

Contents list available at [www.jurnal.unimed.ac.id](http://www.jurnal.unimed.ac.id)

**CESS**  
**(Journal of Computing Engineering, System and Science)**

journal homepage: <https://jurnal.unimed.ac.id/2012/index.php/cess>



**Analisis Perbandingan Modulasi 16-QAM Dan 64-QAM Pada Kanal Additive White Gaussian Noise Dan Rayleigh Fading**

***Comparative Analysis of 16-QAM And 64-QAM Modulation In Additive White Gaussian Noise And Rayleigh Fading Channels***

**Khoirun Ni'amah<sup>1\*</sup>, Muhammad Panji Kusuma Praja<sup>2</sup>, Yuninda Dwianti Marimbun<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Jurusan Teknik Telekomunikasi, Institut Teknologi Telkom Purwokerto  
Jl. DI Panjaitan No 128, Purwokerto 53147, Indonesia.

email: <sup>1</sup>[irun@ittelkom-pwt.ac.id](mailto:irun@ittelkom-pwt.ac.id), <sup>2</sup>[panji@ittelkom-pwt.ac.id](mailto:panji@ittelkom-pwt.ac.id), <sup>3</sup>[17101163@ittelkom-pwt.ac.id](mailto:17101163@ittelkom-pwt.ac.id)

Diterima: 15 Juli 2021 | Diterima setelah perbaikan: 25 Nopember 2021 | Disetujui: 17 Desember 2021

**ABSTRAK**

Penelitian ini melakukan simulasi dan menganalisa perbandingan Bit Error Rate (BER) modulasi 16-QAM dan 64-QAM pada kanal Additive White Gaussian Noise dan Rayleigh Fading. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui modulasi 5G dengan tingkat kualitas data setelah proses transmisi yang dilakukan. Hasil simulasi modulasi 16-QAM dan 64-QAM yang didapatkan akan dibandingkan dengan teori BER. Hasil simulasi yang diperoleh dari dua skenario kanal yang digunakan ialah pada modulasi 16-QAM mencapai BER 10<sup>-4</sup> kanal AWGN hanya membutuhkan Eb/N0 15 dB dan untuk kanal Rayleigh Fading membutuhkan Eb/N0 sebesar 38 dB. Hasil teori BER yang didapatkan untuk modulasi 16-QAM kanal AWGN terdapat selisih 3 dB dengan hasil simulasinya sedangkan untuk kanal Rayleigh Fading sebesar 5 dB. Kemudian, hasil simulasi modulasi 64-QAM kanal AWGN untuk mencapai BER 10<sup>-4</sup> membutuhkan Eb/N0 sebesar 24,6 dB, Rayleigh Fading sebesar 47 dB. Hasil teori BER yang didapatkan untuk modulasi 64-QAM kanal AWGN terdapat selisih 1 dB dengan hasil simulasinya sedangkan untuk kanal Rayleigh Fading sebesar 0,5 dB. Pada penelitian ini antara modulasi 16-QAM dan 64-QAM 5G lebih cocok menggunakan modulasi 16-QAM karena membutuhkan daya yang lebih kecil untuk mencapai BER 10<sup>-4</sup> yang diinginkan.

**Kata Kunci:** *Modulasi 16-QAM dan 64-QAM, AWGN, Rayleigh Fading.*

**ABSTRACT**

This research simulates and analyzes parameters bit error rate (BER) of 16-QAM and 64-QAM modulation on Additive White Gaussian Noise and Rayleigh Fading channels. This research aims to determine 5G modulation with the level of data quality after the transmission process is carried out. The modulation simulation results obtained will be compared with the theoretical bit error rate (BER). The simulation results obtained from the two channel

\*Penulis Korespondensi:

email: [irun@ittelkom-pwt.ac.id](mailto:irun@ittelkom-pwt.ac.id)

scenarios used are 16-QAM modulation reaching BER  $10^{-4}$ , AWGN channel only requires 15 dB Eb/NO and for Rayleigh Fading channel it requires 38 dB Eb/NO. The BER theoretical results obtained for the 16-QAM modulation of the AWGN channel have a difference of 3 dB with the simulation results, while for the Rayleigh Fading channel it is 5 dB. Then, the simulation results of 64-QAM modulation AWGN channel to achieve BER  $10^{-4}$  requires Eb/NO of 24.6 dB, Rayleigh Fading of 47 dB. The theoretical results of BER obtained for the 64-QAM modulation of the AWGN channel have a difference of 1 dB with the simulation results, while for the Rayleigh Fading channel it is 0.5 dB. In this study, between 16-QAM and 64-QAM 5G modulation is more suitable to use 16-QAM modulation because it requires less power to achieve the desired BER  $10^{-4}$ .

