

Teknik Pengiriman File *Audio* Berbasis *Software Defined Radio* pada Kanal Komunikasi dalam Ruangan dengan *Multicarrier OFDM*

FIGA AGHANI ROSYID, SOLICHAH LARASATI, WAHYU PAMUNGKAS

Departement Teknik Telekomunikasi, Universitas Telkom, Purwokerto, Indonesia
Email: wahyupa@telkomuniversity.ac.id

Received 22 Agustus 2024 | *Revised* 20 September 2024 | *Accepted* 29 September 2024

ABSTRAK

Transmisi audio pada kanal indoor dipengaruhi oleh efek multipath fading yang dapat mengganggu kualitas sinyal. Multicarrier OFDM digunakan sebagai solusi untuk mengatasi fenomena ini. Penelitian ini mengkaji tentang karakteristik kanal indoor dan transmisi audio dengan multicarrier OFDM berbasis SDR. Simulasi menggunakan NI-USRP2920, RTL2832U, GNU Radio dan Matlab pada kondisi NLOS dan LOS. Analisa kanal berdasarkan parameter CCDF menunjukkan daya sinyal maksimum pada kondisi NLOS (0,535 dB) lebih rendah dibandingkan LOS (1,214 dB), menandakan multipath fading yang lebih signifikan. Transmisi audio dengan modulasi BPSK, QPSK, 16-QAM pada kondisi NLOS menunjukkan nilai BER secara berurutan 0.26880, 0.37976, 0.49522. Sementara untuk kondisi LOS, secara berurutan 0, 0, 0.00020. Hasil ini menunjukkan modulasi yang lebih sederhana pada multicarrier OFDM meningkatkan ketahanan terhadap multipath fading.

Kata kunci: *Audio, Kanal Indoor, Multicarrier OFDM, Multipath Fading, SDR*

ABSTRACT

Audio transmission on indoor channels is affected by the effect of multipath fading which can interfere with signal quality. Multicarrier OFDM is used as a solution to overcome this phenomenon. This study examines the characteristics of indoor channels and audio transmission with SDR-based OFDM multicarrier. The simulation uses NI-USRP2920, RTL2832U, GNU Radio and Matlab under NLOS and LOS conditions. Channel analysis based on CCDF parameters showed that the maximum signal power under NLOS conditions (0.535 dB) was lower than that of LOS (1.214 dB), indicating a more significant multipath fading. Audio transmission with BPSK, QPSK, 16-QAM modulation under NLOS conditions showed BER values of 0.26880, 0.37976, 0.49522 respectively. Meanwhile, for LOS conditions, 0, 0, 0.00020 respectively. These results show that simpler modulation of OFDM multicarriers improves resistance to multipath fading.

Keywords: *Audio, Indoor Channel, Multicarrier OFDM, Multipath Fading, SDR*

1. PENDAHULUAN

Komunikasi nirkabel adalah teknologi yang memungkinkan pengiriman dan penerimaan informasi tanpa menggunakan media transmisi fisik (**Isnawati, dkk, 2022**), salah satu jenis informasi yang sering dikirim dan diterima melalui komunikasi nirkabel adalah audio. Audio adalah media untuk menyampaikan informasi yang dituangkan ke dalam lambang-lambang auditif yang berupa kata-kata, musik, ataupun *sound effect* (**Fatmawaty & Mufty, 2020**). Rentang frekuensi audio yang dapat didengar oleh telinga manusia berkisar antara 20 Hz hingga 20 KHz dengan beberapa format yang umum digunakan, seperti Wav, MP3, WMA, AAC dan lain-lain (**Kusuma, 2020**). Salah satu faktor yang mempengaruhi kualitas dan efisiensi audio adalah frekuensi *sampling*, yaitu seberapa sering sinyal analog diambil dan direproduksi dalam bentuk digital. *Sampling rate* diukur dalam *hertz* (Hz), semakin tinggi *sampling rate* maka akan semakin kuat resolusi audio tersebut (**Syam, 2018**). Untuk mengirimkan audio dari satu tempat ke tempat lain, diperlukan suatu sistem transmisi yang dapat menjamin kualitas audio yang ditransmisikan ketika melewati sebuah kanal propagasi.

Kanal *indoor* merupakan salah satu jenis kanal propagasi yang umum digunakan untuk mengirimkan suatu informasi termasuk audio. Kanal yang berada di dalam ruangan atau bangunan ini memiliki beberapa karakteristik, seperti penyebaran sinyal yang terbatas dalam ruangan dan interferensi dari objek disekitar. Kanal *indoor* yang memiliki banyak benda di sekitarnya ini menciptakan sebuah kondisi *multipath fading*, kondisi ketika terjadinya fenomena sinyal yang dikirim dari pemancar ke penerima mengalami banyak pantulan dari objek-objek di sekitarnya, seperti meja, kursi, dinding, lemari, pintu, atau jendela. Kondisi ini dapat menyebabkan distorsi, kesalahan pada sinyal yang diterima, dan potensi redaman sinyal oleh struktur bangunan (**Alsaify, dkk, 2020**). Selain itu, sudut kedatangan sinyal juga dapat dipengaruhi oleh *multipath fading* (**Hendry, dkk, 2018**). Interferensi dan redaman sinyal ini dapat menciptakan variasi acak dalam amplitudo sinyal yang ditransmisikan. Variasi acak dalam kanal *indoor* ini dapat dimodelkan dengan distribusi *Rayleigh*. Distribusi ini digunakan untuk kondisi kanal *Non Line of Sight* (NLOS), yaitu ketika tidak ada jalur pandang langsung antara pemancar dan penerima (**Hayati, 2020**).

Multicarrier orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) merupakan teknik yang bekerja dengan membagi sinyal menjadi *subcarrier-subcarrier* yang saling *orthogonal* tanpa menginterferensi satu sama lain (**Hadiansyah, 2021**). Teknik ini mendukung kondisi kanal *indoor* yang memiliki variasi acak dalam amplitudo sinyal. Untuk menerapkan sistem OFDM dalam mentransmisikan audio melalui kanal *indoor*, pada penelitian ini akan menggunakan konsep *Software Defined Radio* (SDR) (**Wyglinski & Pu, 2013**). SDR merupakan suatu teknologi dimana fungsi-fungsi radio seperti proses modulasi pada *transmitter* dan proses demodulasi pada *receiver* dijalankan oleh *software* (**Molla, dkk, 2022**), sehingga SDR memberikan kelebihan pada fleksibilitas, efisiensi dan dengan implementasi yang tepat dapat menjaga kualitas audio yang ditransmisikan. Teknologi ini memungkinkan untuk melakukan simulasi transmisi secara riil. Selain itu, SDR juga dapat digunakan untuk mengkarakterisasi kanal nirkabel, terutama di lingkungan *indoor* yang kompleks (**Pamungkas, dkk, 2023**).

