

# Analisis Kinerja Sistem Modulasi *Downlink* LTE dan 5G pada Kanal AWGN

Amalia Eka Rakhmania<sup>1\*</sup>, Akhmad Mukhibuddin Harvinanda<sup>2</sup>, Hudiono<sup>3</sup>, Aad Hariyadi<sup>4</sup>, Hadiwiyatno<sup>5</sup>, Mochammad Taufik<sup>6</sup>

Program Studi Jaringan Telekomunikasi Digital,  
Fakultas Teknik Elektro,  
Politeknik Negeri Malang

<sup>1\*</sup>amaliaeka.rakhmania@polinema.ac.id, <sup>2</sup>akhmadndaliti@gmail.com,

<sup>3</sup>hudiono@polinema.ac.id, <sup>4</sup>aad.hariyadi@polinema.ac.id, <sup>5</sup>hadiwiyatno@polinema.ac.id,

<sup>6</sup>moch.taufik@polinema.ac.id

## Abstrak

Pada *paper* ini performansi *downlink* LTE dan 5G dianalisis dengan menggunakan MATLAB. *Paper* ini menampilkan perbandingan kinerja teknik modulasi *quadrature phase shift keying* (QPSK), *16-quadrature amplitude modulation* (QAM), dan 64-QAM yang digunakan pada *downlink* LTE dan teknik modulasi QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM pada *downlink* 5G yang melalui kanal *additive white gaussian noise* (AWGN) untuk mengetahui nilai *bit error rate* (BER) pada teknik modulasi yang digunakan. Teknik *multiplexing* yang digunakan adalah *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM) dan *cyclic prefix* (CP)-OFDM untuk *downlink long-term evolution* (LTE) dan CP-OFDM untuk *downlink* 5G dengan variasi *cyclic prefix* yang digunakan adalah kategori "normal". Pada *downlink* LTE, kinerja modulasi QPSK lebih baik dari 16-QAM dan 64-QAM. Pada OFDM, BER QPSK diperoleh  $10^{-19}$  pada  $E_b/N_0$  16 dB, BER 16-QAM diperoleh  $10^{-19}$  pada  $E_b/N_0$  20 dB dan BER 64-QAM diperoleh  $10^{-8}$  pada  $E_b/N_0$  20 dB. Pada CP-OFDM, BER QPSK diperoleh  $10^{-20}$  pada  $E_b/N_0$  16 dB, BER 16-QAM diperoleh  $10^{-19}$  pada  $E_b/N_0$  20 dB dan BER 64-QAM diperoleh  $10^{-9}$  pada  $E_b/N_0$  20 dB. Pada *downlink* 5G CP-OFDM, kinerja modulasi QPSK lebih baik dari 16-QAM, 64-QAM dan 256-QAM, BER QPSK diperoleh  $10^{-24}$  pada  $E_b/N_0$  16 dB, BER 16-QAM diperoleh  $10^{-23}$  pada  $E_b/N_0$  20 dB, BER 64-QAM diperoleh  $10^{-14}$  pada  $E_b/N_0$  20 dB, dan BER 256-QAM diperoleh  $10^{-7}$  pada  $E_b/N_0$  20 dB.

**Kata kunci:** LTE, 5G, OFDM, CP-OFDM, *Downlink*, *Cyclic Prefix*, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, AWGN, BER, MATLAB.

## Abstract

In this paper, LTE and 5G downlink performance is analyzed using MATLAB. This paper presents a performance comparison of quadrature phase shift keying (QPSK), 16-quadrature amplitude modulation (QAM), and 64-QAM modulation techniques used in LTE downlink and QPSK, 16-QAM, 64-QAM, and 256-QAM modulation techniques on the 5G downlink through the additive white gaussian noise (AWGN) channel to determine the bit error rate (BER) value of the modulation technique used. The multiplexing technique used is orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) and cyclic prefix (CP)-OFDM for long-term evolution (LTE) downlinks and CP-OFDM for 5G downlinks with variations of the cyclic prefix used in the "normal" category. On LTE downlink, QPSK modulation performance is better than 16-QAM and 64-QAM. In OFDM, the BER of QPSK was  $10^{-19}$  at  $E_b/N_0$  16 dB, BER 16-QAM was obtained  $10^{-19}$  at  $E_b/N_0$  20 dB and BER 64-QAM was obtained  $10^{-8}$  at  $E_b/N_0$  20 dB. In CP-OFDM, the BER of QPSK was  $10^{-20}$  at  $E_b/N_0$  16 dB, the BER 16-QAM was obtained  $10^{-19}$  at  $E_b/N_0$  20 dB and the BER 64-QAM was obtained  $10^{-9}$  at  $E_b/N_0$  20 dB. On the 5G CP-OFDM downlink, QPSK modulation performance is better than 16-QAM, 64-QAM and 256-QAM,

the BER of QPSK is obtained  $10^{-24}$  at  $E_b/N_0$  16 dB, BER 16-QAM is obtained  $10^{-23}$  at  $E_b/N_0$  20 dB, BER 64-QAM obtained  $10^{-14}$  at  $E_b/N_0$  20 dB, and BER 256-QAM obtained  $10^{-7}$  at  $E_b/N_0$  20 dB.

**Keywords:** LTE, 5G, OFDM, CP-OFDM, Downlink, Cyclic Prefix, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, AWGN, BER, MATLAB.

## 1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi berbasis *long-term evolution* (LTE) di Indonesia dewasa ini berkembang sangat pesat, mengarah kepada teknologi terbaru berbasis 5G. Salah satu kelebihan yang dimiliki oleh kedua teknologi ini adalah penggunaan sistem *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) di sisi *downlink*-nya. OFDM adalah salah satu teknik transmisi dengan beberapa frekuensi *subcarrier* yang saling *orthogonal*. *Subcarrier* akan saling *overlap* tanpa terjadi interferensi. Sinyal LTE dasar menggunakan berbagai format modulasi, termasuk *phase-shift keying* (PSK) dan *quadrature amplitude modulation* (QAM). Modulasi tingkat tinggi digunakan untuk mencapai kecepatan data yang lebih tinggi [1]. Penambahan *cyclic prefix* (CP) pada LTE ketika pada lingkungan propagasi terdapat *time dispersion* yang parah dapat membuat sistem lebih tangguh terhadap distorsi *multipath* [2]. Jaringan 5G melayani berbagai aplikasi pada pita frekuensi yang sama, oleh sebab itu, *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) yang merupakan pengembang dari teknologi 4G LTE sebelumnya mengembangkan dan menerapkan OFDM sebagai salah satu standar teknologi 5G. Kapasitas sistem dicapai melalui penggunaan spektrum baru dengan *data rate* yang lebih cepat. Hal ini disebabkan karena komunikasi *multicarrier* mengirimkan data di seluruh saluran dalam berbagai *subcarrier* frekuensi dengan laju data. Dalam penerapannya, *Cyclic Prefix-Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (CP-OFDM) adalah contoh dari beberapa bentuk gelombang yang potensial untuk komunikasi 5G [3].

Pada [4], kinerja OFDM pada kanal *additive white gaussian noise* (AWGN) dilakukan dengan menganalisis nilai *bit error rate* (BER) dan  $E_b/N_0$  yang diterima oleh OFDM *receiver* dengan berbagai saluran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin rendah *level* modulasi semakin baik kinerja terhadap *noise*. Penelitian tersebut dilakukan pada teknologi LTE, dan tidak membahas mengenai teknologi 5G. Model Kanal 5G Indonesia dengan Pengaruh Dedaunan pada [5] melakukan pemodelan kanal untuk *bandwidth* 40 MHz pada frekuensi kerja 3,3 GHz dan menampilkan teori *outage performance* yang diperoleh dari model kanal 5G di Indonesia, kemudian memvalidasi teori *outage performance* tersebut menggunakan *Block Error Rate* (BLER) pada *Cyclic Prefix-Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (CP-OFDM) *numerology zero* dengan *Complex-Binary Phase Shift Keying* (C-BPSK) standard 5G dan pengkodean polar. Pada penelitian tersebut yang dievaluasi adalah teknik pengkodeannya, dan tidak melakukan perbandingan dengan teknologi 4G. Pengaruh panjang CP dievaluasi pada [6], akan tetapi jenis modulasi yang digunakan adalah *binary phase shift keying* (BPSK) saja, yang merupakan jenis modulasi yang paling sederhana.

Atas dasar permasalahan performansi dan penggunaan teknik *multiplexing* yang ada pada *downlink* teknologi LTE dan 5G, maka pada penelitian ini dilakukan analisis terhadap performansi *downlink* LTE dan 5G dengan simulasi menggunakan *software* MATLAB. Teknik *multiplexing* yang digunakan pada penelitian ini adalah OFDM dan CP-OFDM untuk *downlink* LTE dan *multiplexing* CP-OFDM untuk *downlink* 5G dengan variasi *cyclic prefix* yang digunakan adalah kategori "normal" dengan panjang 14. Kanal yang digunakan adalah kanal *Additive White Gaussian Noise* (AWGN), dimana sinyal yang dikirimkan akan dilemahkan oleh derau panas yang berasal dari kanal fisik itu sendiri dan

juga komponen elektronik pada pemancar dan penerima. Teknik modulasi QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM digunakan dalam penelitian ini sebagaimana penerapannya pada *multiplexing* OFDM. Selain itu, nilai *bit error rate* (BER) terhadap *energy per bit-to-noise* ( $E_b/N_0$ ) dari simulasi *downlink* LTE dan 5G dianalisis dan dilakukan perbandingan. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi untuk pengembangan dan mendukung implementasi teknologi 5G di Indonesia secara menyeluruh.

## 2. Kajian Teori

### 2.1 Long Term Evolution (LTE)

*Long Term Evolution* (LTE) adalah penerus 4G untuk sistem *universal mobile telecommunications system* (UMTS) 3G yang dikembangkan untuk memberikan evolusi lebih lanjut dari sistem telekomunikasi seluler yang tersedia sebelumnya. Memberikan kecepatan data yang jauh lebih tinggi dan kinerja yang sangat ditingkatkan, serta biaya pengoperasian yang lebih rendah, skema ini mulai digunakan dalam bentuk dasarnya sekitar tahun 2008. Penyebaran pertama hanya dikenal sebagai LTE, tetapi kemudian ditetapkan sebagai 4G LTE Advanced dan selanjutnya 4G LTE Pro. Tidak hanya jaringan akses radio yang ditingkatkan untuk 4G LTE, tetapi arsitektur jaringan dimodifikasi untuk memungkinkan latensi yang lebih rendah dan interkoneksi yang jauh lebih baik antara elemen jaringan akses radio.

