

ANALISIS BER PADA GAMMA-GAMMA TURBULENCE MENGUNAKAN TEKNIK MODULASI ON OFF KEYING (OOK) DAN PULSE WIDTH MODULATION (PWM) UNTUK SISTEM KOMUNIKASI CAHAYA TAMPAK BAWAH LAUT

BER ANALYSIS OF GAMMA-GAMMA TURBULENCE USING ON OFF KEYING (OOK) AND PULSE WIDTH MODULATION (PWM) FOR UNDERWATER VISIBLE LIGHT COMMUNICATION SYSTEM

Niken Sekar Ningrum¹, Akhmad Hambali², Harfan Hian Ryanu³

^{1,2,3} Universitas Telkom, Bandung

¹nikensekarningrum@telkomuniversity.ac.id, ²ahambali@telkomuniversity.co.id,

³harfanhr@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Visible Light Communication (VLC) merupakan salah satu teknologi yang umum diimplementasikan pada sistem komunikasi cahaya tampak bawah laut. Pada penelitian ini digunakan teknik modulasi *On-Off Keying Non-Return to Zero (OOK-NRZ)*, *On-Off Keying Return to Zero (OOK-RZ)*, dan *Pulse Width Modulation (PWM)*. Dalam penelitian ini terdapat dua skenario yang disimulasikan. Skenario pertama menguji pengaruh perubahan jarak terhadap BER modulasi dan SNR pada media *pure sea water* atau air laut murni dimana parameter yang digunakan yaitu tiga jarak berbeda antara *transmitter* dan *receiver* serta laju disipasi temperatur rata-rata (X_T) dan laju disipasi energi kinetik (ϵ) bernilai sama. Skenario kedua menguji pengaruh perubahan jarak terhadap BER modulasi dan SNR pada media *coastal ocean* atau pesisir pantai.

Hasil akhir dari simulasi menunjukkan bahwa PWM Gamma menjadi teknik modulasi yang memiliki kinerja optimal untuk diimplementasikan dalam sistem komunikasi cahaya tampak bawah laut. Hal ini dapat dilihat dari nilai BER dibawah turbulensi rendah yaitu jarak 50 m, pada *pure sea water* diperoleh BER OOK-NRZ Gamma sebesar 2.2175×10^{-8} , BER OOK-RZ Gamma sebesar $2,1603 \times 10^{-20}$ dan BER PWM Gamma sebesar $8,8399 \times 10^{-31}$. Sedangkan pada turbulensi sedang yaitu jarak 60 m di media *coastal ocean* diperoleh BER OOK-NRZ Gamma sebesar 0,0015, BER OOK-RZ Gamma sebesar $1,2984 \times 10^{-9}$, BER PWM Gamma sebesar $4,8818 \times 10^{-14}$. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi tingkat turbulensi maka semakin buruk performansi dari BER.

Kata Kunci: VLC, gamma-gamma turbulence, OOK-RZ, OOK-NRZ, PWM, pure sea water, coastal ocean.

Abstract

Visible Light Communication (VLC) is one of the technologies commonly implemented in underwater visible light communication systems. In this study, the modulation techniques are On-Off Keying Non-Return to Zero (OOK-NRZ), On-Off Keying Return to Zero (OOK-RZ), and Pulse Width Modulation (PWM). In this study there are two scenarios that are simulated. The first scenario is to examines the effect of the distance changes on BER modulation and SNR in the pure sea water where there are three different distances between transmitter and receiver and the same value of the rate of dissipation of mean squared temperature (X_T) and the rate of dissipation kinetic energy (ϵ) parameter. The second scenario is to examines the effect of the distance changes on BER modulation and SNR in the coastal ocean. The result of the simulation shows that PWM Gamma becomes a modulation technique which has optimal performance to be implemented in an underwater visible light communication system. It can be seen from the BER value under weak turbulence which is 50 m in pure sea water the BER OOK-NRZ Gamma is 2.2175×10^{-8} , the BER Gamma OOK-RZ is $2,1603 \times 10^{-20}$ and the BER Gamma PWM is $8,8399 \times 10^{-31}$. Meanwhile, at moderate turbulence, which is 60 m in the coastal ocean media, the BER OOK-NRZ Gamma is 0,0015, the BER Gamma OOK-RZ is $1,2984 \times 10^{-9}$ and the BER Gamma PWM is $4,8818 \times 10^{-14}$. Therefore, it can be concluded that the higher the turbulence level, BER performance will get worse.

Keywords: VLC, gamma-gamma turbulence, OOK-RZ, OOK-NRZ, PWM, pure sea water, coastal ocean.

1. Pendahuluan

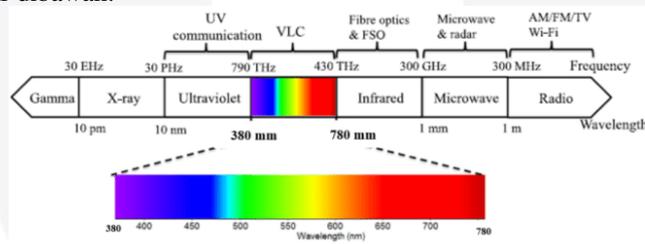
Turbulensi merupakan proses fisika dalam mentransfer momentum, panas, dan dispersi zat terlarut serta partikel organik maupun non organik di danau, laut, samudera, bahkan di luar angkasa. Turbulensi dapat dikatakan sebagai suatu kejadian alamiah yang tidak dapat dihindarkan dan memiliki probabilitas menimbulkan berbagai macam efek turbulensi seperti *beam wander*, *beam scattering*, dan *beam scintillation* [1]. Seiring dengan perkembangan teknologi yang semakin canggih, banyak peneliti yang memanfaatkan teknologi *Visible Light Communication* (VLC) untuk komunikasi bawah laut dengan menggunakan kanal model yang sesuai dengan tingkatan skema turbulensi dikarenakan VLC dianggap sebagai teknologi yang ramah lingkungan [2].

Pada penelitian sebelumnya [3], diteliti analisis nilai BER pada *gamma-gamma turbulence* dengan modulasi OOK, BPSK, dan DPSK untuk sistem komunikasi *free space optical* (FSO). Dari hasil penelitian tersebut didapatkan nilai BER OOK-NRZ lebih baik dibandingkan BER OOK-RZ. Namun modulasi yang menunjukkan hasil paling baik yaitu 16-PPM dalam skema turbulensi rendah, sedang, dan tinggi. Pada penelitian [4], dianalisis performansi parameter daya terima, *link margin*, SNR, dan kecepatan data di media *pure sea water*, *clean ocean*, *coastal ocean*, dan *turbid harbor*. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa *pure sea water* dan *clean ocean* menghasilkan daya terima, *link margin*, kecepatan data, dan SNR lebih baik dibandingkan dengan media air lainnya. Dengan demikian dalam penelitian ini dilakukan simulasi untuk mengevaluasi kinerja BER pada modulasi OOK NRZ, OOK RZ, dan PWM dengan media *pure sea water* dan *coastal ocean* untuk sistem komunikasi cahaya tampak bawah laut dalam skema turbulensi rendah, sedang, dan tinggi.