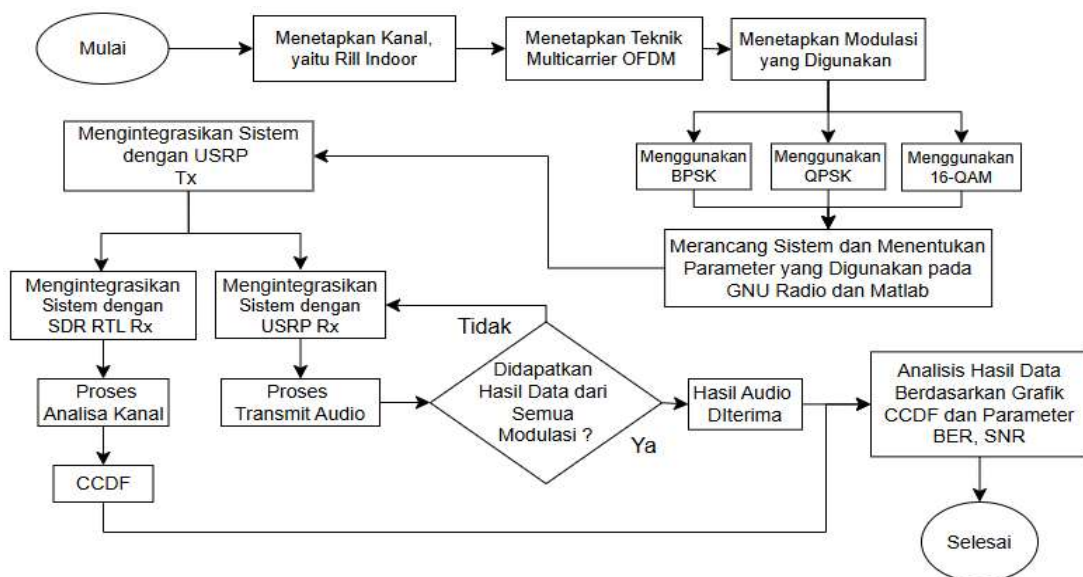
Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi teknik *multicarrier* OFDM untuk transmisi audio di lingkungan *indoor* dengan memanfaatkan fleksibilitas SDR dan ketahanan OFDM terhadap *multipath fading*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan perkembangan dari penelitian sebelumnya yang lebih mendalam tentang bagaimana mentransmisikan audio melalui kanal *indoor* dengan teknik *multicarrier* OFDM berbasis SDR, bagaimana pengaruh *multipath* pada kanal *indoor* terhadap transmisi audio, serta bagaimana hasil analisis berdasarkan parameter CCDF, BER dan SNR. Lebih lanjut, dengan memfokuskan pada kanal *indoor*, penelitian ini akan

lebih banyak mengeksplorasi karakteristik kanal *indoor* yang nanti akan digunakan untuk mentransmisikan informasi berupa *audio signal*. Sinyal *audio* dipilih karena pemanfaatan sinyal multimedia ini ke depan nya dapat mendukung aplikasi *Digital Audio Broadcasting* (DAB) sebagai alternatif pengganti analog *broadcasting* FM radio. Penggunaan teknik multicarrier dapat memberikan keuntungan dalam stabilitas sinyal, efisiensi spektrum, dan penghematan energi.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Alur Simulasi

Penelitian ini mengambil objek ruangan Laboratorium *Programming* dan *Internet of Everything* di Institut Teknologi Telkom Purwokerto. Alur simulasi pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1, Penelitian dimulai dengan menetapkan kanal riil *indoor* dengan *multipath fading* sebagai media transmisi. Teknik transmisi *multicarrier* OFDM dipilih untuk mengatasi tantangan *multipath* dan interferensi yang mungkin terjadi. Modulasi BPSK, QPSK, dan 16-QAM ditetapkan untuk digunakan dalam penelitian ini sebagai perbandingan kinerja sistem. Perancangan sistem seperti blok-blok pemrosesan sinyal dan penetapan parameter yang akan digunakan dibangun menggunakan perangkat lunak GNU Radio. Setelah sistem dirancang, GNU Radio diintegrasikan dengan perangkat keras USRP pada sisi pemancar. Untuk analisa kanal dilakukan menggunakan perangkat SDR RTL2832U dan Matlab, dengan parameter *Complementary Cumulative Distribution Function* (CCDF) sebagai fokus utama. Proses transmisi audio dilakukan menggunakan sistem *multicarrier* OFDM berbasis SDR yang telah dirancang. Analisa kanal dan transmisi audio dilakukan pada dua kondisi, *Non Line of Sight* (NLOS) di Laboratorium *Programming* dan *Line of Sight* (LOS) di Laboratorium *Internet of Everything* dengan menggunakan variasi modulasi BPSK, QPSK, dan 16-QAM. Sampel hasil simulasi dikumpulkan untuk setiap kombinasi modulasi dan kondisi kanal. Analisis mendalam terhadap hasil simulasi kemudian dilakukan. Nilai CCDF digunakan untuk memahami karakteristik kanal, sementara untuk kualitas audio yang diterima akan dievaluasi secara subjektif, dan kinerja sistem diukur berdasarkan parameter *Bit Error Rate* (BER) dan *Signal to Noise Ratio* (SNR).



Gambar 1. Diagram Alir Simulasi

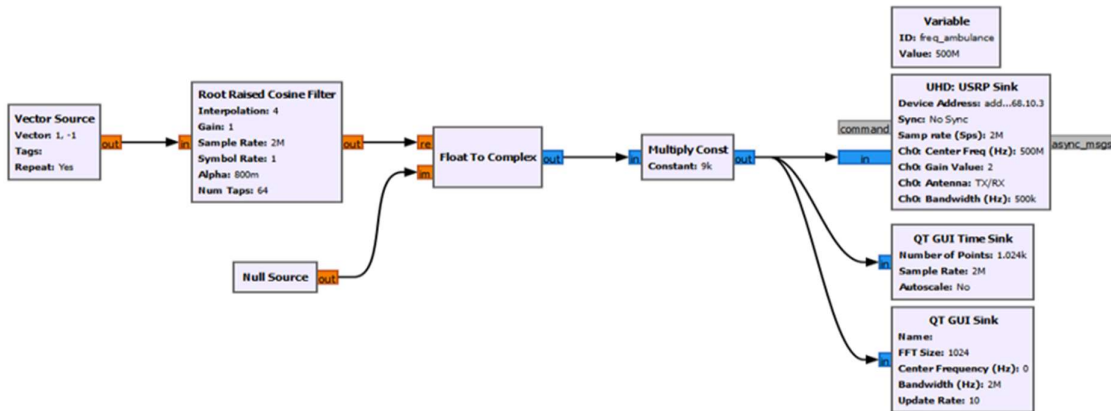
2.2 Menetapkan Kanal Komunikasi Nirkabel Indoor

Pada penelitian ini, kami menetapkan kanal komunikasi indoor untuk dapat mengetahui karakteristik kanal komunikasi yang akan digunakan untuk mengirimkan file audio. Lingkungan kanal komunikasi berada di ruangan Laboratorium Komunikasi Data, kampus Telkom University Purwokerto. Model komunikasi yang digunakan adalah seperti yang tertampil pada Gambar 2.



