

Analisis Kinerja Modulasi M-ary QAM Pada Sistem OFDM

Aristyo Sudhartanto, Bheta Agus Wardijono

Universitas Gunadarma, Jalan Margonda Raya 100, Depok
Aristyo.sudhartanto@gmail.com, bheta@staff.gunadarma.ac.id

Abstrak

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) merupakan suatu teknik transmisi dengan pembawa jamak (multicarrier) dengan sinyal dalam ranah frekuensi yang saling tegak lurus (orthogonal). Setiap sub pembawa (sub carrier) dimodulasi dengan teknik modulasi digital yang beragam. Dalam artikel ini, dirancang program simulasi sistem OFDM menggunakan Matlab. Tujuan dari simulasi adalah untuk menganalisis hubungan antara skema modulasi M-ary QAM yang meliputi 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM terhadap kinerja sistem OFDM yang diukur dari Bit Error Rate (BER) dan model gangguan pada kanal transmisi adalah Additive White Noise Gaussian (AWGN). Hasil simulasi menunjukkan pada level Signal to Noise Ratio (SNR) yang sama, modulasi 4-QAM memberikan sinyal dengan tingkat kesalahan bit terkecil.

Kata Kunci: OFDM, M-ary QAM, BER, SNR

1. Pendahuluan

Peningkatan pada permintaan pelayanan komunikasi wireless jalur lebar (broadband) seperti video conferences, akses internet, dan aplikasi digital multimedia membutuhkan suatu metode baru dalam mentransmisikan data untuk memperoleh laju data yang tinggi dan kapasitas user yang besar di dalam jaringan wireless. Beberapa teknik yang digunakan dalam mentransmisikan data dalam jaringan wireless adalah *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS), *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS), dan *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM).

FHSS adalah teknik transmisi yang membagi alokasi spektrum frekuensi menjadi beberapa bagian dengan bandwidth yang sama, kemudian data dikirimkan dengan berpindah-pindah dari frekuensi satu ke frekuensi lainnya. DSSS adalah teknik transmisi yang mengimkan data secara langsung pada frekuensi tertentu tanpa berpindah-pindah [10]. Teknik DSSS ini digunakan pada jaringan telepon selular CDMA dan GPS. Namun kedua teknik transmisi tersebut mempunyai kendala dalam hal layanan laju data yang masih tergolong rendah.

OFDM muncul sebagai solusi untuk memberikan layanan laju data berkecepatan tinggi (High Data-rate Services) didalam jaringan komunikasi wireless, selain itu teknik OFDM diproyeksikan akan menjadi platform untuk lapisan fisik pada infrastruktur jaringan generasi ke-4 (4G)[1]

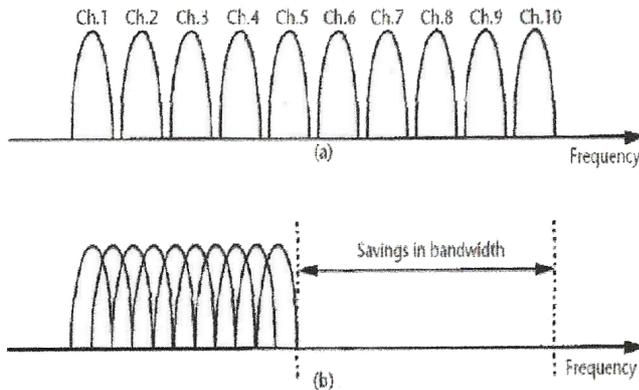
OFDM adalah suatu teknologi modulasi digital dengan pembawa-jamak (multicarrier) dimana dapat membawa sejumlah data berkapasitas besar dengan sinyal antar *subcarrier* yang saling orthogonal sehingga memungkinkan pengiriman data dengan kecepatan tinggi. OFDM memberikan efisiensi bandwidth dengan menempatkan tiap *subcarrier* dengan frekuensi yang berdekatan sehingga memungkinkan terjadinya saling-cakup (*overlap*) pada ranah frekuensi tanpa menimbulkan interferensi satu sama lain.

