

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-QAM And M-PSK Modulation Based On Simulink

Anna Afif Aprian¹, Sudi Mariyanto Al Sasongko², Bulkis Kanata³

¹ Jurusan Teknik elektro Fakultas Teknik Universitas Mataram Nusa Tenggara Barat, Indonesia

Email : afifaprian@gmail.com¹; mariyantosas@unram.ac.id²; uqinata@yahoo.co.id³

ABSTRAK

OFDM adalah teknik transmisi yang menggunakan frekuensi subcarrier yang saling orthogonal. Subcarrier saling overlap tanpa terjadi interferensi. Penelitian ini bertujuan membuat rangkaian sistem OFDM pada kanal AWGN dan Rayleigh dengan modulasi 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, QPSK, 16-PSK dan 64-PSK menggunakan Simulink. Kinerja sistem ini dianalisis dengan membandingkan energi dan konvergensi titik konstelasi sinyal terima dan Bit Error Rate yang dihasilkan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem modulasi M-QAM mempunyai energi lebih tinggi dan titik konstelasi yang lebih konvergen dibandingkan dengan sistem modulasi M-PSK. Sehingga, sistem dengan modulasi M-QAM memiliki kinerja yang lebih baik daripada M-PSK. Berdasarkan analisis BER, sistem dengan modulasi 4-QAM dan 16-QAM mempunyai kinerja paling baik.

Kata kunci: OFDM, AWGN, Rayleigh, QAM, PSK, Simulink.

ABSTRACT

OFDM is a transmission technique that uses mutually orthogonal subcarrier frequency. Subcarriers overlap without interference. This research using Simulink to make a circuit of the OFDM system in AWGN and Rayleigh Channels with 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, QPSK, 16-PSK and 64-PSK modulation. Performance analysis of this system by comparing the energy and convergence of receiving signal constellation points and the results of the Bit Error Rate. The simulation results show that the M-QAM modulation system has higher energy and more convergent constellation points compared to the M-PSK modulation system. So that the system with M-QAM modulation has a better performance than M-PSK. Based on the BER analysis, the system with 4-QAM modulation and 16-QAM has the best performance.

Keywords: OFDM, AWGN, Rayleigh, QAM, PSK, Simulink.

PENDAHULUAN

Saluran komunikasi merupakan salah satu kebutuhan yang penting khususnya dalam hal spektrum frekuensi. Spektrum frekuensi yang lebar memungkinkan pengguna saluran komunikasi memperoleh informasi dengan cepat. Semakin besar kebutuhan akan saluran komunikasi maka lebar pita frekuensi yang dibutuhkan juga semakin besar. Hal ini merupakan suatu permasalahan karena rentang frekuensi yang terbatas.

Pemanfaatan rentang frekuensi dapat dilakukan dengan teknik *Multiple Access*. Teknik ini dapat membagi saluran komunikasi dengan lebar tertentu kepada banyak pengguna (*Multi User*). Salah satu teknik *Multiple Access* yang umum digunakan adalah *Frequency Division Multiple Acces* (FDMA).

Teknik ini membagi rentang frekuensi tertentu menjadi beberapa rentang frekuensi yang lebih kecil sesuai dengan jumlah penggunaannya. Teknik FDMA ini pun memiliki kendala karena tidak optimal dalam penggunaan rentang frekuensi yang tersedia.

OFDM adalah bentuk khusus dari FDMA. OFDM dapat menggunakan rentang frekuensi yang tersedia secara optimal. Teknik ini memungkinkan penggunaan lebar pita secara keseluruhan. Teknik ini memiliki keunggulan yaitu sifat orthogonal pada sub-band. Sifat orthogonal memungkinkan masing-masing sub-band saling berpotongan tanpa mengalami interferensi antara satu dengan yang lain.

Penelitian ini diperuntukkan sebagai alternatif peraga praktikum di Laboratorium Sistem Telekomunikasi Fakultas Teknik

Universitas Mataram. Laboratorium ini merupakan sarana bagi mahasiswa khususnya Jurusan Teknik Elektro untuk mempelajari sistem telekomunikasi termasuk tentang modulasi digital dan teknik *Multiple Access* melalui kegiatan praktikum. Terdapat kondisi beberapa peralatan yang telah rusak dan tidak lengkap menjadi kendala. Oleh karena itu, diperlukan adanya alternatif peraga modul praktikum berbasis simulasi yang menunjang pembelajaran di laboratorium. Sehingga kegiatan praktikum dapat dilakukan secara optimal.

Penelitian ini akan merancang sistem OFDM berbasis *software* simulator yakni *Simulink*. *Simulink* adalah *software* yang dapat digunakan untuk merancang dan mempelajari suatu sistem secara matematik. Ruang lingkup pembahasan terbatas pada analisa konstelasi sinyal terima dan perbandingan BER sistem.

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu:

- Menganalisis rangkaian sistem OFDM menggunakan *Simulink* untuk alternative modul praktikum modulasi digital.
- Membandingkan energi dan konvergensi titik konstelasi sinyal terima terhadap modulasi M-QAM dan M-PSK.
- Mengetahui pengaruh *Energy Bit to Noise Ratio* (E_b/N_0) terhadap *Bit Error Rate* (BER) kanal pada sistem OFDM.

OFDM. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) adalah teknik modulasi *multicarrier* yang menggunakan metode pengortogonalan *sub-carrier* pembawa data pada ranah frekuensi agar masing-masing *sub-carrier* yang bersebelahan dapat saling beririsan kecuali pada frekuensi tengahnya, sehingga secara keseluruhan (dalam satu simbol) dapat digunakan lebar pita sekecil mungkin. Dengan teknik OFDM, penggunaan spektrum daya transmisi dapat lebih efisien penggunaannya (Darlis dkk, 2010).