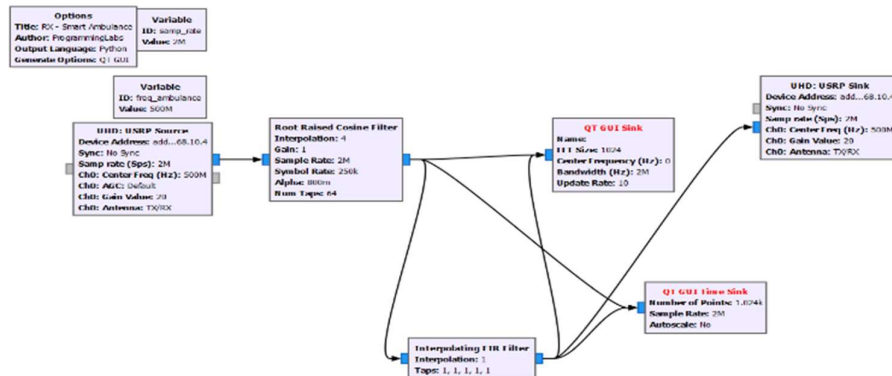
Gambar 2. Setting Perlengkapan SDR pada lingkungan Indoor untuk karakteristik kanal

Penelitian ini menggunakan perangkat USRP pada sisi pengirim dan di sisi penerima diterima dengan menggunakan perangkat USRP dan SDR RTL. Perangkat USRP pengirim mengirimkan impulse sinyal yang diprogram menggunakan GNU Radio software dengan konfigurasi seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Konfigurasi Pengaturan GNU Radio untuk USRP pengirim

Sumber impulse berupa format *line coding Non Return to Zero (NRZ)* sebagaimana terlihat pada bagian vector source. Sinyal ini kemudian masuk ke bagian Filter untuk diatur menjadi 4 impulse dengan sampling rate 2 Msps dan disesuaikan titik FFT nya sejumlah 64 titik. Impulse ini kemudian dikirimkan melalui lingkungan kanal komunikasi indoor untuk dapat diterima pada USRP dan SDR RTL di sisi penerima.

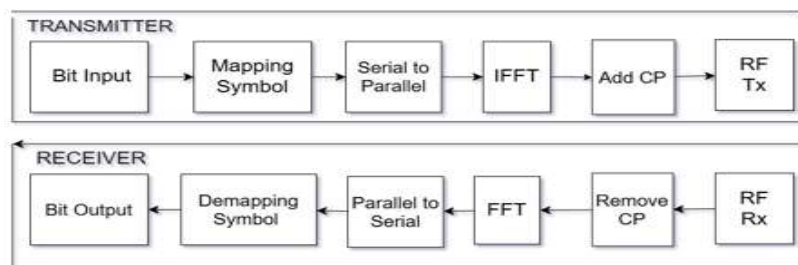


Gambar 4. Konfigurasi Pengaturan GNU Radio untuk USRP sisi penerima

Di sisi penerima, konfigurasi pengaturan GNU Radio dapat dilihat pada Gambar 4. Pada gambar ini terlihat bahwa GNU Radio dihubungkan dengan perangkat USRP dan sinyal diterima pada bagian Root Raised Cosine Filter yang berfungsi menerima sinyal dan mempertahankan bentuk sinyal sesuai tampilan frekuensi domain yang dikirimkan.

2.3 Desain Sistem *Multicarrier OFDM*

Blok sistem yang digunakan seperti terlihat pada Gambar 5 Pada bagian pemancar, data audio yang awalnya berupa berkas .Wav diubah menjadi aliran bit-bit informasi. Bit-bit ini kemudian dipetakan ke simbol-simbol kompleks menggunakan teknik modulasi digital yang akan digunakan, yaitu BPSK, QPSK, atau 16-QAM. Selanjutnya, simbol-simbol ini diatur dalam bentuk paralel dan diubah dari domain frekuensi ke domain waktu menggunakan *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT), menghasilkan sinyal OFDM. Lalu, *Cyclic Prefix* (CP) ditambahkan di awal setiap simbol OFDM. Selanjutnya, sinyal OFDM yang telah dimodulasi dan dilengkapi CP akan dikirimkan melewati kanal. Pada sisi penerima, sinyal OFDM yang telah diterima akan dihapus CP-nya dari setiap simbol OFDM, dan sinyal diubah kembali ke domain frekuensi menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT). Kemudian, Simbol-simbol yang telah dikembalikan ke bentuk serial akan didekode kembali menjadi bit-bit informasi menggunakan teknik demodulasi yang sesuai dengan modulasi yang digunakan pada pemancar. Terakhir, bit-bit informasi ini akan diubah kembali menjadi data audio pada tahap selanjutnya dan disimpan untuk evaluasi lebih lanjut.

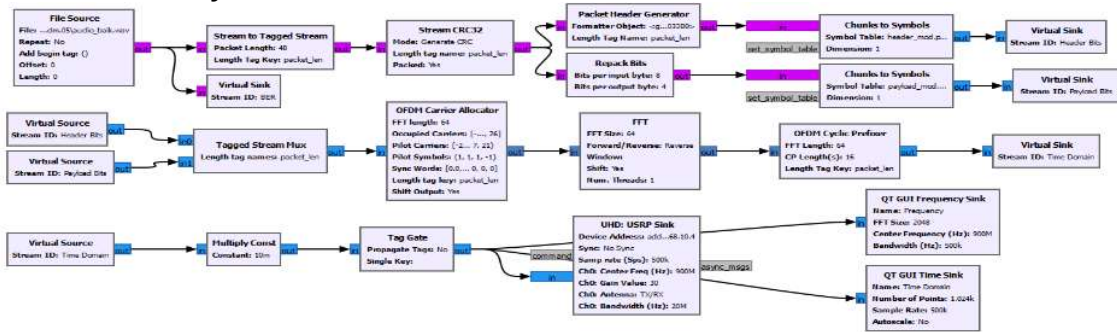


Gambar 5. Blok Sistem *Multicarrier OFDM*

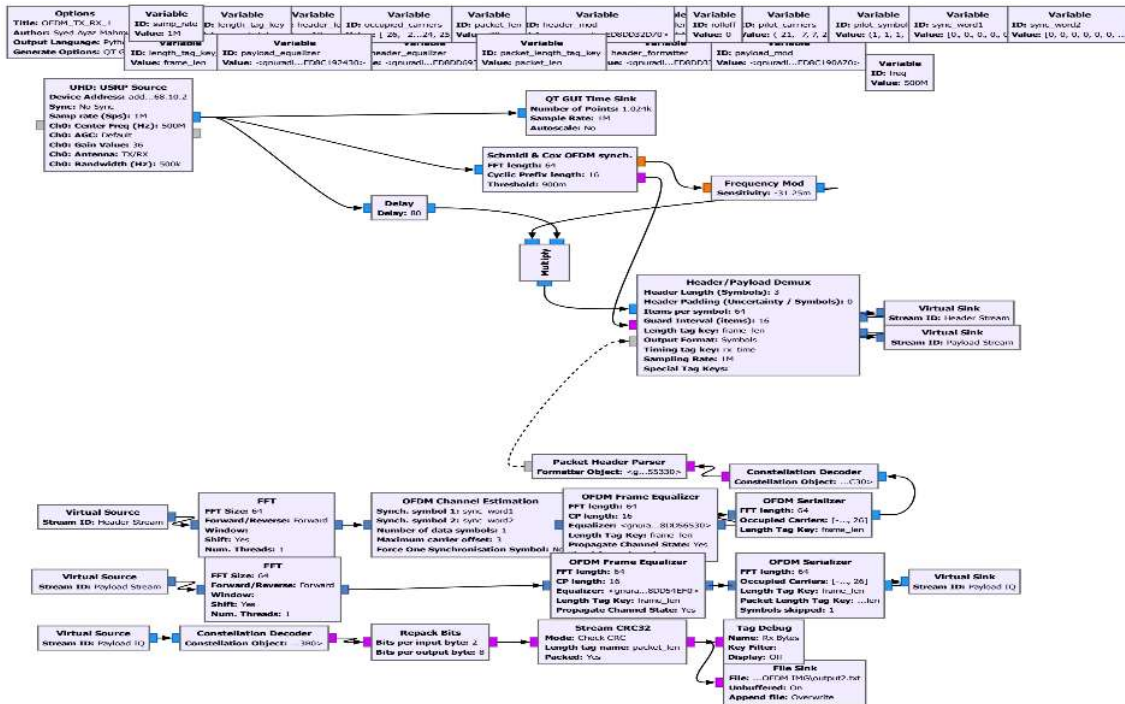
2.2.1 Blok Diagram *Transmitter* dan *Receiver*