Berdasarkan pada referensi di atas, dalam penelitian ini dirancang suatu program simulasi dengan tujuan menganalisis kinerja sistem OFDM dari sudut pandang modulasi digital yang lain, dalam ini M-ary QAM. Parameter yang diukur adalah BER pada sisi penerima dan kemudian model kanal transmisi yang digunakan

adalah AWGN. Dalam paper ini, pertimbangan mengenai pemilihan modulasi M-ary QAM sebagai dasar analisis pada sistem OFDM adalah karena modulasi M-ary QAM digunakan oleh standar IEEE 802.11a dan IEEE 802.11g yang mengatur *Wireless Local Area Networks* (WLAN) sebagai modulasi level tinggi pada sistem OFDM yang mendukung bit rates mencapai 54 Mbits/s (64-QAM) [5].

2. Prinsip OFDM

OFDM merupakan salah satu bentuk khusus modulasi *multicarrier*. Sinyal-sinyal *subcarrier* pada OFDM merupakan sinyal sinusoidal yang saling tegaklurus (*orthogonal*), sehingga memungkinkan terjadinya saling-cakup (*overlap*) pada ranah frekuensi tanpa menimbulkan interferensi satu sama lain. Hal ini menghilangkan proses penyamaan (*equalization*) dan pemakaian tapis lolos bidang pada bagian penerima yang menggunakan sistem FDMA atau FDM. Frekuensi-frekuensi *subcarrier* seperti ini menghemat pemakaian *bandwidth* hampir 50% [9]. Gambar 1 mengilustrasikan perbedaan antara spektrum frekuensi FDM dan spektrum frekuensi OFDM.



Gambar 1. Konsep Sinyal OFDM : (a) Spektrum Frekuensi FDM, dan (b) Spektrum Frekuensi OFDM

Orthogonal merupakan sifat matematika dari dua vektor yang saling tegaklurus. Dua vektor tersebut memiliki nilai kosinus sudut antar mereka nol. Pada sistem komunikasi, sinyal-sinyal dikatakan *orthogonal* jika mereka berdiri sendiri tanpa saling mengganggu satu sama lain. Sifat ortogonal dari vektor sinyal ini memungkinkan beberapa sinyal informasi dikirimkan pada kanal yang sama tanpa mengalami interferensi. OFDM merupakan bentuk khusus dari FDM, yang menempatkan sinyal-sinyal *subcarrier* sedekat mungkin, sehingga dapat menghemat pemakaian *bandwidth*, namun tetap mempertahankan sifat ortogonal antar sinyal. Dua set sinyal dikatakan *orthogonal*, jika integral perkalian keduanya dalam satu interval sama dengan nol.

$$\int_{\tau}^{\tau+T_s} \psi_k(t) * \psi_j(t) dt = 0, \text{ jika } k \neq j \quad (1)$$

$$= C, \text{ jika } k = j$$

Setiap sinyal *subcarrier* adalah sinyal sinusoidal dengan frekuensi *baseband* yang merupakan kelipatan bulat dari frekuensi dasarnya. Frekuensi dasar *subcarrier* pada OFDM merupakan kebalikan periode satu simbol, $f_0 = 1/T_s$, dengan T_s adalah periode simbol. Maka untuk setiap simbolnya, sinyal *subcarrier* memiliki jumlah siklus yang merupakan kelipatan bulat sinyal dasar. Pada interval yang sama, setiap sinyal memiliki jumlah siklus dengan kelipatan yang bulat. Sinyal-sinyal tersebut *orthogonal*, karena hasil integral perkalian antara dua sinyal periodik itu akan selalu nol. Jika sinyal *subcarrier* diandaikan $s_k(t)$, maka persamaannya diberikan pada persamaan (2).

$$S_k(t) = \sin(2\pi k f_0 t), \quad 0 < t < T_s \text{ dan } k = 0, \dots, M \quad (2)$$

$$= 0, \quad t \text{ yang lain}$$

dengan : T_s = periode simbol

$$f_0 = \text{jarak antar subcarrier} = 1/T_s$$

$$M = \text{jumlah subcarrier}$$

Jika m dan n adalah k, maka

$$\int_0^T \sin(2\pi m f_0 t) * \sin(2\pi n f_0 t) dt = 0 \quad (3)$$

Untuk $m \neq n$

Hal ini menunjukkan bahwa sinyal-sinyal *subcarrier* tersebut memiliki sifat *orthogonal*.