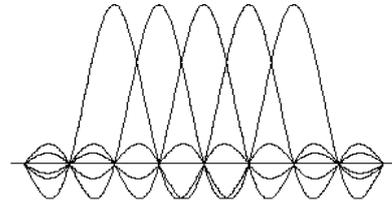
Istilah *orthogonal* mengandung makna hubungan matematis antara frekuensi-frekuensi yang digunakan. Hubungan tersebut dapat ditulis dengan persamaan:

$$\int_a^b \varphi_p(t)\varphi_q(t) dt = 0$$

di mana $p \neq q$ dengan interval $a < t < b$.

Suatu sinyal orthogonal meskipun saling *overlapping* tetapi tidak terjadi interferensi. Mengacu Gambar 1, jika ditarik suatu garis

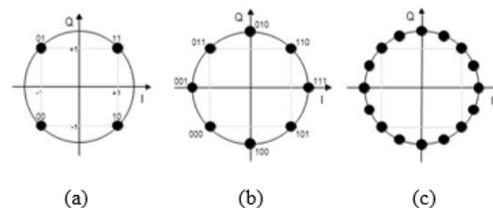
urus maka nilai puncak dari suatu *sub-carrier* akan terhubung dengan nilai minimum dari



Gambar 1. Spektrum Sinyal OFDM

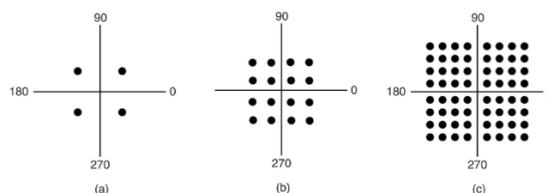
1 *sub-carrier* yang ada di sebelahnya. Dapat dijelaskan bahwa energi pada tiap-tiap *sub-carrier* tidak berkorelasi dengan energi pada *sub-carrier* yang ada di dekatnya. Dikarenakan oleh hal seperti itu, meskipun *sub-carrier* saling *overlapping* tidak akan terjadi interferensi (Abdillah dan Moegiharto, 2010).

Phase Shift Keying (PSK). PSK adalah modulasi digital yang membawa data dengan merubah fase dari sinyal referensi (sinyal *carrier*). Pada modulasi PSK, tiap bit akan membentuk simbol yang diwakili oleh fase yang berbeda satu dengan lainnya. Pada skema modulasi PSK, titik-titik konstelasi (*constellation points*) ditempatkan dengan jarak antar simbol yang seragam sepanjang lingkaran konstelasi (Ananta, 2009).



Gambar 2. *Constellation points* dari PSK (a) QPSK (b) 8-PSK (c) 16-PSK

Quadrature Amplitude Modulation (QAM). QAM adalah modulasi yang membawa data dengan merubah amplitudo dan fase dari sinyal *carrier*. Sinyal yang dimodulasi akan menghasilkan sinyal termodulasi yang merupakan kombinasi dari *Phase Shift Keying* (PSK) dan *Amplitude Shift Keying* (ASK) (Ananta, 2009).



Gambar 3. Constellation points pada (a) 4-QAM (b) 16-QAM (c) 64-QAM

FFT dan IFFT. Pada sistem OFDM, hubungan antara *sub-carrier* yang *orthogonal* dapat diimplementasikan menggunakan transformasi *fourier*. Di mana pada sisi pemancar OFDM menggunakan *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) dan pada sisi penerima menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT). Persamaan FFT dapat dituliskan dengan persamaan:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j(\frac{2\pi}{N})nk} \dots\dots\dots (1)$$

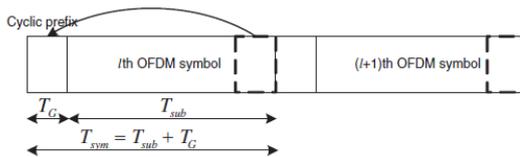
untuk $k = 0, 1, \dots, N - 1$

Sementara di sisi pengirim, IFFT ditulis dengan persamaan:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot e^{j(\frac{2\pi}{N})nk} \dots\dots\dots (2)$$

untuk $n = 0, 1, \dots, N - 1$, di mana $x(n)$ merupakan deretan data masukan ke- n , dan $X(k)$ merupakan deretan data keluaran ke- k (Darlis dkk, 2010).

Cyclic Prefix. *Cyclic prefix* adalah salinan dari bagian akhir simbol OFDM yang ditambahkan pada awal simbol untuk mencegah terjadinya *Intersymbol Interference* (ISI). Syarat agar tidak terjadi ISI yaitu durasi dari *cyclic prefix* harus lebih panjang dari durasi dari *delay multipath*.



Gambar 4. Cyclic Prefix pada OFDM (Cho et al., 2010)

Dari Gambar 4, dapat dibuat suatu persamaan panjang keseluruhan dari simbol OFDM yaitu:

$$T_{sym} = T_G + T_{sub} \dots\dots\dots (3)$$

dimana:

T_G = Panjang *Cyclic Prefix*

T_{sub} = Panjang simbol tanpa *Cyclic Prefix*

T_{sym} = Total panjang simbol OFDM

Kanal AWGN. *Kanal Additive White Gaussian Noise* (AWGN) adalah kanal di mana informasi diberi gangguan berupa penambahan linear dari *white noise* dengan kerapatan spektrum yang konstan dan

distribusi *Gaussian* dari *sample noise*. Sinyal yang ditransmisikan $S_{Tx}(t)$ terkena sebuah *noise* acak yaitu $n(t)$ (Hakim dkk, 2010). Ketika sinyal mendapat redaman selama proses pentransmisian melalui sebuah kanal, maka sinyal yang diterima pada interval $0 \leq t \leq T$, dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$S_{Rx}(t) = S_{Tx}(t) + n(t) \dots\dots\dots (4)$$

Kanal Rayleigh. Dalam sistem komunikasi bergerak, perambatan sinyal antara pemancar dan penerima melalui berbagai lintasan yang berbeda. Lintasan yang berbeda-beda tersebut mengakibatkan kuat sinyal penerimaan menjadi bervariasi. Sinyal yang diterima oleh *receiver* yang melewati suatu kanal *multipath* merupakan jumlah superposisi dari keseluruhan sinyal yang dipantulkan akibat banyak lintasan (*multipath*).