**Keywords:** 16-QAM and 64-QAM Modulation, AWGN, Rayleigh Fading

---

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi telekomunikasi tiap tahunnya sangat pesat, termasuk pada teknologi ke-5 (5G) juga terus dilakukan riset dan implementasi. Teknologi telekomunikasi seluler generasi ke-5 (5G) merupakan teknologi yang memiliki karakter bekerja pada frekuensi tinggi. Teknologi 5G di Indonesia saat ini sedang dilakukan spektrum frekuensi oleh Kementerian Komunikasi dan Informatika (KOMINFO), yaitu dengan frekuensi 3,5 GHz yang dinyatakan ideal untuk kebutuhan di Indonesia [1]. Dengan frekuensi kerja yang tinggi dapat menghasilkan *bandwidth* yang besar namun dapat menimbulkan *multipath fading* [2].

Sistem komunikasi pada umumnya terdiri dari tiga komponen penting yaitu *transmitter*, kanal dan *receiver*. Kanal menjadi komponen penting karena dalam komunikasi membutuhkan kanal sebagai perantara atau medium yang digunakan untuk bertukar informasi. Sistem komunikasi di dalamnya terdapat modulasi, demikian juga dengan sistem komunikasi 5G. Proses penumpangan sinyal informasi dari frekuensi rendah ke sinyal pembawa dengan frekuensi tinggi dikenal dengan istilah modulasi. *Bit Error Rate* (BER) merupakan parameter yang digunakan untuk mengetahui kualitas dari modulasi. Dalam 5G sendiri digunakan beberapa modulasi yaitu modulasi BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM dan 256-QAM [3].

Berdasarkan penelitian Egbunugha dkk 2021 tentang "Analisis Kinerja Sistem MIMO-OFDM pada Skema Modulasi Digital yang Berbeda" melakukan penelitian tentang kinerja modulasi yang berbeda pada sistem MIMO-OFDM dengan menggunakan MATLAB/*Simulink*. Teknik modulasi digital yang digunakan pada penelitian ini yaitu 8-QAM, 16-QAM dan 64-QAM untuk mengetahui nilai BER dan SNR pada Kanal AWGN dan *Rayleigh Fading*. Setelah melakukan simulasi ekstensif dan evaluasi kinerja, hasil menunjukkan bahwa untuk modulasi 8-QAM menghasilkan BER dengan nilai 0,000652 dan 0,0231, 16-QAM menghasilkan kinerja BER 0,017 dan 0,0301, 64-QAM menghasilkan kinerja BER sebesar 0,0265 dan 0,0792 sehubungan dengan meningkatnya SNR sebesar 10dB pada Kanal AWGN dan *Rayleigh Fading*. Hasil penelitian ini juga menunjukkan kinerja kanal AWGN lebih baik dari pada kinerja kanal *Rayleigh Fading* untuk modulasi yang digunakan. Secara umum hasil simulasi menunjukkan bahwa kinerja BER meningkat dengan meningkatnya SNR[4].