Gambar 6 dan Gambar 7 terlihat *flowgraph* GNU Radio yang digunakan pada pemancar dan penerima. Sisi *transmitter* dan *receiver* dalam *flowgraph* GNU Radio ini dirancang dan diimplementasikan berdasarkan blok sistem *multicarrier OFDM* yang telah dibuat sebelumnya. Proses dimulai dengan pembentukan paket data, yang mencakup penambahan *header*, pengkodean CRC32 untuk deteksi kesalahan, dan pengacakan untuk meningkatkan ketahanan

terhadap gangguan. Kemudian, data dimodulasi dan diubah menjadi format OFDM. Lalu, penambahan *cyclic prefix* untuk perlindungan terhadap *multipath fading*, sinyal siap ditransmisikan melalui perangkat keras *Universal Software Radio Peripheral (USRP)*. Pada bagian *receiver*, sinyal yang diterima dari USRP pertama-tama disinkronkan untuk mengidentifikasi awal dan akhir simbol OFDM. Kemudian, *header* paket didekode untuk mendapatkan informasi tentang struktur paket. Setelah itu, data dimodulasi dan diubah kembali ke format aslinya. Pemeriksaan CRC32 dilakukan untuk memastikan integritas data, dan jika tidak ada kesalahan, data disimpan ke dalam *file* untuk analisis lebih lanjut. Selain itu, tampilan *waterfall* dan *number sink* disediakan untuk visualisasi spektrum frekuensi dan pemantauan kinerja sistem secara *real-time*.



Gambar 6. Blok GNU Radio Sisi Transmitter



Gambar 7. Blok GNU Radio Sisi Receiver

Parameter yang digunakan pada simulasi penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1. Dimana, simulasi ini mengevaluasi kinerja tiga jenis modulasi digital pada kanal *indoor multipath fading* yang dimodelkan dengan distribusi *Rayleigh* dan *Rician*. Parameter lain yang relevan termasuk nilai *gain*, frekuensi pembawa, jumlah *subcarrier* OFDM, dan ukuran data audio.

Tabel 1. Parameter Simulasi

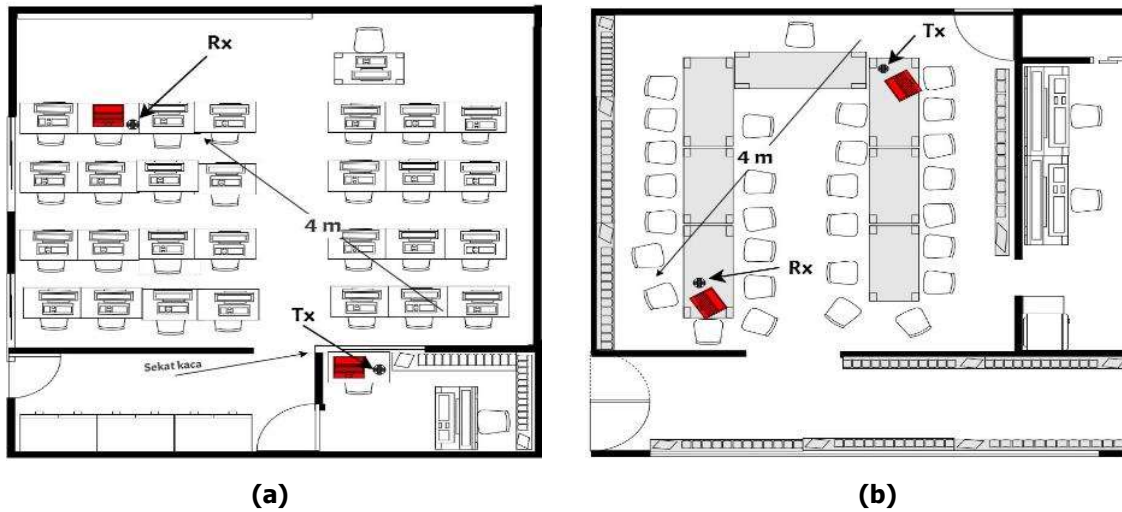
Parameter	Nilai
Jenis Modulasi	BPSK, QPSK, 16-QAM
Gain	30
Kanal	<i>Indoor Multipath fading</i>
Distribusi Fading	<i>Rayleigh dan Rician</i>
Frekuensi Pembawa	900 MHz
Jumlah Subcarrier	64
Jenis Data	Audio
Ukuran Audio	990.338 Byte

Penelitian ini menggunakan rancangan perangkat keras yang terdiri dari dua buah laptop, dua buah NI USRP 2920, satu buah SDR RTL2832U, dua buah *Gigabit Ethernet*, dan kabel *Local Area Network* (LAN), dapat dilihat pada Gambar 8. *Gigabit Ethernet* digunakan untuk menghubungkan laptop yang belum didukung oleh *port* bawaan yang sesuai dengan perangkat NI USRP 2920. Pada sisi *transmitter*, laptop terhubung ke perangkat NI USRP 2920 melalui *Gigabit Ethernet* menggunakan kabel LAN. *Software* GNU Radio di-*instal* pada laptop ini dan diintegrasikan dengan NI USRP 2920 untuk mengirimkan data audio. Disisi *receiver*, laptop juga terhubung ke perangkat NI USRP 2920 melalui *Gigabit Ethernet* menggunakan kabel LAN, dengan konfigurasi yang serupa seperti pada sisi pemancar. Selain itu, ditambahkan perangkat SDR RTL2832U yang terhubung langsung ke laptop ini melalui *port* USB untuk analisa karakteristik kanal.



Gambar 8. Rancangan Hardware

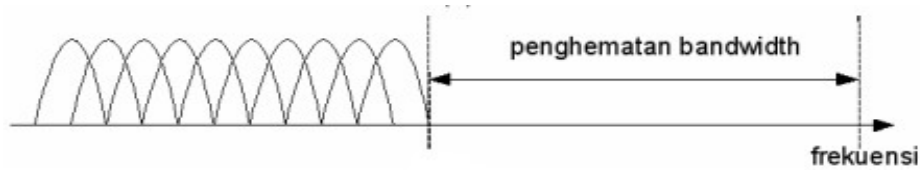
Gambar 9. (a) menunjukkan keadaan Laboratorium *Programming* dengan *transmitter* dan *receiver* dibuat dalam kondisi NLOS, dimana dengan adanya sekat kaca yang menghalangi dapat diasumsikan kondisi ini tidak memiliki jalur langsung atau dominan. Dan Gambar 8. (b) menunjukkan keadaan Laboratorium *Internet of Everything* dibuat dalam kondisi LOS yang ditandai dengan adanya jalur dominan tanpa halangan antara *transmitter* dan *receiver*. Penempatan *transmitter* dan *receiver* pada kedua ruangan ini diatur dengan jarak yang sama, yaitu 4 meter. Hal ini dilakukan agar perbandingan pengujian simulasi ini terfokus pada pengaruh efek *multipath* kanal *indoor* terhadap transmisi audio dikondisi NLOS dan LOS tanpa melibatkan faktor jarak.