Distribusi *Rayleigh* didapat dari penjumlahan secara kuadratur antara dua *Gaussian noise*. *Probability Density Function* (PDF) distribusi *Rayleigh* adalah:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} ; 0 \leq r \leq \infty \dots\dots\dots (5)$$

dengan σ^2 adalah nilai variansi tegangan selubung sinyal deteksi yang mengalami *fading*, jika di pengirim dikirimkan sinyal berselubung konstan.

Sinyal-sinyal pada kanal *flat fading* dapat dimodelkan sebagai:

$$r(t) = s(t) \cdot ray(t) + n(t) \dots\dots\dots (6)$$

dimana:

$r(t)$ = sinyal yang diterima

$ray(t)$ = *Rayleigh Multipath Fading*

$s(t)$ = sinyal terkirim

$n(t)$ = *noise AWGN*

Sinyal-sinyal pada kanal *frequency selective fading* dapat dimodelkan sebagai superposisi antar dua lintasan sinyal:

$$r(t) = a_0 \cdot ray_0(t) \cdot s(t - \tau_0) + a_1 \cdot ray_1(t) \cdot s(t - \tau_1) + n(t) \dots\dots\dots (7)$$

dengan a_0 dan a_1 masing-masing adalah amplitudo ray_0 utama yang mewakili lintasan langsung dan amplitudo ray_1 yang mewakili satu lintasan pantul, sedangkan τ_0 dan τ_1 masing-masing adalah *delay* pada lintasan perambatan langsung dan pantul (Manglani, 2001).

Bit Error Rate (BER). BER adalah suatu rumusan kesalahan laju bit (*bit error*) yang terjadi selama pentransmisian data antara

terminal pengirim dan terminal penerima (Hapsara, 2007). Persamaan *Bit Error Rate* dapat dihitung dengan persamaan:

$$BER = \frac{\text{Jumlah bit error}}{\text{Jumlah total bit kirim}} \dots\dots\dots (8)$$

Signal to Noise Ratio (SNR). SNR adalah perbandingan antara sinyal yang dikirim terhadap *noise*. SNR digunakan untuk mengetahui besarnya pengaruh redaman sinyal terhadap sinyal yang ditransmisikan (Susanti, 2013). SNR dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$SNR = 10 \log \left(\frac{P_r}{N_o} \right) \dots\dots\dots (9)$$

dengan:

$SNR = \text{Signal to Noise Ratio (dB)}$

$P_r = \text{daya yang diterima oleh receiver}$

$N_o = \text{noise saluran transmisi}$

Energy per Bit to Noise Ratio (E_b/N_o). Perhitungan nilai BER sistem dipengaruhi oleh nilai E_b/N_o . E_b/N_o adalah suatu parameter yang berhubungan dengan SNR yang biasanya digunakan untuk menentukan laju data digital dan mutu standar kinerja sistem digital. Dari namanya, E_b/N_o dapat didefinisikan sebagai perbandingan energi sinyal per *bit* terhadap *noise* (Susanti, 2013). Nilai E_b/N_o dapat dihitung dengan persamaan:

$$\frac{E_b}{N_o} = SNR + 10 \log \left(\frac{B}{R} \right) \dots\dots\dots (10)$$

di mana:

$\frac{E_b}{N_o} = \text{Energy per Bit to Noise Ratio (dB)}$

$SNR = \text{Signal to Noise Ratio (dB)}$

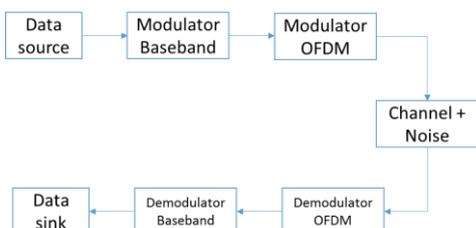
$B = \text{Bandwith (bps)}$

$R = \text{laju data total (bps)}$

METODE PENELITIAN

Sistem ini akan dibuat dengan perangkat lunak *Simulink*. Sistem yang akan dibuat ini terdiri dari *Transmitter*, *Receiver*, dan kanal. Blok diagram sistem OFDM yang akan dibuat dapat dilihat pada Gambar 5.

Parameter-parameter yang akan dibuat pada sistem OFDM ini dapat dilihat pada Tabel 1.

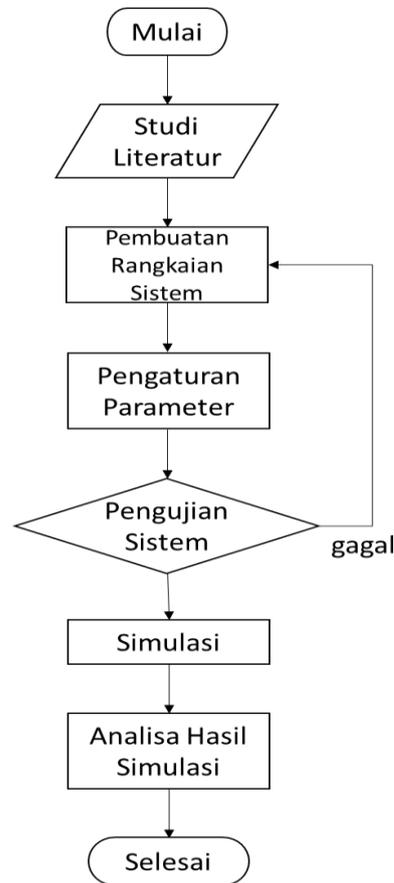


Gambar 5. Blok diagram sistem OFDM

Tabel 1 Parameter rancangan sistem OFDM

Frame size	192
Sample time	$0,04 \times 10^{-6}$ s
Pilot Symbol	8
IFFT size	256
Teknik Modulasi	QPSK, 16-PSK, 64-PSK, 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM
Kanal	AWGN dan <i>Rayleigh</i>
Bandwidth Kanal	20 MHz
Transmisi Data	10^6 bit
Variasi E_b/N_o	0 dB s/d 150 dB

Langkah penelitian dapat dilihat dalam *flowchart* pada Gambar 6.