2. Dasar Teori

2.1 Visible Light Communication (VLC)

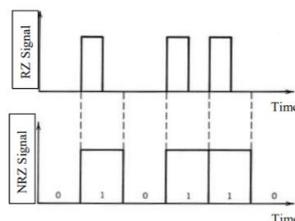
Visible Light Communication (VLC) merupakan salah satu penerapan dari *Optical Wireless Communication* (OWC) yang memanfaatkan cahaya tampak sebagai media pertukaran informasi pada rentang frekuensi 430-790 THz dengan panjang gelombang 380 nm – 780 nm seperti yang tertera pada gambar dibawah.



Gambar 1. Spektrum cahaya tampak [5]

2.2 On-Off Keying

On-Off Keying (OOK) merupakan teknik modulasi yang umum digunakan pada komunikasi cahaya tampak karena modulasi ini yang paling sederhana diantara modulasi lainnya. OOK merupakan bagian dari *Amplitude Shift Keying* (ASK). Pada teknik modulasi ini terbagi menjadi dua yaitu OOK NRZ dan OOK RZ. OOK NRZ (*Non-Return to Zero*) merupakan modulasi dimana bit “1” melambangkan “*on* atau *true*” dan bit “0” melambangkan “*off* atau *false*”. Pada modulasi OOK-RZ (*Return to Zero*) pulsa yang mewakili bit 1 akan kembali ke nol sebelum menyelesaikan slot bit.



Gambar 2. Modulasi OOK RZ dan OOK NRZ [6]

Transmitter menghasilkan pulsa rektanguler dengan periode bit sebagai berikut [6].

$$T_b = \frac{1}{R_b} \quad (1)$$

dimana T_b merupakan periode bit (s) dan R_b merupakan laju bit (bps).

Daya terima dapat dinotasikan sebagai berikut [6].

$$P_R = P_T \frac{D}{9^2 \cdot \frac{h^2}{n}} 10^{-\Gamma \cdot \frac{h}{10 \cdot n}} \tau_{tx} \tau_{rx} \quad (2)$$

Pada modulasi OOK-NRZ, energi per bit dapat dinotasikan sebagai berikut [6].

$$E_b = 2 (R \cdot P_R)^2 T_b \quad (3)$$

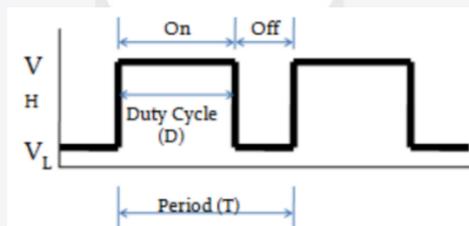
Pada modulasi OOK-RZ, energi per bit dapat dinotasikan sebagai berikut [6].

$$E_b = \frac{2 (R \cdot P_R)^2 T_b}{\gamma} \quad (4)$$

dimana E_b merupakan energi per bit (J), R merupakan responsivitas PIN (A/W), P_R merupakan daya terima (W), T_b merupakan periode bit (s), dan γ merupakan *duty cycle*.

2.2.2 Pulse Width Modulation

Pulse Width Modulation (PWM) adalah modulasi yang mengkodekan suatu sinyal informasi terhadap *duty cycle*. *Duty cycle* digunakan untuk membawa sinyal informasi melewati kanal transmisi. PWM menggunakan gelombang persegi dan memvariasikan lebar pulsa untuk modulasi data baik analog maupun digital.



Gambar 3. Signalling PWM [6]

Pada modulasi PWM, energi per bit dapat dinotasikan sebagai berikut [6].

$$E_b = \frac{2 (R \cdot P_R)^2 T_b}{\gamma} \quad (5)$$

2.3 Kanal Transmisi

Kanal transmisi dapat dibagi menjadi dua kategori; kabel (*wired*) dan nirkabel (*wireless*). Contoh dari kanal *wired* adalah kabel *twisted pair*, kabel *coaxial*, *fiber optic*, bumbung gelombang (*waveguide*), dan sebagainya. Sedangkan yang termasuk dalam kanal *wireless* yaitu vakum, udara, dan air laut. Secara umum air laut terbagi menjadi beberapa jenis, sebagaimana tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1. Jenis air laut [7]

Jenis air	α (m ⁻¹) (absorpsi)	β (m ⁻¹) (scattering)	c (m ⁻¹) (redaman)
Pure sea water	0,0405	0,0025	0,043
Coastal ocean	0,179	0,219	0,398
Turbid harbor	0,266	1,824	2,09
Clear ocean	0,114	0,037	0,151

2.4 Turbulensi

Turbulensi merupakan proses fisika dalam mentransfer momentum, panas, dan dispersi zat terlarut serta partikel organik maupun non organik di danau, laut, samudera, bahkan di luar angkasa. Adapun karakteristik dari turbulensi yaitu [8].

1. *Randomness* dan *chaotic*
Salah satu karakteristik aliran turbulensi adalah ketidakteraturan atau keacakannya. Aliran turbulensi selalu *chaotic* namun tidak semuanya yang bersifat *chaotic* itu merupakan turbulensi.
2. Meningkatnya transport dan pencampuran material
Aliran turbulensi umumnya menunjukkan kecepatan pencampuran dan transportasi dari materi, panas, dan momentum.
3. Vortisitas
Turbulensi sering dianggap sebagai vortisitas atau dalam ilmu oseanografi disebut sebagai pusaran.
4. Disipasi
Turbulensi bersifat disipasi yang artinya adalah energi kinetik dihamburkan menjadi panas akibat dari tegangan *viscous sheer*. Aliran turbulensi akan berhenti dengan cepat ketika tidak ada energi yang diberikan.

2.5 Gamma-Gamma Turbulence

Pada model kanal *gamma gamma turbulence* terdapat tiga jenis turbulensi yaitu turbulensi rendah, sedang, dan tinggi yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan parameter alpha, beta, dan rytov variansi pada PDF *gamma-gamma turbulence* [6]

Turbulensi	α	β	σ_I^2
Rendah	11,6	10,1	0,2
Sedang	4	1,9	1,6
Tinggi	4,2	1,4	3,5

dimana α dan β adalah parameter *small and large scale eddies* yang dapat dihitung dengan persamaan berikut ini [6].

$$\alpha = \left\{ \exp \left(\frac{0,49 \sigma_I^2}{\left(1 + 1,1 \sigma_I^{\frac{12}{5}} \right)^{\frac{7}{6}}} \right) - 1 \right\}^{-1} \tag{6}$$

$$\beta = \left\{ \exp \left(\frac{0,51 \sigma_I^2}{\left(1 + 0,69 \sigma_I^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{5}{6}}} \right) - 1 \right\}^{-1} \quad (7)$$

dimana σ_I^2 adalah rytov variansi yang merupakan salah satu parameter penentu turbulensi dan dapat dinotasikan sebagai berikut [6].

$$\sigma_I^2 = 1,23 \cdot k^{\frac{7}{6}} \cdot C_n^2 \cdot h^{\frac{11}{6}} \quad (8)$$

2.6 Transmitter

Transmitter adalah alat yang berfungsi untuk mengkonversi sinyal listrik menjadi sinyal dalam bentuk cahaya. Pada penelitian ini yang bertindak sebagai *transmitter* adalah *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)*.

