil GUI Receiver 16 QAM Audio

Berdasarkan Tabel diatas, kualitas audio terbaik diperoleh pada jarak 1 meter. Bertambahnya jarak transmisi menyebabkan nilai BER meningkat, sedangkan Audio SNR dan STOI mengalami penurunan. Pada jarak 15 meter hingga 20 meter audio tidak lagi dapat diterima dengan baik sehingga nilai STOI menjadi 0.



### Hak Cipta:

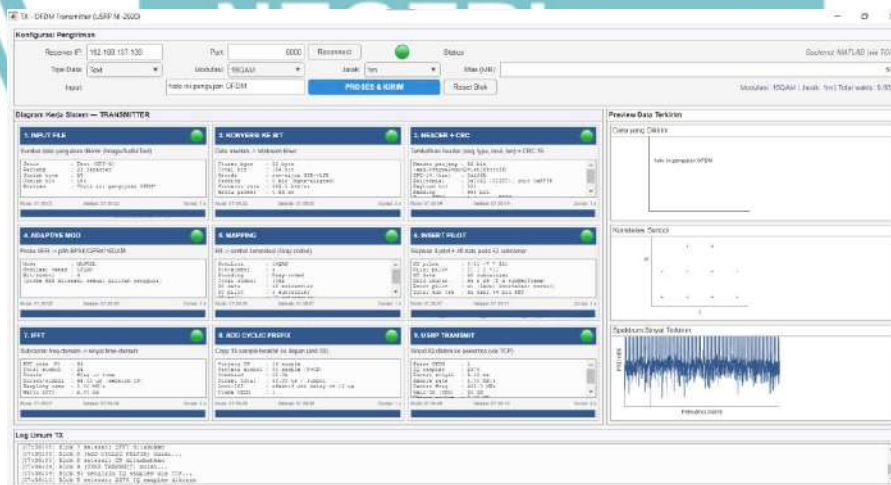
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

### c. Hasil Transmisi Data Teks

Pengujian teks dilakukan untuk mengetahui tingkat keberhasilan sistem dalam mempertahankan informasi karakter dan kata setelah proses transmisi menggunakan modulasi 16-QAM. Evaluasi dilakukan menggunakan parameter BER, CER, dan WER. Hasil pengujian pada setiap variasi jarak ditunjukkan pada Tabel berikut:

Tabel 4. 10 Hasil Teks 16 QAM

| Jarak (m) | BER                  | CER   | WER   |
|-----------|----------------------|-------|-------|
| 1         | $5,6 \times 10^{-2}$ | 0.411 | 0.929 |
| 5         | —                    | 1.000 | 1.000 |
| 10        | —                    | 1.000 | 1.000 |
| 15        | —                    | 1.000 | 1.000 |
| 20        | —                    | 1.000 | 1.000 |



Gambar 4. 25 Hasil GUI Receiver 16 QAM Teks

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Berdasarkan Tabel diatas, data teks hanya dapat diterima dengan baik pada jarak 1 meter. Pada jarak 5 meter hingga 20 meter nilai CER dan WER mencapai 1,000 yang menunjukkan bahwa karakter dan kata hasil penerimaan tidak lagi dapat dikenali dengan baik.

#### 4.3.4 Analisis Data dan Evaluasi

Hasil pengujian sistem komunikasi OFDM menggunakan modulasi 16-QAM dianalisis berdasarkan parameter yang diperoleh pada pengiriman data gambar, audio, dan teks. Analisis dilakukan untuk mengetahui pengaruh pertambahan jarak terhadap kualitas transmisi serta mengevaluasi kemampuan modulasi 16-QAM dalam mempertahankan integritas data yang dikirim. Parameter yang dianalisis meliputi BER, PSNR, SSIM, Audio SNR, STOI, CER, dan WER.

##### A. Analisis Hasil Pengujian Gambar

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel, kualitas gambar yang diterima mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak transmisi. Pada jarak 1 meter diperoleh nilai BER sebesar  $1,2 \times 10^{-2}$ , PSNR sebesar 24,5 dB, dan SSIM sebesar 0,744. Nilai tersebut menunjukkan bahwa gambar masih dapat diterima dengan baik, meskipun telah terjadi sedikit penurunan kualitas dibandingkan gambar asli.

