

ANALISIS KINERJA SISTEM KOMUNIKASI CAHAYA TAMPAK DIBAWAH AIR DENGAN *OPTICAL CONCENTRATOR*

PERFORMANCE ANALYSIS OPTICAL CONCENTRATOR ON UNDERWATER VISIBLE LIGHT COMMUNICATION

Muhammad Fauzan¹, Kris Sujatmoko, S.T., M.T.², Rizky Satria S.T., M.T.³

^{1,2,3} Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹fauzanspi@student.telkomuniversitygmail.ac.id

²krissujatmoko@telkomuniversity.ac.id ³satria.riz2007@gmail.com

Abstrak

UVLC memiliki beberapa tantangan, yaitu nilai eksponensial koefisien atenuasi air dan keterbatasan *bandwidth* pada sumber cahaya. Tugas Akhir ini mempertimbangkan penggunaan *optical concentrator* pada *photodetector* yang berfungsi untuk memusatkan dan mengumpulkan cahaya yang masuk ke *receiver* sehingga semakin banyak daya yang diterima dalam jangkauan komunikasi.

Tugas Akhir ini menggunakan dua skenario penelitian diantaranya, skenario I menganalisis kinerja sistem UVLC tanpa penambahan *optical concentrator* menggunakan dua jenis modulasi *On Off Keying* (OOK), yakni *OOK - Non Return to Zero* (OOK-NRZ) dan *OOK-Return to Zero* (OOK-RZ), sedangkan, skenario II membandingkan kinerja sistem UVLC dengan dan tanpa penambahan *optical concentrator*. Kedua skenario tersebut akan diuji berdasarkan parameter jarak, daya terima, *Signal to Noise Ratio* (SNR) terhadap *Bit Error Rate* (BER).

Tugas Akhir ini menghasilkan analisis bahwa penambahan *optical concentrator* pada skenario II menghasilkan daya terima dan nilai SNR yang lebih baik daripada skenario I. Hal ini terbukti ketika dengan menggunakan *optical concentrator* pada *photodetector* memberikan peningkatan daya terima sebesar 165 % dan memberikan peningkatan nilai SNR sebesar 59 %. Dapat disimpulkan bahwa penambahan *optical concentrator* menghasilkan kinerja yang lebih baik

Kata kunci: *UVLC, Optical Concentrator, OOK-NRZ, OOK-RZ, SNR, BER.*

Abstract

UVLC has several challenges, i.e. the exponential value of the water attenuation coefficient and the limited bandwidth of the light source. This thesis considered used of *optical concentrator* on *photodetector* to focus and collect light entering the receiver, therefore the received power is increasing within the communication range.

This thesis uses two scenarios to evaluate the performance evaluation. Scenario I analyzes the performance of the UVLC system without the optical concentrator on two types of On Off Keying (OOK) modulation, namely OOK - Non Return to Zero (OOK-NRZ) and OOK-Return to Zero (OOK-RZ), without the addition of an optical concentrator. Scenario II compares system performance UVLC with the addition of an optical concentrator. Both scenarios will be tested based on distance, Received Power, Signal to Noise Ratio (SNR) and Bit Error Rate (BER) parameters.

The result confirmed the addition of optical concentrator has better performance by proving that Received Power and SNR value that obtained in scenario II greater than in the scenario I. This is proven when using an optical concentrator on the photodetector gives an increase in received power of 165% and gives an increase in the value of the SNR of 59%. It can be concluded that the addition of optical concentrator results in better performance.

Keywords: *UVLC, Optical Concentrator, OOK-NRZ, OOK-RZ, SNR, BER.*

1. Pendahuluan

Dalam teknologi komunikasi nirkabel penggunaan frekuensi radio masih sering digunakan untuk mengirimkan sinyal informasi dan kegunaan spektrum frekuensi radio yang besar menyebabkan trafik komunikasi semakin padat, maka diperlukan teknologi alternatif lain yang salah satunya

teknologi *Visible Light Communication* (VLC) yang dimana adalah salah satu teknologi sistem komunikasi yang menggunakan gelombang elektromagnetik yang bekerja pada spektrum cahaya tampak.