### 2.2 Fifth Generation (5G)

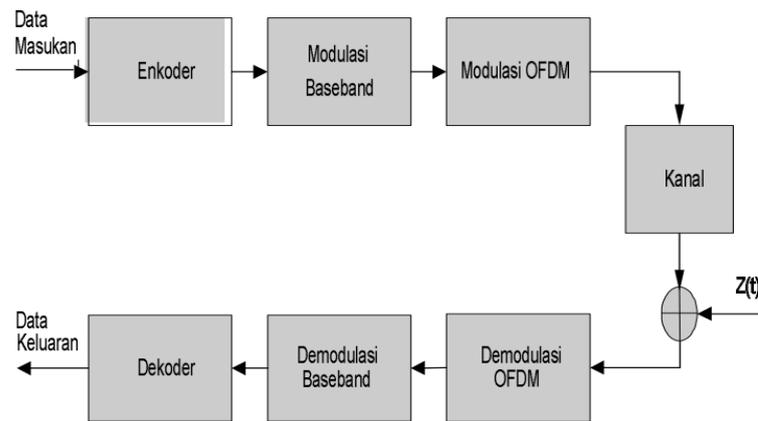
Sistem komunikasi seluler 5G memberikan tingkat kinerja yang jauh lebih tinggi daripada sistem komunikasi seluler generasi sebelumnya. Teknologi baru 5G berkembang dari 1G ke 2G, 3G, 4G, dengan pendekatan baru yang memberikan konektivitas dimanapun. Komunikasi seluler 5G telah didorong oleh kebutuhan untuk menyediakan konektivitas dimanapun untuk aplikasi yang beragam, seperti komunikasi otomotif, *remote control* dengan umpan balik *haptic style*, unduhan video berukuran besar, serta aplikasi *low data rate*, seperti sensor jarak jauh dan *Internet of Things* (IoT).

Teknologi 5G memiliki kecepatan data 10 kali lebih tinggi daripada 4G, yang berdampak pada *latency* yang semakin rendah dan *bandwidth* yang semakin besar. Bertujuan pada *device to device communication* (D2D), 5G memiliki kemampuan untuk menghubungkan hingga satu juta *device* tiap km<sup>2</sup> dengan mobilitas 500 km/jam [4].

Teknologi 5G telah dikembangkan untuk memberikan peningkatan yang signifikan, seperti fleksibilitas, skalabilitas, dan efisiensi, baik dalam hal penggunaan daya maupun spektrum. Teknologi 5G mampu memberikan komunikasi untuk *band* yang sangat tinggi dengan transmisi, seperti *video streaming*, serta komunikasi latensi rendah untuk komunikasi kendaraan *remote control* serta komunikasi *low data rate low bandwidth*.

### 2.3 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

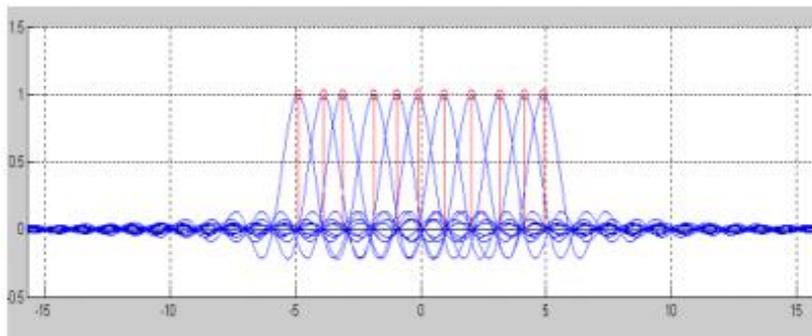
OFDM adalah suatu teknik *multicarrier* dan digunakan di dalam bidang telekomunikasi. Salah satunya pada teknologi LTE dan 5G, OFDM memiliki efisiensi pemakaian spektrum frekuensi yang baik karena spektrum sinyalnya dipisahkan ke dalam beberapa *frequency subcarrier* yang saling tegak lurus (*orthogonal*) namun tidak menyebabkan interferensi. OFDM juga memungkinkan untuk melawan efek *multipath* pada saluran telekomunikasi yang memiliki *data rate* yang tinggi. Pengkodean pada OFDM menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) dan ditransmisikan secara paralel. Selain itu, prinsip utama OFDM adalah pembagian aliran data kecepatan tinggi ke dalam beberapa kecepatan aliran rendah yang kemudian dikirimkan secara bersamaan melalui sejumlah *subcarriers* yang saling *orthogonal* [6].



Gambar 1. Blok diagram sistem OFDM sederhana [5]

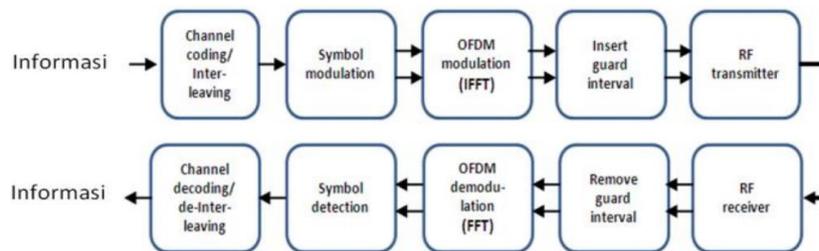
### 2.4 *Cyclic Prefix-Orthogonal Frequency Division Multiplexing (CP-OFDM)*

Teknik CP-OFDM merupakan suatu teknik transmisi dengan menggunakan beberapa buah frekuensi pembawa (*multicarrier*) dalam satu saluran dimana setiap frekuensi pembawa tersebut saling *orthogonal* [7].



Gambar 2. Sinyal *orthogonal* pada spektrum OFDM [3]

Dikarenakan pada setiap frekuensi pembawa tersebut sudah saling *orthogonal*, maka akan terjadi tumpang tindih pada setiap frekuensi pembawa yang bersebelahan dimana pada setiap frekuensi pembawa tersebut dipisahkan *guard interval* berupa *cyclic prefix* (CP). Penambahan *band guard* ini yang terlalu lebar dapat mengurangi *throughput* data yang dikirimkan [7].



Gambar 3. Blok fungsional CP-OFDM [8]

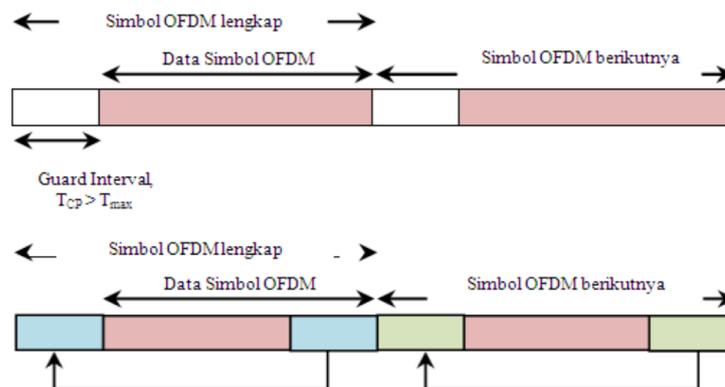
Terdapat dua jenis *cyclic prefix* yang didukung untuk sistem OFDM, jenis *cyclic prefix* 'normal' digunakan untuk menentukan *cyclic prefix* yang sama dengan 14 simbol OFDM dalam tiap *slot*. Jenis *cyclic prefix* 'extended' digunakan untuk menentukan *cyclic prefix* yang sama dengan 12 simbol OFDM dalam tiap *slot*, seperti pada Tabel 1 berikut [9].

Tabel 1. Variasi panjang *Cyclic prefix* pada OFDM [9]

$\mu$	$\Delta f = 2^\mu \cdot 15\text{kHz}$	<i>Cyclic Prefix</i>
0	15	<i>Normal</i>
1	30	<i>Normal</i>
2	60	<i>Normal, Extended</i>
3	120	<i>Normal</i>
4	240	<i>Normal</i>

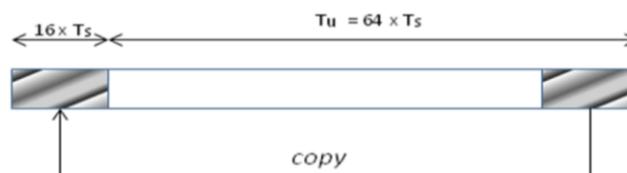
### 2.5 Skema Penambahan *Cyclic Prefix*

Ketika saluran melewati saluran dispertif waktu, ortogonalitas dari OFDM dapat berubah. *Cyclic Prefix* (CP) dapat membantu menjaga ortogonalitas dari sinyal OFDM tersebut. Sebelum ada *Cyclic Prefix* (CP), jarak antara *subcarrier* diisi dengan *guard interval*. Dalam praktiknya, antara *subcarrier* tersebut yang berisikan *guard interval* menimbulkan *intercarrier interference* (ICI) karena adanya *crosstalk* antara *subcarrier* yang berbeda sehingga hal tersebut akan menimbulkan hilangnya ortogonalitas dari sinyal OFDM. *Cyclic Prefix* merupakan salinan (*copy*) dari bagian akhir simbol OFDM yang diletakkan pada bagian depan saat pengiriman sinyal OFDM. Gambar 4 memperlihatkan definisi *Cyclic Prefix* yang digunakan sebagai *guard interval* pada sistem OFDM [7].



Gambar 4. CP pada *guard interval* OFDM [7]

*Cyclic prefix* berfungsi sebagai *guard interval* yang memastikan semua simbol OFDM terkirim secara lengkap dalam interval *fast Fourier transforms* (FFT) dengan waktu tunda yang sama. Hal ini akan menjaga ortogonalitas dari sinyal OFDM. Pada modulasi OFDM, *inverse fast Fourier transforms* (IFFT) diambil sebagai periode simbol sehingga secara teknis akan dihasilkan waktu yang sama. Pada transformasi *Fourier* akan dihasilkan komponen dari semua sinyal yang saling *orthogonal*. Pada bagian penerima, *cyclic prefix* tersebut dibuang sebelum proses demodulasi dengan FFT. Selama interval CP tersebut tidak melebihi *delay spread* maksimum  $\tau_{max}$ , semua pantulan dari simbol sebelumnya dibuang dan ortogonalitas sinyal dipulihkan. Jika interval *cyclic prefix* melebihi *delay spread* maksimum  $\tau_{max}$ , maka ortogonalitas sinyal tersebut akan hilang.

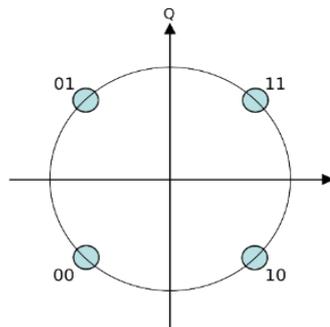


Gambar 5. Proses *copy frame* [7]

Dalam proses pembangkitannya, CP di-copy-kan 16 *sample* terakhir ( $16 T_s$ ) dari *frame* simbol OFDM untuk ditambahkan ke awal *frame* simbol berikutnya. Tiap *sample* memiliki periode  $T_s$  dan total dalam satu *frame* terdapat  $64 T_s$ . Pada sisi penerima, CP tersebut akan dihilangkan sehingga yang masuk pada proses ekualisasi tetap sepanjang  $64 T_s$ .