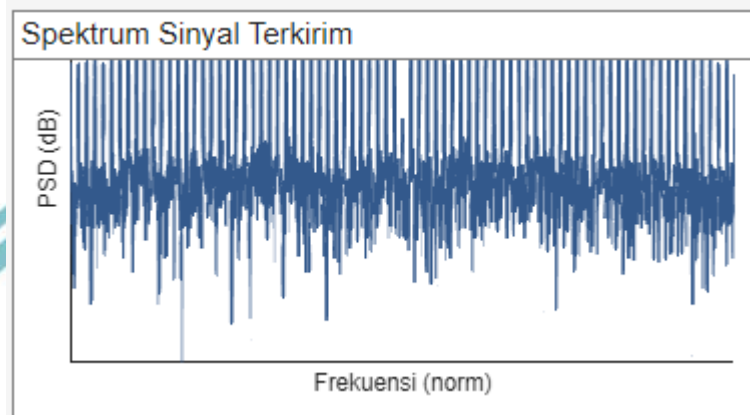
Pada jarak 5 meter nilai BER meningkat menjadi  $2,1 \times 10^{-1}$ , sedangkan nilai PSNR dan SSIM menurun menjadi 9,0 dB dan 0,243. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa sebagian informasi gambar mulai mengalami kerusakan akibat meningkatnya kesalahan bit selama proses transmisi. Pada jarak 10 meter dan 15 meter, kualitas gambar semakin menurun yang ditandai dengan meningkatnya nilai BER serta



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

menurunnya nilai SSIM hingga mendekati nol. Akibatnya, gambar hasil penerimaan kehilangan sebagian besar detail dan sulit dikenali.

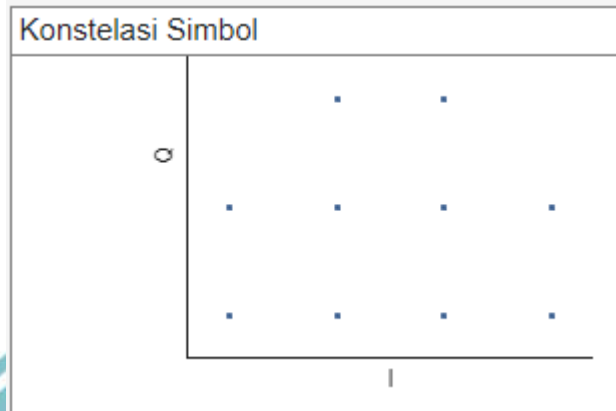


Gambar 4. 26 Spektrum Sinyal 16 QAM

Spektrum sinyal pada Gambar 4.26 menunjukkan distribusi daya sinyal OFDM yang dipancarkan menggunakan modulasi 16-QAM pada domain frekuensi. Distribusi daya terlihat menyebar pada seluruh subcarrier OFDM dengan pola yang relatif merata, yang menunjukkan bahwa proses pembentukan simbol OFDM, penyisipan pilot, dan transformasi IFFT telah berjalan sesuai dengan konfigurasi sistem. Visualisasi spektrum ini digunakan untuk memastikan bahwa sinyal yang dipancarkan memiliki karakteristik frekuensi yang sesuai sebelum ditransmisikan melalui perangkat NI USRP-2920.

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 27 Konstelasi 16 QAM

Konstelasi pada Gambar 4.27 menunjukkan hasil penerimaan sinyal menggunakan modulasi 16-QAM pada sisi receiver. Titik-titik konstelasi membentuk empat tingkat amplitudo pada sumbu In-phase (I) dan Quadrature (Q) yang merepresentasikan 16 simbol modulasi. Meskipun sebagian besar titik masih berada di sekitar posisi simbol yang diharapkan, terlihat adanya penyebaran titik akibat pengaruh noise dan kondisi kanal komunikasi. Dibandingkan dengan modulasi BPSK dan QPSK, jarak antar titik konstelasi pada 16-QAM lebih rapat sehingga modulasi ini lebih sensitif terhadap gangguan selama proses transmisi. Kondisi tersebut meningkatkan kemungkinan terjadinya kesalahan simbol yang dapat memengaruhi kualitas data hasil penerimaan, terutama pada jarak transmisi yang lebih jauh.