Dengan semakin berkembangnya teknologi VLC, maka dilakukan penelitian pengiriman informasi menggunakan sistem komunikasi VLC dibawah air atau yang diberi nama *Underwater Visible Light Communication* (UVLC). Berbeda dengan VLC dalam ruangan dan media ruang bebas, UVLC memiliki beberapa tantangan yaitu nilai eksponensial koefisien atenuasi air dan keterbatasan bandwidth pada sumber cahaya [1]. UVLC merupakan teknologi *Underwater Wireless Optical Communication* (UWOC) yang menggunakan pita tampak pada spektrum elektromagnetik (450 - 550 nm), air relatif transparan terhadap cahaya dan absorpsi membutuhkan nilai minimumnya [2]. Terdapat redaman cahaya pada UVLC oleh air yang disebabkan oleh hamburan dan absorpsi, yang mempengaruhi amplitudo, fase, dan sudut tembak cahaya. Ini merupakan mekanisme penyerapan utama di laut dan sangat bervariasi dengan panjang gelombang [3].

Light Emitting Diode (LED) dapat digunakan sebagai sumber cahaya pada UVLC untuk kecepatan data nirkabel dibawah air. Terdapat dua jenis *photodetector* pada teknologi optik yaitu, *Positive Intrinsic Negative Photodetector* (PIN-PD) dan *Avalanche Photodetector* (APD). Penelitian H.Al Hajjar mempresentasikan *concentrator* jenis *Compound Parabolic Concentrator* (CPC) [4]. Menyimpulkan bahwa *optical concentrator* merupakan elemen kunci dalam sistem *optical wireless communication*. Penelitian selanjutnya yang dilakukan Rahmat Mulyawan dan lainnya dengan judul *A Comparative Study of Optical Concentrator for Visible Light Communications* [5]. Menyatakan bahwa bertambahnya ketertarikan terhadap VLC akan meningkatkan kebutuhan akan pengumpul cahaya dengan gain yang tinggi serta *Field of View* (FoV) yang luas.

Pada Tugas Akhir ini akan mengamati perbedaan kualitas transmisi data pada *photodetector* murni dan *photodetector* yang ditambahkan *optical concentrator* pada teknologi UVLC. Hal-hal tersebut bertujuan untuk mengetahui seberapa pengaruh peran *optical concentrator* jika ditambahkan pada *photodetector* guna meningkatkan efektifitas dan efisiensi transmisi data.

2. Dasar Teori

2.1. Underwater Visible Light Communication

Underwater Visible Light Communication (UVLC) atau komunikasi cahaya tampak dibawah air merupakan teknologi komunikasi yang kompetitif untuk diterapkan dibawah air. Sistem ini dapat membawa informasi dengan modulasi cahaya tampak dibawah air. Hamburan air laut disebabkan oleh partikel organik dan anorganik yang ada didalam air. Faktor lain yang menyebabkan hamburan dalam air laut adalah suhu, tekanan, salinitas karena factor tersebut dapat mengubah indeks bias yang terbentuk pada batas optik dan dengan demikian menyimpang dari jalur propagasi[6]. Hamburan memiliki efek yang berbeda pada jenis air. Hamburan pada air laut murni dideskripsikan oleh hamburan Rayleigh karena lebih jelas pada panjang gelombang yang lebih pendek karena adanya kandungan garam dan ion didalamnya [7]. Sama halnya seperti pada sistem komunikasi lain, pada sistem UVLC juga terdapat faktor loss propagasi didalamnya. Faktor loss propagasi diformulasikan sebagai berikut.

$$Lp(\lambda, z) = \exp^{-c(\lambda)z}$$

Dengan $c(\lambda)$ adalah nilai beam extinction coefficient, λ merupakan panjang gelombang cahaya tampak yang digunakan dan z adalah jarak. Dari persamaan (2.1) nilai loss propagasi yang terjadi dipengaruhi oleh *beam extinction coefficient* yang dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

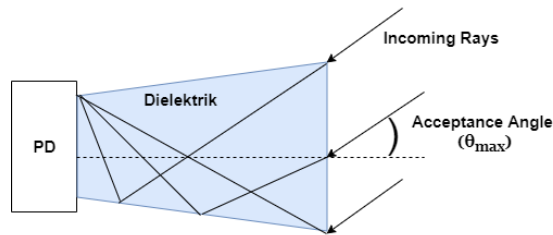
$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda),$$

