

**PENGARUH OPTICAL CONCENTRATOR TERHADAP PERFORMA UNDERWATER
VISIBLE LIGHT COMMUNICATION MENGGUNAKAN MODULASI PPM**

**IMPACT OF OPTICAL CONCENTRATOR ON VISIBLE LIGHT
COMMUNICATION UNDERWATER PERFORMANCE USING PPM
MODULATION**

M. Sulthan Suryo Adfa¹, Ir.Akhmad Hambali,M.T.², Rizky Satria S.T., M.T³
^{1,2,3} Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹sulthanadfa@student.telkomuniversitygmail.ac.id

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

Abstrak

Underwater Visible Light Communication (UVLC) adalah sistem komunikasi optik yang memanfaatkan cahaya tampak yang dimodulasi untuk mengirimkan data dengan media transmisi berupa air. Media transmisi air laut mempunyai *loss* propagasi dipengaruhi dari *beam extinction coefficients*. Hal tersebut, memungkinkan sistem mempunyai *loss* propagasi yang lebih besar dari sistem VLC. Maka dari itu UVLC membutuhkan *optical concentrator* yang akan digunakan dalam *photodetector* yang memiliki kualitas lebih baik walau dengan kuantitas yang terbatas.

Penelitian ini menganalisis performansi *photodetector Positive Intrinsic Negative Photodetector (PIN)*. Dalam Tugas Akhir ini menggunakan dua skenario yang akan dilakukan. Skenario I menganalisis performansi sistem UVLC menggunakan PIN dalam modulasi L-PPM. Skenario II menganalisis performansi dari sistem UVLC menggunakan PIN yang ditambah dengan *optical concentrator*. Parameter dalam Tugas Akhir ini menggunakan jarak, daya terima, *Signal to Noise Ratio (SNR)* dan *Bit Error Rate (BER)*.

Dari hasil simulasi yang sudah didapatkan, penambahan *optical concentrator* memberikan kenaikan 60% terhadap nilai daya terima yang mengakibatkan nilai SNR dan BER menjadi lebih baik daripada tanpa *optical concentrator* dan nilai dari level PPM sangat mempengaruhi nilai BER, semakin tinggi nilai level maka nilai BER akan semakin optimum pada setiap kedalaman.

Kata kunci: *Underwater Visible Light Communication, L-PPM, PIN, Optical Concentrator, Bit Error Rate, Signal to Noise Ratio, Daya Terima.*

Abstract

Underwater Visible Light Communication (UVLC) is an optical communication system that utilizes modulated visible light for transmitting data with water as a media transmission. Seawater as the media transmission has loss propagation that impact by the beam extinction coefficients. Those matters, sustain the system have loss propagation bigger than the VLC system. UVLC needs an optical concentrator that will be transmitted to the photodetector that has a better quality although with limited quantity.

This experiment will analysis about the performance of the photodetector Positive Intrinsic Negative Photodetector (PIN). In this Final Project use two scenarios that will do. First scenario analysis about the performance of the UVLC system using a PIN with L-PPM modulation. Second scenario analysis about the performance of the UVLC system using PIN and optical concentrator. The parameters of this Final Project are distance, received power, Signal to Noise Ratio (SNR) and Bit Error Rate (BER).

From the simulation result, adding an optical concentrator give 60% increases towards the received power that makes SNR and BER are better than without an optical concentrator and the value of PPM level affects the value of BER, more and more the PPM level BER will optimum in every depths.

Keywords: *Underwater Visible Light Communication, L-PPM, PIN, Optical Concentrator, SNR, BER, Received Power.*

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi pada era ini telah mengalami suatu pertumbuhan yang sangat pesat. Teknologi telekomunikasi yang cepat dan efisien merupakan sesuatu hal yang diperlukan oleh masyarakat saat ini dan masa depan, maka dibutuhkan teknologi salah satunya adalah *Visible Light Communication* (VLC). Teknologi yang dimana merupakan salah satu perkembangan dalam sebuah sistem komunikasi yang menggunakan gelombang elektromagnetik.

Seiring dengan berjalannya waktu, teknologi VLC semakin berkembang hingga saat ini sedang dilakukan penelitian tentang *Underwater Visible Light Communication* (UVLC) yang merupakan sistem komunikasi VLC di dalam air. UVLC ini memiliki beberapa hal yang perlu diperhatikan seperti keterbatasan *bandwidth* dalam sumber cahaya [1]. UVLC adalah teknologi dalam *Underwater Wireless Optical Communication* (UWOC) menggunakan pita tampak dalam spektrum elektromagnetik, air relatif transparan jika terkena cahaya dan absorpsi mempunyai nilai minimumnya. Pada UVLC mempunyai redaman cahaya dalam air yang dikarenakan oleh absorpsi dan hamburan yang akan mempengaruhi *fase*, amplitudo dan juga sudut tembak cahaya. Ini adalah mekanisme penyerapan utama dalam laut dan sangat bervariasi dengan panjang gelombang [2].