Gambar 6. *Flowchart* penelitian

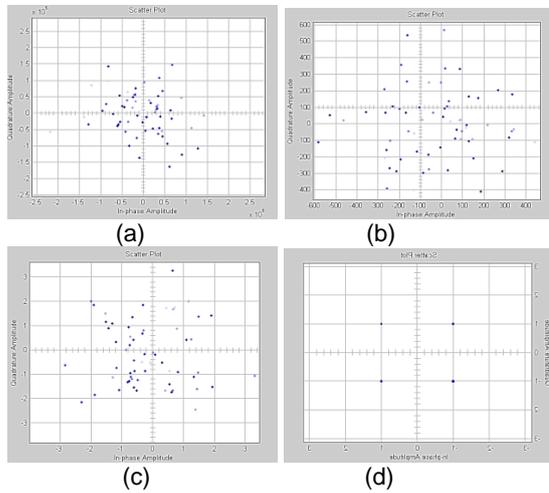
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada nilai $M = 4$, nilai integer memiliki rentang antara 0 sampai 3. Sehingga membutuhkan 2 bit untuk masing-masing bilangan integer yang dibangkitkan. Untuk $M = 16$, nilai integer memiliki rentang antara 0 sampai 15. Sehingga membutuhkan 4 bit

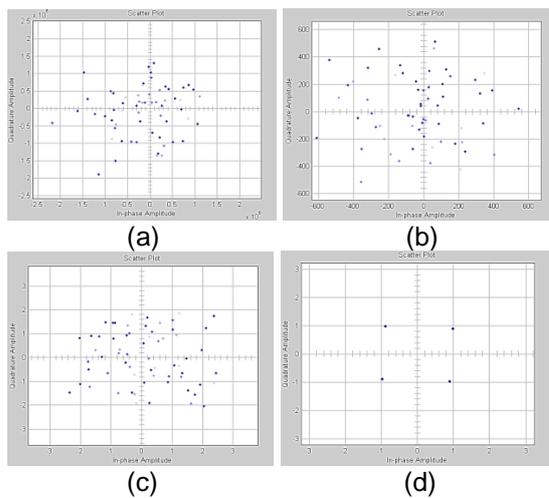
untuk masing-masing bilangan integer yang dibangkitkan. Dan untuk nilai $M = 64$, nilai integer memiliki rentang antara 0 sampai 63. Sehingga membutuhkan 6 bit untuk masing-masing bilangan integer yang dibangkitkan. Dengan demikian, *bit rate* yang dihasilkan oleh setiap *M*-ary number pada *sample time* $0,04 \times 10^{-6}$ s yaitu:

- $Bit\ rate_{M=4} = 2 \times 25 \times 10^6 = 50\ Mbps$
- $Bit\ rate_{M=16} = 4 \times 25 \times 10^6 = 100\ Mbps$
- $Bit\ rate_{M=64} = 6 \times 25 \times 10^6 = 150\ Mbps$

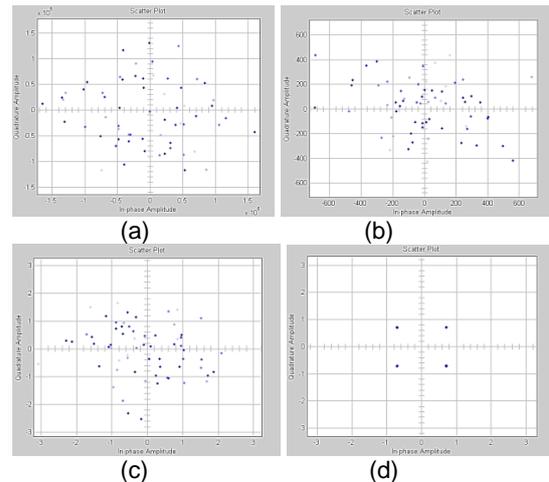
Titik Konstelasi (Constellation Points). Titik konstelasi sinyal pada sistem OFDM ini dapat dilihat pada Gambar 7 sampai Gambar 18.



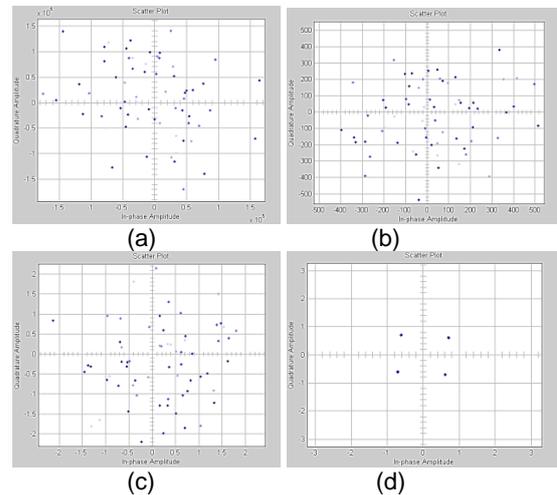
Gambar 7. Titik konstelasi Modulasi 4-QAM pada sisi penerima kanal AWGN dengan $E_b/N_0 =$ (a) 0 dB, (b) 50 dB, (c) 100 dB, (d) 115 dB



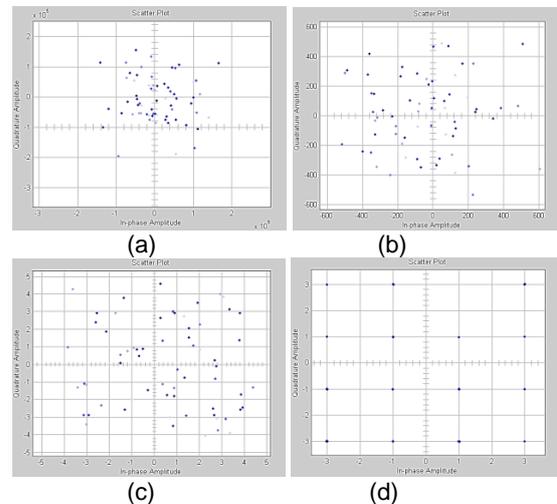
Gambar 8. Titik konstelasi Modulasi 4-QAM pada sisi penerima kanal *Rayleigh Fading* dengan $E_b/N_0 =$ (a) 0 dB, (b) 50 dB, (c) 100 dB, (d) 120 dB