2.7 Receiver

Pada penelitian ini yang bertindak sebagai *receiver* ialah photodiode jenis *Positive Intrinsic Negative (PIN)*. Selain APD, PIN diode adalah jenis sensor cahaya yang umum digunakan pada komunikasi cahaya tampak. Prinsip kerja PIN diode yaitu mengubah sinyal optik menjadi sinyal listrik dan memerlukan bias mundur (*reverse bias*).

2.8 Signal to Noise (SNR)

Signal to Noise (SNR) adalah suatu parameter yang digunakan untuk mengukur kualitas dari sinyal yang tercampur oleh *noise* atau derau. Persamaan SNR dapat dituliskan sebagai berikut [6].

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log \frac{(R \cdot P_R)^2 T_b}{2 \cdot q \cdot I_{bg}} \quad (9)$$

2.9 Bit Error Rate (BER)

Bit Error Rate (BER) didefinisikan sebagai jumlah bit error yang diterima dibagi dengan jumlah bit yang dikirimkan. Semakin kecil nilai BER maka akan semakin baik kualitas dari sistem komunikasi tersebut.

- Persamaan BER untuk OOK-NRZ dapat dituliskan sebagai berikut [6].

$$\text{BER}_{\text{Gamma OOK-NRZ}} = Q \left(\frac{\text{th}_{\text{NRZ}}}{\sigma_{\text{NRZ}}} \right) \quad (10)$$

dimana Q merupakan *q function*, $\text{th}_{\text{NRZ}} = 0,3(2 \cdot R \cdot P_R)^2 T_b$ merupakan level *threshold* OOK-NRZ,

dan $\sigma_{\text{NRZ}} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot I_b (2 \cdot R \cdot P_R)^2 \cdot T_b}{2}}$ merupakan variansi *noise*.

- Persamaan BER untuk OOK-RZ dapat dituliskan sebagai berikut [6].

$$\text{BER}_{\text{Gamma OOK-RZ}} = Q \left(\frac{\text{th}_{\text{RZ}}}{\sigma_{\text{RZ}}} \right) \quad (11)$$

dimana Q merupakan *q function*, $\text{th}_{\text{RZ}} = \frac{0,3(2 \cdot R \cdot P_R)^2 T_b}{\gamma}$ merupakan level *threshold* OOK-RZ, dan

$$\sigma_{\text{RZ}} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot I_b (2 \cdot R \cdot P_R)^2 T_b}{2 \cdot \gamma}}$$
 merupakan variansi *noise*.

- Persamaan BER untuk PWM dapat dituliskan sebagai berikut [6].

$$\text{BER Gamma}_{\text{PWM}} = Q \left(\frac{\text{th}_{\text{PWM}}}{\sigma_{\text{PWM}}} \right) \quad (12)$$

dimana Q merupakan q function, $\text{th}_{\text{PWM}} = \frac{0,3(2.R.P_R)^2 T_b}{\gamma}$ merupakan level *threshold* PWM, dan

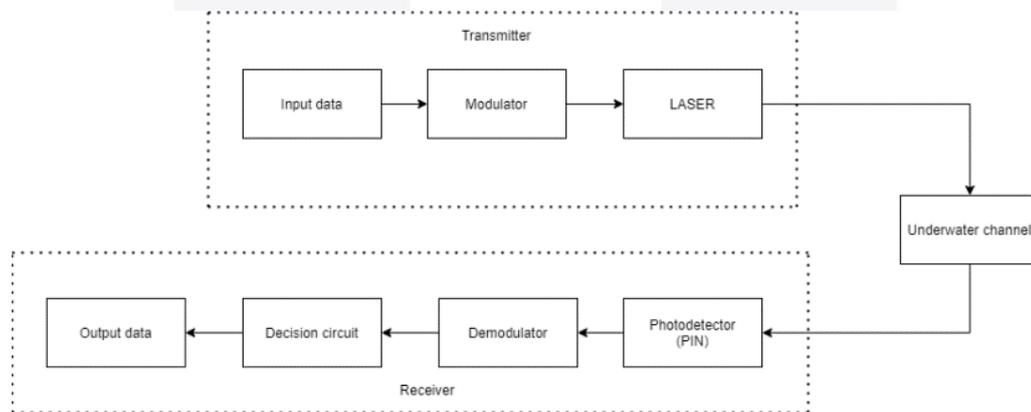
$$\sigma_{\text{PWM}} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot I_b \times \frac{0,3(2.R.P_R)^2 T_b}{\gamma}}{2}} \text{ merupakan variansi } \textit{noise}.$$

3. Pembahasan

3.1 Diagram Blok

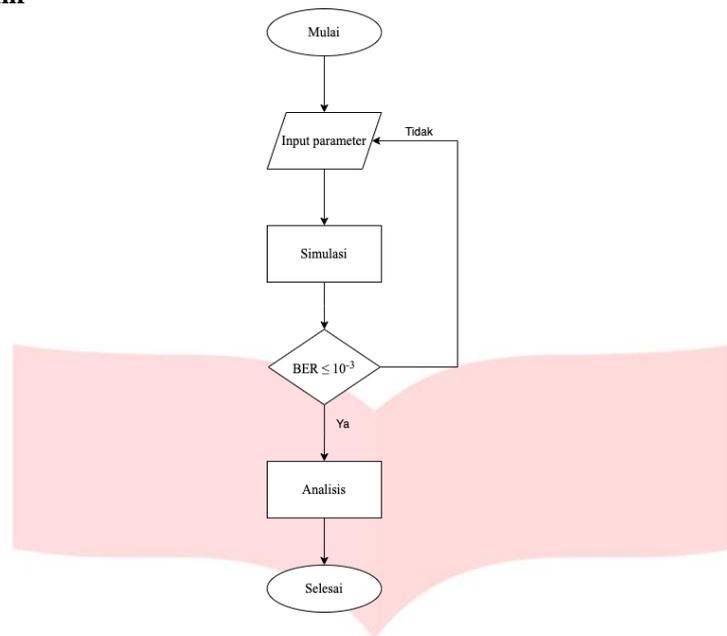
Pada penelitian ini terdapat tiga blok utama meliputi *transmitter*, *channel*, dan *receiver* blok. Pada blok *transmitter* terdapat input data yang berisi sejumlah sinyal informasi yang akan dikirimkan. Kemudian sinyal informasi tersebut ditumpangkan ke sinyal pembawa yang disebut dengan proses modulasi dan akan dilakukan pada modulator OOK-NRZ, OOK-RZ, dan PWM. Lalu sinyal termodulasi tersebut akan dipancarkan melalui LASER. Kemudian sinyal dari LASER akan ditransmisikan melalui *channel model Gamma-Gamma Turbulence*.