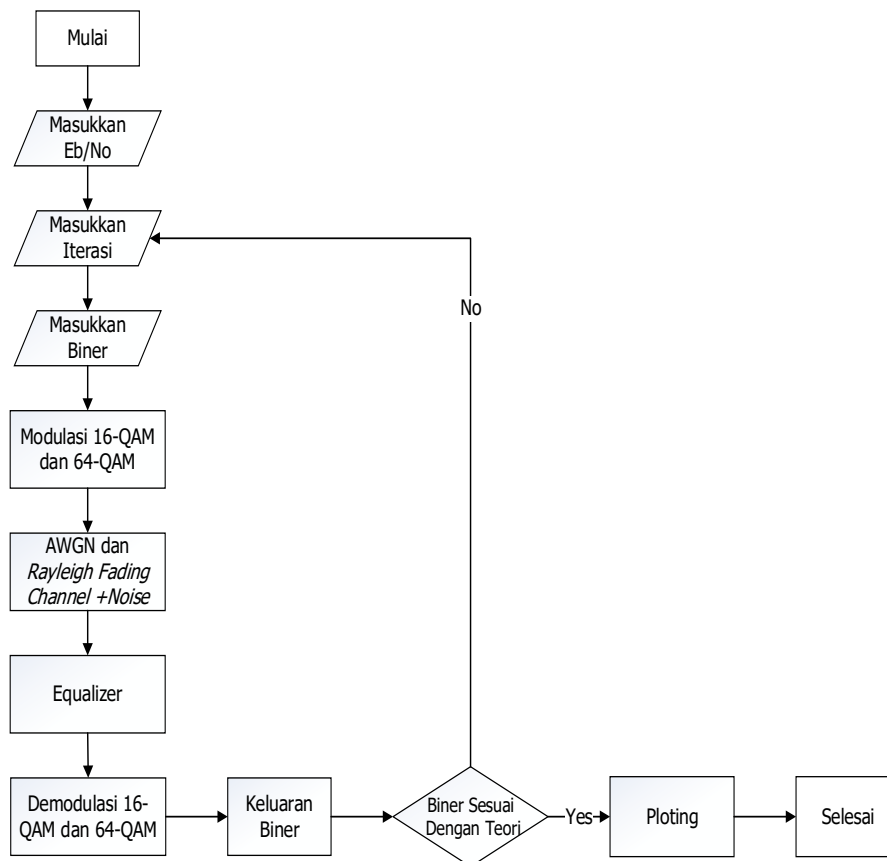
Teknologi sistem komunikasi 5G yang masih dalam tahap pengembangan dan penelitian belum diketahui ketahanannya terhadap derau. Dengan menggunakan kanal *Additive White Gaussian Noise* dan *Rayleigh Fading* serta modulasi 16-QAM dan modulasi 64-QAM akan dilakukan penelitian terhadap ketahanan derau. Kanal *Additive White Gaussian Noise* dan kanal *Rayleigh* memiliki perbedaan besar dalam *noise* dan *fading* dimana pada kanal AWGN

memiliki *noise* dan *fading* yang kecil sedangkan pada kanal *Rayleigh* memiliki *noise* dan *fading* yang besar karena terakumulasi dari kanal AWGN. Hasil yang ingin dicapai berupa perbandingan dari modulasi 5G dengan tingkat kualitas data setelah proses transmisi yang dilakukan dengan menggunakan kanal *Additive White Gaussian Noise* dan *Rayleigh Fading* akan diamati performansinya dan apakah sesuai dengan teori BER yang ada.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini melakukan simulasi modulasi 16-QAM dan 64-QAM terhadap kanal AWGN dan *Rayleigh Fading* menggunakan *software* simulasi matlab. Simulasi yang dilakukan ini sesuai dengan modulasi yang digunakan, serta simulasi dilakukan secara bergantian.

### 2.1. Alur Penelitian



Gambar 1. Alur Penelitian

1. *Energy per bit to noise power spectral density ratio* ( $E_b/N_0$ ).  $E_b/N_0$  digunakan untuk membandingkan energy per bit terhadap noise. Parameter  $E_b/N_0$  berhubungan dengan SNR yang biasanya digunakan untuk menentukan laju data digital dan mutu standar kinerja sistem digital [5]. Penelitian ini menggunakan nilai  $E_b/N_0$  dari 0 - 40 dB untuk percobaan yang dilakukan pada kanal AWGN dan 0-50 untuk kanal *Rayleigh Fading*.
2. Iterasi. Jumlah iterasi atau perulangan yang akan diberikan yaitu 10000x untuk setiap percobaan. Iterasi berguna untuk memperoleh hasil simulasi yang maksimal.
3. Biner Informasi. Pada penelitian ini jumlah biner yang digunakan yaitu 100000 bit. Pada modulasi 16-QAM terdapat empat bit informasi yaitu (0000, 0001, 0010, .....1111) sedangkan untuk modulasi 64-QAM terdapat enam bit informasi yaitu (000000, 000001, 000010, 111111)

#### 4. Modulasi

Penelitian ini menggunakan modulasi 16-QAM dan modulasi 64-QAM. Modulasi merupakan proses perubahan sebuah gelombang periodik menjadi sebuah sinyal yang membawa informasi. Proses modulasi membutuhkan dua buah sinyal pemodulasi yang berupa sinyal informasi dan sinyal *carrier* (pembawa). Sinyal informasi tersebut akan ditumpangkan terhadap sinyal pembawanya (*carrier*) [6].