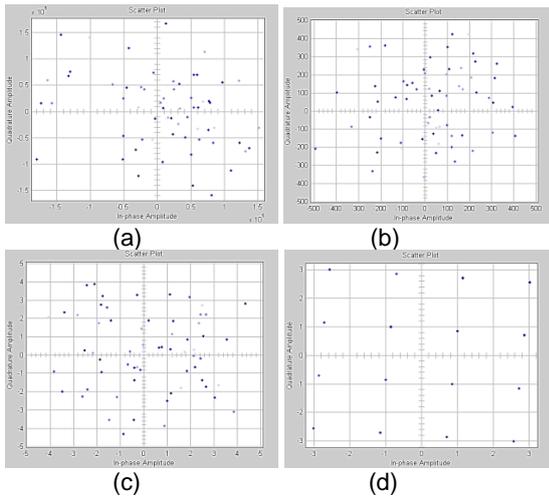
Gambar 9. Titik konstelasi Modulasi QPSK pada sisi penerima kanal AWGN dengan $E_b/N_0 =$ (a) 0 dB, (b) 50 dB, (c) 100 dB, (d) 115 dB



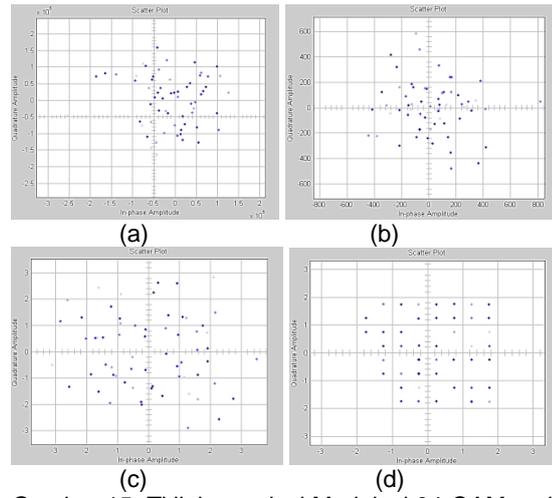
Gambar 10. Titik konstelasi Modulasi QPSK pada sisi penerima kanal *Rayleigh Fading* dengan $E_b/N_0 =$ (a) 0 dB, (b) 50 dB, (c) 100 dB, (d) 120 dB



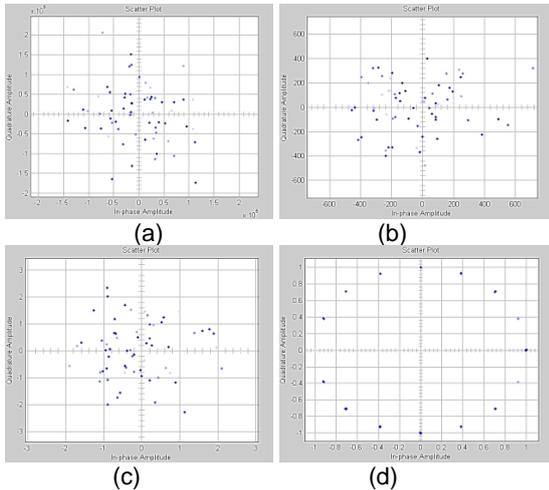
Gambar 11. Titik konstelasi Modulasi 16-QAM pada sisi penerima kanal AWGN dengan $E_b/N_0 =$ (a) 0 dB, (b) 50 dB, (c) 100 dB, (d) 115 dB



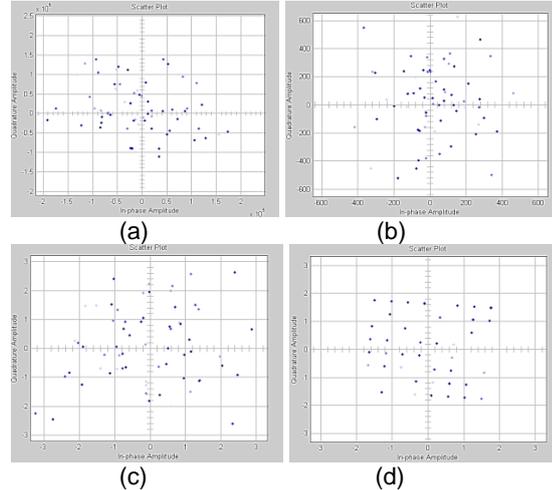
Gambar 12. Titik konstelasi Modulasi 16-QAM pada sisi penerima kanal *Rayleigh Fading* dengan E_b/N_0 = (a) 0 dB, (b) 50 dB, (c) 100 dB, (d) 125 dB



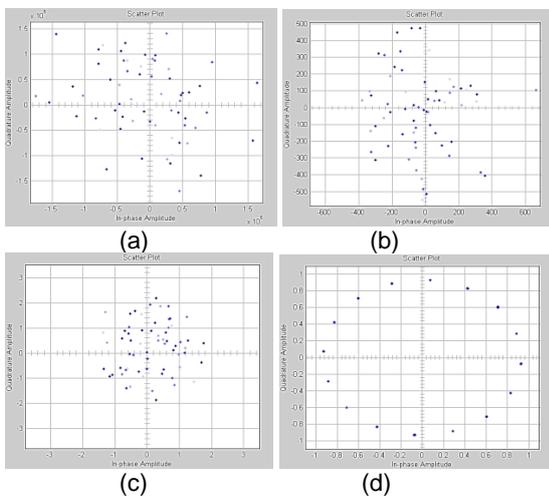
Gambar 15. Titik konstelasi Modulasi 64-QAM pada sisi penerima kanal AWGN dengan E_b/N_0 = (a) 0 dB, (b) 50 dB, (c) 100 dB, (d) 125 dB