### 2.6 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

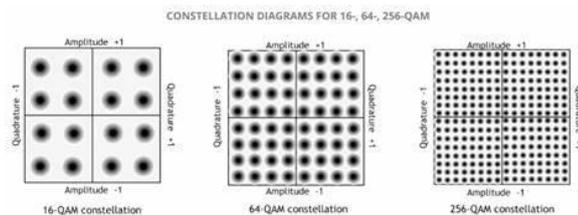
Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) adalah teknik pengkodean  $M$ -ary dengan  $M=4$ . Dalam QPSK terdapat empat fase keluaran yang berbeda, maka harus ada empat kondisi masukan yang berbeda, yaitu 00, 01, 10 dan 11. Hal ini memanfaatkan ketersediaan sinyal pembawa informasi ganda menggunakan *bandwidth* yang sama dan menunjukkan bahwa *bandwidth* QPSK lebih efisien daripada BPSK [5].



Gambar 6. Diagram konstelasi QPSK [10]

### 2.7 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

Quadrature Amplitude Modulation (QAM) adalah skema modulasi yang membawa data dengan mengubah amplitudo dan fase dari sinyal *carrier*. Sinyal yang dimodulasi akan menghasilkan sinyal yang merupakan kombinasi dari *Phase Shift Keying* (PSK) dan *Amplitude Shift Keying* (ASK). Pada modulasi QAM, titik-titik konstelasi (*constellation points*) dibuat dalam bentuk kotak dengan jarak vertikal dan horizontal yang sama [5].



Gambar 7. Diagram konstelasi modulasi 16QAM, 64QAM, dan 256QAM [11]

Untuk 16-QAM  $M = 16$  sehingga untuk masukan digital ke modulator adalah sinyal dengan jumlah bit sebanyak 4 dengan 16 kondisi logika. Untuk 64-QAM  $M = 64$  sehingga untuk masukan digital ke modulator adalah sinyal dengan jumlah bit sebanyak 6 dengan 64 kondisi logika. Untuk 256-QAM  $M = 256$  sehingga untuk masukan digital ke modulator adalah sinyal dengan jumlah bit sebanyak 8 dengan 256 kondisi logika.

### 2.8 FFT dan IFFT

FFT adalah algoritma transformasi *Fourier* yang dikembangkan dari algoritma *Discrete Fourier Transform* (DFT) untuk meningkatkan laju komputasi dari perhitungan transformasi *Fourier*, yaitu dengan mereduksi proses *looping* pada kalkulasi DFT sehingga mengurangi pemakaian memori dan mempercepat kerja sistem yang menggunakannya. FFT dapat mengambil sinyal acak, mengalikannya berturut-turut dengan eksponensial

kompleks selama rentang frekuensi yang ada, menjumlahkan setiap hasil, dan melakukan *plot* hasil tersebut sebagai koefisien frekuensi. Koefisien ini disebut spektrum dan mewakili jumlah frekuensi yang terdapat dalam sinyal *input*, ditunjukkan pada Persamaan (1) berikut:

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

dimana  $x(n)$  adalah koefisien sinus dan cosinus dari  $2\pi k / N$ ,  $k$  adalah indeks dari frekuensi dari  $N$  buah frekuensi,  $n$  adalah indeks waktu,  $x(k)$  adalah nilai dari spektrum untuk frekuensi  $k_{th}$ , dan  $x(n)$  adalah nilai dari sinyal pada waktu  $n$ . Koefisien yang ada didefinisikan sebagai *sample* domain waktu  $x(k)$  untuk FFT dan nilai bit  $x(n)$  frekuensi untuk IFFT.

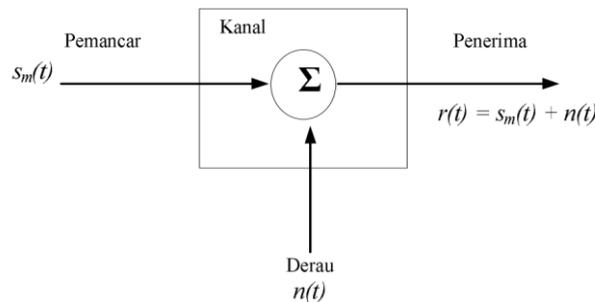
*Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) mengambil spektrum yang diterima dan mengubah semuanya kembali ke sinyal domain waktu dengan cara mengalikannya dengan sejumlah gelombang sinus, ditunjukkan pada Persamaan (2) berikut [7].

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

### 2.9 Kanal AWGN

AWGN merupakan tipe *noise* yang diberikan untuk menguji kemampuan sistem. AWGN mempunyai kerapatan spektral datar (*flat spectral density*) pada ranah frekuensi yang lebar. *Transmitter* mengirimkan informasi digital dengan menggunakan sinyal bentuk gelombang  $\{S_m(t)\} m = 1, 2, \dots M$ . Setiap bentuk gelombang ditransmisikan dengan simbol pada durasi interval waktu  $T$ . Karakteristik *noise* AWGN, yaitu sinyal keluaran yang melalui kanal AWGN sama dengan sinyal asli yang ditambah dengan *noise* AWGN, dinyatakan dengan Persamaan (3) berikut:

$$r(t) = S_m(t) + n(t) \quad (3)$$



Gambar 8. Kanal AWGN [5]

### 2.10 Bit Error Rate (BER)

BER adalah perbandingan jumlah bit salah yang diterima *receiver* terhadap jumlah bit yang dikirim. Dalam realisasinya BER sangat dipengaruhi oleh *noise* karena *noise* dapat menyebabkan adanya kesalahan proses deteksi, persamaan *Bit Error Rate* dapat dihitung dengan Persamaan (4) berikut [8].

$$BER = \frac{\text{Jumlah bit error}}{\text{Jumlah total bit dikirim}} \quad (4)$$

Besarnya nilai BER ( $P_b$ ) untuk masing-masing teknik modulasi dapat diperoleh dengan menggunakan *Q-Function* untuk QPSK dalam Persamaan (5) berikut.

$$P_b = Q(\sqrt{2\gamma_b}) \tag{5}$$

dimana  $\gamma_b = E_b/N_0$

Untuk modulasi QAM, nilai BER secara teori dapat dicari dengan menggunakan Persamaan (6) berikut.

$$P_b = \frac{4}{\log_2 M} Q\left(\sqrt{\frac{3\gamma_b \cdot \log_2 M}{M - 1}}\right) \tag{6}$$

dengan:

$\gamma_b = E_b/N_0$

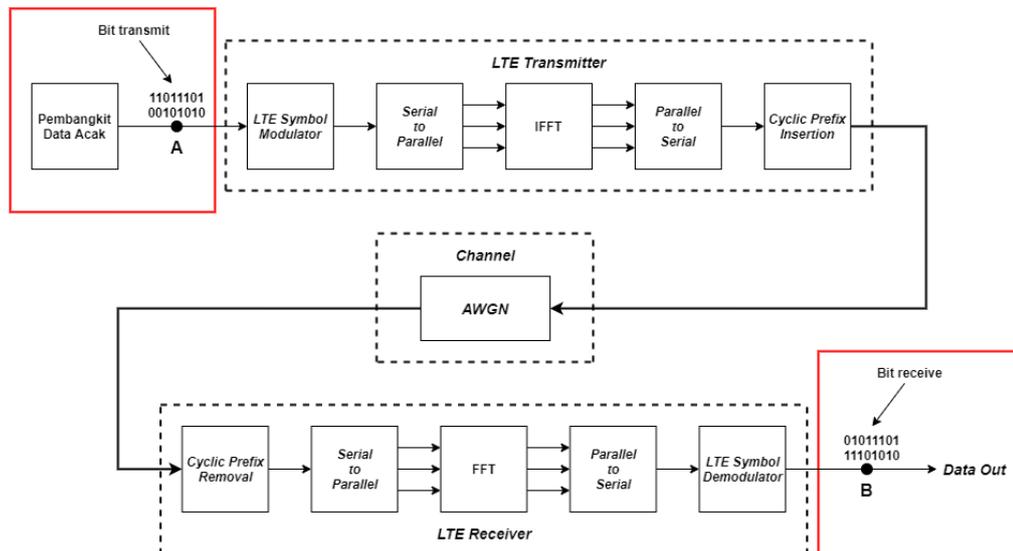
$M$  = indeks dari QAM

### 3. Perancangan Simulasi

Perancangan sistem dibuat dalam beberapa tahap. Sistem dibuat dengan *software* MATLAB 2021a, terdiri dari *transmitter*, kanal, dan *receiver*. Terdapat dua rancangan sistem yang diimplementasikan pada MATLAB *code*, masing-masing untuk sistem *downlink* LTE dan sistem *downlink* 5G.

#### 3.1 Rancangan Sistem Downlink LTE

Pada simulasi yang dilakukan dengan *software* MATLAB untuk sistem *downlink* LTE, titik-titik pengukuran ditunjukkan pada Gambar 9 dengan titik A merupakan titik pengukuran untuk bit yang dikirimkan selama proses transmisi, dan titik B merupakan titik pengukuran untuk bit yang diterima setelah melalui proses transmisi.



Gambar 91. Titik pengukuran BER pada *downlink system* LTE

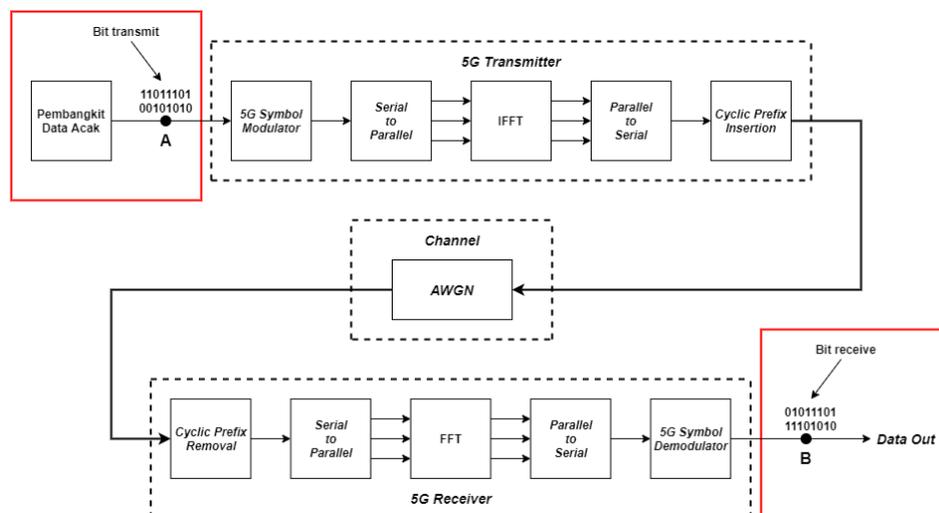
Melalui perhitungan *bit error rate* dari Persamaan (4), dari kedua titik tersebut dapat diasumsikan bahwa pengukuran pada titik A mewakili jumlah total bit dikirim, sedangkan pengukuran pada titik B mewakili jumlah bit *error* selama proses transmisi. Dari hasil pengukuran titik A dan titik B kemudian dilakukan perbandingan sebagaimana pada Persamaan (4) untuk memperoleh nilai *bit error rate* untuk variasi nilai  $E_b/N_0$  0 dB sampai dengan 20 dB. Adapun parameter-parameter yang digunakan pada sistem *downlink* LTE dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter rancangan sistem downlink LTE