- a. Modulasi 16-QAM adalah modulasi dimana dalam satu simbolnya memuat 4bit data yang akan ditransmisikan. Beberapa pasang bit yang dipetakan dalam simbol angka modulasi kompleks  $d(i)$  [7] sebagai berikut :

$$d(i) = 1/\sqrt{10} \{(1 - 2b(4i))[2 - (1 - 2b(4 + 2))] + j(1 - 2b(4i + 1))[2 - (1 - 2b(4i + 3))]\} \quad (1)$$

- b. Modulasi 64-QAM menghasilkan simbol modulasi bernilai kompleks yang berisi enam bit informasi per simbolnya. Simbol angka modulasi kompleks  $d(i)$  [7] sebagai berikut :

$$d(i) = 1/\sqrt{42}\{(1 - 2b(6i))[4 - (-2b(6i + 2))[2 - (1 - 2b(6i + 4))]] + j(1 - 2b(6i + 1))[4 - (1 - 2b(6i + 3))[2 - (1 - 2b(6i + 5))]]\} \quad (2)$$

#### 5. Kanal yang digunakan :

- a. *Additive White Gaussian Noise* (AWGN)

*Additive White Gaussian Noise* (AWGN) memiliki sifat-sifat *additive* artinya *noise* yang dijumlahkan dengan sinyal, *white* artinya *noise* tidak tergantung dari frekuensi operasi sistem dan memiliki rapat daya yang konstan, dan *Gaussian* artinya besar tegangan *noise* memiliki peluang terdistribusi *Gaussian*. Derau AWGN bersifat *additive* atau ditambahkan terhadap sinyal transmisi. AWGN mempunyai karakteristik respon frekuensi yang sama disepanjang frekuensi dan variannya sama dengan satu. Pada kanal transmisi selalu terdapat penambahan derau yang timbul karena akumulasi derau termal dari perangkat pemancar, kanal transmisi dan perangkat penerima [8].

*Noise* yang terjadi selama proses transmisi sinyal dikirim sampai diterima pada bagaian *receiver* secara matematis dituliskan dala persamaan berikut :

$$n(t) = (randn.S_{Tx}(t) + randn.S_{Tx}(t).j) / ((\Sigma\sqrt{1/SNR}))/\sqrt{2} \quad (3)$$

- b. *Rayleigh Fading*

Pada sistem komunikasi *wireless* terdapat gangguan khusus berupa *multipath* dari sinyal yang di pancarkan *Multipath* merupakan jalur propagasi yang berbeda-beda, yang dilalui sinyal antara pengirim dan penerima, yang disebabkan karena pantulan oleh halangan-halangan dan benda-benda yang ada disepanjang jalur propagasi. Perbedaan waktu tiba pada penerima tersebut menyebabkan fenomena fluktuasi amplitudo dan fasa sinyal yang diterima, dan menimbulkan fenomena mendasar yang disebut *fading*. Fluktuasi amplitudo sinyal yang terjadi adalah acak dan tidak dapat ditentukan sebelumnya, besar dan kapan terjadinya. Namun, *fading* dapat diperkirakan secara statistik berupa nilai secara acak dengan distribusi tertentu. Salah satu distribusi tersebut adalah distribusi *Rayleigh*. Distribusi *Rayleigh* merupakan salah satu distribusi yang dapat menjadi model untuk mewakili *fading*, sehingga *fading* yang memiliki distribusi *Rayleigh* ini disebut *Rayleigh fading* [9].

Persamaan sinyal-sinyal pada kanal *fading* dapat dimodelkan sebagai berikut :

$$Y(t) = \sin s(t) \text{ ray}(t) + n(t) \quad (4)$$

Ray(t) dan n(t) dituliskan pada persamaan 2.5 dan 2.6 berikut:

$$\text{Ray}(t) = (\text{randn} + \text{randn}.j)/\sqrt{2} \quad (5)$$

$$n(t) = (\text{randn}.s(t) + \text{randn}.s(t).j)/((\Sigma\sqrt{1/SNR}))/\sqrt{2} \quad (6)$$

6. Ekuwalizer. Pada penelitian tahapan ini akan membantu mengurangi gngguan inter-symbol interferensi (ISI) pada sinyal termodulasi yang telah melewati kanal dan terkena noise sehingga menyebabkan simbol yang ditransmisikan menjadi terdistorsi untuk memungkinkan pemulihan simbol-simbol pengirim [10].
7. Demodulasi didefenisikan sebagai kebalikan dari proses modulasi, yaitu mendapatkan kembali sinyal informasi yang ditumpangkan pada sinyal carrier (sinyal pembawa) [11]. Demodulasi pada penelitian ini merubah kembali bit-bit informasi yang telah diubah kedalam bentuk simbol pada proses modulasi di sisi pengirim, menjadi bit-bit informasi yang sama dengan bit-bit informasi asal.
8. Parameter ukur kualitas sinyal yang digunakan pada penelitian ini yaitu bit error rate (BER). Bit error rate (BER) merupakan parameter ukur kualitas sebuah sinyal dengan melihat kesalahan bit yang terjadi saat proses transmisi berlangsung dan membandingkan data keluaran dengan data masukan. Pada BER kurva yang dihasilkan digambarkan dalam hubungan BER (dB) dengan SNR (dB) atau BER (dB) dengan  $E_b/N_0$  [12].