Dengan $a(\lambda)$ merupakan koefisien absorpsi pada air laut sementara $b(\lambda)$ merupakan nilai koefisien hamburan *Rayleigh* air laut jernih. Sementara nilai koefisien hamburan *Rayleigh* air laut jernih. Sementara koefisien hamburan *Rayleigh* direpresentasikan dengan persamaan berikut,

$$b(\lambda) = 0,005826 \left(\frac{400}{\lambda} \right)^{4,322}$$

2.1.1. Optical Concentrator

Receiver yang ideal memiliki *Field of View* (FoV) dan daerah deteksi yang luas, serta detector yang kecil[8]. Semakin luas daerah deteksi, sinyal optik yang dikumpulkan semakin banyak. *Concentrator* adalah suatu elemen optik pasif yang meningkatkan area detektor yang efektif tanpa mempengaruhi parameter lain pada *photodiode*.



Gambar 2.1. *Compound Parabolic Concentrator*.

Gain dari *optical concentrator* berkaitan dengan besar indeks refraktif *concentrator* (n) dan sudut FoV yang dapat dirumuskan

$$G_{con} = \frac{n^2}{\sin^2(\text{FoV})}$$

2.2. Photodetector

Photodetector adalah komponen utama dalam *receiver* pada system VLC, yang bertugas untuk konversi sinyal cahaya menjadi listrik. Contoh cahaya yang dapat diterima oleh fotodiode yaitu cahaya tampak, inframerah, ultraviolet, dan sinar-X [9].

2.3. On-Off Keying

Modulasi digital yang paling banyak digunakan adalah *On-Off Keying* (OOK) yang termasuk kedalam jenis *Amplitude Shift Keying* (ASK), terutama pada *Optical Wireless Communication* (OWC). Hal ini disebabkan karena sederhananya implementasi OOK [10]. Skema modulasi OOK layaknya seperti saklar yang dimana pada skema OOK, bit 1 melambungkan adanya pulsa optik pada suatu interval, atau bahwa sumber cahaya nyala (on), sedangkan bit 0 melambungkan ketiadaan pulsa optik atau sumber cahaya mati (off). Terdapat dua format modulasi OOK yaitu modulasi *On-Off Keying Non Return to Zero* (OOK-NRZ) dan *On-Off Keying Return to Zero* (OOK-RZ).

Format NRZ membuktikan bahwa untuk bit 1 menempati seluruh interval bit dan tidak ada pulsa yang digunakan untuk bit 0. Format NRZ sinyalnya menempati bandwidth yang lebih kecil, dan NRZ tidak memiliki error monitoring atau kemampuan koreksi. Pada sistem RZ menunjukkan bahwa pada bit 1 menempati sebagian periode bit, dan tidak ada pulsa yang digunakan pada bit 0.

2.4. Parameter Performa Sistem

2.4.1. Jarak Receiver terhadap Transmitter

Pada suatu sistem komunikasi cahaya tampak, semakin jauh jarak *receiver* terhadap *transmitter* atau sumber cahaya, maka akan semakin kecil intensitas cahaya yang diterima oleh *photodetector*. Begitu juga sebaliknya, semakin dekat jarak *receiver* terhadap *transmitter* maka akan semakin besar cahaya yang diterima oleh *photodetector*, sehingga menyebabkan daya terima dalam sistem UVLC akan semakin besar. Besar nilai jarak antara *receiver* dan *transmitter* (d) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$d = \sqrt{(X_r - X_t)^2 + (Y_r - Y_t)^2 + (Z_r - Z_t)^2}$$

2.4.2. Daya Terima

Pada suatu sistem komunikasi terdapat daya dikirim dari *transmitter* dan diterima *receiver*, daya yang diterima *receiver* disebut *receiver power*. *Receiver power* adalah besar nilai yang diterima dari sinyal *input* yang mengalami attenuasi. *Receiver power* dapat direpresentasikan dengan persamaan sebagai berikut.

$$PR_x = P_{s,in} - \alpha_{Total}$$

Dengan $P_{s,in}$ adalah sinyal input, dan α_{Total} adalah nilai redaman attenuasi. *Receiver power* dalam keadaan LOS direpresentasikan sebagai berikut

$$PR_x = P_T \eta_T \eta_R L_P H$$

Dengan P_T adalah daya optik *transmitter* rata-rata, η_T adalah efisiensi optik *transmitter* dan η_R adalah efisiensi optik *receiver*, L_P adalah *loss* propagasi pada air laut (*pure water*), dan H adalah nilai kanal.