Sampling rate	$4 \times 10^6$
Frekuensi carrier	10 MHz
Nfft	128
Subcarrier spacing	15 kHz
Multiplexing	OFDM, CP-OFDM
Cyclic prefix length	0, 14
Teknik modulasi	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Kanal	AWGN
Variasi $E_b/N_0$	0 dB s/d 20 dB

### 3.2 Rancangan Sistem Downlink 5G

Pada simulasi yang akan dilakukan pada *software* MATLAB untuk sistem *downlink* 5G, titik-titik pengukuran ditunjukkan pada Gambar 10 dengan pada titik A merupakan titik pengukuran untuk bit yang dikirimkan selama proses transmisi, dan titik B merupakan titik pengukuran untuk bit yang diterima setelah melalui proses transmisi. Melalui perhitungan *bit error rate* dari Persamaan (4), dari kedua titik tersebut dapat diasumsikan bahwa pengukuran pada titik A mewakili jumlah total bit dikirim, sedangkan pengukuran pada titik B mewakili jumlah bit *error* selama proses transmisi. Dari hasil pengukuran titik A dan titik B kemudian dilakukan perbandingan sebagaimana pada Persamaan (4) untuk memperoleh nilai *bit error rate* untuk variasi nilai  $E_b/N_0$  0dB-20dB. Adapun parameter-parameter yang akan digunakan pada sistem *downlink* 5G dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 20. Titik pengukuran BER pada *downlink* system 5G

Tabel 3. Parameter rancangan sistem downlink 5G

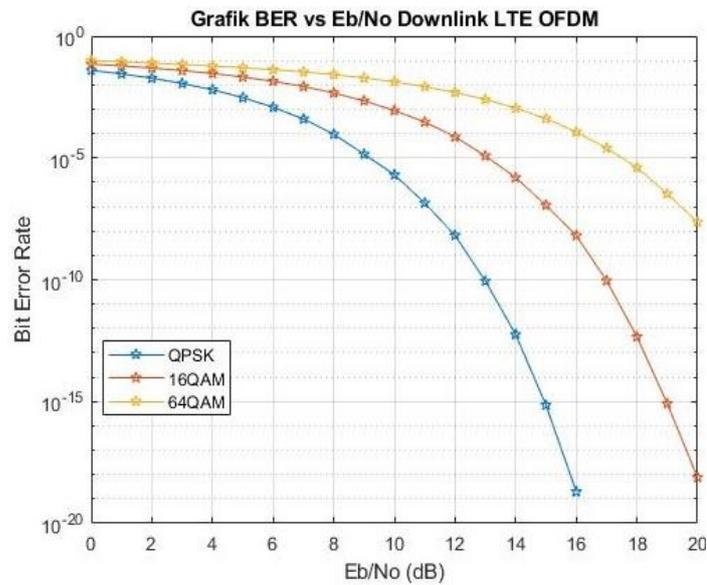
Sampling rate	$4 \times 10^6$
Frekuensi Carrier	10 MHz
Nfft	256
Subcarrier Spacing	15 kHz
Multiplexing	CP-OFDM
Cyclic prefix length	14
Teknik Modulasi	QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM
Kanal	AWGN

Variasi  $E_b/N_0$  0 dB s/d 20 dB

#### 4. Hasil dan Pembahasan

##### 4.1 Hasil Pengujian Sistem *Downlink* LTE (OFDM)

Gambar 11 menunjukkan grafik BER vs  $E_b/N_0$  pada *downlink* LTE dengan sistem OFDM yang melalui kanal AWGN. Diperoleh nilai BER dari masing-masing teknik modulasi yang digunakan dengan variasi panjang CP 0 (tanpa CP) dan variasi modulasi, yaitu QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM. Pada modulasi QPSK mempunyai nilai BER  $10^{-19}$  dengan nilai  $E_b/N_0$  16 dB. Pada modulasi 16-QAM mempunyai nilai BER  $10^{-19}$  dengan nilai  $E_b/N_0$  20 dB dan untuk modulasi 64-QAM mempunyai nilai BER  $10^{-8}$  dengan nilai  $E_b/N_0$  20 dB.



Gambar 31. Grafik BER vs  $E_b/N_0$  downlink LTE dengan sistem OFDM

Gambar 11 menunjukkan bahwa kinerja modulasi pada *downlink* LTE dengan sistem OFDM yang melalui kanal AWGN untuk modulasi QPSK lebih baik dibandingkan dengan modulasi 16-QAM dan modulasi 64-QAM. Hal tersebut dikarenakan pada modulasi QPSK hanya menggunakan 2 bit dalam 1 simbol, sedangkan modulasi 16-QAM dan 64-QAM memodulasikan 4 dan 6 bit dalam 1 simbol, sehingga modulasi dengan simbol yang lebih tinggi lebih rentan terhadap *noise* selama proses transmisi yang mengakibatkan performansi dari sistem dengan simbol yang lebih rendah akan semakin baik. Namun, berdasarkan perbedaan jumlah bit per simbol tersebut, modulasi QPSK memiliki *bitrate* yang lebih kecil dibandingkan dengan modulasi 16-QAM dan modulasi 64-QAM. Persamaan yang membuktikan bahwa nilai *bitrate* QPSK lebih kecil adalah sebagai berikut:

$$R_s = \frac{R}{\log_2 M}, \log_2 M = k$$

dimana:

- $R_s$  = symbol rate (sps)
- $R$  = bitrate (bps)
- $M$  = indeks modulasi
- $k$  = bit per symbol

Tabel 4. Nilai perbandingan BER terhadap  $E_b/N_0$  variasi modulasi QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM pada *downlink* LTE OFDM

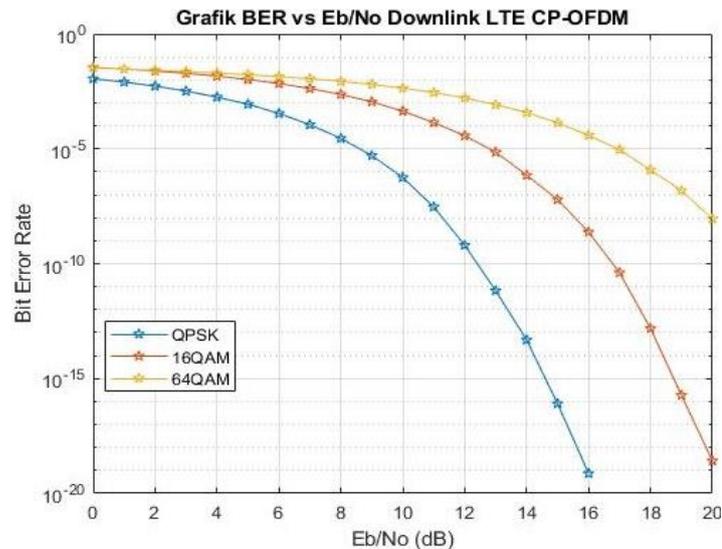
$E_b/N_0$ (dB)	Bit Error Rate (BER)		
	QPSK	16-QAM	64-QAM
0	$3,93483 \times 10^{-2}$	$7,04226 \times 10^{-2}$	$9,96601 \times 10^{-2}$
1	$2,80962 \times 10^{-2}$	$5,95108 \times 10^{-2}$	$8,8934 \times 10^{-2}$
2	$1,86706 \times 10^{-2}$	$4,88663 \times 10^{-2}$	$7,83069 \times 10^{-2}$
3	$1,14207 \times 10^{-2}$	$3,86405 \times 10^{-2}$	$6,83576 \times 10^{-2}$
4	$6,29036 \times 10^{-3}$	$2,92102 \times 10^{-2}$	$5,90438 \times 10^{-2}$
5	$2,98189 \times 10^{-3}$	$2,09076 \times 10^{-2}$	$5,02437 \times 10^{-2}$
6	$1,19915 \times 10^{-3}$	$1,39141 \times 10^{-2}$	$4,17774 \times 10^{-2}$
7	$3,94285 \times 10^{-4}$	$8,49897 \times 10^{-3}$	$3,36776 \times 10^{-2}$
8	$9,31964 \times 10^{-5}$	$4,63711 \times 10^{-3}$	$2,60402 \times 10^{-2}$
9	$1,41995 \times 10^{-5}$	$2,18132 \times 10^{-3}$	$1,92384 \times 10^{-2}$
10	$2,03692 \times 10^{-6}$	$8,74366 \times 10^{-4}$	$1,32125 \times 10^{-2}$
11	$1,41107 \times 10^{-7}$	$2,98089 \times 10^{-4}$	$8,41413 \times 10^{-3}$
12	$8,66301 \times 10^{-9}$	$7,30972 \times 10^{-5}$	$4,88096 \times 10^{-3}$
13	$8,82195 \times 10^{-11}$	$1,21995 \times 10^{-5}$	$2,51238 \times 10^{-3}$
14	$5,64177 \times 10^{-13}$	$1,55843 \times 10^{-6}$	$1,11759 \times 10^{-3}$
15	$7,1246 \times 10^{-16}$	$1,1392 \times 10^{-7}$	$4,07297 \times 10^{-4}$
16	$1,98002 \times 10^{-19}$	$6,5022 \times 10^{-9}$	$1,15999 \times 10^{-4}$
17	-	$9,07163 \times 10^{-11}$	$2,50998 \times 10^{-5}$
18	-	$4,52231 \times 10^{-13}$	$4,06402 \times 10^{-6}$
19	-	$8,20182 \times 10^{-16}$	$3,37663 \times 10^{-7}$
20	-	$7,64322 \times 10^{-19}$	$2,29184 \times 10^{-8}$

Karena modulasi QPSK mampu mengirimkan 2 bit per simbol, maka:  $M = 4, k = \log_2 4, k = 2$ . Untuk modulasi 16-QAM mampu mengirimkan 4 bit per simbol, maka:  $M = 16, k = \log_2 16, k = 4$ . Untuk modulasi 64-QAM mampu mengirimkan 6 bit per simbol, maka:  $M = 64, k = \log_2 64, k = 6$ . Hubungan dari persamaan tersebut dapat digambarkan nilai  $k$  berbanding lurus dengan *bitrate*, jika nilai  $k$  meningkat maka *bitrate* juga akan meningkat.

Secara keseluruhan dapat dilihat bahwa seiring dengan semakin tinggi nilai  $E_b/N_0$ , BER dari sistem semakin rendah. Hal ini dikarenakan dengan naiknya nilai  $E_b/N_0$ , maka SNR semakin tinggi dan *noise* yang disebabkan semakin rendah sehingga secara langsung berpengaruh terhadap nilai BER sistem.