Gambar 9. (a) Laboratorium *Programming* (NLOS), (b) Laboratorium *Internet of Everything* (LOS)

2.3 Multicarrier Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

OFDM merupakan teknik modulasi yang membagi data menjadi beberapa aliran yang lebih kecil dan mengirimkannya secara paralel menggunakan metode ortogonalisasi *subcarrier* dalam domain frekuensi. Pada Gambar 10, *subcarrier* yang berdekatan dapat saling tumpang tindih kecuali pada frekuensi pusatnya, sehingga secara keseluruhan (dalam satu simbol) dapat digunakan *bandwidth* sekecil mungkin. Dengan teknik OFDM, spektrum daya transmisi dapat dimanfaatkan secara lebih efisien (Zainudin, dkk, 2014).



Gambar 10. Spektrum *Multicarrier* OFDM

Dalam sistem OFDM, keterkaitan antara *subcarrier-subcarrier orthogonal* diwujudkan melalui penggunaan transformasi *fourier*. Disisi pemancar OFDM menggunakan *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT), sedangkan disisi penerima menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT). Umumnya persamaan untuk FFT dan IFFT adalah sebagai berikut (Aryanta, dkk, 2016).

1) FFT:

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (1)$$

2) IFFT:

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (2)$$

2.4 Binary Phase Shift Keying (BPSK)

BPSK adalah skema modulasi digital yang memodulasi data biner dengan mengubah fase sinyal pembawa. Teknik BPSK menggunakan dua fase berbeda untuk memodulasi data biner, yaitu (0° dan 180°). Kedua fase ini dapat direpresentasikan sebagai dua titik pada diagram

konstelasi BPSK, dimana setiap fase mewakili satu bit data (0 atau 1). Persamaan umum dari BPSK adalah sebagai berikut **(Kumar, 2022)**.

$$S_i(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + 180^\circ) \quad (3)$$

Dimana A_c adalah amplitudo sinyal pembawa, f_c adalah frekuensi pembawa, dan fase 180° menunjukkan bahwa sinyal ini mewakili bit '1', berbeda dengan fase 0° yang mewakili bit '0'.

2.5 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

QPSK adalah skema modulasi digital yang memodulasi data biner dengan memanipulasi fase sinyal pembawa. Teknik QPSK menggunakan 4 fase berbeda untuk memodulasi data biner (0° , 90° , 180° , dan 270°). Keempat fase ini diwakili oleh empat kuadran pada diagram konstelasi QPSK. Masing-masing fase mewakili kombinasi 2 bit data, sehingga QPSK dapat mentransmisikan 2 bit per simbol. Persamaan umum dari QPSK adalah sebagai berikut **(Kumar, 2022)**.

$$\begin{aligned} S_i &= A \cos(2\pi f_c t + \theta_i), \quad 0 \leq t \leq T, \\ i &= 1,2,3,4 \\ \theta_i &= \frac{(2i-1)\pi}{4} \end{aligned} \quad (4)$$

Dimana S_i adalah sinyal QPSK pada waktu t . Indeks i menunjukkan simbol ke- i yang sedang ditransmisikan, dengan i berkisar dari 1 hingga 4.

2.6 Sixteen-State Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM)

16-QAM adalah skema modulasi digital yang memodulasi data biner dengan mengubah amplitudo dan fase sinyal pembawa. 16-QAM menggunakan enam belas kombinasi amplitudo dan fase yang berbeda, yaitu (45° , 135° , 225° , 315° dengan amplitudo rendah, sedang, dan tinggi), memungkinkan transmisi 4 bit data per symbol **(Kumar, 2022)**. Diagram konstelasi 16-QAM diwakili oleh enam belas titik yang tersebar dalam grid persegi. Setiap titik mewakili kombinasi unik dari 4 bit data. Persamaan umum dari QAM adalah sebagai berikut **(Winda & Endah, 2021)**.

$$\begin{aligned} S_i(t) &= \sqrt{2} E_i(t) T \cos [\omega_0 t + \phi_i], \quad 0 \leq t \leq T, \\ i &= 1,2, \dots, M \end{aligned} \quad (5)$$

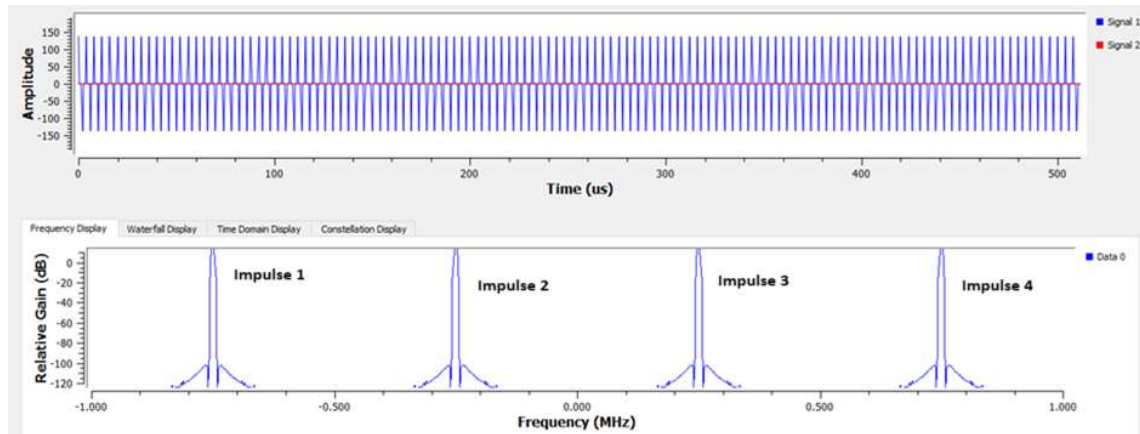
Dimana $S_i(t)$ adalah sinyal M-QAM pada waktu t , indeks i menunjukkan simbol ke- i yang sedang ditransmisikan, dengan i berkisar dari 1 hingga M.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisa Kanal Komunikasi *Indoor*

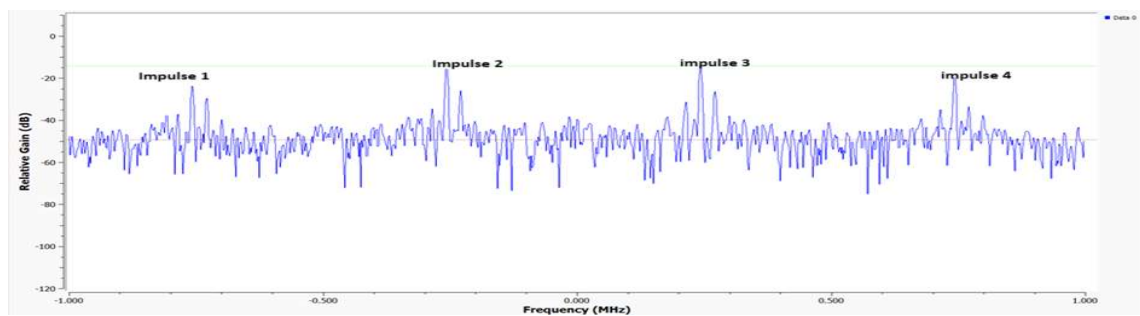
3.1.1 Analisa Impulse

Analisa kanal dilakukan pertama kali dengan melihat tampilan antara *impulse* yang dikirim pada time domain dan frekuensi domain yang akan dibandingkan dengan *impulse* yang diterima dengan tampilan yang sama. Pada tampilan *impulse* yang dikirim dapat dilihat pada Gambar 11 berikut ini.