Selanjutnya pada blok *receiver*, fotodetektor berupa PIN dioda akan mendeteksi sinyal optik dan menkonversinya menjadi sinyal listrik. Setelah sinyal keluar dari PIN dioda kemudian akan diproses pada demodulator untuk mengubah kembali sinyal pembawa menjadi sinyal informasi. Selanjutnya sinyal informasi akan diteruskan *decision circuit*. Pada *decision circuit* berperan dalam meloloskan sinyal yang memiliki daya melebihi dari batas *threshold* maka sinyal tersebut direpresentasikan sebagai bit 1. Sedangkan untuk sinyal yang memiliki daya kurang dari batas *threshold* maka sinyal tersebut direpresentasikan sebagai bit 0. Pada penelitian ini diasumsikan *threshold* untuk PWM sebesar 0,4 dan *threshold* untuk OOK-RZ sebesar 0,5.



Gambar 4. Diagram blok sistem

3.2 Diagram Alir



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

3.4 Skenario Simulasi dan Perhitungan

Pada subbab ini dipaparkan dua skenario yang akan disimulasikan diantaranya; Skenario I menguji pengaruh perubahan jarak terhadap BER modulasi dan SNR pada media *pure sea water* atau air laut murni dimana parameter yang digunakan yaitu tiga jarak berbeda antara *transmitter* dan *receiver*, namun parameter laju disipasi temperatur rata-rata (X_T) dan laju disipasi energi kinetik (ϵ) bernilai sama. Skenario II menguji pengaruh perubahan jarak terhadap BER dan SNR pada media *coastal ocean* atau pesisir pantai.

3.4.1 Skenario I

Berdasarkan Gambar 3.3 skenario I menggunakan media *pure sea water* atau air laut murni dengan parameter jarak antara *transmitter* dan *receiver* (h) sejauh 50 m, 60 m, dan 110 m serta nilai laju disipasi temperatur rata-rata (X_T) sebesar $10^{-4} \text{ K}^2/\text{s}$ dan laju disipasi energi kinetik (ϵ) sebesar $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}^3$.



Gambar 6. Skenario I

Pada jarak *transmitter* dan *receiver* sejauh 50 m dan media *pure sea water* dapat dihitung daya terima sebagai berikut.

$$P_R = P_T \frac{D}{9^2 \frac{h^2}{n}} 10^{-\Gamma \frac{h}{10 \cdot n}} \tau_{tx} \tau_{rx}$$

$$P_R = 7 \times 10^{-4} \frac{1}{1,5^2 \frac{50^2}{1,33}} 10^{-0,043 \cdot \frac{50}{10(1,33)}} 0,5 \cdot 0,5$$

$$P_R = 5,4362 \times 10^{-8} \text{ W}$$

Setelah didapat daya terima, maka dihitung level *threshold* sebagai berikut.

$$th_{NRZ} = 0,3(2 \cdot R \cdot P_R)^2 T_b = 1,7263 \times 10^{-21}$$

$$th_{RZ} = \frac{0,3(2 \cdot R \cdot P_R)^2 T_b}{0,5} = 3,4526 \times 10^{-21}$$

$$th_{PWM} = \frac{0,3(2 \cdot R \cdot P_R)^2 T_b}{0,4} = 4,3157 \times 10^{-21}$$

Kemudian dapat dihitung nilai variansi *noise*.

$$\sigma_{NRZ} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot I_b (2 \cdot R \cdot P_R)^2 T_b}{2}} = 2,2696 \times 10^{-21}$$

$$\sigma_{RZ} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot I_b \frac{(2 \cdot R \cdot P_R)^2 T_b}{0,5}}{2}} = 4,5392 \times 10^{-21}$$

$$\sigma_{PWM} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot I_b \frac{0,3(2 \cdot R \cdot P_R)^2 T_b}{0,4}}{2}} = 5,674 \times 10^{-21}$$

Setelah didapat nilai daya terima maka dapat dihitung *Signal to Noise Ratio*.

$$SNR = \frac{(R \cdot P_R)^2 T_b}{2 \cdot q \cdot I_{bg}}$$

$$= \frac{(0,8 \cdot 5,4362 \times 10^{-8})^2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1,6 \times 10^{-19} \cdot 202 \times 10^{-6}} = 58,5$$

$$SNR_{dB} = 10 \log (SNR)$$

$$SNR_{dB} = 17,671 \text{ dB}$$

Kemudian diperoleh nilai *Bit Error Rate* (BER) untuk setiap modulasi.

$$BER_{\text{Gamma OOK-NRZ}} = Q\left(\frac{th_{NRZ}}{\sigma_{NRZ}}\right)$$

$$BER_{\text{Gamma OOK-NRZ}} = 2,2175 \times 10^{-8}$$

$$BER_{\text{Gamma OOK-RZ}} = Q\left(\frac{th_{RZ}}{\sigma_{RZ}}\right)$$

$$BER_{\text{Gamma OOK-RZ}} = 2,1603 \times 10^{-20}$$

$$\text{BER Gamma}_{\text{PWM}} = Q\left(\frac{\text{th}_{\text{PWM}}}{\sigma_{\text{PWM}}}\right)$$

$$\text{BER Gamma}_{\text{PWM}} = 8,8399 \times 10^{-31}$$

3.4.2 Skenario II

Berdasarkan Gambar 3.2 skenario II menggunakan media *coastal ocean* atau pesisir pantai dengan parameter jarak antara *transmitter* dan *receiver* (h) sejauh 50 m, 60 m, dan 110 m serta nilai laju disipasi temperatur rata-rata (X_T) sebesar $10^{-4} \text{ K}^2/\text{s}$ dan laju disipasi energi kinetik (ϵ) sebesar $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}^3$.



Gambar 7. Skenario II

Pada jarak *transmitter* dan *receiver* sejauh 60 m dan media *coastal ocean* sehingga dapat dihitung daya terima sebagai berikut.

$$P_R = P_T \frac{D}{9^2 \frac{h^2}{n}} 10^{-\Gamma \cdot \frac{h}{10 \cdot n}} \tau_{\text{tx}} \tau_{\text{rx}}$$

$$P_R = 7 \times 10^{-4} \frac{1}{1,5^2 \frac{60^2}{1,33}} 10^{-0,015 \cdot \frac{60}{10(1,33)}} 0,5 \cdot 0,5$$

$$P_R = 3,5267 \times 10^{-8} \text{ W}$$

Setelah didapat daya terima, maka dihitung level *threshold* sebagai berikut.

$$\text{th}_{\text{NRZ}} = 0,3(2 \cdot R \cdot P_R)^2 T_b = 9,5519 \times 10^{-22}$$

$$\text{th}_{\text{RZ}} = \frac{0,3(2 \cdot R \cdot P_R)^2 T_b}{0,5} = 1,9104 \times 10^{-21}$$

$$\text{th}_{\text{PWM}} = \frac{0,3(2 \cdot R \cdot P_R)^2 T_b}{0,4} = 2,388 \times 10^{-21}$$

Kemudian dapat dihitung nilai standar deviasi dari *noise*.

$$\sigma_{\text{NRZ}} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot I_b (2 \cdot R \cdot P_R)^2 T_b}{2}} = 3,2079 \times 10^{-22}$$

$$\sigma_{\text{RZ}} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot I_b \frac{(2 \cdot R \cdot P_R)^2 T_b}{0,5}}{2}} = 4,5366 \times 10^{-22}$$

$$\sigma_{\text{PWM}} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot I_b \frac{0.3(2R.P_R)^2 T_b}{0.4}}{2}} = 5,0721 \times 10^{-22}$$

Setelah didapat nilai daya terima maka dapat dihitung *Signal to noise ratio*.