2.4.3. Bit Error Rate

Bit Error Rate (BER) adalah perbandingan jumlah bit kesalahan relatif terhadap jumlah total bit yang diterima dalam suatu transmisi [11]. Semakin kecil BER yang dihasilkan pada suatu sistem digital, maka kualitas transmisi yang dihasilkan akan semakin bagus. Untuk komunikasi cahaya tampak atau *Visible Light Communication* (VLC) *threshold* nilai BER yang baik sebesar $<10^{-3}$ [12]. BER memiliki hubungan dengan *Signal to Noise Ratio* (SNR). Persamaan SNR dapat dituliskan sebagai berikut.

$$SNR = \frac{(P_{Rx} \cdot R \cdot M)^2}{2q \cdot P_{Rx} \cdot R \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot B_e + \frac{4K_B \cdot T \cdot B_e}{R_L}}$$

P adalah daya yang diterima *photodetector* (Watt), R adalah responsivitas (A/W), M adalah factor multiplikasi, q adalah *electron charge* ($1,69 \times 10^{-19}$ C), $F(M)$ adalah *Noise Figure* yang merupakan fungsi terhadap factor multiplikasi, B_e adalah Konstanta *Boltzman* ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K) T adalah suhu ruangan (300°K), dan R adalah Resistansi (Ω). Nilai BER untuk modulasi OOK-NRZ dapat ditentukan dengan persamaan berikut,

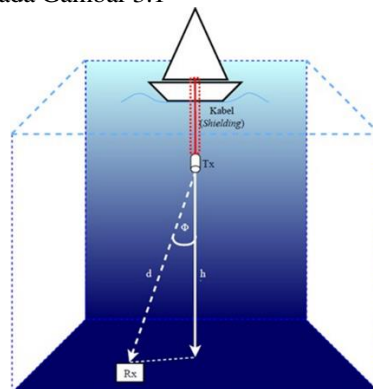
$$BER_{OOK-NRZ} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{SNR}\right)$$

$$BER_{OOK-RZ} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \sqrt{SNR}\right)$$

3. Pembasan

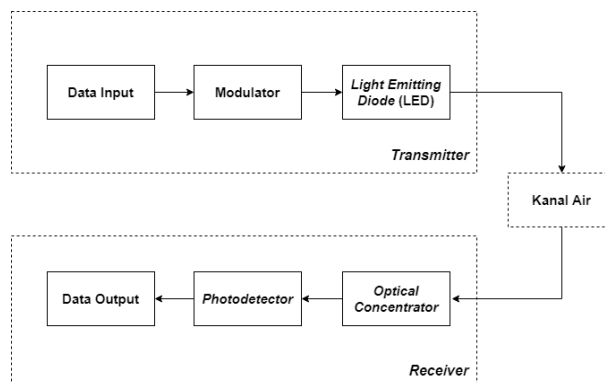
3.1. Desain Sistem

Pada Bab ini akan membahas mengenai perancangan simulasi yang digunakan untuk komunikasi antara kapal laut dengan penyelam menggunakan lampu LED yang dimodulasi oleh format *On Off Keying- Non Return to Zero* (OOK-NRZ) dan *On Off Keying-Return to Zero* (OOK-RZ) rancangan dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Desain Simulasi sistem