## B. Analisis Hasil Pengujian Audio

Hasil pengujian audio menunjukkan bahwa kualitas sinyal yang diterima mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak transmisi. Pada jarak 1 meter diperoleh nilai BER sebesar  $3,9 \times 10^{-2}$ , Audio SNR sebesar -1,1 dB, dan STOI sebesar 0,557. Nilai tersebut menunjukkan





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

bahwa audio masih dapat diterima, namun kualitasnya telah mengalami penurunan dibandingkan data audio asli.

Pada jarak 5 meter nilai BER meningkat menjadi  $3,2 \times 10^{-1}$ , sedangkan Audio SNR menurun menjadi -6,3 dB dan STOI menjadi 0,082. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kualitas audio semakin menurun sehingga tingkat keterpahaman suara menjadi sangat rendah. Pada jarak 10 meter kualitas audio kembali mengalami penurunan yang ditunjukkan oleh meningkatnya nilai BER menjadi  $4,9 \times 10^{-1}$  dan nilai STOI yang mendekati nol.

Pada jarak 15 meter hingga 20 meter sistem tidak lagi menghasilkan nilai BER, sedangkan Audio SNR dan STOI bernilai 0. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa audio tidak lagi dapat direkonstruksi sehingga informasi suara yang dikirim tidak dapat dipahami pada sisi penerima.

### C. Analisis Hasil Pengujian Teks

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.17, transmisi data teks menggunakan modulasi 16-QAM menghasilkan kualitas terbaik pada jarak 1 meter dengan nilai BER sebesar  $5,6 \times 10^{-2}$ , CER sebesar 0,411, dan WER sebesar 0,929. Meskipun data masih dapat diterima, telah terjadi kesalahan pada sebagian karakter dan kata sehingga hasil penerimaan tidak sepenuhnya sama dengan data asli.

Pada jarak 5 meter hingga 25 meter nilai CER dan WER mencapai 1,000. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa seluruh karakter dan kata mengalami kesalahan pembacaan sehingga data teks tidak lagi dapat dikenali dengan baik oleh sistem penerima. Hasil ini



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

menunjukkan bahwa transmisi data teks menggunakan modulasi 16-QAM sangat dipengaruhi oleh pertambahan jarak sehingga kualitas penerimaan menurun lebih cepat dibandingkan data gambar dan audio.

#### **D. Evaluasi Modulasi 16-QAM**

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, modulasi 16-QAM mampu mentransmisikan data gambar, audio, dan teks pada jarak pendek, namun kualitas hasil penerimaan mengalami penurunan yang lebih cepat seiring bertambahnya jarak transmisi. Pada pengujian gambar, penurunan kualitas ditunjukkan oleh meningkatnya nilai BER serta menurunnya nilai PSNR dan SSIM pada setiap variasi jarak. Pada pengujian audio, peningkatan nilai BER diikuti dengan penurunan Audio SNR dan STOI sehingga kualitas suara menjadi semakin sulit dipahami. Sementara itu, pada pengujian teks nilai CER dan WER meningkat secara signifikan mulai jarak 5 meter yang menunjukkan bahwa sebagian besar informasi tidak lagi dapat diterima dengan benar.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa modulasi 16-QAM memiliki kemampuan untuk mengirimkan data dengan efisiensi yang lebih tinggi, namun kualitas transmisi sangat dipengaruhi oleh kondisi kanal dan jarak antara transmitter dan receiver. Pertambahan jarak menyebabkan peningkatan kesalahan bit yang berdampak langsung pada penurunan kualitas gambar, audio, maupun teks yang diterima.