Sebuah sinyal OFDM adalah penjumlahan dari setiap *subcarrier* yang secara individual dimodulasi dengan menggunakan skema modulasi digital (M-ary ASK, M-ary PSK, dan M-ary FSK). Sinyal OFDM dibangkitkan dan diproses secara digital. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi kerumitan menyediakan sejumlah besar osilator dalam ranah waktu kontinyu. Proses modulasi dan demodulasi dilakukan dengan teknik pengolahan digital, yaitu *Fast Fourier Transform* (FFT). *Subcarrier* pada FFT memiliki frekuensi harmonis kelipatan bulat frekuensi dasarnya.

3. Modulasi M-ary

Didalam skema modulasi M-ary, sinyal yang dikirimkan merupakan M macam sinyal yang terdiri dari $s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)$, dengan periode selama T detik. Jika terdapat n bit dalam tiap simbol, maka ada sejumlah $M = 2^n$ kemungkinan simbol yang berbeda. Dengan durasi simbol $T = nT_b$, dimana T_b adalah durasi bit. Sinyal ini kemudian termodulasi amplitudo, frekuensi, dan fasa membentuk modulasi digital yang secara berurutan disebut M-ary ASK, M-ary FSK, dan M-ary PSK.

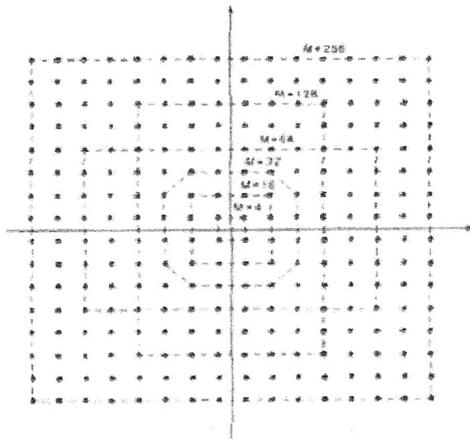
Salah satu keunggulan yang dimiliki oleh teknik modulasi M-ary adalah efisiensi bandwidth. Dari penjabaran diatas, jika

terdapat sejumlah $M = 2^n$ symbol maka durasi symbol menjadi $T = nT_b$, sehingga bandwidth yang diperlukan menjadi $1/nT_b$ [2].

A. M-ary QAM

Modulasi M-ary QAM merupakan teknik modulasi hybrid yang menggabungkan modulasi ASK dan modulasi PSK. Pembawa (carrier) dari sinyal QAM akan berubah baik amplitudo maupun fasa terhadap sinyal modulasi (digital).

Diagram konstelasi untuk M-ary QAM dengan pola kotak (square lattice), ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Diagram Konstelasi M-ary QAM

Bentuk umum dari sinyal M-ary QAM dapat didefinisikan sebagai berikut

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_{min}}{T_s}} a_i \cos(2\pi f_0 t) + \sqrt{\frac{2E_{min}}{T_s}} b_i \sin(2\pi f_0 t) \quad (4)$$

Untuk $0 \leq t \leq T_s$ $i = 1, 2, \dots, M$

Dimana E_{min} adalah energy dari sinyal dengan amplitudo terendah, a_i dan b_i merupakan pasangan koordinat titik pada diagram konstelasi, f_0 adalah frekuensi carrier, T_s adalah periode symbol.

Jika diasumsikan bentuk pulsa adalah persegi, maka sinyal $S_i(t)$ dapat dibentuk dalam pasangan fungsi basis yang didefinisikan sebagai berikut

$$\varphi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_0 t) \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (5)$$

$$\varphi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin(2\pi f_0 t) \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (6)$$

Koordinat titik ke- i pada diagram konstelasi adalah $a_i \sqrt{E_{min}}$ dan $b_i \sqrt{E_{min}}$ dimana (a_i, b_i) adalah elemen dari matrix $L \times L$ sebagai berikut

$$[a_i, b_i] \begin{bmatrix} (-L+1, L-1) & (-L+3, L-1) & \dots & (L-1, L-1) \\ (-L+1, L-3) & (-L+3, L-3) & \dots & (L-1, L-3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (-L+1, -L+1) & (-L+3, -L+1) & \dots & (L-1, -L+1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