Gambar 11.Tampilan impulse pada time domain dan frekuensi domain di sisi pengirim

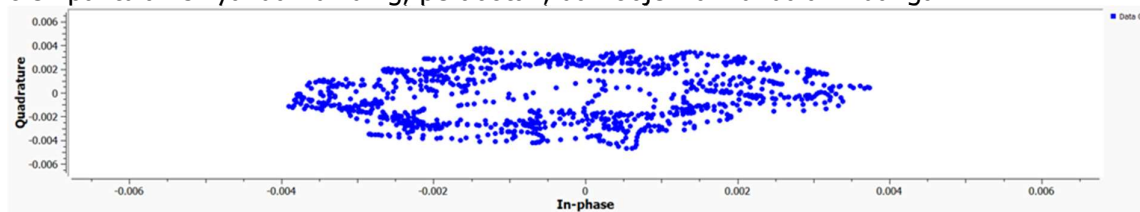
Pada Gambar 11 terlihat bahwa terdapat 4 *impulse* sinyal dalam domain frekuensi sesuai dengan pengaturan software GNU radio pada Gambar 3. Selain itu, tampilan 4 *impulse* dalam time domain juga diperlihatkan pada Gambar 11 ini. Dapat dilihat bahwa pada sisi pengirim, tampilan impulse masih ideal tanpa adanya *noise* dan nilainya belum dipengaruhi *multipath fading*. Tampilan ini akan dibandingkan dengan impulse yang diterima pada sisi penerima.



Gambar 12.Tampilan impulse pada frekuensi domain di sisi penerima

Pada Gambar 12, analisis pada domain frekuensi menunjukkan perbedaan signifikan antara sinyal ideal dan sinyal yang diterima. Pada grafik domain frekuensi pertama Gambar 11, impuls terlihat jelas dengan gangguan noise yang minimal, sedangkan Gambar 12, menunjukkan adanya noise dan distorsi yang tersebar di spektrum frekuensi.

Distorsi ini terutama disebabkan oleh karakteristik kanal komunikasi indoor, yang mencakup *multipath fading*, redaman (attenuation), dan interferensi dari berbagai perangkat elektronik. Efek multipath terlihat dari fluktuasi gain relatif antara impuls, yang kemungkinan disebabkan oleh pantulan sinyal dari dinding, perabotan, dan objek lain di dalam ruangan.

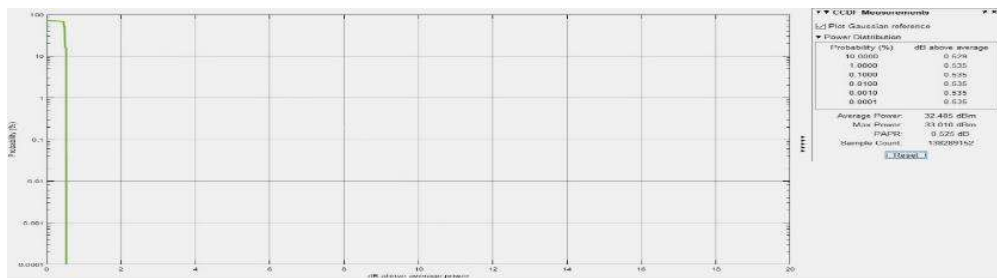


Gambar 13. Diagram konstelasi sinyal impulse yang diterima

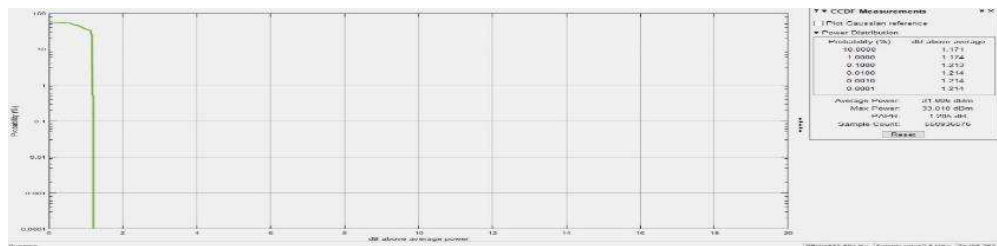
Diagram konstelasi yang ditunjukkan pada Gambar 13 menggambarkan distribusi titik sinyal pada sisi penerima dalam domain In-phase dan Quadrature. Terlihat bahwa sinyal mengalami penyebaran atau penyimpangan yang cukup signifikan dari posisi idealnya. Penyebaran ini menunjukkan adanya pengaruh dari noise dan distorsi kanal yang menyebabkan penurunan kualitas sinyal, sehingga titik-titik konstelasi tidak terletak di posisi yang seharusnya secara ideal.

3.1.2 Analisa parameter CCDF

Pada tahapan ini bertujuan untuk mengetahui kondisi sesungguhnya dari kanal yang akan digunakan untuk simulasi transmisi audio menggunakan sistem OFDM. Pengukuran dilakukan berdasarkan parameter CCDF dan digunakan untuk memvalidasi bahwa kanal mengalami *multipath fading*.



Gambar 14. Kurva CCDF kondisi NLOS



Gambar 15. Kurva CCDF kondisi LOS

Gambar 14 dan Gambar 15 menunjukkan kurva CCDF pada kondisi NLOS dan LOS, dimana terdapat perbedaan signifikan dalam karakteristik sinyal yang diterima. pada kondisi NLOS, nilai sinyal maksimum diatas rata-rata yang diperoleh untuk probabilitas terkecil adalah 0.535 dB dan 1.214 dB untuk kondisi LOS. Ini menunjukkan, pada kondisi LOS, sinyal memiliki kemungkinan lebih besar untuk melebihi ambang batas daya tertentu dibandingkan dengan kondisi NLOS, yang mengindikasikan bahwa daya sinyal yang lebih besar dan lebih stabil pada kondisi LOS. Perbedaan ini disebabkan oleh karakteristik kanal yang berbeda pada masing-masing kondisi. Pada kondisi LOS, jalur transmisi langsung antara pemancar dan penerima menghasilkan redaman sinyal yang minimal. Sebaliknya, pada kondisi NLOS, sinyal mengalami hambatan dan pemantulan dari berbagai objek dilingkungan Laboratorium, menyebabkan *multipath fading* yang dominan.

3.2 Analisis Kinerja Sistem Multicarrier OFDM BPSK, QPSK, dan 16-QAM

Sistem *Multicarrier* OFDM yang telah dirancang sebelumnya untuk mentransmisikan audio dikombinasikan dengan modulasi BPSK, QPSK, dan 16-QAM lalu dibandingkan kinerjanya pada kondisi NLOS dan LOS. Pengujian ini menggunakan audio dalam format .Wav yang berbunyi