3.2. Blok Diagram



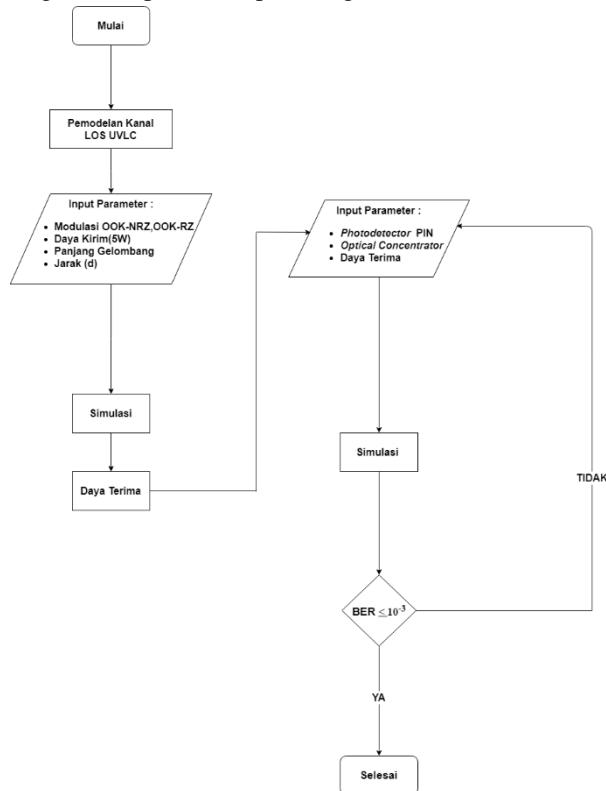
Gambar 3.1. Blok diagram *Underwater Visible Light Communication*.

Gambar 3.1 merupakan blok diagram UVLC pada Tugas Akhir ini. Yang diawali oleh arus listrik dan kode biner atau sinyal digital yang masuk ke modulator. Di dalam modulator sinyal

input ditumpangkan ke sinyal pembawa menggunakan modulasi *On Off Keying Non-Return to Zero* (OOK NRZ) dan *On Off Keying Return to Zero* (OOK RZ). Sinyal yang telah dimodulasi kemudian akan dipancarkan oleh *Light Emitting Diode* (LED). Kemudian akan merambat melalui kanal air laut. Tugas Akhir ini menggunakan jenis kanal *Line of Sight* (LOS). Setelah melalui kanal, cahaya masuk ke *optical concentrator* yang berfungsi untuk mengumpulkan dan memusatkan cahaya agar sinyal yang diterima oleh *photodetector* optimal. Cahaya yang sudah terkumpul masuk ke *photodetector* dan diubah kembali menjadi arus listrik hingga berakhir di perangkat user

3.2. Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan diagram alir penelitian pada Tugas Akhir ini.



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian system UVLC

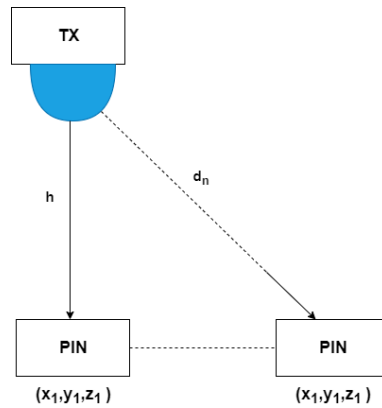
Gambar 3.2 menjabarkan alur dari penelitian Tugas Akhir ini. Blok *process* hingga blok data, merancang simulasi sistem komunikasi UVLC. Kemudian memasukkan beberapa parameter input seperti jenis modulasi, daya kirim, panjang gelombang serta jarak *transmitter – receiver*. Teknik modulasi yang digunakan adalah modulasi OOK-NRZ dan OOK-RZ. Daya kirim LED sebagai sumber *transmitter*. Menggunakan satu panjang gelombang cahaya tampak dari LED. Serta jarak *transmitter – receiver* berdasarkan koordinat posisi *receiver* awal (x,y,z) terhadap *transmitter* yaitu (0,0,0) hingga (5,5,0). Setelah itu semua parameter diinputkan secara bergantian, simulasi dilakukan menggunakan *software*.

Blok *process* hingga blok *process*, setelah disimulasi didapatkan nilai daya terima dari setiap koordinat posisi *receiver* terhadap *transmitter* yang terpancar oleh LED. Setelah itu beralih ke blok *process*, dimana data daya terima dari simulasi akan menjadi input pada proses selanjutnya

Blok data hingga blok *process*, data nilai daya terima yang telah didapatkan menjadi input untuk simulasi berikutnya. Untuk simulasi kedua ada tiga parameter input, *photodetector* PIN, *optical concentrator*, serta nilai daya terima.