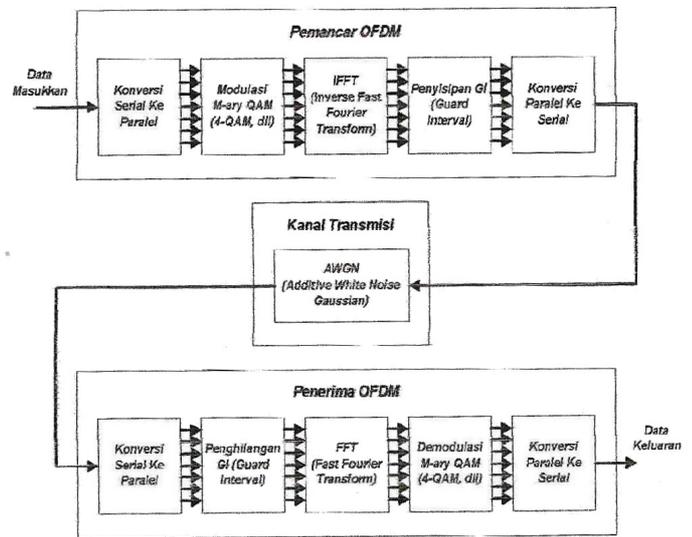
Dimana $L = \sqrt{M}$

4. Simulasi Model Sistem OFDM

Dalam paper ini, model sistem OFDM dirancang menggunakan program simulasi Matlab R2007a. Beberapa fungsi program Matlab diambil dari [6] dan dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan dari simulasi sistem OFDM ini.

A. Model Sistem OFDM

Blok sistem OFDM ditampilkan pada gambar 3. Blok sistem terdiri dari 3 bagian utama, yaitu : pemancar (transmitter), kanal transmisi (channel), dan penerima (receiver).



Gambar 3. Model Sistem OFDM

Berikut ini penjelasan singkat mengenai fungsi dari setiap blok.

1) Data Masukan

Data masukan terdiri 3 jenis file, yaitu : file teks (*.txt), file gambar (*.bmp), dan file suara (*.wav). Data ini dikonversikan ke dalam data biner 1 dan 0 yang berupa vector baris tunggal.

2) Konversi Serial ke Paralel

Data masukan yang berupa serial data stream dirubah ke dalam symbol yang dibutuhkan untuk transmisi, sebagai contoh 2 bit per symbol untuk 4-QAM, sebelum akhirnya

masuk ke dalam blok serial ke parallel. Blok serial ke parallel berfungsi untuk mengubah aliran data yang terdiri dari satu baris menjadi beberapa baris dan beberapa kolom. Hasil dari konversi serial ke parallel berupa matriks bit-bit dengan jumlah baris menyatakan jumlah subcarrier yang digunakan dan jumlah kolom menyatakan jumlah dari simbol OFDM yang ditransmisikan.

3) *Modulasi M-ary QAM*

Pada blok ini, data - data biner pada setiap subcarrier dimodulasikan sesuai jenis modulasi yang digunakan. Untuk simulasi ini jenis modulasi yang digunakan adalah 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM.

4) *Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)*

Blok IFFT pada sistem OFDM bertujuan untuk membangkitkan frekuensi subcarrier yang saling orthogonal dan mengubah sinyal dari domain frekuensi ke domain waktu. Jumlah titik pada IFFT minimal harus dua kali lebih besar dari jumlah carrier yang digunakan.

5) *Penyisipan Guard Interval (GI)*

Pada simulasi ini Guard Interval yang digunakan bertipe Cyclic Prefix. Panjang cyclic prefix yang digunakan adalah hasil penjumlahan dari banyaknya titik pada IFFT dan guardtime pada simulasi yang kemudian ditempatkan di depan simbol. Tujuan dari penyisipan guard interval adalah mencegah Inter Symbol Interference (ISI) sehingga simulasi dapat berjalan dengan baik.

6) *Konversi Paralel ke Serial*

Sebelum sinyal ditransmisikan melalui kanal radio, simbol OFDM dalam bentuk parallel data stream dikonversikan ke dalam bentuk serial data stream baseband OFDM.

7) *Kanal Transmisi*

Pemodelan kanal yang digunakan dalam simulasi ini adalah model kanal Additive White Noise Gaussian (AWGN).