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

## 4.4 Pengujian Menggunakan Adaptive Modulation

### 4.4.1 Deskripsi Pengujian

Pengujian Adaptive Modulation dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam memilih skema modulasi secara otomatis berdasarkan kualitas kanal komunikasi. Berbeda dengan pengujian menggunakan modulasi tetap (Fixed BPSK, Fixed QPSK, dan Fixed 16-QAM), pada pengujian ini sistem menentukan modulasi yang digunakan secara otomatis berdasarkan nilai Bit Error Rate (BER) yang diperoleh dari paket uji (*test packet*) yang dikirim sebelum proses transmisi data utama.

Mekanisme Adaptive Modulation dirancang agar sistem dapat menyesuaikan modulasi dengan kondisi kanal. Apabila kualitas kanal baik, sistem memilih modulasi dengan efisiensi spektral yang lebih tinggi, sedangkan apabila kualitas kanal menurun, sistem memilih modulasi yang lebih robust terhadap gangguan sehingga kualitas komunikasi tetap dapat dipertahankan.

Pengujian dilakukan terhadap tiga jenis data, yaitu gambar, audio, dan teks pada beberapa variasi jarak pengujian. Parameter yang diamati meliputi modulasi yang dipilih sistem, BER, PSNR, SSIM, Audio-SNR, STOI, CER, WER, waktu transmisi, dan throughput.

### 4.4.2 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian Adaptive Modulation dilakukan melalui tahapan sebagai berikut.

1. Pengguna memilih mode transmisi Adaptive pada GUI transmitter.
2. Pengguna memilih file yang akan dikirim menggunakan fasilitas Browse File.



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3. Sistem membangkitkan paket uji (*test packet*) menggunakan modulasi BPSK.
4. Paket uji dipancarkan menggunakan NI USRP-2920 melalui frekuensi 433 MHz.
5. RTL-SDR Blog V4 menerima paket uji dan menghitung nilai BER hasil penerimaan.
6. Nilai BER dikirimkan kembali ke transmitter melalui komunikasi TCP sebagai kanal kontrol.
7. Berdasarkan nilai BER yang diterima, transmitter memilih modulasi secara otomatis menggunakan mekanisme Adaptive Modulation sesuai nilai ambang (*threshold*) yang telah ditentukan.
8. Data utama dikirim menggunakan modulasi hasil keputusan sistem.
9. Receiver melakukan proses sinkronisasi, demodulasi, pemeriksaan CRC, serta rekonstruksi data.
10. GUI receiver menampilkan hasil pengujian berupa modulasi yang dipilih, BER, throughput, waktu transmisi, parameter kualitas data, diagram konstelasi, serta grafik BER terhadap jarak.

**POLITEKNIK  
NEGERI  
JAKARTA**



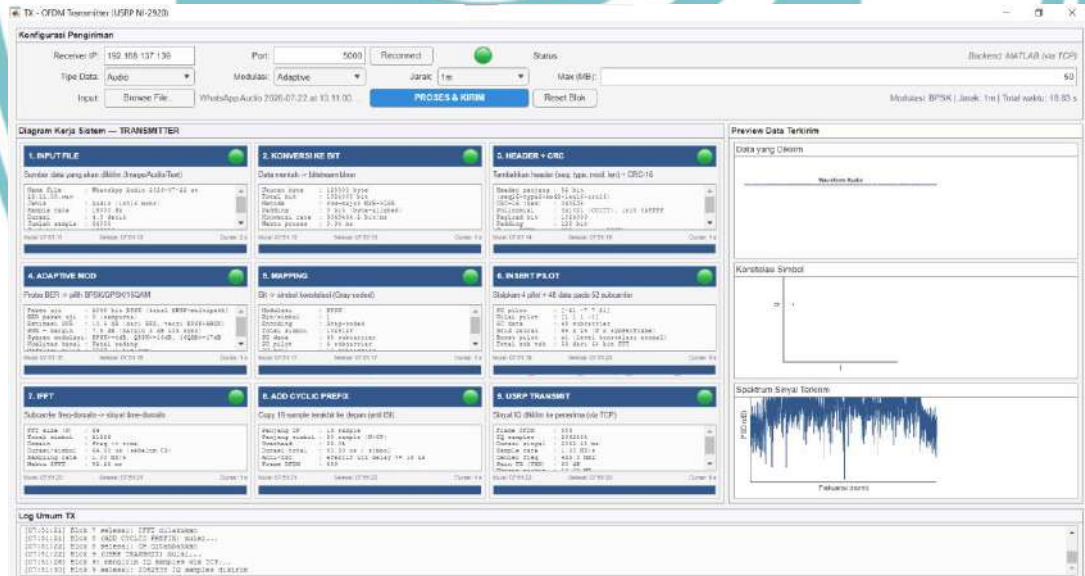
## Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