#### 4.2 Hasil Pengujian Sistem Downlink LTE (CP-OFDM)

Gambar 12 menunjukkan grafik BER vs  $E_b/N_0$  pada *downlink* LTE dengan sistem CP-OFDM yang melalui kanal AWGN. Diperoleh nilai BER dari masing-masing teknik modulasi yang digunakan dengan variasi panjang CP 14 dan variasi modulasi, yaitu QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM. Pada modulasi QPSK mempunyai nilai BER  $10^{-20}$  dengan nilai  $E_b/N_0$  16 dB. Pada modulasi 16-QAM mempunyai nilai BER  $10^{-19}$  dengan nilai  $E_b/N_0$  20 dB dan untuk modulasi 64-QAM mempunyai nilai BER  $10^{-9}$  dengan nilai  $E_b/N_0$  20 dB.



Gambar 42. Grafik BER vs  $E_b/N_0$  *downlink* LTE dengan sistem CP-OFDM

Pada Gambar 12 dapat dilihat bahwa kinerja modulasi pada *downlink* LTE dengan sistem OFDM yang melalui kanal AWGN untuk modulasi QPSK lebih baik dibandingkan dengan modulasi 16-QAM dan modulasi 64-QAM. Hal tersebut dikarenakan pada modulasi QPSK hanya menggunakan 2 bit dalam 1 simbol, sedangkan modulasi 16-QAM dan 64-QAM memodulasikan 4 dan 6 bit dalam 1 simbol, sehingga modulasi dengan simbol yang lebih tinggi lebih rentan terhadap *noise* selama proses transmisi yang mengakibatkan performansi dari sistem dengan simbol yang lebih rendah akan semakin baik. Namun, berdasarkan perbedaan jumlah bit per simbol tersebut, modulasi QPSK memiliki *bitrate* yang lebih kecil dibandingkan dengan modulasi 16-QAM dan modulasi 64-QAM. Persamaan yang membuktikan bahwa nilai *bitrate* QPSK lebih kecil adalah sebagai berikut:

$$R_s = \frac{R}{\log_2 M}, \log_2 M = k$$

dimana:

$R_s$  = symbol rate (sps)

$R$  = bitrate (bps)

$M$  = indeks modulasi

$k$  = bit per symbol

Tabel 5. Nilai perbandingan BER terhadap  $E_b/N_0$  variasi modulasi QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM pada *downlink* LTE CP-OFDM

$E_b/N_0$ (dB)	<i>Bit Error Rate (BER)</i>		
	QPSK	16-QAM	64-QAM
0	$1,12285 \times 10^{-2}$	$3,51397 \times 10^{-2}$	$3,3191 \times 10^{-2}$
1	$8,05307 \times 10^{-3}$	$2,97574 \times 10^{-2}$	$2,95784 \times 10^{-2}$
2	$5,36048 \times 10^{-3}$	$2,4421 \times 10^{-2}$	$2,6102 \times 10^{-2}$
3	$3,26452 \times 10^{-3}$	$1,9289 \times 10^{-2}$	$2,28258 \times 10^{-2}$
4	$1,77959 \times 10^{-3}$	$1,46025 \times 10^{-2}$	$1,96951 \times 10^{-2}$
5	$8,72499 \times 10^{-4}$	$1,04206 \times 10^{-2}$	$1,67814 \times 10^{-2}$
6	$3,4526 \times 10^{-4}$	$6,95903 \times 10^{-3}$	$1,39282 \times 10^{-2}$
7	$1,11987 \times 10^{-4}$	$4,19804 \times 10^{-3}$	$1,1195 \times 10^{-2}$
8	$2,84967 \times 10^{-5}$	$2,32681 \times 10^{-3}$	$8,65761 \times 10^{-3}$
9	$5,09967 \times 10^{-6}$	$1,10886 \times 10^{-3}$	$6,34769 \times 10^{-3}$
10	$5,6576 \times 10^{-7}$	$4,37383 \times 10^{-4}$	$4,36985 \times 10^{-3}$
11	$2,96508 \times 10^{-8}$	$1,38795 \times 10^{-4}$	$2,80868 \times 10^{-3}$
12	$6,33199 \times 10^{-10}$	$3,72986 \times 10^{-5}$	$1,63647 \times 10^{-3}$
13	$6,6522 \times 10^{-12}$	$7,15456 \times 10^{-6}$	$8,33033 \times 10^{-4}$
14	$4,7864 \times 10^{-14}$	$7,08559 \times 10^{-7}$	$3,7797 \times 10^{-4}$
15	$8,00238 \times 10^{-17}$	$6,24804 \times 10^{-8}$	$1,35589 \times 10^{-4}$
16	$7,44129 \times 10^{-20}$	$2,37089 \times 10^{-9}$	$3,89969 \times 10^{-5}$
17	-	$4,07163 \times 10^{-11}$	$9,18108 \times 10^{-6}$
18	-	$1,5223 \times 10^{-13}$	$1,2033 \times 10^{-6}$
19	-	$1,87418 \times 10^{-16}$	$1,52257 \times 10^{-7}$
20	-	$2,64711 \times 10^{-19}$	$9,0285 \times 10^{-9}$

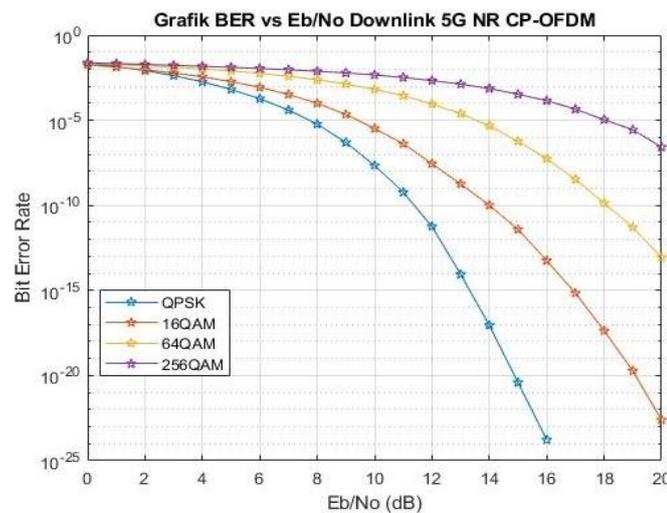
Karena modulasi QPSK mampu mengirimkan 2 bit per simbol, maka:  $M = 4, k = \log_2 4, k = 2$ . Untuk modulasi 16-QAM mampu mengirimkan 4 bit per simbol, maka:  $M = 16, k = \log_2 16, k = 4$ . Untuk modulasi 64-QAM mampu mengirimkan 6 bit per simbol, maka:  $M = 64, k = \log_2 64, k = 6$ . Hubungan dari persamaan tersebut dapat digambarkan nilai  $k$  berbanding lurus dengan *bitrate*, jika nilai  $k$  meningkat maka *bitrate* juga akan meningkat.

Secara keseluruhan dapat dilihat bahwa seiring dengan semakin naik nilai  $E_b/N_0$ , BER dari sistem semakin kecil. Hal ini dikarenakan dengan naiknya nilai  $E_b/N_0$ , maka SNR

semakin tinggi dan *noise* yang disebabkan semakin rendah sehingga secara langsung berpengaruh terhadap nilai BER sistem.

### 4.3 Hasil Pengujian Sistem Downlink 5G (CP-OFDM)

Gambar 13 menunjukkan grafik BER vs  $E_b/N_0$  pada *downlink* 5G dengan sistem CP-OFDM yang melalui kanal AWGN. Diperoleh nilai BER dari masing-masing teknik modulasi yang digunakan dengan variasi panjang CP 14 dan variasi modulasi, yaitu QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM. Pada modulasi QPSK mempunyai nilai BER  $10^{-24}$  dengan nilai  $E_b/N_0$  16 dB. Pada modulasi 16-QAM mempunyai nilai BER  $10^{-23}$  dengan nilai  $E_b/N_0$  20 dB. Pada modulasi 64-QAM mempunyai nilai BER  $10^{-12}$  dengan nilai  $E_b/N_0$  20 dB dan untuk modulasi 256-QAM mempunyai nilai BER  $10^{-7}$  dengan nilai  $E_b/N_0$  20 dB.



Gambar 13. Grafik BER vs  $E_b/N_0$  downlink 5G dengan sistem CP-OFDM

Gambar 13 menunjukkan bahwa kinerja modulasi pada *downlink* 5G dengan sistem CP-OFDM yang melalui kanal AWGN untuk modulasi QPSK lebih baik dibandingkan dengan modulasi 16-QAM, modulasi 64-QAM, dan modulasi 256-QAM. Hal tersebut dikarenakan pada modulasi QPSK hanya menggunakan 2 bit dalam 1 simbol, sedangkan modulasi 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM memodulasikan 4, 6, dan 8 bit dalam 1 simbol, sehingga modulasi dengan simbol yang lebih tinggi lebih rentan terhadap *noise* selama proses transmisi yang mengakibatkan performansi dari sistem dengan simbol yang lebih rendah akan semakin baik. Namun, berdasarkan perbedaan jumlah bit per simbol tersebut, modulasi QPSK memiliki *bitrate* yang lebih kecil dibandingkan dengan modulasi 16-QAM dan modulasi 64-QAM. Persamaan yang membuktikan bahwa nilai *bitrate* QPSK lebih kecil adalah sebagai berikut:

$$R_s = \frac{R}{\log_2 M}, \log_2 M = k$$

dimana:

$R_s$  = symbol rate (sps)

$R$  = bitrate (bps)

$M$  = indeks modulasi

$k$  = bit per symbol

Tabel 6. Nilai perbandingan BER terhadap  $E_b/N_0$  dengan pengaruh sitem modulasi QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM pada *downlink* 5G CP-OFDM