8) *Penerima OFDM*

Blok penerima OFDM melakukan operasi kebalikan dari blok pemancar OFDM. Sinyal yang diterima dalam bentuk serial data stream kemudian dikonversikan ke dalam bentuk parallel data stream. Guard interval dihilangkan sehingga diperoleh simbol asli dan operasi FFT bertujuan untuk mengembalikan simbol OFDM ke dalam bentuk spektrum frekuensi. Demodulasi M-ary QAM bertujuan untuk memperoleh kembali data-data biner. Hasil dari data yang diterima ini kemudian direkonstruksikan dan dibandingkan dengan data yang dikirimkan untuk mengukur kinerja sistem OFDM secara keseluruhan.

B. *Parameter Sistem OFDM*

Beberapa parameter yang digunakan dalam simulasi ini ditunjukkan pada tabel 1.

Keempat skema modulasi yang meliputi 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM akan diuji dan kemudian dibandingkan kinerja dari keempat modulasi tersebut. Dari hasil simulasi, dapat dipilih tipe modulasi yang cocok sesuai dengan kondisi kanal transmisi.

Tabel 1. Parameter Sistem OFDM

No	Parameter	Keterangan
1	Jenis data masukan	teks, gambar, dan suara
2	Modulasi Carrier yang digunakan	4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM
3	Jumlah titik IFFT/FFT	128
4	Jumlah carrier yang digunakan	32
5	Tipe Guard Period	cyclic prefix
6	Jumlah guardtime	32, 25 % dari jumlah titik FFT

5. Hasil Simulasi dan Pembahasan

Simulasi model sistem OFDM menggunakan program Matlab R2007. Sistem OFDM diuji dengan menggunakan teknik modulasi M-ary QAM yang meliputi 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM, kemudian hasil simulasi dari keempat modulasi ini akan dibandingkan kinerjanya. Beberapa tipe data masukan yang akan diuji adalah data teks (*.txt), data gambar (*.bmp), dan data suara (*.wav).

Parameter yang digunakan untuk mengukur kinerja model sistem OFDM dalam simulasi ini adalah *Bit Error Rate (BER)*. BER adalah perbandingan antara jumlah bit yang salah pada penerima dan jumlah bit yang dikirimkan pada pemancar.

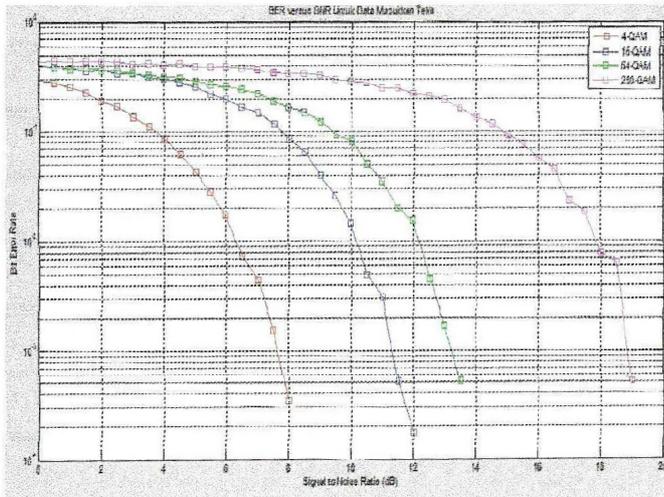
$$BER = \frac{\text{Jumlah bit error}}{\text{Jumlah bit yang dikirimkan}} \quad (8)$$

A. *Hasil Simulasi untuk Masukan Data Teks*

Tipe data masukan teks yang digunakan dalam simulasi adalah ber-extension txt dan berukuran 738 bytes. Gambar 4 menunjukkan grafik perbandingan modulasi 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM, nilai variasi SNR dari 0 dB sampai 20 dB dengan tingkat kenaikan setiap 0.5 dB.

Untuk merekonstruksi data tanpa kesalahan pada penerima, maka SNR minimum yang dibutuhkan adalah 8.5 dB untuk 4-QAM, 12.5 dB untuk 16-QAM, 14 dB untuk 64-QAM, dan 19.5 dB untuk 256-QAM. Terlihat bahwa kinerja

terbaik yang diukur dari BER dimiliki oleh modulasi 4-QAM, lalu secara berurutan diikuti oleh modulasi 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM.