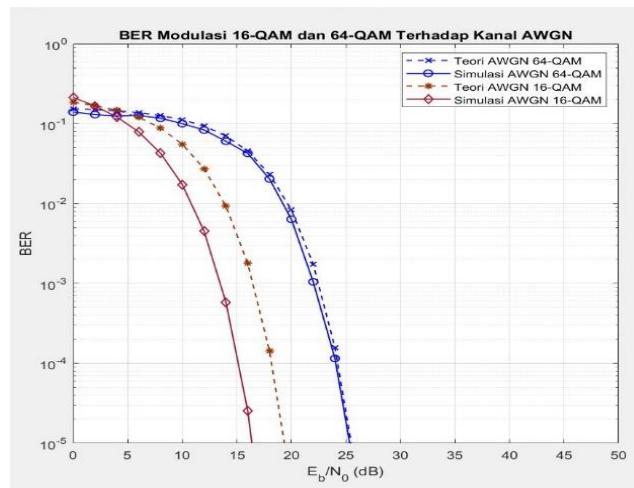
$$BER = \frac{\text{jumlah bit error}}{\text{jumlah total bit kirim}} \quad (7)$$

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan grafik perbandingan BER pada modulasi 16-QAM dan 64-QAM terhadap kanal AWGN dan *Rayleigh Fading* yang diperoleh dari simulasi dan dibandingkan dengan teori BER.

#### 3.1. Perbandingan BER Modulasi 16-QAM dan 64-QAM terhadap Kanal AWGN.

Penelitian ini melakukan simulasi dan menganalisis pebandingan BER modulasi 16-QAM dan 64-QAM pada kanal *Additive White Gaussian Noise* (AWGN). Pada simulasi melakukan pengujian memasukkan  $E_b/N_0$  dari 0 dB sampai 40 dB dan 100000bit informasi secara acak yang dikirimkan *noise* pada kanal AWGN ketika ditransmisikan dan diteraskan juga mulai dari 100000 kali untuk tiap penggunaan  $E_b/N_0$ .

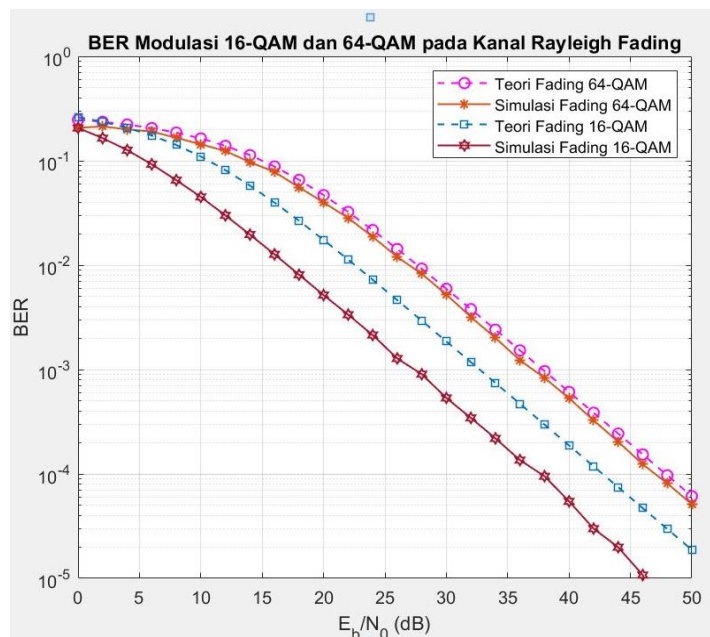


**Gambar 2.** Kurva Perbandingan Modulasi 16-QAM dan 64-QAM terhadap Kanal AWGN

Pada kedua modulasi tersebut untuk mencapai BER  $10^{-4}$ , modulasi 16-QAM membutuhkan  $E_b/N_0$  sebesar 15 dB sedangkan modulasi 64-QAM membutuhkan  $E_b/N_0$  sebesar 24,6 dB untuk simulasinya. Pada kurva teori dari kedua modulasi ini hasil teori yang ditampilkan menunjukkan untuk mencapai BER  $10^{-4}$ , modulasi 16-QAM membutuhkan  $E_b/N_0$  sebesar 18 dB sedangkan modulasi 64-QAM membutuhkan  $E_b/N_0$  sebesar 24,7 dB. Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa pada Kanal AWGN dengan modulasi 16-QAM memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan 64-QAM karena memiliki gap  $E_b/N_0$  sebesar 9 dB saat BER  $10^{-4}$ .