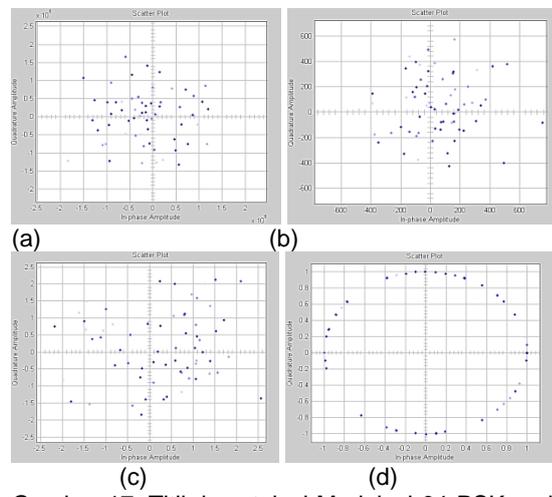
Gambar 13. Titik konstelasi Modulasi 16-PSK pada sisi penerima kanal AWGN dengan E_b/N_0 = (a) 0 dB, (b) 50 dB, (c) 100 dB, (d) 125 dB



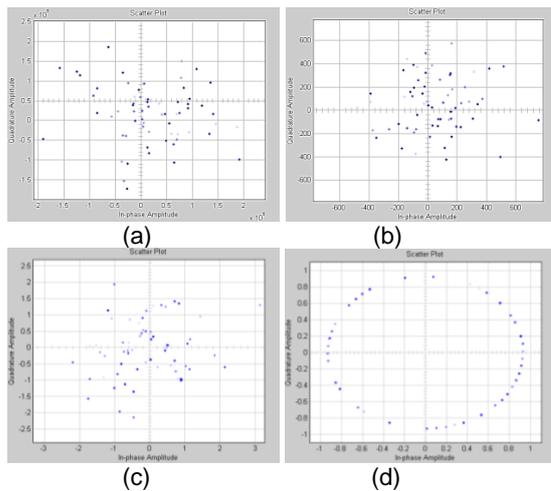
Gambar 16. Titik konstelasi Modulasi 64-QAM pada sisi penerima kanal *Rayleigh Fading* dengan E_b/N_0 = (a) 0 dB, (b) 50 dB, (c) 100 dB, (d) 150 dB



Gambar 14. Titik konstelasi Modulasi 16-PSK pada sisi penerima kanal *Rayleigh Fading* dengan E_b/N_0 = (a) 0 dB, (b) 50 dB, (c) 100 dB, (d) 150 dB



Gambar 17. Titik konstelasi Modulasi 64-PSK pada sisi penerima kanal AWGN dengan E_b/N_0 = (a) 0 dB, (b) 50 dB, (c) 100 dB, (d) 140 dB

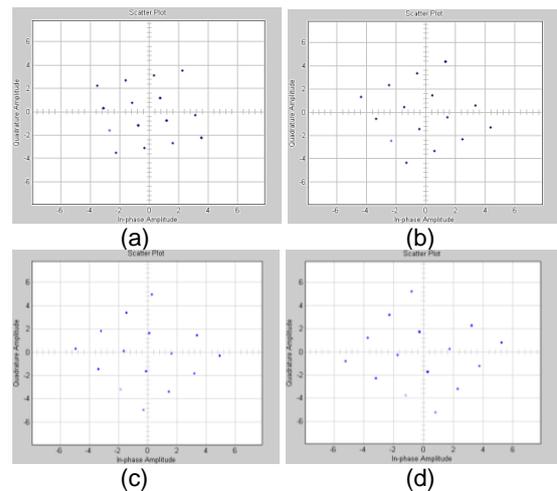


Gambar 18. Titik konstelasi Modulasi 64-PSK pada sisi penerima kanal *Rayleigh Fading* dengan E_b/N_0 = (a) 0 dB, (b) 50 dB, (c) 100 dB, (d) 150 dB

Gambar 7 sampai gambar 18 adalah titik konstelasi pada masing-masing modulasi pada kanal AWGN dan *Rayleigh*. Pada nilai $E_b/N_0 = 0$ dB menghasilkan titik konstelasi yang menyebar, sehingga kualitas BER yang dihasilkan masih buruk. Pada nilai $E_b/N_0 = 50$ dB dan 100 dB menunjukkan titik konstelasi yang masih menyebar, tetapi lebih konvergen dibandingkan pada $E_b/N_0 = 0$ dB. Sehingga, kualitas BER terhadap E_b/N_0 akan lebih baik. Pada saat nilai E_b/N_0 di atas 100 dB, titik konstelasi berada di titik yang hampir sama dengan sisi pengirim, sehingga kualitas BER terhadap E_b/N_0 yang dihasilkan akan lebih baik lagi. Ditinjau dari energi bit modulasi M-QAM dan M-PSK, terlihat pada E_b/N_0 diatas 100 dB titik konstelasinya sudah konvergen, tetapi modulasi M-QAM mempunyai energi bit yang lebih besar untuk nilai E_b/N_0 yang sama.

Pengaruh Doppler Shift terhadap Titik Konstelasi Sinyal. Pada kanal *Rayleigh Fading*, bentuk konstelasi sinyal yang dihasilkan pada sisi penerima sudah sama dengan sisi pengirim, tetapi terjadi pergeseran posisi dari titik awal. Hal ini disebabkan oleh adanya parameter *doppler shift* pada kanal. Pengaruh *doppler shift* terhadap titik konstelasi sinyal dapat dilihat pada Gambar 19.