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= \frac{(R \cdot P_R)^2 T_b}{2 \cdot q \cdot I_{bg}} \\ &= \frac{(0,8 \cdot 3,5267 \times 10^{-8})^2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1,6 \times 10^{-19} \cdot 202 \times 10^{-6}} = 24,6 \end{aligned}$$

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log (\text{SNR})$$

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 13,909 \text{ dB}$$

Kemudian diperoleh nilai *Bit Error Rate* (BER) untuk setiap modulasi.

$$\text{BER Gamma}_{\text{OOK-NRZ}} = Q\left(\frac{\text{th}_{\text{NRZ}}}{\sigma_{\text{NRZ}}}\right)$$

$$\text{BER Gamma}_{\text{OOK-NRZ}} = 0,0015$$

$$\text{BER Gamma}_{\text{OOK-RZ}} = Q\left(\frac{\text{th}_{\text{RZ}}}{\sigma_{\text{RZ}}}\right)$$

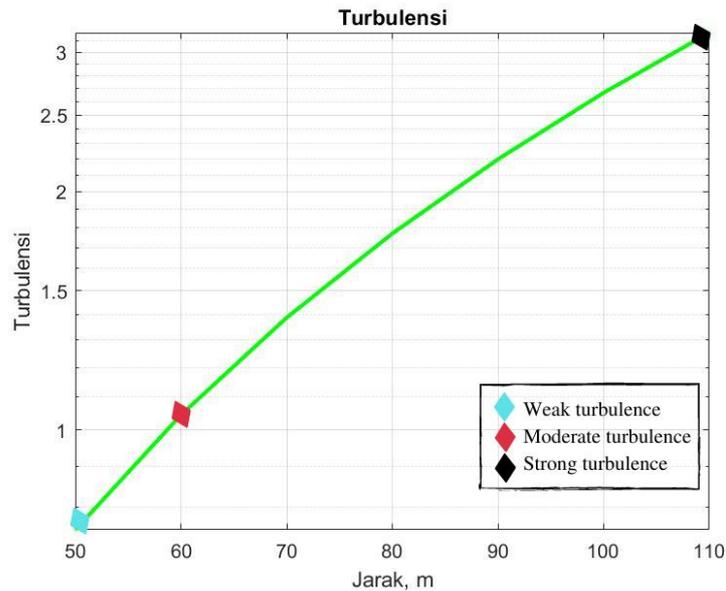
$$\text{BER Gamma}_{\text{OOK-RZ}} = 1,2984 \times 10^{-9}$$

$$\text{BER Gamma}_{\text{PWM}} = Q\left(\frac{\text{th}_{\text{PWM}}}{\sigma_{\text{PWM}}}\right)$$

$$\text{BER Gamma}_{\text{PWM}} = 4,8818 \times 10^{-14}$$

4. Hasil Simulasi dan Analisis

4.1 Skema Turbulensi terhadap Jarak



Gambar 8. Grafik turbulensi terhadap jarak

Pada jarak sejauh 50 m, 60 m, dan 110 m, $\varepsilon = 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^3$, $X_T = 10^{-4} \text{ K}^2/\text{s}$ dapat diperoleh nilai variasi indeks refraktif sebagai berikut.

$$C_n^2 = 2.1544 \times 10^{-12} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$$

Setelah nilai variasi indeks refraktif diperoleh kemudian dapat ditentukan nilai rytov variansi untuk menentukan tingkat turbulensi. Adapun nilai rytov variansi pada jarak *transmitter* dan *receiver* sejauh 50 m sebagai berikut.

$$\sigma_1^2 = 0.7482$$

Kemudian diperoleh nilai alpha dan beta sebagai berikut.

$$\alpha = 4.8734$$

$$\beta = 3.1707$$

Pada jarak *transmitter* dan *receiver* sejauh 60 m, maka diperoleh nilai rytov variansi sebagai berikut.

$$\sigma_1^2 = 1.0452$$

Kemudian diperoleh nilai alpha dan beta sebagai berikut.

$$\alpha = 4.3396$$

$$\beta = 2.4869$$

Pada jarak *transmitter* dan *receiver* sejauh 110 m, maka diperoleh nilai rytov variansi sebagai berikut.

$$\sigma_1^2 = 3.1753$$

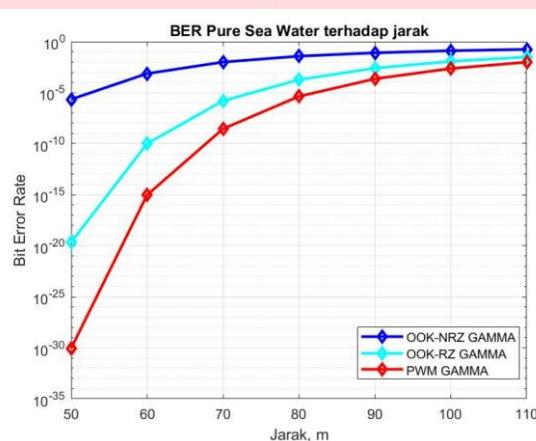
Kemudian diperoleh nilai alpha dan beta sebagai berikut.

$$\alpha = 4.1556$$

$$\beta = 1.4067$$

4.2 Hasil Analisis Skenario I

4.2.1 BER terhadap Jarak pada *Pure Sea Water*

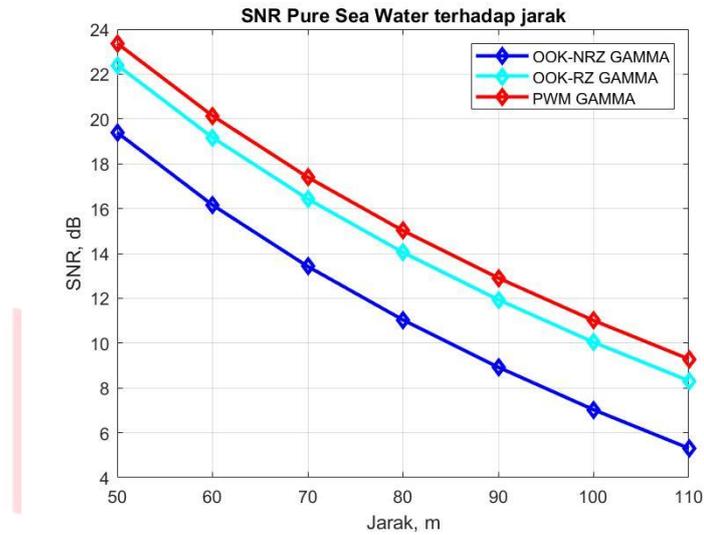


Gambar 9. Grafik BER terhadap jarak pada *pure sea water*

Pada Gambar 4.2 menunjukkan hasil kinerja BER terhadap jarak di media *pure sea water*. Pada turbulensi rendah dengan jarak 50 m diperoleh BER OOK-NRZ Gamma sebesar 2.2175×10^{-8} , BER OOK-RZ Gamma sebesar $2,1603 \times 10^{-20}$ dan BER PWM Gamma sebesar $8,8399 \times 10^{-31}$. Pada turbulensi sedang dengan jarak sejauh 60 m, diperoleh BER OOK-NRZ Gamma sebesar $7,3736 \times 10^{-4}$, BER OOK-RZ Gamma sebesar $1,0139 \times 10^{-10}$, BER Gamma PWM sebesar $9,399 \times 10^{-16}$. Pada turbulensi tinggi dengan jarak 110 m diperoleh BER OOK-NRZ Gamma sebesar 0,175, BER OOK-RZ Gamma sebesar 0,0308 BER PWM Gamma sebesar 0,0097.