### 3.2. Perbandingan BER Modulasi 16-QAM dan 64-QAM terhadap Kanal *Rayleigh Fading*.

Penelitian ini mensimulasikan dan menganalisis perbandingan BER modulasi 16-QAM dan 64-QAM pada kanal *Rayleigh Fading*. Pada simulasi yang digunakan, peneliti melakukan pengujian dengan memasukkan  $E_b/N_0$  dari 0 dB samapi 50 dB.



**Gambar 3.** Kurva Perbandingan Modulasi 16-QAM dan 64-QAM 5G terhadap Kanal *Rayleigh Fading*

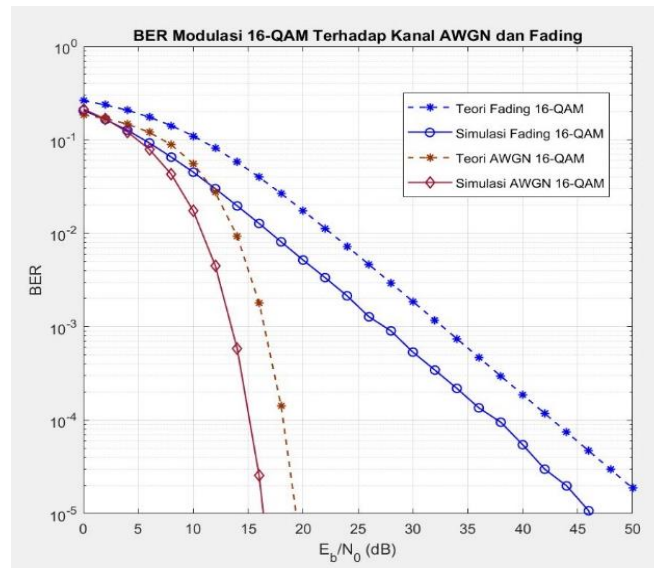
Hasil simulasi 16-QAM dan 64-QAM menunjukkan bahwa untuk mencapai nilai BER  $10^{-4}$  modulasi 16-QAM membutuhkan  $E_b/N_0$  sebesar 38 dB sedangkan pada modulasi 64-QAM untuk mencapai nilai BER  $10^{-4}$  membutuhkan  $E_b/N_0$  sebesar 47 dB.

Hasil simulasi teori untuk modulasi 16-QAM dan 64-QAM terhadap kanal *Rayleigh Fading*. Dapat diketahui bahwa hasil simulasi teori modulasi 16-QAM untuk mencapai BER  $10^{-4}$  membutuhkan  $E_b/N_0$  sebesar 43 dB sedangkan untuk modulasi 64-QAM jika ingin mencapai BER  $10^{-4}$  maka membutuhkan  $E_b/N_0$  sebesar 47,5 dB. Dari kedua modulasi tersebut dapat disimpulkan bahwa lebih bagus modulasi 16-QAM. Kanal *Rayleigh Fading* dengan modulasi 16-QAM memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan 64-QAM karena memiliki gap  $E_b/N_0$  sebesar 9 dB saat BER  $10^{-4}$ .