Gambar 19 adalah contoh pengaruh *doppler shift* terhadap titik konstelasi sinyal untuk modulasi 16-QAM pada nilai 5 Hz sampai 20 Hz. Dapat dilihat bahwa titik konstelasi sinyal memiliki bentuk yang sama dengan sisi pengirim. Tetapi mengalami



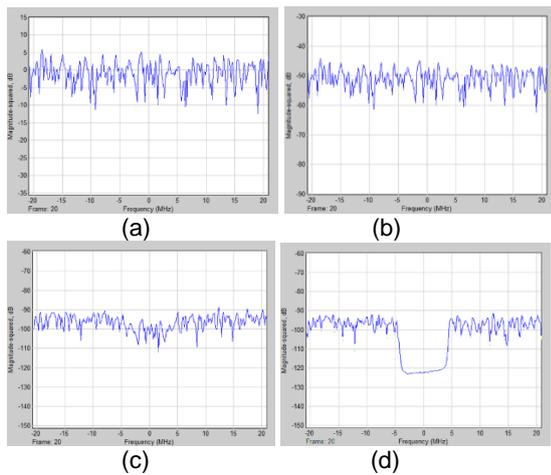
Gambar 19. Titik konstelasi Modulasi 16-QAM pada sisi penerima dengan *Doppler Shift* = (a) 5 Hz, (b) 10 Hz, (c) 15 Hz, (d) 20 Hz

pergeseran pada setiap perubahan *doppler shift*. Pergeseran ini mengakibatkan perubahan posisi titik konstelasi yang nantinya akan mempengaruhi nilai BER.

Power Spectrum Noise. *Power Spectrum Noise* OFDM sinyal *Transmitter* memiliki *bandwidth* sebesar 20 MHz. Proses pembangkitan *Power Spectrum Noise* sinyal *Transmitter* tersebut pada *frame* 20 yaitu antara -91 dB sampai -123 dB. Bentuk dari *Power Spectrum* ini dipengaruhi oleh nilai *FFT size* yaitu sebesar 256 di mana pada nilai ini bentuk *Power Spectrum* tidak terlalu halus. Semakin besar nilai *FFT size*, maka bentuk *Power Spectrum* yang dihasilkan akan semakin baik. Bentuk *Spectrum* yang dihasilkan tidak simetris. Hal ini dikarenakan data yang ditransmisikan adalah data asimetris. *Power Spectrum Noise* sinyal OFDM dapat dilihat pada Gambar 20.

Pada $E_b/N_0 = 0$ dB, dapat dilihat bahwa *Magnitude* sinyal yang dihasilkan yaitu antara 6 dB sampai -13 dB di mana nilai ini sangat berbeda dengan sinyal *Transmitter*. Hal ini dikarenakan nilai E_b/N_0 yang buruk yang menghasilkan *noise* yang tinggi. Sehingga kondisi ini akan menghasilkan kualitas BER yang buruk. Pada $E_b/N_0 = 50$ dB, dapat dilihat bahwa *Magnitude* sinyal yang dihasilkan yaitu antara -45 dB sampai -63 dB di mana nilai ini masih berbeda dengan sinyal *Transmitter*.

Pada $E_b/N_0 = 100$ dB, dapat dilihat bahwa *Magnitude* sinyal yang dihasilkan yaitu antara -89 dB sampai -112 dB di mana nilai ini sudah menyerupai nilai sinyal *Transmitter*, tetapi



Gambar 20. *Power Spectrum Noise* sistem OFDM sinyal Receiver dengan E_b/N_0 = (a) 0 dB, (b) 50 dB, (c) 100 dB, (d) 150 dB

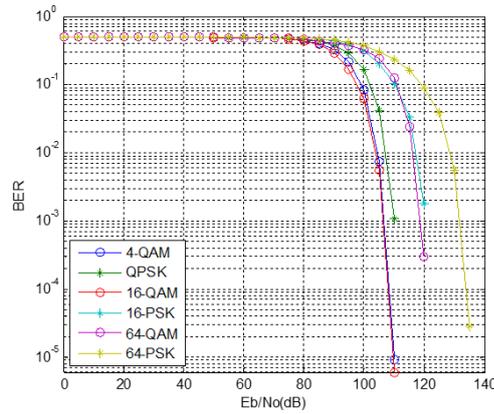
bentuk sinyal masih belum halus seperti sinyal *Transmitter*. Pada E_b/N_0 = 150 dB, dapat dilihat pada kondisi ini bahwa *Magnitude* sinyal yang dihasilkan yaitu antara -92 dB sampai -123 dB di mana nilai ini sudah menyerupai nilai sinyal *Transmitter* dan bentuk sinyal sudah hampir sama seperti sinyal *Transmitter*. Kualitas BER yang akan dihasilkan pada kondisi ini akan lebih baik.

Analisis BER. Analisis BER dilakukan pada dua kondisi kanal, yaitu kanal AWGN dan *Rayleigh Fading*. Pada kanal *Rayleigh Fading* terdapat parameter khusus yaitu *Path Delay* dan *Path Gain*. *Path Delay* maksimal pada parameter *Rayleigh Fading* ini adalah 0,5 % dari lebar data yaitu sebesar 40 ns pada frekuensi kerja 1800 MHz. Parameter yang digunakan ini dapat dilihat pada Tabel 2.

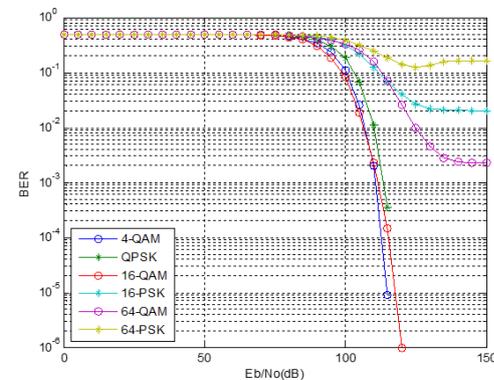
Gambar 21 menunjukkan grafik BER vs E_b/N_0 sistem OFDM pada kanal AWGN. Dapat dilihat bahwa teknik modulasi dengan nilai $M = 4$ memiliki nilai BER yang paling kecil. Sedangkan teknik modulasi dengan $M = 64$ memiliki nilai BER yang paling besar. Untuk sistem OFDM kanal AWGN, teknik modulasi 4-QAM dan 16-QAM adalah yang paling baik dibandingkan dengan teknik modulasi yang lain.