$E_b/N_0$ (dB)	<i>Bit Error Rate (BER)</i>			
	QPSK	16-QAM	64-QAM	256-QAM
0	$2,26448 \times 10^{-2}$	$1,77199 \times 10^{-2}$	$2,18344 \times 10^{-2}$	$2,38619 \times 10^{-2}$
1	$1,42922 \times 10^{-2}$	$1,31974 \times 10^{-2}$	$1,87618 \times 10^{-2}$	$2,14774 \times 10^{-2}$
2	$8,24083 \times 10^{-3}$	$3,54869 \times 10^{-3}$	$1,57924 \times 10^{-2}$	$1,91643 \times 10^{-2}$
3	$4,17987 \times 10^{-3}$	$5,98431 \times 10^{-3}$	$1,30365 \times 10^{-2}$	$1,69046 \times 10^{-2}$
4	$1,81479 \times 10^{-3}$	$3,54869 \times 10^{-3}$	$1,03576 \times 10^{-2}$	$1,47773 \times 10^{-2}$
5	$6,42095 \times 10^{-4}$	$1,85004 \times 10^{-3}$	$7,93417 \times 10^{-3}$	$1,28407 \times 10^{-2}$
6	$1,83099 \times 10^{-4}$	$8,62672 \times 10^{-4}$	$5,71944 \times 10^{-3}$	$1,09555 \times 10^{-2}$
7	$3,98997 \times 10^{-5}$	$3,2789 \times 10^{-4}$	$3,84229 \times 10^{-3}$	$9,23814 \times 10^{-3}$
8	$5,93618 \times 10^{-6}$	$1,00197 \times 10^{-4}$	$2,38481 \times 10^{-3}$	$7,59327 \times 10^{-3}$
9	$4,9696 \times 10^{-7}$	$2,19993 \times 10^{-5}$	$1,34669 \times 10^{-3}$	$6,00288 \times 10^{-3}$
10	$2,185659 \times 10^{-8}$	$3,29332 \times 10^{-6}$	$6,47148 \times 10^{-4}$	$4,56474 \times 10^{-3}$
11	$8,5154 \times 10^{-10}$	$4,15439 \times 10^{-7}$	$2,80578 \times 10^{-4}$	$3,26006 \times 10^{-3}$
12	$4,80041 \times 10^{-12}$	$2,79176 \times 10^{-8}$	$9,02928 \times 10^{-5}$	$2,14471 \times 10^{-3}$
13	$3,77304 \times 10^{-15}$	$1,799991 \times 10^{-9}$	$2,4398 \times 10^{-5}$	$1,31228 \times 10^{-3}$
14	$8,96055 \times 10^{-18}$	$1,0092 \times 10^{-10}$	$4,74156 \times 10^{-6}$	$7,34065 \times 10^{-4}$
15	$2,85754 \times 10^{-21}$	$3,8137 \times 10^{-12}$	$5,88492 \times 10^{-7}$	$3,35393 \times 10^{-4}$
16	$5,67301 \times 10^{-24}$	$5,67119 \times 10^{-14}$	$5,51079 \times 10^{-8}$	$1,41655 \times 10^{-4}$
17	-	$6,97491 \times 10^{-16}$	$3,36016 \times 10^{-9}$	$3,36016 \times 10^{-5}$
18	-	$4,21399 \times 10^{-18}$	$1,3479 \times 10^{-10}$	$4,43858 \times 10^{-5}$
19	-	$1,8748 \times 10^{-20}$	$5,0754 \times 10^{-12}$	$2,74009 \times 10^{-6}$
20	-	$2,4376 \times 10^{-23}$	$8,8251 \times 10^{-14}$	$2,62968 \times 10^{-7}$

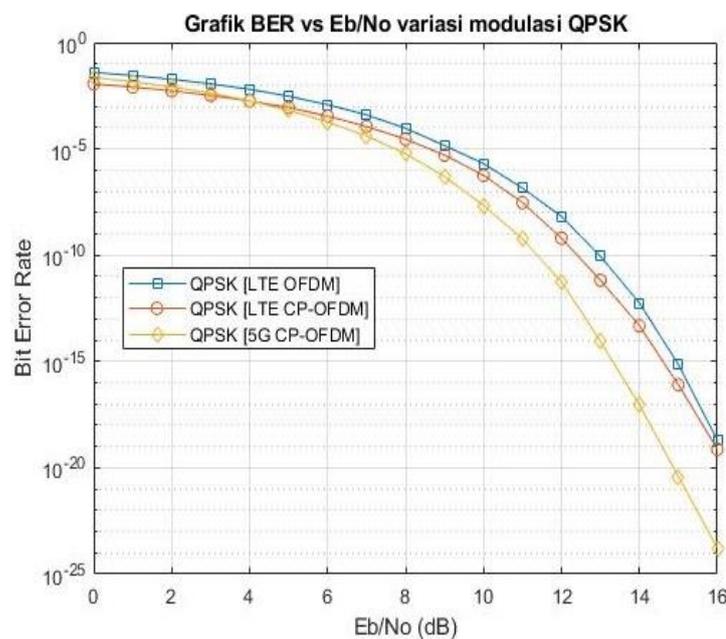
Karena modulasi QPSK mampu mengirimkan 2 bit per simbol, maka:  $M = 4, k = \log_2 4, k = 2$ . Untuk modulasi 16-QAM mampu mengirimkan 4 bit per simbol, maka:  $M = 16, k = \log_2 16, k = 4$ . Untuk modulasi 64-QAM mampu mengirimkan 6 bit per simbol, maka:  $M = 64, k = \log_2 64, k = 6$ . Untuk modulasi 256-QAM mampu mengirimkan 8 bit per simbol, maka:  $M = 256, k = \log_2 256, k = 8$ . Hubungan dari persamaan tersebut dapat digambarkan nilai  $k$  berbanding lurus dengan *bitrate*, jika nilai  $k$  meningkat maka *bitrate* juga akan meningkat.

Secara keseluruhan dapat dilihat bahwa seiring dengan semakin naik nilai  $E_b/N_0$ , BER dari sistem semakin kecil. Hal ini dikarenakan dengan naiknya nilai  $E_b/N_0$ , maka SNR

semakin tinggi dan *noise* yang disebabkan semakin rendah sehingga secara langsung berpengaruh terhadap nilai BER sistem.

#### 4.4 Kinerja Downlink LTE dan 5G dengan Pengaruh Modulasi QPSK

Gambar 14 menunjukkan grafik BER vs  $E_b/N_0$  kinerja modulasi QPSK pada *downlink* LTE dengan sistem OFDM dan CP-OFDM, dan pada *downlink* 5G dengan sistem CP-OFDM yang melalui kanal AWGN. Nilai BER diperoleh dari pengujian sistem *downlink* LTE dan *downlink* 5G dengan pengaruh modulasi QPSK dan dengan variasi panjang CP 14 untuk *downlink* dengan sistem CP-OFDM. Untuk variasi nilai  $E_b/N_0$  pada hasil pengujian ini adalah pada 16 dB. Pada *downlink* LTE sistem OFDM mempunyai nilai BER  $10^{-19}$ . Pada *downlink* LTE sistem CP-OFDM mempunyai nilai BER  $10^{-20}$ . Pada *downlink* 5G sistem CP-OFDM mempunyai nilai BER  $10^{-24}$ .



Gambar 54. Grafik BER vs  $E_b/N_0$  pengaruh sistem modulasi QPSK pada *downlink* LTE dan 5G

Kinerja modulasi QPSK pada *downlink* 5G dengan sistem CP-OFDM merupakan yang terbaik dengan BER paling kecil. Kinerja modulasi QPSK pada *downlink* LTE dengan sistem CP-OFDM cukup baik dengan BER cukup kecil. Kinerja modulasi QPSK pada *downlink* LTE dengan sistem OFDM merupakan yang terburuk dengan BER paling kecil.

Pada *downlink* LTE dapat dilihat perbandingan antara penggunaan sistem OFDM dengan CP-OFDM. Nilai BER yang dihasilkan pada *downlink* LTE dengan sistem CP-OFDM lebih baik dibandingkan dengan sistem OFDM. Hal ini disebabkan karena CP dapat mengatasi *multipath* pada kanal, sehingga pengaruh adanya CP akan meminimalisir terjadinya *bit error* yang ditransmisikan pada kanal. Perbandingan untuk *downlink* LTE dan *downlink* 5G, nilai BER yang dihasilkan oleh *downlink* 5G dengan pengaruh modulasi QPSK lebih baik dibandingkan dengan *downlink* LTE, yang artinya *downlink* 5G dengan sistem CP-OFDM yang telah dibuat dapat mentransmisikan sistem modulasi QPSK dengan *noise* yang lebih rendah sehingga mempunyai nilai *error* yang lebih sedikit.

Tabel 7. Nilai perbandingan BER terhadap  $E_b/N_0$  dengan pengaruh sistem modulasi QPSK pada *downlink* LTE dan 5G

$E_b/N_0$ (dB)	<i>Bit Error Rate (BER)</i>		
	QPSK (LTE OFDM)	QPSK (LTE CP-OFDM)	QPSK (5G CP-OFDM)
0	$3,93483 \times 10^{-2}$	$1,12285 \times 10^{-2}$	$2,26448 \times 10^{-2}$
1	$2,80962 \times 10^{-2}$	$8,05307 \times 10^{-3}$	$1,42922 \times 10^{-2}$
2	$1,86706 \times 10^{-2}$	$5,36048 \times 10^{-3}$	$8,24083 \times 10^{-3}$
3	$1,14207 \times 10^{-2}$	$3,26452 \times 10^{-3}$	$4,17987 \times 10^{-3}$
4	$6,29036 \times 10^{-3}$	$1,77959 \times 10^{-3}$	$1,81479 \times 10^{-3}$
5	$2,98189 \times 10^{-3}$	$8,72499 \times 10^{-4}$	$6,42095 \times 10^{-4}$
6	$1,19915 \times 10^{-3}$	$3,4526 \times 10^{-4}$	$1,83099 \times 10^{-4}$
7	$3,94285 \times 10^{-4}$	$1,11987 \times 10^{-4}$	$3,98997 \times 10^{-5}$
8	$9,31964 \times 10^{-5}$	$2,84967 \times 10^{-5}$	$5,93618 \times 10^{-6}$
9	$1,41995 \times 10^{-5}$	$5,09967 \times 10^{-6}$	$4,9696 \times 10^{-7}$
10	$2,03692 \times 10^{-6}$	$5,6576 \times 10^{-7}$	$2,185659 \times 10^{-8}$
11	$1,41107 \times 10^{-7}$	$2,96508 \times 10^{-8}$	$5,8154 \times 10^{-10}$
12	$8,66301 \times 10^{-9}$	$6,33199 \times 10^{-10}$	$5,70041 \times 10^{-12}$
13	$8,82195 \times 10^{-11}$	$6,6522 \times 10^{-12}$	$8,77304 \times 10^{-15}$
14	$5,64177 \times 10^{-13}$	$4,7864 \times 10^{-14}$	$8,96055 \times 10^{-18}$
15	$7,1246 \times 10^{-16}$	$8,00238 \times 10^{-17}$	$3,85754 \times 10^{-21}$
16	$1,98002 \times 10^{-19}$	$7,44129 \times 10^{-20}$	$1,67301 \times 10^{-24}$

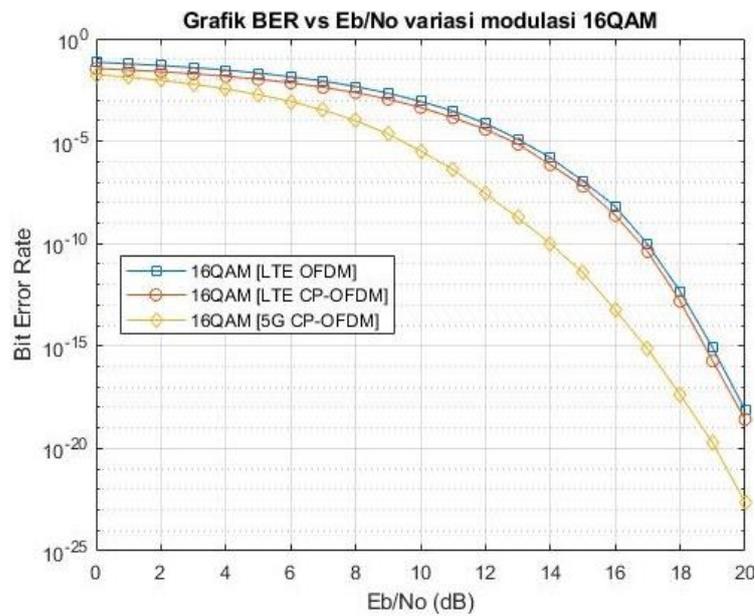
#### 4.5 Kinerja *Downlink* LTE dan 5G dengan Pengaruh Modulasi 16-QAM

Gambar 15 menunjukkan grafik BER vs  $E_b/N_0$  kinerja modulasi 16-QAM pada *downlink* LTE dengan sistem OFDM dan CP-OFDM, dan pada *downlink* 5G dengan sistem CP-OFDM yang melalui kanal AWGN. Nilai BER diperoleh dari pengujian sistem *downlink* LTE dan *downlink* 5G dengan pengaruh modulasi 16-QAM, dengan variasi panjang CP 14 untuk *downlink* dengan sistem CP-OFDM. Untuk variasi nilai  $E_b/N_0$  pada hasil pengujian ini adalah 20 dB. Pada *downlink* LTE, sistem OFDM mempunyai nilai BER  $10^{-19}$ . Pada *downlink* LTE, sistem CP-OFDM mempunyai nilai BER  $10^{-19}$ . Pada *downlink* 5G, sistem CP-OFDM mempunyai nilai BER  $10^{-23}$ .