### 3.3. BER Modulasi 16-QAM dan 64-QAM terhadap Kanal AWGN dan *Rayleigh Fading*.

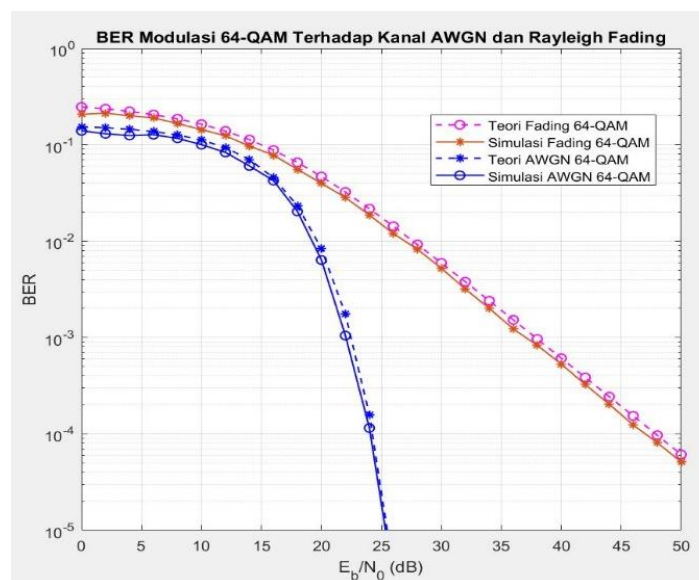
Penelitian ini melakukan simulasi dan menganalisis BER modulasi 16-QAM dan 64-QAM pada kanal *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) dan *Rayleigh Fading* dengan memasukkan

nilai  $E_b/N_0$  dari 0 dB – 24,7 dB untuk kanal AWGN dan 0 dB – 47,5 dB untuk kanal *Rayleigh Fading* dan 100000bit informasi secara acak yang dikirimkan *noise* pada setiap transmisi dan di iterasikan sebesar 100000 kali untuk masing-masing modulasi 16-QAM dan modulasi 64-QAM.



**Gambar 4.** Kurva Modulasi 16-QAM terhadap Kanal AWGN dan kanal *Rayleigh Fading*.

Kurva modulasi 16-QAM terhadap kanal AWGN dan *Rayleigh Fading* dapat dilihat pada gambar 3.4 Berdasarkan kurva tersebut hasil simulasi modulasi 16-QAM ketika nilai  $E_b/N_0$  sebesar 15 dB baru akan mencapai nilai BER  $10^{-4}$ , sedangkan untuk teori AWGN modulasi 16-QAM untuk mencapai nilai BER  $10^{-4}$  ketika nilai  $E_b/N_0$  nya 18 dB. Pada kanal *Rayleigh Fading*, kurva BER Modulasi 16-QAM terhadap Kanal AWGN dan *Rayleigh Fading*. Hasil simulasi modulasi 16-QAM terhadap kanal *Rayleigh Fading* ketika kondisi  $E_b/N_0$  38 dB di dapat BER sebesar  $10^{-4}$  sedangkan untuk teori modulasi 16-QAM terhadap kanal *Rayleigh Fading* ketika kondisi  $E_b/N_0$  43 dB di dapat BER sebesar  $10^{-4}$ .



**Gambar 5.** Kurva Modulasi 64-QAM terhadap Kanal AWGN dan Kanal *Rayleigh Fading*.

Modulasi 64-QAM dapat dilihat pada gambar 3.5 Kurva modulasi 64-QAM terhadap kanal AWGN dan kanal *Rayleigh Fading*. Hasil simulasi modulasi 64-QAM terhadap kanal AWGN saat kondisi  $E_b/N_0$  24,6 dB didapat BER  $10^{-4}$  sedangkan untuk teori modulasi 64-QAM untuk mencapai BER  $10^{-4}$  pada saat kondisi  $E_b/N_0$  24,7 dB dan dapat dipat dilihat bahwa kedua garis kurva tersebut hampir mendekati sama sehingga dapat dikatakan valid.

Kanal *Rayleigh Fading*, pada gambar 3.5 Kurva modulasi 64-QAM terhadap kanal AWGN dan kanal *Rayleigh Fading*. Hasil simulasi modulasi 64-QAM terhadap kanal *Rayleigh Fading* saat kondisi  $E_b/N_0$  47 didapat BER sebesar  $10^{-4}$  sedangkan untuk teori modulasi 64-QAM terhadap kanal *Rayleigh Fading* saat kondisi  $E_b/N_0$  47,5 dB didapat BER sebesar  $10^{-4}$  dan dari kuva yang ditampilkan gradien garis antara simulasi modulasi 64-QAM dan teori terhadap kanal *Rayleigh Fading* mendekati sama sehingga bisa di katakana valid.

Hasil simulasi modulasi 64-QAM pada teknologi 5G lebih bagus terhadap kanal AWGN karena untuk mencapai nilai BER  $10^{-4}$  membutuhkan nilai  $E_b/N_0$  24,6 dB yang lebih kecil jika dibandingkan dengan hasil simulasi terhadap kanal *Rayleigh Fading*.