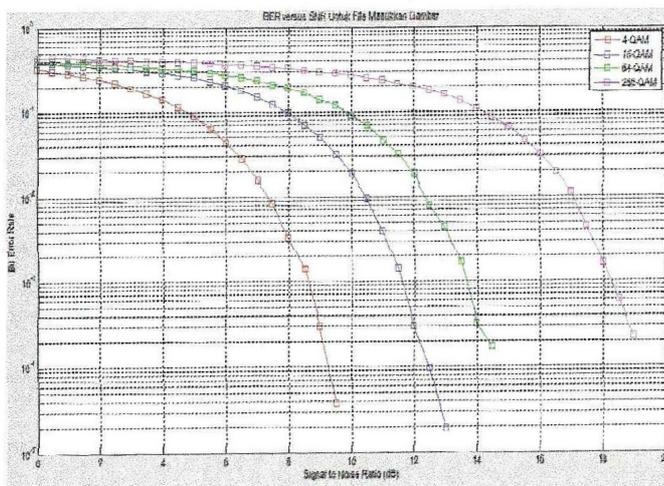


Gambar 4. Grafik BER vs SNR untuk Masukan Data Teks

B. Hasil Simulasi untuk Masukan Data Gambar

Tipe data masukan gambar yang digunakan dalam simulasi adalah gambar grayscale ber-extension bmp dan berukuran 100 x 64 pixels. Gambar 5 menunjukkan grafik perbandingan modulasi 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM, nilai variasi SNR dari 0 dB sampai 20 dB dengan tingkat kenaikan setiap 0.5 dB.

Untuk merekonstruksi data tanpa kesalahan pada penerima, maka SNR minimum yang dibutuhkan adalah 10 dB untuk 4-QAM, 13.5 dB untuk 16-QAM, 15 dB untuk 64-QAM, dan 19.5 dB untuk 256-QAM. Terlihat bahwa kinerja terbaik yang diukur dari BER dimiliki oleh modulasi 4-QAM, lalu secara berurutan diikuti oleh modulasi 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM.

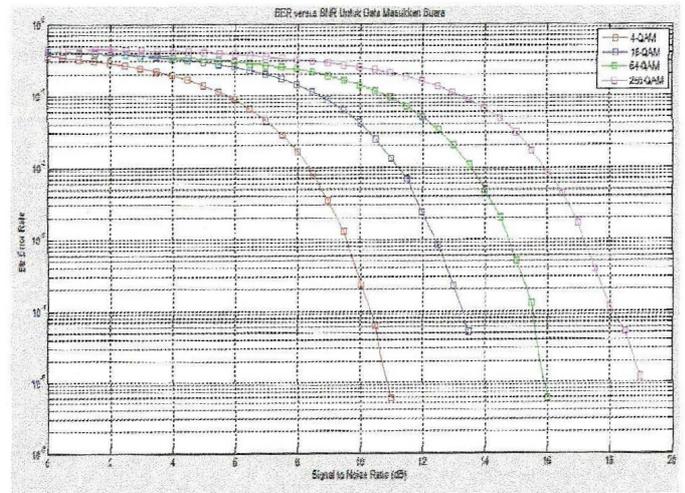


Gambar 5. Grafik BER vs SNR untuk Masukan Data Gambar

C. Hasil Simulasi untuk Masukan Data Suara

Simulasi dengan masukan data suara menggunakan sampel suara berdurasi 2 detik. Data ini ber-extension wav dan berukuran 21.2 KB. Gambar 6 menunjukkan grafik perbandingan modulasi 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM, nilai variasi SNR dari 0 dB sampai 20 dB dengan tingkat kenaikan setiap 0.5 dB.

Untuk merekonstruksi data tanpa kesalahan pada penerima, maka SNR minimum yang dibutuhkan adalah 11.5 dB untuk 4-QAM, 14 dB untuk 16-QAM, 16.5 dB untuk 64-QAM, dan 19.5 dB untuk 256-QAM. Terlihat bahwa kinerja terbaik yang diukur dari BER dimiliki oleh modulasi 4-QAM, lalu secara berurutan diikuti oleh modulasi 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM.