3.3. Skenario I

Pada simulasi pertama seperti pada **Gambar 3.2**, ada dua jenis modulasi yang diuji coba, yaitu OOK-NRZ dan OOK-RZ. Sebelum memulai simulasi, parameter yang dimasukkan bukan hanya modulasi, tetapi daya kirim juga turut diperhitungkan. kemudian simulasi berjalan sampai nilai BER yang diinginkan tercapai.

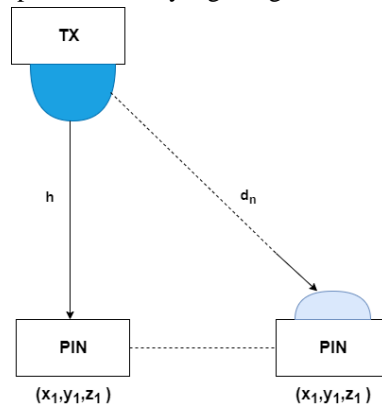


Gambar 3.2 Set-up skenario I

Jika belum tercapai, nilai-nilai parameter akan diubah lagi. *Photodetector* yang digunakan pada skenario I adalah *photodetector* yang murni tanpa tambahan *optical concentrator*. Pada skenario I, untuk mencari nilai parameter pengujian yaitu, jarak *receiver* dari *transmitter*, *Signal to Noise Ratio* (SNR), dan *Bit Error Rate* (BER).

3.4. Skenario II

Dalam skenario II, pada *photodetector* akan ditambahkan dengan *optical concentrator* seperti pada Gambar 3.3. parameter input yang diinputkan sama dengan pada skenario I untuk nilai BER. Kemudian simulasi berjalan sampai nilai BER yang diinginkan tercapai.

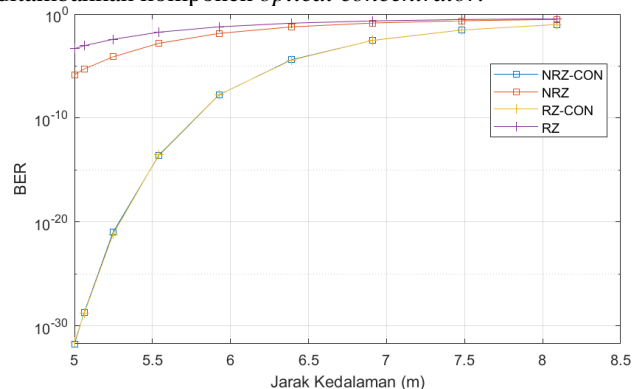


Gambar 3.3 Set-up skenario II

Jika belum, maka nilai-nilai parameter akan diubah lagi. Dari skenario I, dilakukan beberapa perhitungan untuk mendapatkan nilai parameter uji yaitu, *Signal to Noise Ratio* (SNR), dan *Bit Error Rate* (BER).

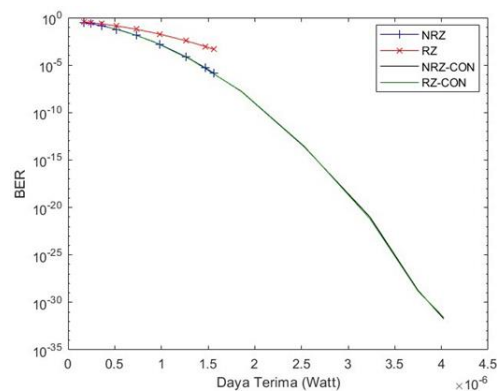
4. Analisis Skenario I dan Skenario II

Pada bab ini membahas analisis dari hasil skenario I dan skenario II yang dimana pada hasil skenario I simulasi berupa jarak, daya terima, dan *Signal to Noise Ratio* (SNR) yang akan dihubungkan dengan nilai $BER \leq 10^{-3}$ dalam kondisi menggunakan *photodetector* murni. Sedangkan pada hasil skenario II adalah hasil yang sama seperti skenario I yang berbeda hanya pada *photodetector* akan ditambahkan komponen *optical concentrator*.