Sesuai dengan nilai BER acuan $\leq 10^{-3}$ maka semakin jauh jarak *transmitter* dan *receiver* serta semakin tinggi tingkat turbulensinya mengakibatkan nilai BER yang dihasilkan akan semakin besar sehingga kualitas dari sistem komunikasi akan semakin buruk. Pada skenario ini, kinerja BER PWM Gamma bernilai baik pada jarak maksimal 90 m sementara BER OOK-RZ Gamma bernilai baik pada jarak maksimal 80 m dan BER OOK-NRZ Gamma bernilai baik pada jarak maksimal 60 m karena jika melebihi dari jarak tersebut nilai BER menjadi semakin besar dan melampaui nilai acuan BER.

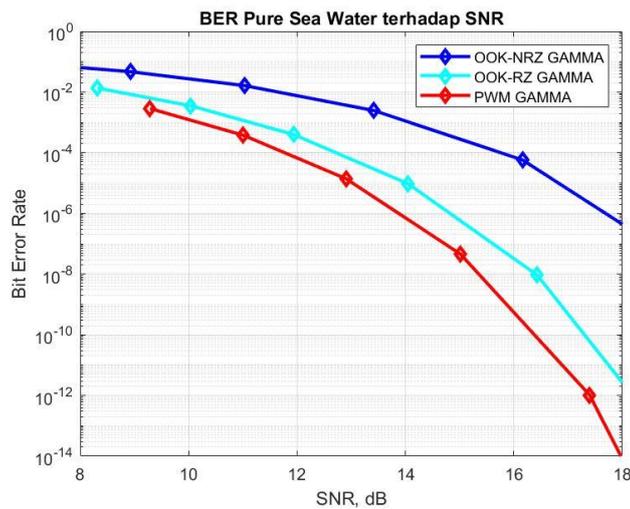
4.2.2 SNR terhadap Jarak pada *Pure Sea Water*



Gambar 10. Grafik SNR terhadap jarak pada *pure sea water*

Pada Gambar 4.3 menunjukkan hasil kinerja SNR terhadap jarak di media *pure sea water*. Pada turbulensi rendah dengan jarak 50 m, didapatkan nilai SNR pada OOK-NRZ Gamma sebesar 17,673 dB, SNR pada OOK-RZ Gamma sebesar 20,6833 dB, dan SNR pada PWM Gamma sebesar 21,6524 dB. Pada turbulensi sedang dengan jarak 60 m, didapatkan nilai SNR pada OOK-NRZ Gamma sebesar 14,4845 dB, SNR pada OOK-RZ Gamma sebesar 17,4948 dB dan SNR pada PWM Gamma sebesar 18,4639 dB. Sedangkan pada turbulensi tinggi dengan jarak 110 m, didapatkan nilai SNR pada OOK-NRZ Gamma sebesar 3,8483 dB, SNR pada OOK-RZ Gamma sebesar 6,8586 dB dan SNR pada PWM Gamma sebesar 7,8277 dB. Berdasarkan Gambar 4.3 dapat disimpulkan bahwa semakin jauh jarak *transmitter* dan *receiver* maka nilai SNR akan semakin kecil sehingga akan semakin buruk kualitas dari sistem komunikasi.

4.2.3 BER terhadap SNR pada *Pure Sea Water*



Gambar 11. Grafik BER terhadap SNR pada *pure sea water*

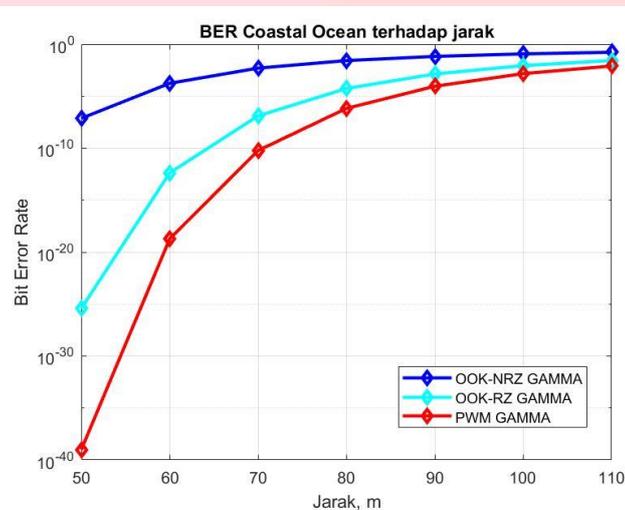
Pada Gambar 4.4 menunjukkan perbandingan BER terhadap SNR di media *pure sea water*. Agar dapat mencapai nilai acuan BER $\leq 10^{-3}$ maka modulasi OOK-NRZ Gamma memerlukan SNR sebesar 14,4845 dB, OOK-RZ Gamma sebesar 12,4546 dB, dan PWM Gamma sebesar 11,3563 dB.

Hal ini menunjukkan bahwa PWM Gamma membutuhkan paling sedikit SNR untuk mendapatkan BER yang diinginkan lalu diikuti dengan OOK-RZ Gamma dan OOK-NRZ Gamma. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, dapat diketahui modulasi yang paling efisien adalah modulasi yang memiliki nilai BER paling kecil dan SNR yang paing besar. PWM Gamma adalah modulasi yang memiliki nilai BER paling kecil dan SNR paling besar sementara OOK-NRZ Gamma merupakan modulasi yang memiliki nilai BER paling besar dan SNR yang paling kecil.

Dari hasil simulasi skenario I di media *pure sea water* dapat disimpulkan bahwa jarak antara *transmitter* dan *receiver* berpengaruh dalam penentuan kualitas BER modulasi yang disimulasikan. Hal ini dikarenakan semakin jauh jarak, nilai SNR akan semakin menurun karena bergantung pada derau yang dihasilkan tiap jaraknya sehingga nilai BER akan semakin besar.