Tabel 2 *Multipath Power Delay Profile*

Path	Path Delay (ps)	Gain Vector (dB)
1	20	0
2	110	-10
3	200	-15



Gambar 21. Grafik BER vs E_b/N_0 sistem OFDM kanal AWGN



Gambar 22. Grafik BER vs E_b/N_0 sistem OFDM kanal *Rayleigh*

Gambar 22 menunjukkan grafik BER vs E_b/N_0 sistem OFDM pada kanal *Rayleigh*. Dapat dilihat bahwa teknik modulasi dengan nilai $M = 4$ memiliki nilai BER yang paling kecil. Sedangkan teknik modulasi dengan $M = 64$ memiliki nilai BER yang paling besar. Untuk sistem OFDM kanal *Rayleigh Fading*, teknik modulasi 16-PSK, 64-QAM dan 64-PSK tidak dapat digunakan. Hal ini dikarenakan BER yang didapatkan bernilai diatas 10^{-3} .

KESIMPULAN

- 1) Semakin tinggi nilai M pada modulasi M-QAM dan M-PSK, maka nilai BER akan semakin besar.
- 2) *Bit rate* untuk $M = 4$ memiliki nilai paling kecil yaitu 50 Mbps, sedangkan *bit rate* untuk $M = 16$ bernilai 100 Mbps, dan *bit rate* untuk $M = 64$ memiliki nilai paling besar yaitu 150 Mbps.

- 3) Titik konstelasi sinyal OFDM dipengaruhi oleh nilai Eb/No. Semakin besar nilai Eb/No, maka titik konstelasi sinyal akan semakin terpusat hingga mendekati posisi yang sesuai, dan akan menghasilkan nilai BER yang rendah.
- 4) Pada kanal *Rayleigh Fading*, bentuk konstelasi sinyal OFDM yang dihasilkan pada sisi penerima sudah sama dengan sisi pengirim, tetapi bergeser karena adanya parameter pergeseran Doppler (*Doppler shift*).
- 5) *Power spectrum noise* sinyal OFDM dipengaruhi oleh nilai Eb/No. Semakin kecil nilai Eb/No, maka amplitude *power spectrum noise* akan semakin tinggi, dan akan menghasilkan nilai BER yang tinggi.
- 6) Modulasi 4-QAM dan QPSK memiliki titik konstelasi yang sama. Di mana keduanya memiliki empat titik dengan beda fase yang sama yaitu 90°, yang membedakan antara kedua modulasi tersebut adalah nilai Eb/No pada masing-masing modulasi. Pada simulasi ini, Eb/No pada modulasi 4-QAM lebih besar daripada Eb/No pada modulasi QPSK. Sehingga Grafik BER vs Eb/No sistem OFDM dengan modulasi 4-QAM lebih baik daripada dengan modulasi QPSK.
- 7) Kinerja sistem OFDM kanal AWGN dengan modulasi M-QAM lebih baik daripada sistem OFDM dengan modulasi M-PSK. Hal ini ditunjukkan pada titik konstelasi pada modulasi M-QAM yang memiliki jarak yang renggang antar titiknya dibandingkan dengan modulasi M-PSK.
- 8) Untuk sistem OFDM kanal AWGN, teknik modulasi 4-QAM dan 16-QAM adalah yang paling baik dibandingkan dengan teknik modulasi QPSK, 16-PSK, 64-QAM, dan 64-PSK
- 9) Berdasarkan hasil simulasi (Gambar 22) dengan parameter pada Tabel 2, modulasi 16-PSK, 64-QAM, dan 64-PSK tidak dapat digunakan pada sistem OFDM kanal *Rayleigh Fading*. Hal ini dikarenakan BER yang didapatkan bernilai diatas 10^{-3} .

SARAN

Adapun beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian mendatang.

- 1) Simulasi hendaknya dapat menggunakan parameter sistem yang berbeda.
- 2) Simulasi hendaknya dapat menggunakan teknik modulasi dengan nilai *M-ary number* yang berbeda.
- 3) Penelitian hendaknya dapat membandingkan kinerja sistem OFDM berdasarkan ukuran FFT.
- 4) Kanal pada sistem hendaknya dapat menggunakan model yang lain untuk merepresentasikan kondisi kanal dengan berbagai gangguan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, K., Moegiharto, Y., 2010. *Analisa Kinerja Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) berbasis Perangkat Lunak*. PENS-ITS: Surabaya.
- Ananta, A., 2009. *Simulasi Perbandingan Kinerja Modulasi M-PSK dan M-QAM terhadap Laju Kesalahan Data pada Sistem Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*. Skripsi. Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro: Semarang.
- Cho, S.Y., et al., 2010. *MIMO-OFDM Communication with MATLAB*. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd: Singapore.
- Darlis, D., Muayyadi, A. A., Sumaryo, S., 2010. *Perancangan dan Implementasi Prosesor OFDM Baseband untuk Prototipe Modem PLC pada FPGA*, Jurnal Penelitian dan Pengembangan TELEKOMUNIKASI Vol.15, No.2, hlm 108-115.
- Hakim, M. L., Sukiswo, Santoso, I., 2010. *Analisis Kinerja Sistem MIMO-OFDM pada Kanal Rayleigh dan AWGN dengan Modulasi QPSK*, Transmisi Vol.12, No.4, hlm 150-154.
- Hapsara, A. K., 2007. *Kinerja Modulasi Digital dengan Metode PSK (Phase Shift Keying)*. Skripsi. Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro: Semarang.

- Manglani, M. J., 2001, *Wavelet Modulation in Gaussian and Rayleigh Fading Channel*. Blacksburg, Virginia.
- Susanti, S. D., 2013. *Analisis Penerapan Model Propagasi ECC 33 pada Jaringan Mobile Worldwide Interoperability For Microwave Access (Wimax)*, EECCIS Journal.