Tabel 8. Nilai perbandingan BER terhadap  $E_b/N_0$  dengan pengaruh sistem modulasi 16-QAM pada *downlink* LTE dan 5G

$E_b/N_0$ (dB)	Bit Error Rate (BER)		
	16-QAM (LTE OFDM)	16-QAM (LTE CP-OFDM)	16-QAM (5G CP-OFDM)
0	$7,04226 \times 10^{-2}$	$3,51397 \times 10^{-2}$	$1,77199 \times 10^{-2}$
1	$5,95108 \times 10^{-2}$	$2,97574 \times 10^{-2}$	$1,31974 \times 10^{-2}$
2	$4,88663 \times 10^{-2}$	$2,4421 \times 10^{-2}$	$3,54869 \times 10^{-3}$
3	$3,86405 \times 10^{-2}$	$1,9289 \times 10^{-2}$	$5,98431 \times 10^{-3}$
4	$2,92102 \times 10^{-2}$	$1,46025 \times 10^{-2}$	$3,54869 \times 10^{-3}$
5	$2,09076 \times 10^{-2}$	$1,04206 \times 10^{-2}$	$1,85004 \times 10^{-3}$
6	$1,39141 \times 10^{-2}$	$6,95903 \times 10^{-3}$	$8,62672 \times 10^{-4}$
7	$8,49897 \times 10^{-3}$	$4,19804 \times 10^{-3}$	$3,2789 \times 10^{-4}$
8	$4,63711 \times 10^{-3}$	$2,32681 \times 10^{-3}$	$1,00197 \times 10^{-4}$
9	$2,18132 \times 10^{-3}$	$1,10886 \times 10^{-3}$	$2,19993 \times 10^{-5}$
10	$8,74366 \times 10^{-4}$	$4,37383 \times 10^{-4}$	$3,29332 \times 10^{-6}$
11	$2,98089 \times 10^{-4}$	$1,38795 \times 10^{-4}$	$4,15439 \times 10^{-7}$
12	$7,30972 \times 10^{-5}$	$3,72986 \times 10^{-5}$	$2,79176 \times 10^{-8}$
13	$1,21995 \times 10^{-5}$	$7,15456 \times 10^{-6}$	$1,799991 \times 10^{-9}$
14	$1,55843 \times 10^{-6}$	$7,08559 \times 10^{-7}$	$1,0092 \times 10^{-10}$
15	$1,1392 \times 10^{-7}$	$6,24804 \times 10^{-8}$	$3,8137 \times 10^{-12}$
16	$6,5022 \times 10^{-9}$	$2,37089 \times 10^{-9}$	$5,67119 \times 10^{-14}$
17	$9,07163 \times 10^{-11}$	$4,07163 \times 10^{-11}$	$6,97491 \times 10^{-16}$
18	$4,52231 \times 10^{-13}$	$1,5223 \times 10^{-13}$	$4,21399 \times 10^{-18}$
19	$8,20182 \times 10^{-16}$	$1,87418 \times 10^{-16}$	$1,8748 \times 10^{-20}$
20	$7,64322 \times 10^{-19}$	$2,64711 \times 10^{-19}$	$2,4376 \times 10^{-23}$

Kinerja modulasi 16-QAM pada *downlink* 5G dengan sistem CP-OFDM merupakan yang terbaik dengan BER paling kecil. Kinerja modulasi 16-QAM pada *downlink* LTE dengan sistem CP-OFDM cukup baik dengan BER cukup kecil. Kinerja modulasi 16-QAM pada *downlink* LTE dengan sistem OFDM merupakan yang terburuk dengan BER paling kecil.



Gambar 65. Grafik BER vs  $E_b/N_0$  pengaruh sistem modulasi 16-QAM pada *downlink* LTE dan 5G

Pada *downlink* LTE dapat dilihat perbandingan antara penggunaan sistem OFDM dengan CP-OFDM. Nilai BER yang dihasilkan pada *downlink* LTE dengan sistem CP-OFDM lebih baik dibandingkan dengan sistem OFDM. Hal ini disebabkan karena CP dapat mengatasi *multipath* pada kanal, sehingga pengaruh adanya CP akan meminimalisir terjadinya *bit error* yang ditransmisikan pada kanal. Perbandingan untuk *downlink* LTE dan *downlink* 5G, nilai BER yang dihasilkan oleh *downlink* 5G dengan pengaruh modulasi 16-QAM lebih baik dibandingkan dengan *downlink* LTE, yang artinya *downlink* 5G dengan sistem CP-OFDM yang telah dibuat dapat mentransmisikan sistem modulasi 16-QAM dengan *noise* yang lebih rendah sehingga mempunyai nilai *error* yang lebih sedikit.

#### 4.6 Kinerja *Downlink* LTE dan 5G dengan Pengaruh Modulasi 64-QAM

Gambar 16 menunjukkan grafik BER vs  $E_b/N_0$  kinerja modulasi 64-QAM pada *downlink* LTE dengan sistem OFDM dan CP-OFDM, serta pada *downlink* 5G dengan sistem CP-OFDM yang melalui kanal AWGN. Nilai BER diperoleh dari pengujian sistem *downlink* LTE dan *downlink* 5G dengan pengaruh modulasi 64-QAM dan dengan variasi panjang CP 14 untuk *downlink* dengan sistem CP-OFDM. Untuk variasi nilai  $E_b/N_0$  pada hasil pengujian ini adalah 20 dB. Pada *downlink* LTE sistem OFDM mempunyai nilai BER 10<sup>-8</sup>. Pada *downlink* LTE sistem CP-OFDM mempunyai nilai BER 10<sup>-9</sup>. Pada *downlink* 5G sistem CP-OFDM mempunyai nilai BER 10<sup>-14</sup>.

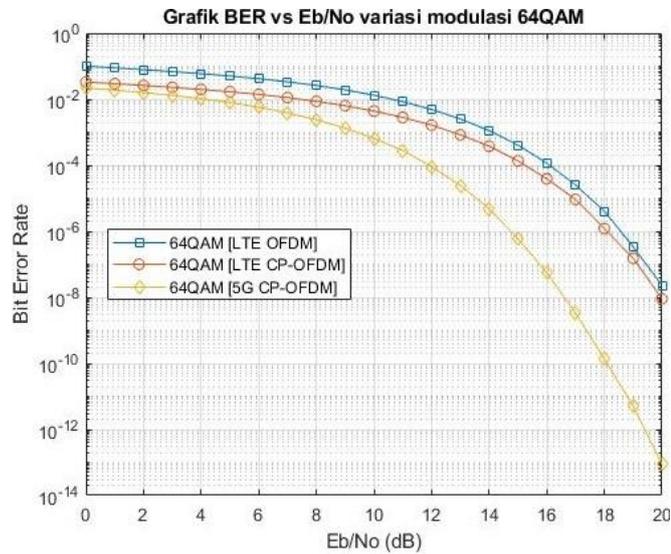
Kinerja modulasi 64-QAM pada *downlink* 5G dengan sistem CP-OFDM merupakan yang terbaik dengan BER paling kecil. Kinerja modulasi 64-QAM pada *downlink* LTE dengan sistem CP-OFDM cukup baik dengan BER cukup kecil. Kinerja modulasi 64-QAM pada *downlink* LTE dengan sistem OFDM merupakan yang terburuk dengan BER paling kecil.

Tabel 9. Nilai perbandingan BER terhadap  $E_b/N_0$  dengan pengaruh sistem modulasi 64-QAM pada *downlink* LTE dan 5G

$E_b/N_0$ (dB)	Bit Error Rate (BER)		
	64-QAM (LTE OFDM)	64-QAM (LTE CP-OFDM)	64-QAM (5G CP-OFDM)
0	$9,96601 \times 10^{-2}$	$3,3191 \times 10^{-2}$	$2,18344 \times 10^{-2}$
1	$8,8934 \times 10^{-2}$	$2,95784 \times 10^{-2}$	$1,87618 \times 10^{-2}$
2	$7,83069 \times 10^{-2}$	$2,6102 \times 10^{-2}$	$1,57924 \times 10^{-2}$
3	$6,83576 \times 10^{-2}$	$2,28258 \times 10^{-2}$	$1,30365 \times 10^{-2}$
4	$5,90438 \times 10^{-2}$	$1,96951 \times 10^{-2}$	$1,03576 \times 10^{-2}$
5	$5,02437 \times 10^{-2}$	$1,67814 \times 10^{-2}$	$7,93417 \times 10^{-3}$
6	$4,17774 \times 10^{-2}$	$1,39282 \times 10^{-2}$	$5,71944 \times 10^{-3}$
7	$3,36776 \times 10^{-2}$	$1,1195 \times 10^{-2}$	$3,84229 \times 10^{-3}$
8	$2,60402 \times 10^{-2}$	$8,65761 \times 10^{-3}$	$2,38481 \times 10^{-3}$
9	$1,92384 \times 10^{-2}$	$6,34769 \times 10^{-3}$	$1,34669 \times 10^{-3}$
10	$1,32125 \times 10^{-2}$	$4,36985 \times 10^{-3}$	$6,47148 \times 10^{-4}$
11	$8,41413 \times 10^{-3}$	$2,80868 \times 10^{-3}$	$2,80578 \times 10^{-4}$
12	$4,88096 \times 10^{-3}$	$1,63647 \times 10^{-3}$	$9,02928 \times 10^{-5}$
13	$2,51238 \times 10^{-3}$	$8,33033 \times 10^{-4}$	$2,4398 \times 10^{-5}$
14	$1,11759 \times 10^{-3}$	$3,7797 \times 10^{-4}$	$4,74156 \times 10^{-6}$
15	$4,07297 \times 10^{-4}$	$1,35589 \times 10^{-4}$	$5,88492 \times 10^{-7}$
16	$1,15999 \times 10^{-4}$	$3,89969 \times 10^{-5}$	$5,51079 \times 10^{-8}$
17	$2,50998 \times 10^{-5}$	$9,18108 \times 10^{-6}$	$3,36016 \times 10^{-9}$
18	$4,06402 \times 10^{-6}$	$1,2033 \times 10^{-6}$	$1,3479 \times 10^{-10}$
19	$3,37663 \times 10^{-7}$	$1,52257 \times 10^{-7}$	$5,0754 \times 10^{-12}$
20	$2,29184 \times 10^{-8}$	$9,0285 \times 10^{-9}$	$8,8251 \times 10^{-14}$