4.3 Hasil Analisis Skenario II

4.3.1 BER terhadap Jarak pada *Coastal Ocean*

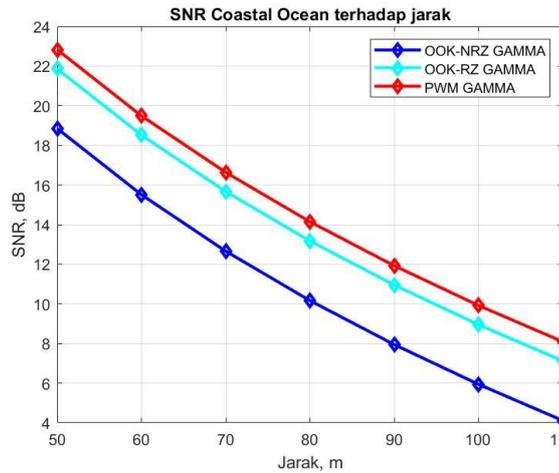


Gambar 12. Grafik BER terhadap jarak pada *coastal ocean*

Pada Gambar 4.5 menunjukkan hasil kinerja BER terhadap jarak di media *coastal ocean*. Pada turbulensi rendah dengan jarak 50 m diperoleh BER OOK-NRZ Gamma sebesar $6,9454 \times 10^{-6}$, BER OOK-RZ Gamma sebesar $1,7938 \times 10^{-18}$ dan BER Gamma PWM sebesar $8,559 \times 10^{-28}$. Pada turbulensi sedang dengan jarak 60 m, diperoleh BER OOK-NRZ Gamma sebesar 0,0015, BER OOK-RZ Gamma sebesar $1,2984 \times 10^{-9}$, BER PWM Gamma sebesar $4,8818 \times 10^{-14}$. Sedangkan pada turbulensi tinggi dengan jarak 110 m diperoleh BER OOK-NRZ Gamma sebesar 0,2037, BER OOK-RZ Gamma sebesar 0,0488, BER PWM Gamma sebesar 0,0192.

Sesuai dengan nilai BER acuan $\leq 10^{-3}$ sehingga dapat dianalisis bahwa semakin jauh jarak *transmitter* dan *receiver* serta semakin tinggi tingkat turbulensinya mengakibatkan nilai BER yang dihasilkan akan semakin besar sehingga kualitas dari sistem komunikasi akan semakin buruk. Pada skenario ini, kinerja BER PWM Gamma bernilai baik pada jarak maksimal 90 m sementara BER OOK-RZ Gamma bernilai baik pada jarak maksimal 80 m dan BER OOK-NRZ Gamma bernilai baik pada jarak maksimal 50 m karena jika melebihi dari jarak tersebut nilai BER menjadi semakin besar dan melampaui nilai acuan BER.

4.3.2 SNR terhadap Jarak pada Coastal Ocean

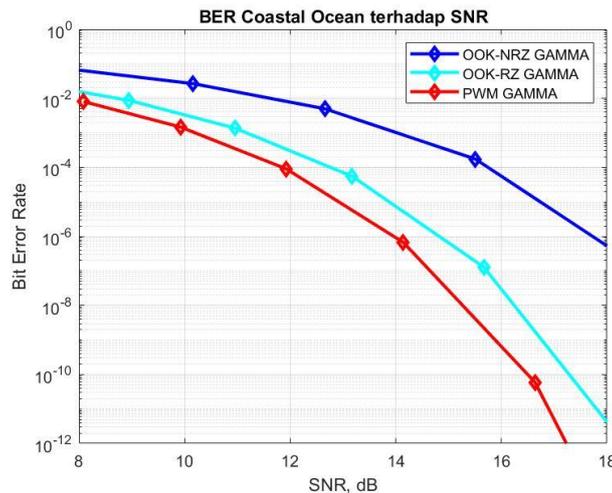


Gambar 13. Grafik SNR terhadap jarak pada coastal ocean

Pada Gambar 4.6 menunjukkan hasil kinerja SNR terhadap jarak di media coastal ocean. Pada turbulensi rendah dengan jarak 50 m, diperoleh nilai SNR pada OOK-NRZ Gamma sebesar 17,1979 dB, SNR pada OOK-RZ Gamma sebesar 20,2082 dB, dan SNR pada PWM Gamma sebesar 21,773 dB. Pada turbulensi sedang dengan jarak 60 m, diperoleh nilai SNR pada OOK-NRZ Gamma sebesar 13,9144 dB, SNR pada OOK-RZ Gamma sebesar 16,9247 dB dan SNR pada PWM Gamma sebesar 17,8938 dB. Sedangkan pada turbulensi tinggi dengan jarak 110 m, diperoleh nilai SNR pada OOK-NRZ Gamma sebesar 2,8032 dB, SNR pada OOK-RZ Gamma sebesar 5,8135 dB dan SNR pada PWM Gamma sebesar 6,7826 dB.

Berdasarkan Gambar 4.6 dapat disimpulkan bahwa semakin jauh jarak transmitter dan receiver maka nilai SNR akan semakin kecil sehingga akan semakin buruk kualitas dari sistem komunikasi begitupun sebaliknya, semakin dekat jarak trasnmmitter dan receiver maka nilai SNR akan semakin besar sehingga akan semakin baik kualitas komunikasinya.

4.3.3 BER terhadap SNR pada Coastal Ocean



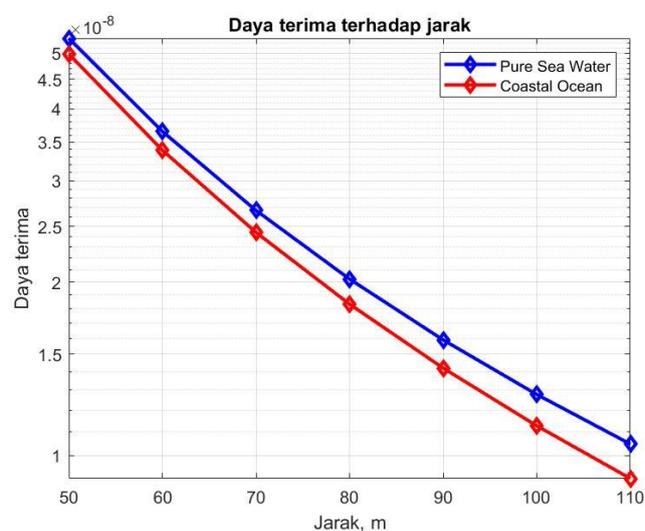
Gambar 14. Grafik BER terhadap SNR pada coastal ocean

Pada Gambar 4.7 menunjukkan perbandingan BER terhadap SNR di media coastal ocean. Agar dapat mencapai nilai acuan BER ≤ 10⁻³ maka modulasi OOK-NRZ Gamma memerlukan SNR

sebesar 17,1979 dB, OOK-RZ Gamma sebesar 11,6945 dB, dan PWM Gamma sebesar 10,5012 dB. Hal ini menunjukkan bahwa PWM Gamma membutuhkan paling sedikit SNR untuk mendapatkan BER yang diinginkan lalu diikuti dengan OOK-RZ Gamma dan OOK-NRZ Gamma. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, dapat diketahui modulasi yang paling efisien adalah modulasi yang memiliki nilai BER paling kecil dan SNR yang paing besar. PWM Gamma adalah modulasi yang memiliki nilai BER paling kecil dan SNR paling besar sementara OOK-NRZ Gamma merupakan modulasi yang memiliki nilai BER paling besar dan SNR yang paling kecil.