Penelitian ini melakukan simulasi untuk modulasi 16-QAM dan 64-QAM terhadap kanal AWGN dan *Rayleigh Fading*. Berdasarkan simulasi yang dilakukan maka (i) performa kinerja antara modulasi 16-QAM dan 64-QAM menggunakan kanal AWGN menghasilkan modulasi 16-QAM lebih baik karena hanya membutuhkan  $E_b/N_0$  15 dB untuk mencapai BER  $10^{-4}$  (ii) performansi kinerja pada modulsai 16-QAM dan 64-QAM menggunakan kanal *Rayleigh Fading* menghasilkan bahwa modulasi 16-QAM memiliki kinerja yang lebih baik karena hanya membutuhkan  $E_b/N_0$  38 dB. Jaringan 5G dengan tingkat kualitas data setelah proses transmisi yang dilakukan cocok menggunakan modulasi 16-QAM.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini melakukan simulasi untuk modulasi 16-QAM dan 64-QAM terhadap kanal AWGN dan kinerja antara modulasi 16-QAM dan 64-QAM menggunakan kanal AWGN menghasilkan modulasi 16-QAM lebih baik karena hanya membutuhkan  $E_b/N_0$  10,6 dB untuk mencapai BER  $10^{-3}$ . Performansi kinerja pada modulasi 16-QAM dan 64-QAM menggunakan kanal *Rayleigh Fading* menghasilkan bahwa modulasi 16-QAM memiliki kinerja yang lebih baik karena hanya membutuhkan  $E_b/N_0$  27,3 dB. Jaringan 5G dengan tingkat kualitas data setelah proses transmisi yang dilakukan cocok menggunakan modulasi 16-QAM.

#### REFERENSI

- [1] I. K. Fenta Febriyandi, "Rekomendasi ITU Pada Alokasi Spektrum 5G di Indonesia ITU," *Bul. Pos dan Telekomun.*, vol. 20, pp. 1–6.
- [2] T. Y. Muhammad Daffa Rheza, Rina Pudji Astuti, "Sistem Antena Pemancar MIMO (4x4) Menggunakan Multi Substrat dan Aie GAP pada frekuensi 3,5 Ghz untuk komunikasi 5G," *e-Proceeding Eng.*, vol. 0, p. 1712, 2021.
- [3] S. L. KHOIRUN NI'AMAH and Program, "Proyeksi EXIT Chart untuk Memprioritaskan Data Komunikasi Manusia pada Jaringan Super Padat," *Elkomnika*, vol. 7, no. 3, pp. 508–520, 2019.
- [4] C. A. Egbunugha, C. A., Akaneme, S. A, Nwabueze, "Performance Analysis of MIMO-OFDM System on Different Digital Modulation Schemes Egbunugha," *IJIETS*, vol. 4, pp. 139–154, 2021.
- [5] N. M. A, "Propagasi Sinyal Pada Kanal Fading Komunikasi Bergerak," 2017.



- [6] dan T. S. Angga Yuda Prasetya, Suwadi, "Implementasi Modulasi dan Demodulasi M-Ary QAM pada DSK TMS320C6416T," *Tek. POMITS*, vol. 2, no. 1, pp. 37–39, 2013.
- [7] E. T. 138 211, "5G NR Physical channels and modulation," *3GPP TS 38.211 version 15.2.0 Release 15*, vol. 15, no. 2, p. 15, 2018.
- [8] M. T. Nurul Aisyah Jafar, Yuyun Siti Rohmah, S.T., M.T., Suci Aulia, S.T., "Perancangan Simulator Teknik Modulasi M-Ary Qam Menggunakan Matlab Simulator," *Openlibrarypublications-telkomuniversity*, 2018.  
<https://openlibrarypublications.telkomuniversity.ac.id/index.php/appliedscience/article/view/7512/7400>.
- [10] B. N. M. Simamora and R. Fauzi, "Analisis Unjuk Kerja Ekualizer Pada Sistem Komunikasi Dengan Algoritma Stop and Go," *Singuda ENSIKOM*, vol. 8, no. 3, pp. 158–164, 2014.
- [11] M. Ferio Dheaputro, Yuyun Siti Rohmah, ST., MT., Afief Dias Pambudi, ST., "Perancangan Simulator Modulasi Dan Demodulasi 16-QAM Dan 64- QAM Menggunakan Labview Design," *e-Proceeding Appl. Sci.*, vol. 1, no. 2, pp. 14–50, 2015.
- [12] A. K. Wahyu Pamungkas, Anggun Fitriani Isnawati, "Modulasi Digital Menggunakan Matlab," *Infotel*, vol. 4, pp. 1–9, 2012.