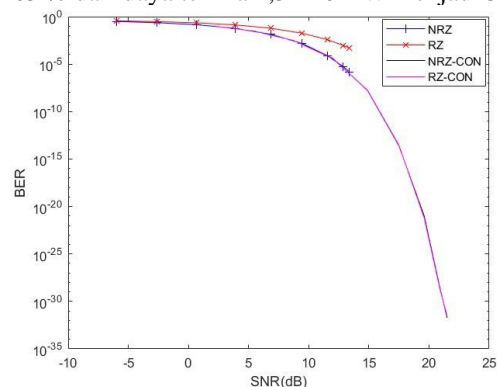
Gambar 4.1 Perbandingan jarak *receiver* dari *transmitter* terhadap BER pada dua skenario

Pada **Gambar 4.1** menunjukkan jarak antara *receiver* dan *transmitter* terhadap nilai *Bit Error Rate* (BER). Pada kondisi menggunakan *photodetector* murni, jarak LED dengan *photodetector* menggunakan modulasi OOK-NRZ dengan nilai BER 10^{-3} adalah 5,54 m. Sedangkan jarak antar LED dengan *photodetector* menggunakan modulasi OOK-RZ dengan nilai BER 10^{-3} adalah 5,247 m. Sehingga modulasi OOK-NRZ lebih baik daripada modulasi OOK-RZ pada *photodetector* murni yang memiliki selisih jarak sebesar Sedangkan pada kondisi *photodetector* yang ditambahkan *optical concentrator*, jarak LED dengan *photodetector* menggunakan modulasi OOK-NRZ dengan nilai BER 10^{-3} adalah 6,912 m. Sedangkan jarak antar LED dengan *photodetector* menggunakan modulasi OOK-RZ dengan nilai BER 10^{-3} adalah 6,389 m. Sehingga modulasi OOK-NRZ menggunakan *optical concentrator* pada *photodetector* mengalami peningkatan jarak 24,7 % dari jarak 5,54 meter menjadi 6,912 m. Sedangkan pada modulasi OOK-RZ menggunakan *optical concentrator* pada *photodetector* mengalami peningkatan 21,7 % dari jarak 5,247 meter menjadi 6,389 meter.



Gambar 4.2 Perbandingan daya terima terhadap BER pada dua skenario

Pada Gambar 4.2 menunjukkan perbandingan daya terima terhadap BER pada kondisi menggunakan *photodetector* murni dan *photodetector* yang ditambahkan *optical concentrator*. Pada kondisi *photodetector* murni, menghasilkan daya terima sebesar $1,5 \times 10^{-6}$ W (-58dBw), dan menghasilkan nilai BER OOK-NRZ dan OOK-RZ sebesar $1,3 \times 10^{-6}$ dan $4,5 \times 10^{-4}$. Sedangkan pada kondisi *photodetector* yang ditambahkan *optical concentrator*, daya terima sebesar $3,975 \times 10^{-6}$ W (-54 dBw) dan menghasilkan nilai BER OOK-NRZ dan OOK-RZ sebesar $3,36 \times 10^{-32}$ dan $4,7 \times 10^{-17}$. Sehingga dengan menggunakan *optical concentrator* pada *photodetector* memberikan peningkatan daya terima sebesar 165 % dari daya terima $1,5 \times 10^{-6}$ W menjadi $3,975 \times 10^{-6}$ W.



Gambar 4.3 Perbandingan SNR terhadap BER pada dua skenario

Gambar 4.9. menunjukkan perbandingan nilai SNR terhadap nilai BER pada kondisi menggunakan *photodetector* murni dan *photodetector* yang ditambahkan *optical concentrator*. Pada kondisi *photodetector* murni menggunakan modulasi OOK-NRZ dan OOK-RZ menghasilkan nilai SNR sebesar 13,43 dB dan nilai BER sebesar $1,35 \times 10^{-6}$ dan $4,5 \times 10^{-4}$. Sedangkan pada kondisi *photodetector* yang ditambahkan *optical concentrator* menggunakan modulasi OOK-NRZ dan OOK-RZ, menghasilkan nilai SNR 21,4 dB dan menghasilkan nilai BER sebesar $3,36 \times 10^{-32}$ dan $4,7 \times 10^{-17}$. Sehingga dengan menggunakan *optical concentrator* pada *photodetector* memberikan peningkatan nilai SNR sebesar 59 % dari nilai SNR 13,43 dB menjadi 21,4 dB.