## 4.4.3 Data Hasil Pengujian



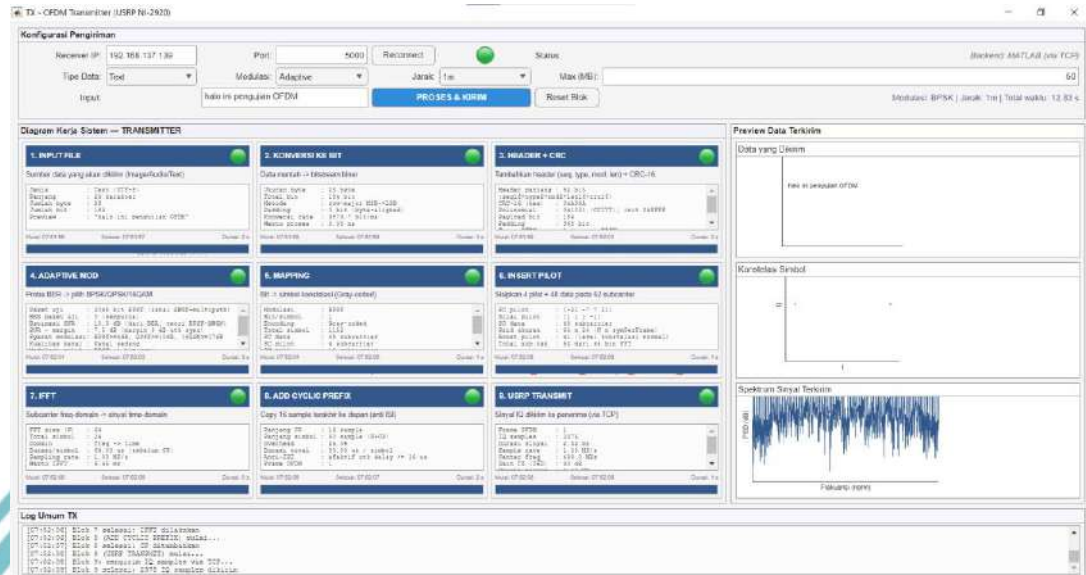
Gambar 4. 28 Adaptive Gambar



Gambar 4. 29 Adaptive Audio

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 30 Adaptive Teks

#### 4.4.4 Analisis Data dan Evaluasi

Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil Adaptive Modulation terhadap pengujian menggunakan modulasi tetap BPSK, QPSK, dan 16-QAM. Evaluasi difokuskan pada kemampuan sistem dalam memilih modulasi yang sesuai dengan kondisi kanal sehingga diperoleh keseimbangan antara kecepatan transmisi dan kemudahan dalam komunikasi.

Apabila kualitas kanal berada pada kondisi baik, sistem cenderung memilih modulasi 16-QAM sehingga throughput yang diperoleh lebih tinggi. Sebaliknya, ketika kualitas kanal menurun akibat bertambahnya jarak transmisi atau gangguan kanal, sistem akan memilih modulasi QPSK atau BPSK untuk mempertahankan nilai BER tetap rendah. Dengan mekanisme tersebut, Adaptive Modulation mampu meningkatkan fleksibilitas sistem dibandingkan penggunaan modulasi tetap karena pemilihan modulasi dilakukan secara otomatis sesuai kondisi kanal yang terukur.