Dari hasil simulasi skenario II di media *coastal ocean* dapat disimpulkan bahwa jarak antara *transmitter* dan *receiver* berpengaruh dalam penentuan kualitas BER modulasi yang disimulasikan. Hal ini dikarenakan semakin jauh jarak, nilai SNR akan semakin menurun karena bergantung pada derau yang dihasilkan tiap jaraknya sehingga nilai BER akan semakin besar.

4.4 Daya Terima terhadap Jarak Skenario I dan Skenario II



Gambar 15. Daya terima terhadap jarak

Gambar 4.8 merupakan hasil perbandingan kedua skenario yang ditinjau dari daya terima terhadap jarak. Pada grafik berwarna biru yang merupakan media *pure sea water* diperoleh daya terima maksimum sebesar $5,4362 \times 10^{-8}$ dibawah turbulensi rendah dengan jarak 50 m dan daya terima minimum sebesar $1,1068 \times 10^{-8}$ W dibawah turbulensi tinggi dengan jarak 110 m.

Sedangkan pada grafik berwarna merah yang merupakan media *coastal ocean* diperoleh daya terima maksimum sebesar $5,1469 \times 10^{-8}$ W pada dibawah turbulensi rendah dengan jarak 50 m dan diperoleh daya terima minimum sebesar $9,8131 \times 10^{-9}$ W dibawah turbulensi tinggi dengan jarak 110 m. Daya terima pada skenario I relatif lebih besar karena disebabkan oleh pengaruh dari absorpsi, *scattering*, dan redaman pada *pure sea water* yang lebih rendah dibandingkan dengan *coastal ocean*. Dari hasil perbandingan daya terima terhadap jarak tersebut, dapat membuktikan bahwa semakin jauh jarak antara *transmitter* dengan *receiver* maka semakin kecil daya yang akan diterima oleh fotodetektor begitu pun sebaliknya, semakin dekat jarak antara *transmitter* dengan *receiver* maka semakin besar daya yang akan diterima oleh fotodetektor.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dari dua skenario yang telah dijalankan maka dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Ditinjau dari kinerja BER terhadap jarak pada skenario I dan skenario II didapatkan hasil performansi BER paling baik berada pada jarak 50 m dengan modulasi PWM Gamma. Hal ini disebabkan karena semakin dekat jarak antara *transmitter* dan *receiver* maka semakin rendah tingkat turbulensinya yang mengakibatkan nilai BER semakin kecil sehingga kinerja dari sistem komunikasi akan semakin bagus. Begitu pun sebaliknya, semakin jauh jarak *transmitter* dan *receiver* maka semakin tinggi nilai turbulensinya yang mengakibatkan nilai BER semakin besar sehingga kinerja dari sistem komunikasi akan semakin buruk.
2. Ditinjau dari nilai SNR terhadap jarak pada skenario I dan skenario II dapat disimpulkan bahwa semakin jauh jarak *transmitter* dan *receiver*, maka nilai SNR akan semakin menurun sehingga nilai BER akan semakin besar dan mengakibatkan kualitas sistem komunikasi menjadi buruk. Hal ini dibuktikan dari hasil SNR pada jarak 50 m untuk *pure sea water* SNR pada OOK-NRZ Gamma sebesar 17,671 dB, SNR pada OOK-RZ Gamma sebesar 20,6833 dB, dan SNR pada PWM Gamma sebesar 21,6524 dB. Sedangkan hasil SNR pada jarak 60 m di *coastal ocean* diperoleh SNR pada OOK-NRZ Gamma sebesar 13,909 dB, SNR pada OOK-RZ Gamma sebesar 16,9247 dB, dan SNR pada PWM Gamma sebesar 17,8938 dB.
3. Ditinjau dari perbandingan daya terima terhadap jarak pada skenario I dan skenario II diperoleh daya terima maksimum pada *pure sea water* diperoleh sebesar $5,4362 \times 10^{-8}$ W pada jarak *transmitter* dan *receiver* sejauh 50 m dan daya terima minimum sebesar $1,1068 \times 10^{-8}$ W pada jarak *transmitter* dan *receiver* sejauh 110 m. Sedangkan pada media *coastal ocean*, daya terima maksimum yang diperoleh sebesar $5,1469 \times 10^{-8}$ W pada jarak *transmitter* dan *receiver* sejauh 50 m dan daya terima minimum sebesar $9,8131 \times 10^{-9}$ W pada jarak *transmitter* dan *receiver* sejauh 110 m. Terdapat selisih daya terima diantara kedua skenario tersebut yang disebabkan oleh pengaruh dari absorpsi, *scattering*, dan redaman pada *pure sea water* lebih rendah dibandingkan dengan *coastal ocean*. Hal ini juga dapat membuktikan bahwa semakin jauh jarak antara *transmitter* dan *receiver* maka semakin kecil daya yang akan diterima oleh fotodetektor.

5.2 Saran

Diharapkan untuk penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan saran yang dapat penulis usulkan yaitu.

1. Menghitung *Q Factor* untuk mengetahui kualitas dari sistem komunikasi yang disimulasikan secara lebih akurat.
2. Menggunakan *channel model* berbeda seperti Monte Carlo atau Distribusi Log Normal.
3. Menggunakan teknik modulasi berbeda seperti PPM.
4. Menggunakan media air yang berbeda seperti *turbid harbor* atau *clear ocean*.

Referensi:

- [1] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 57–96, 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2603518.
- [2] M. Saadi, L. Wattisuttikulij, Y. Zhao, and P. Sangwongngam, "Visible Light Communication : Opportunities , Challenges and Channel Models ISSN :"
- [3] Y. Kono, "BER Analysis of Lognormal and Gamma-Gamma Turbulence Channel under different modulation Techniques for FSO System," *2019 3rd Int. Conf. Trends Electron. Informatics*, no. Icoei, pp. 1385–1388, 2019.
- [4] M. Ali and A. Ali, "Characteristics of Optical Channel for Underwater Optical Wireless Communication System," *IOSR J. Electr. Electron. Eng. Ver. I*, vol. 10, no. 2, pp. 2278–1676, 2016, doi: 10.9790/1676-10210109.
- [5] T. Adiono, S. Fuada, and S. Harimurti, "Bandwidth Budget Analysis for Visible Light Communication Systems utilizing Commercially Available Components," *Int. Conf. Electr. Electron. Eng.*, vol. 126, no. 126, pp. 1375–1380, 2017.
- [6] S. R. Z. Ghassemlooy, W. Papoola, *Optical Wireless Communications System and Channel Modelling with MATLAB*. 1396.
- [7] V. Guerra, C. Quintana, J. Rufo, J. Rabadan, and R. Perez-Jimenez, "Parallelization of a Monte Carlo Ray Tracing Algorithm for Channel Modelling in UWOC," *Procedia Technol.*, vol. 7, no. April, pp. 11–19, 2013, doi: 10.1016/j.protcy.2013.04.002.
- [8] K. J. Richards, "Marine turbulence," *Earth-Science Rev.*, vol. 17, no. 3, pp. 283–284, 1981, doi: 10.1016/0012-8252(81)90030-1.