5. Kesimpulan

Dari penelitian dan simulasi yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Dalam Tugas Akhir ini menganalisis pengaruh dari penambahan *optical concentrator* pada

photodetector menggunakan modulasi *On Off Keying- Non Return to Zero* (OOK-NRZ) and *On Off Keying- Return to Zero* (OOK-RZ).

2. Dalam Tugas Akhir ini terbukti bahwa OOK-NRZ memiliki performansi yang lebih baik daripada OOK-RZ. Hal ini terbukti ketika menggunakan modulasi OOK-NRZ dalam *photodetector* murni memiliki jarak 0,3 meter lebih jauh dibandingkan OOK-RZ ketika BER mencapai 10^{-3} . Pada *photodetector* yang menggunakan *optical concentrator*, OOK-NRZ memiliki jarak 0,5 meter lebih jauh dibandingkan OOK-RZ ketika BER mencapai 10^{-3} . Sehingga modulasi OOK-NRZ menggunakan *optical concentrator* pada *photodetector* mengalami peningkatan jarak 24,7 % dari jarak 5,54 meter menjadi 6,912 m. Sedangkan pada modulasi OOK-RZ menggunakan *optical concentrator* pada *photodetector* mengalami peningkatan 21,7 % dari jarak 5,247 meter menjadi 6,389 meter.
3. Dalam Tugas Akhir ini terbukti ketika daya terima dan SNR dalam *photodetector* yang menggunakan *optical concentrator* memiliki performa yang lebih baik. Hal ini terbukti ketika dengan menggunakan *optical concentrator* pada *photodetector* memberikan peningkatan daya terima sebesar 165 % dari daya terima $1,5 \times 10^{-6}$ W menjadi $3,975 \times 10^{-6}$ W. dan memberikan peningkatan nilai SNR sebesar 59 % dari nilai SNR 13,43 dB menjadi 21,4 dB.
4. Hasil Perhitungan menunjukkan bahwa penambahan *optical concentrator* pada *photodetector* dapat meningkatkan performansi UVLC.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Wei, B. Lin, X. Tang, Y. Li, M. Zhang, Z. Ghassemlooy, Y. Wu, and H. Li, "Underwater visible light communications based on spatial diversity," in *2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. IEEE, 2017, pp. 1–3.
- [2] M. Elamassie, F. Miramirkhani, and M. Uysal, "Performance characterization of underwater visible light communication," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 1, pp. 543–552, 2018.
- [3] M. A. A. Ali, "Characteristics of optical channel for underwater optical wireless communication system," *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 10, no. 1, 2015.
- [4] H. Al Hajjar, B. Fracasso, and F. Lamarque, "Mini optical concentrator design for indoor high bit rate optical wireless communications," in *2013 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW)*. IEEE, 2013, pp. 147–151.
- [5] R. Mulyawan, A. Gomez, H. Chun, S. Rajbhandari, P. P. Manousiadis, D. A. Vithanage, G. Faulkner, G. A. Turnbull, I. D. Samuel, S. Collins et al., "A comparative study of optical concentrators for visible light communications," in *Broadband Access Communication Technologies XI*, vol. 10128. *International Society for Optics and Photonics*, 2017, p. 101280L.
- [6] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Underwater optical wireless communication," *IEEE access*, vol. 4, pp. 1518–1547, 2016.
- [7] E. Hulburt, "Optics of distilled and natural water," *Josa*, vol. 35, no. 11, pp. 698–705, 1945.
- [8] S. Collins, D. C. OBrien, and A. Watt, "High gain, wide field of view concentrator for optical communications," *Optics letters*, vol. 39, no. 7, pp. 1756–1759, 2014.
- [9] R. Islam, P. Choudhury, and M. A. Islam, "Analysis of dco-ofdm and flip-ofdm for im/dd optical-wireless system," in *8th International Conference on Electrical and Computer Engineering*. IEEE, 2014, pp. 32–35.
- [10] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab*®. CRC press, 2019.
- [11] S. J. Alam, M. R. Alam, G. Hu, and M. Z. Mehrab, "Bit error rate optimization in fiber optic communications," *International Journal of Machine Learning and Computing*, vol. 1, no. 5, p. 435, 2011.
- [12] G. Keiser, *Optical communications essentials*. McGraw Hill Professional, 2003.