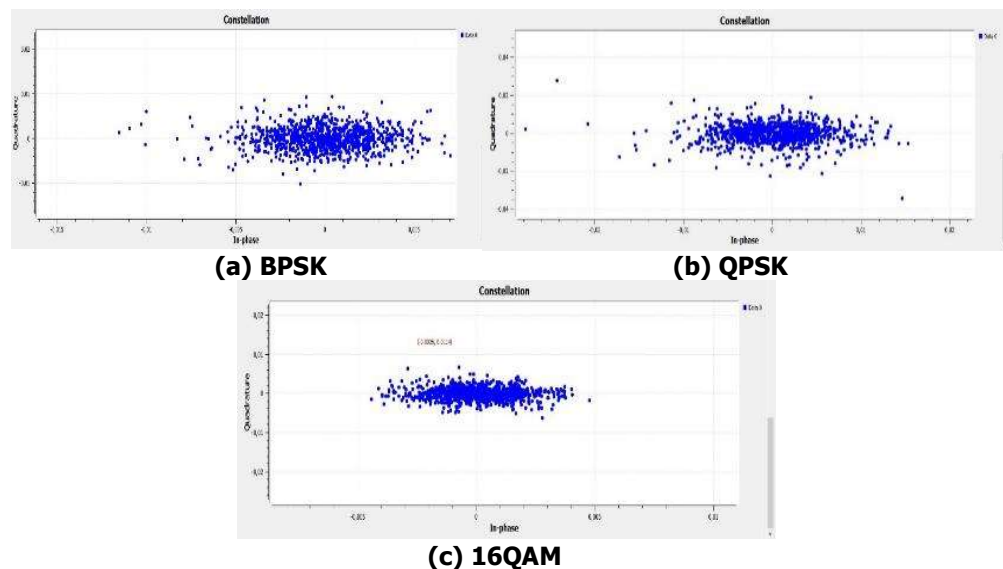
"Nama Saya Figa Aghani Rosyid Dengan Nim 20101156 Dari Program Studi S1 Teknik Telekomunikasi" menggunakan frekuensi sampling 48 Khz yang berdurasi 10 detik dan berukuran 990.338 *byte*. Untuk mendengarkan audio dapat mengakses *link*: (https://drive.google.com/file/d/198nfZ3fwBCLj_gdqBkcCqBi44Q5EyBZ/view?usp=sharing).

3.2.1 Perbandingan Diagram Konstelasi

Untuk mentransmisikan audio berukuran 990.338 *byte*, diperlukan jumlah simbol yang berbeda-beda pada setiap jenis modulasi. Secara teoritis, modulasi BPSK memerlukan 7.922.704 simbol, dengan masing-masing simbol membawa 1 bit data. Modulasi QPSK memerlukan 3.961.352 simbol, dimana setiap simbol mewakili 2 bit data. Sementara itu, modulasi 16-QAM memerlukan 1.980.676 simbol, dengan setiap simbol membawa 4 bit data.

(a) Kondisi NLOS

Berdasarkan Gambar 16 (a,b,c) pada kondisi NLOS, titik-titik konstelasi dari BPSK, QPSK, dan 16-QAM mengalami distorsi dan pengelompokan yang signifikan. Hal ini disebabkan oleh efek *multipath fading*, yaitu fenomena dimana sinyal mengalami pantulan dan hamburan dari berbagai objek di sekitar lingkungan, sehingga menyebabkan fluktuasi amplitudo dan fase sinyal yang diterima. Akibatnya, simbol-simbol yang seharusnya terpisah menjadi berdekatan dan sulit dibedakan, meningkatkan kemungkinan kesalahan deteksi dan menurunkan kualitas transmisi.



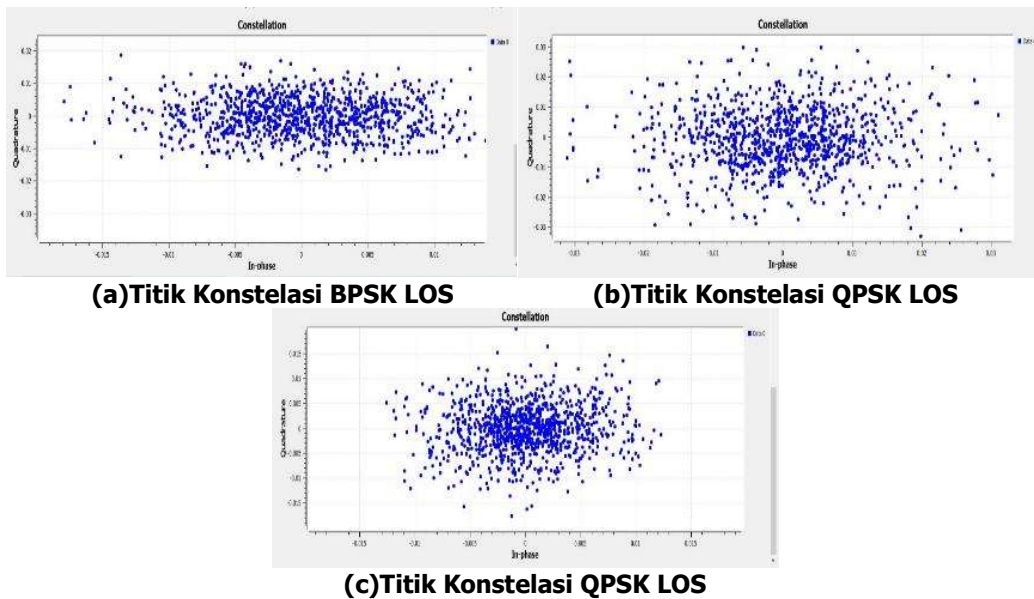
Gambar 16. Titik Konstelasi (a) BPSK, (b) QPSK NLOS dan (c) 16-QAM NLOS

Modulasi BPSK menunjukkan ketahanan terbaik terhadap *multipath fading* meskipun terdapat pengelompokan namun pemisahan antara dua titik masih relatif baik. Pada modulasi QPSK, beberapa titik tampak tumpang tindih dengan titik lain yang mengakibatkan lebih rentan terhadap distorsi. Selanjutnya, pada 16-QAM menunjukkan type modulasi yang paling terpengaruh oleh *multipath fading*.

(b) Kondisi LOS

Pada kondisi LOS, titik-titik konstelasi dari BPSK, QPSK, dan 16-QAM menunjukkan pola yang jelas dan teratur. Hal ini terjadi karena adanya jalur transmisi langsung yang dominan, sehingga mengurangi efek *multipath fading*. Dengan berkurangnya pantulan dan hamburan

sinyal, simbol-simbol yang diterima memiliki amplitudo dan fase yang lebih stabil, sehingga mudah dibedakan dan dideteksi dengan akurat.



Gambar 17. Titik Konstelasi (a) BPSK LOS, (b) QPSK LOS dan (c) 16-QAM LOS

Gambar 17 (a) dan (b) diagram konstelasi BPSK dan QPSK, terlihat titik-titik konstelasi yang jelas dan terpisah dengan baik, membentuk kelompok-kelompok yang sesuai dengan simbol-simbol yang dikirimkan. Pada Gambar 17 (c), meskipun 16-QAM memiliki titik-titik konstelasi yang lebih rapat, namun pada kondisi LOS, titik-titik ini masih dapat dibedakan dengan cukup jelas, menunjukkan bahwa dampak *multipath fading* dapat diminimalisir. Secara keseluruhan, kondisi LOS memungkinkan transmisi yang lebih andal dan akurat pada ketiga jenis modulasi ini, dengan tingkat kesalahan yang minimal.

3.2.2 Perbandingan BER, SNR dan Kualitas Audio

Keseluruhan pengujian kinerja sistem *multicarrier* OFDM dengan modulasi BPSK, QPSK, dan 16-QAM pada kondisi NLOS dan LOS ditampilkan pada Tabel 2. Hasil pengujian dibandingkan berdasarkan parameter BER, SNR dan kualitas audio yang diterima secara subjektif, dimana audio dinilai berdasarkan tingkat kejelasan dan adanya distorsi.