Pada *downlink* LTE dapat dilihat perbandingan antara penggunaan sistem OFDM dengan CP-OFDM. Nilai BER yang dihasilkan pada *downlink* LTE dengan sistem CP-OFDM lebih baik dibandingkan dengan sistem OFDM. Hal ini disebabkan karena CP dapat mengatasi *multipath* pada kanal, sehingga pengaruh adanya CP akan meminimalisir terjadinya *bit error* yang ditransmisikan pada kanal. Perbandingan untuk *downlink* LTE dan *downlink* 5G, nilai BER yang dihasilkan oleh *downlink* 5G dengan pengaruh modulasi 64-QAM lebih baik dibandingkan dengan *downlink* LTE, yang artinya *downlink* 5G dengan

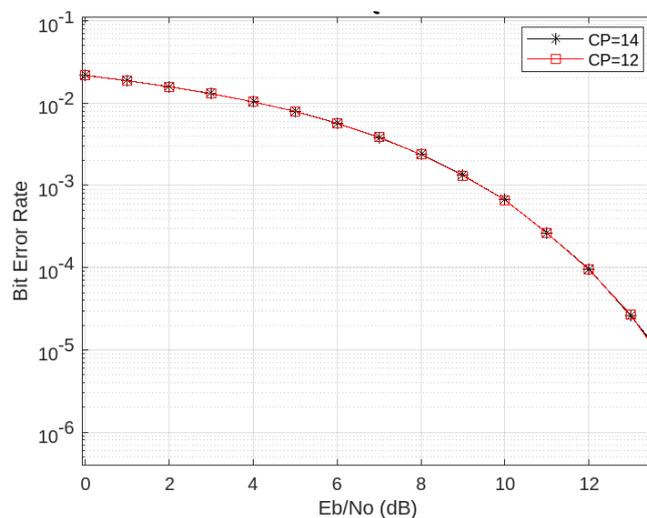
sistem CP-OFDM yang telah dibuat dapat mentransmisikan sistem modulasi 64-QAM dengan *noise* yang lebih rendah sehingga mempunyai nilai *error* yang lebih sedikit.



Gambar 76. Grafik BER vs  $E_b/N_0$  pengaruh sistem modulasi 64-QAM pada *downlink* LTE dan 5G

#### 4.7 Kinerja Modulasi 64-QAM pada 5G dengan Pengaruh Panjang *Cyclic Prefix*

Gambar 17 menunjukkan grafik BER vs  $E_b/N_0$  kinerja modulasi 64-QAM pada *downlink* 5G dengan perubahan panjang CP yang melalui kanal AWGN. Panjang CP yang digunakan adalah 14, yang disebut dengan *normal CP* pada teknologi 5G dan 12 atau *extended CP*. Walaupun nilai BER yang dihasilkan pada  $E_b/N_0$  0 dB sudah di bawah  $10^{-1}$ , akan tetapi seperti yang terlihat Gambar 17 nilai BER keduanya berhimpit, dengan perbedaan nilai rata-rata yang dapat diambil dari Tabel 10 antara CP 12 dan 14 adalah  $2.5376 \times 10^{-5}$ . Perbedaan ini tidak signifikan karena beda panjang CP yang digunakan tidak besar.



Gambar 87. Grafik BER vs  $E_b/N_0$  pengaruh panjang CP pada sistem modulasi 64-QAM 5G

Namun, CP normal lebih umum digunakan pada teknologi 5G karena dapat diimplementasikan pada nilai *subcarrier spacing* yang lebih bervariasi, sedangkan pada *extended CP* hanya dapat digunakan pada nilai *subcarrier spacing* sebesar 60 kHz [13]. Nilai *extended CP* digunakan jika terdapat *delay* propagasi yang lebih lebar, misalnya pada kondisi dengan *macro cell*. Sementara itu, *normal CP* digunakan pada *cell* dengan diameter yang lebih kecil, berkisar antara 1.4 km, yaitu *femtocell*.

Tabel 10. Nilai perbandingan BER terhadap  $E_b/N_0$  sistem modulasi 64-QAM pada teknologi 5G dengan perubahan nilai CP

$E_b/N_0$ (dB)	BER	
	CP=12	CP=14
0	$2.180 \times 10^{-2}$	$2.170 \times 10^{-2}$
1	$1.880 \times 10^{-2}$	$1.870 \times 10^{-2}$
2	$1.580 \times 10^{-2}$	$1.580 \times 10^{-2}$
3	$1.310 \times 10^{-2}$	$1.310 \times 10^{-2}$
4	$1.040 \times 10^{-2}$	$1.040 \times 10^{-2}$
5	$8.000 \times 10^{-3}$	$7.900 \times 10^{-3}$
6	$5.700 \times 10^{-3}$	$5.700 \times 10^{-3}$
7	$3.800 \times 10^{-3}$	$3.900 \times 10^{-3}$
8	$2.400 \times 10^{-3}$	$2.400 \times 10^{-3}$
9	$1.300 \times 10^{-3}$	$1.300 \times 10^{-3}$
10	$6.670 \times 10^{-4}$	$6.657 \times 10^{-4}$
11	$2.639 \times 10^{-4}$	$2.649 \times 10^{-4}$
12	$9.659 \times 10^{-5}$	$9.509 \times 10^{-5}$
13	$2.590 \times 10^{-5}$	$2.680 \times 10^{-5}$
14	$6.111 \times 10^{-6}$	$4.898 \times 10^{-6}$
15	$7.725 \times 10^{-7}$	$6.557 \times 10^{-7}$

## 5. Kesimpulan

Penerapan modulasi QPSK pada *downlink* LTE dengan sistem OFDM dan CP-OFDM yang melalui kanal AWGN menghasilkan kinerja sistem paling baik dengan nilai BER  $10^{-19}$  pada  $E_b/N_0$  16 dB (OFDM) dan nilai BER  $10^{-20}$  pada  $E_b/N_0$  16 dB (CP-OFDM) dibandingkan dengan modulasi 16-QAM dan 64-QAM. Penerapan modulasi QPSK pada *downlink* 5G dengan sistem CP-OFDM yang melalui kanal AWGN menghasilkan kinerja sistem paling baik dengan nilai BER  $10^{-24}$  pada  $E_b/N_0$  16 dB dibandingkan dengan modulasi 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM. Sistem modulasi QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM yang diterapkan pada *downlink* 5G yang melalui kanal AWGN memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan penerapan pada *downlink* LTE. Nilai BER yang diperoleh pada

downlink 5G berturut-turut untuk penerapan modulasi QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM adalah  $10^{-24}$  pada  $E_b/N_0$  16 dB,  $10^{-23}$  pada  $E_b/N_0$  16 dB, dan  $10^{-14}$  pada  $E_b/N_0$  16 dB. Panjang CP tidak secara signifikan berpengaruh pada nilai BER, akan tetapi *normal* CP memiliki fleksibilitas pemilihan *subcarrier spacing* yang lebih luas dibandingkan *extended* CP.

## Daftar Pustaka

- [1] Anna A. Aprian, S. Mariyanto, and B. Kanata, "Analisis kinerja sistem OFDM pada kanal AWGN dan Rayleigh dengan modulasi M-QAM dan M-PSK berbasis Simulink performance analysis of the OFDM system in AWGN and Rayleigh channels with M-," *Dielektrika*, vol. 6, no. 1, p. 9487, 2020.
- [2] A. A. D'Amico, M. Morelli, and M. Moretti, "A novel scheme for CP-length detection and initial synchronization for the LTE downlink," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 18, no. 10, pp. 4668–4678, 2019, doi: 10.1109/TWC.2019.2926712.
- [3] S. Nagul, "A review on 5G modulation schemes and their comparisons for future wireless communications," *2018 Conf. Signal Process. Commun. Eng. Syst. SPACES 2018*, vol. 2018-Janua, pp. 72–76, 2018, doi: 10.1109/SPACES.2018.8316319.
- [4] A. Ananta, I. Santoso, and A. A. Zahra, "Simulasi perbandingan kinerja modulasi M-PSK dan M-QAM terhadap laju kesalahan data pada sistem orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)," *J. Tek. Elektron. dan Telekomun.*, vol. 2, no. June, p. 9, 2015.
- [5] K. Anwar, E. Christy, and R. P. Astuti, "Indonesia 5G channel model under foliage effect [Model kanal 5G Indonesia dengan pengaruh dedaunan]," *Bul. Pos dan Telekomun.*, vol. 17, no. 2, p. 75, 2019, doi: 10.17933/bpostel.2019.170201.
- [6] R. Hidayat, "Laju kesalahan bit sistem transmisi OFDM-BPSK akibat variasi cyclic prefix pada guard interval," *Proc. Modern Electrical Engineering Technology and Its Application Seminar (MEETAS) 2016*, pp. 65–68, 2018, doi: 10.31227/osf.io/ay73d.
- [7] A. Wijaya, "Kelebihan, kekurangan, peluang teknologi 5G di Indonesia," *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 1, no. 1, pp. 43-49, 2022, doi: 10.13140/RG.2.2.19061.81127.
- [8] T. M. Filantika, Y. S. Rohmah, and D. A. Nurmantris, "Perancangan simulator blok komunikasi digital design of the digital communication system block simulator using OFDM based on," *eProceedings of Applied Science*, 6(1), vol. 6, no. 1, pp. 617–628, 2019.
- [9] R. Hidayat, "Ortogonalitas dan simulasi performa sistem OFDM," *Jurnal Tekno Efisiensi KOPERTIS Wilayah IV*, vol. 1, no. 1, pp. 30–37, 2016.
- [10] 3GPP TS 38.211, "NR; Physical channels and modulation," in *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.*, 2020, pp. 71–77.
- [11] F. Amillia, Mulyono, and Jumarwan, "Analisis kinerja jenis modulasi pada sistem SC-FDMA," *Jurnal Sains, Teknologi dan Industri*, vol. 14, no. 1, pp. 52–56, 2016.
- [12] J. D. Brown, S. Pasupathy, and K. N. Plataniotis, "Adaptive demodulation using rateless erasure codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 54, no. 9, pp. 1574–1585, 2006, doi: 10.1109/TCOMM.2006.881236.
- [13] ETSI 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "5G; NR; Physical channels and modulation (3GPP TS 38.211 version 15.3.0 Release 15)", ETSI, Sophia Antipolis Cedex - France, 2018. Accessed: February 2<sup>nd</sup> 2023. [Online]. Available: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138200\\_138299/138211/15.03.00\\_60/ts\\_138211v150300p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/15.03.00_60/ts_138211v150300p.pdf)

This Page Intentionally Left Blank