Gambar 6. Grafik BER vs SNR untuk Masukan Data Suara

6. Kesimpulan

Model sistem OFDM dirancang dan disimulasikan berdasarkan skema modulasi M-ary QAM yang meliputi 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM. Parameter yang diukur untuk memperlihatkan kinerja dari skema modulasi M-ary QAM adalah Bit Error Rate (BER).

Hasil simulasi dari ketiga data masukan menunjukkan bahwa modulasi 4-QAM memberikan kinerja terbaik dengan BER yang terkecil, diikuti secara berurutan oleh modulasi 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM. Semakin tinggi level modulasi M-ary QAM, maka berpengaruh pada peningkatan BER pada kinerja sistem OFDM

Dari segi kapasitas data, modulasi 256-QAM memiliki kapasitas data yang paling banyak dibandingkan 4-QAM, 16-QAM, dan 64-QAM. Modulasi level tinggi seperti 256-QAM mendukung transmisi data berkecepatan tinggi, karena untuk bandwidth yang tetap semakin tinggi level modulasi M-ary QAM, maka kecepatan transmisi data akan semakin tinggi.

Hasil simulasi menunjukkan karakteristik yang serupa untuk ketiga data masukan yang berbeda. Modulasi level rendah seperti 4-QAM sesuai dengan kondisi kanal transmisi yang memiliki derau tinggi (kurang dari 10 dB), namun dengan *data rates* yang rendah. Pada kondisi kanal transmisi yang memiliki derau yang rendah (lebih dari 10 dB), sistem OFDM dapat menggunakan modulasi level tinggi seperti 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM agar mendukung *data rates* yang lebih tinggi.

Dalam prakteknya, sistem OFDM menggunakan modulasi adaptif yang bisa merubah modulasi digital dari 4-QAM sampai 256-QAM secara dinamis sesuai dengan kondisi kanal transmisi. Pada saat kondisi kanal transmisi dengan derau tinggi, sistem OFDM menggunakan modulasi 4-QAM untuk menjaga konektivitas. Sedangkan, pada kondisi kanal transmisi yang baik (derau rendah) dapat menggunakan modulasi 256-QAM untuk mencapai *data rates* yang tinggi.

Beberapa keunggulan yang dimiliki OFDM seperti mendukung transmisi data berkecepatan tinggi, efisien dalam pemakaian spektrum frekuensi, dan kuat menghadapi *frequency selective fading* menjadikan teknik OFDM sebagai platform untuk lapisan fisik (*PHY layer*) pada infrastruktur jaringan generasi ke-4 (4G) [1].

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Hara dan R. Prasad, *Multicarrier Techniques for 4G Mobile Communications*, Boston: Artech House, 2003.
- [2] S. Haykin, *Digital Communications*, John Wiley and Sons, 1988.
- [3] Pranita N. Palsapure, "OFDM Systems for Different Modulation Technique," in *Proc. INDIACom*, Februari 2008.
- [4] O. Grigoriadis dan H. S. Kamath, "BER Calculation Using Matlab Simulation for OFDM Transmission," in *Proc. JMECS*, Maret 2008.
- [5] Anibal L. Intini. "Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Networks," *University of California*, Desember 2000.
- [6] Alan C. Brooks dan Stephen J. Hoelzer, "Design and Simulation of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Signalling," in *Final Report*, Mei 2001.
- [7] Kamil M. Shaikh, "The Performance Evaluation of OFDM Based WLAN (IEEE 802.11a and 802.11g)," in *Thesis*, Blekinge Institute of Technology, Desember 2009.
- [8] Ajub A. Zahra, I. Santoso, dan Wike S. Fadhila, "Pengaruh Modulasi M-PSK Pada Unjuk Kerja Sistem Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)," *Jurnal Teknik Elektro*, Universitas Diponegoro, Jilid 10, Nomor 2, hlm 70-76, Juni 2008.
- [9] Ajub A. Zahra, "Pengaruh Cacah Bin IFFT Terhadap Unjuk Kerja Sistem OFDM," *Transmisi*, Universitas Diponegoro, Jilid 8, Nomor 2, hlm 24-27, Desember 2004.
- [10] PT UFOAKSES SUKSES LUARBIASA, "Wireless 802.11a/b/g," in *Divisi Training*, Jakarta.