Pada kondisi NLOS, BPSK menunjukkan ketahanan terbaik terhadap *multipath fading* dengan BER terendah 0,20737 dan kualitas audio yang diterima jelas meskipun terdapat sedikit distorsi pada detik ke-3. QPSK, meskipun memiliki SNR tertinggi, tetapi menghasilkan BER yang lebih tinggi 0,38748 dan kualitas audio yang jelas namun disertai distorsi keras dan hilangnya kata. Hal ini menunjukkan bahwa SNR tinggi tidak selalu menjamin BER rendah, terutama dalam kondisi *multipath fading* dimana sinyal dapat mengalami penguatan atau pelemahan yang tidak terduga, akibat superposisi dari beberapa sinyal yang mengalami waktu kedatangan yang sama. 16-QAM, dengan kerapatan titik konstelasi tertinggi, paling terpengaruh oleh *multipath fading*, dengan BER tertinggi 0,49237 dan mengakibatkan audio yang diterima tidak dapat didengarkan atau rusak sepenuhnya. Sebaliknya, dalam kondisi LOS semua modulasi menunjukkan kinerja yang sangat baik dengan BER 0,00000 untuk BPSK dan QPSK, ditandai dengan kualitas audio yang jelas tanpa kesalahan. BER 0 dapat dikatakan bahwa kondisi saluran ideal, dimana artinya tidak ada bit yang salah selama transmisi data.

Tabel 2. Perbandingan BER, SNR, dan Kualitas Audio

Modulasi	Kondisi	BER	SNR (dB)	Keterangan Kualitas Audio
BPSK	NLOS	0,20737	21,22	Jelas, dengan distorsi kecil didetik ke 3
	<i>Link Access Audio: https://bit.ly/3zQKvF7</i>			
	LOS	0,00000	17,26	Jelas, tanpa kesalahan
<i>Link Access Audio: https://bit.ly/3Yen2rA</i>				
QPSK	NLOS	0,38748	21,77	Jelas, dengan distorsi keras didetik ke 1 dan suara "ghani" hilang
	<i>Link Access Audio: https://bit.ly/3YfO3eh</i>			
	LOS	0,00000	15,04	Jelas, tanpa kesalahan
<i>Link Access Audio: https://bit.ly/4ddynfP</i>				
16-QAM	NLOS	0,49237	17,34	Audio tidak bisa dibuka
	<i>Link Access Audio: https://bit.ly/3y0k7IC</i>			
	LOS	0,00020	18,64	Jelas, tanpa kesalahan
<i>Link Access Audio: https://bit.ly/3y93MkN</i>				

4. KESIMPULAN

Karakteristik kanal berdasarkan grafik CCDF menunjukkan bahwa kondisi *multipath fading* lebih buruk pada kondisi NLOS dengan daya sinyal maksimum 0,535 dB, sementara pada kondisi LOS mencapai 1,214 dB. Simulasi transmisi audio menunjukkan bahwa *multipath fading* pada NLOS sangat memengaruhi kualitas audio. Modulasi BPSK memberikan kualitas terbaik pada NLOS dengan BER 0,26880 dan SNR 21,69 dB, menghasilkan audio yang jelas dengan sedikit distorsi. Modulasi QPSK menampilkan kinerja baik dengan BER 0,37976 dan SNR 22,57 dB, namun mengalami distorsi lebih besar. Sebaliknya, modulasi 16-QAM memiliki dampak *multipath* paling signifikan, dengan BER 0,49522 dan SNR 17,73 dB, menyebabkan audio menjadi rusak. Pada kondisi LOS, jenis modulasi BPSK, QPSK, dan 16-QAM menunjukkan performa optimal dengan BER rendah dan SNR tinggi, menghasilkan audio sangat jelas. Hasil ini menegaskan pentingnya pemilihan modulasi, dengan BPSK direkomendasikan untuk NLOS karena tahan *multipath fading*, sementara 16-QAM cocok untuk LOS guna meningkatkan kecepatan data tanpa mengurangi kualitas audio.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM), Universitas Telkom atas pendanaan penelitian dan pembiayaan publikasi paper ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Alsaify, B. A., Almazari, M. M., Alazrai, R., & Daoud, M. I. (2020). A dataset for Wi-Fi-based human activity recognition in line-of-sight and non-line-of-sight indoor environments. *Data in Brief*, *33*. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106534>
- Aryanta, D., Darlis, A. R., & Mulyadi, Y. (2016). Perancangan dan Implementasi Sistem Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) dengan Menggunakan DSK-TMS320C6713. *Jurnal Elektro dan Telekomunikasi Terapan*, *2*(2). <https://doi.org/10.25124/jett.v2i2.107>
- Fatmawaty, & Mufty. (2020). Analisis Perbandingan Kompresi File Wav Menggunakan Metode Huffman dan Run Length Encoding. *Jurnal Teknologi Informasi dan Terapan*, *1*(1). <https://doi.org/10.25047/jtit.v7i1.139>
- Hayati, R. (2020). Simulasi Kinerja DSSS Menggunakan Kode Barker Pada Kanal Rayleigh Fading. *Jurnal Litek: Jurnal Listrik Telekomunikasi Elektronika*, *17*(2), 42. <https://doi.org/10.30811/litek.v17i2.2052>
- Hendry, J., Isnawati, A. F., & Pamungkas, W. (2018). Analysis of Position Angle of Arrival in Multipath Fading Channel using Correlated Double Ring Channel Model for VANET Communications. *Jurnal Infotel*, *10*(2). <https://doi.org/10.20895/infotel.v10i2.372>
- Isnawati, A. F., Pamungkas, W., & Praja, M. P. K. (2022). *Sistem Komunikasi Kendaraan Bergerak*. Wawasan Ilmu.
- Kumar, A. (2022). Design and Simulation of OFDM for BPSK, QPSK and QAM with Peak Power Reduction Using Clipping Technique. *Journal of Optical Communications*, *43*(2). <https://doi.org/10.1515/joc-2018-0207>
- Kusuma, D. T. (2020). Fast Fourier Transform (FFT) Dalam Transformasi Sinyal Frekuensi Suara Sebagai Upaya Perolehan Average Energy (AE) Musik. *PETIR*, *14*(1), 28–35. <https://doi.org/10.33322/petir.v14i1.1022>
- Hadiansyah, W. M. (2021). Estimasi Kanal Sistem OFDM pada Kanal Fading Rayleigh dengan Metode Piece-wise Linear. *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication*, *1*(2). <https://doi.org/10.52435/complete.v1i2.70>
- Molla, D. M., Badis, H., George, L., & Berbineau, M. (2022). Software Defined Radio Platforms for Wireless Technologies. *IEEE Access*, *10*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3154364>
- Pamungkas, W., Isnawati, A. F., Larasati, S., Jayati, A. E., Ardina, E. N., & Hendry, J. (2023). Channel Sounder in Indoor Environment with Multipath Fading using Software Defined Radio. *Proceeding - COMNETSAT 2023: IEEE International Conference on*

Communication, Networks and Satellite.
<https://doi.org/10.1109/COMNETSAT59769.2023.10420747>

- Syam, E. (2018). Analisa dan Implementasi Transformasi Analog to Digital Converter (ADC) untuk Mengkonversi Suara Kebentuk Teks. *SATIN - Sains dan Teknologi Informasi*, 3(2).
<https://doi.org/10.33372/stn.v3i2.369>
- Winda, P., & Endah, S. (2021). Analisis Perbandingan 16-QAM dan 64-QAM Pada Kanal AWGN untuk Sistem Komunikasi Nirkabel. *Telecommunications, Networks, Electronics, and Computer Technologies, Vol.1 (2)*, 71–76.
- Wygliniski, A., & Pu, D. (2013). *Digital Communication Systems Engineering With Software-Defined Radio*. Artech.
- Zainudin, A., Sudarsono, A., & Astawa, I. G. P. (2014). Performance Analysis of an OFDM PHY Scheme with Zero Forcing Equalizer Using Software Defined Radio Platform and USRP. *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, 2(1).
<https://doi.org/10.24003/emitter.v2i1.15>