Salah satu sumber cahaya yang digunakan dalam UVLC adalah Light Emitting Diode (LED) untuk kecepatan data nirkabel didalam air. Dalam teknologi optik terdapat dua jenis *photodetector* yang dapat digunakan yaitu *Avalanche Photodetector* (APD) dan *Positive Intrinsic Negative Photodetector* (PIN-PD). Pada penelitian sebelumnya menjelaskan *concentrator* jenis *Compound Parabolic Concentrator*. Mempresentasikan *optical concentrator* merupakan kunci dalam sistem *optical wireless communication* (OWC).

Pada Tugas Akhir ini melakukan penelitian terhadap kualitas transmisi data ketika *photodetector* murni dengan *photodetector* ditambahkan dengan *optical concentrator* dalam teknologi UVLC. Dengan besar harapan dapat mengetahui seberapa besar pengaruh dari *optical concentrator* jika ditambahkan pada *photodetector* untuk meningkatkan efektifitas serta efisiensi transmisi data.

2. Dasar Teori

2.1. Underwater Visible Light Communication

Underwater Visible Light Communication atau biasa disebut UVLC ini merupakan teknologi komunikasi yang lebih efisien untuk dibawah air. Sistem komunikasi ini membawa sinyal informasi dengan modulasi cahaya tampak didalam air. hamburan air dikarenakan oleh adanya sebuah organik dan anorganik didalam air dan mempunyai faktor yang menyebabkan hamburan di dalam air seperti tekanan, suhu karena mengubah indeks bias yang berbentuk pada optik.

Hamburan pada air laut murni disebut dengan hamburan Rayleigh karena panjang gelombang yang lebih pendek dikarenakan adanya kandungan garam serta *ion* didalamnya. Pada sistem komunikasi UVLC mempunyai faktor *loss* propagasi.

Faktor *loss* propagasi diformulasikan dengan sebagai berikut, Faktor *loss* propagasi diformulasikan sebagai berikut.

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

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

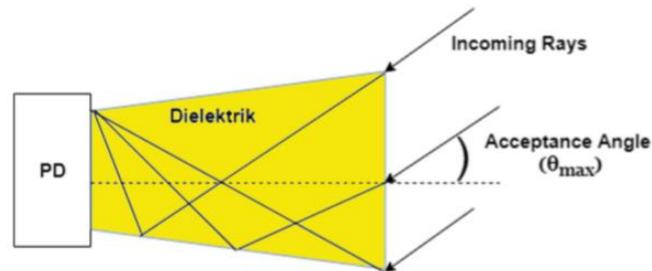
$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda),$$

Dengan $a(\lambda)$ adalah 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 detektor yang kecil. *Optical concentrator* berguna untuk meningkatkan daya terima yang akan diterima oleh fotodiode. Semakin luas daerah, maka sinyal optik yang dikumpulkan akan semakin banyak. *Concentrator* merupakan elemen optik pasif yang meningkatkan area *detector* yang efektif tanpa mempengaruhi parameter lain dalam fotodiode[6].



Gambar 2.1. Compound Parabolic Concentrator.

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

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

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 [7].

2.3. Pulse Position Modulation (L-PPM)

Pada Tugas Akhir ini modulasi yang dipakai adalah modulasi *Pulse Position Modulation* (PPM) merupakan sebuah modulasi yang terdapat perubahan pulsa dari sebuah sumber cahaya. Simbol L pada PPM merupakan sebuah pulsa yang memiliki daya konstan yang menempati satu durasi slot dalam L.L bisa dinotasikan pada persamaan,

$$L = 2^M$$

Modulasi PPM mempunyai efisiensi daya yang baik dibandingkan dari teknik modulasi *On-Off Keying* (OOK). Teknik modulasi PPM mempunyai kekurangan pada *bandwidth* dan kompleksitas yang lebih. Dalam teknik modulasi PPM diperlukan sinkronisasi dalam mendemodulasi sinyal. Teknik modulasi L-PPM memiliki beberapa tingkatan seperti 2-PPM, 4-PPM, 8-PPM.

2.4. Parameter Performa Sistem

2.4.1. Jarak Receiver terhadap Transmitter

Dalam suatu sistem komunikasi cahaya tampak, semakin jauh jarak penerima terhadap pengirim atau sumber cahaya, maka akan semakin kecil intensitas cahaya yang diterima dalam *photodetector*. Dan juga sebaliknya, semakin dekat jarak penerima terhadap pengirim maka akan semakin besar cahaya yang diterima dalam *photodetector*, sehingga menyebabkan daya terima didalam sistem UVLC akan semakin besar. Besar nilai jarak antara penerima dan pengirim (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

Dalam suatu sistem komunikasi mempunyai daya yang terkirim dari pengirim dan diterima oleh *receiver*, daya yang diterima *receiver* yaitu *receiver power*. *Receiver power* merupakan besar nilai yang diterima dalam sinyal input yang akan mengalami atenuasi. *Receiver power* dapat diformulasikan dengan persamaan sebagai berikut.

$$PRx = P_{s,in} - \alpha Total,$$

Dengan $P_{s,in}$ merupakan sinyal input, dan $\alpha Total$ merupakan nilai redaman atenuasi. *Receiver power* dalam keadaan LOS direpresentasikan sebagai berikut

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

Dengan P_T merupakan daya optik pengirim rata-rata, η_T adalah efisiensi optik pengirim dan η_R adalah efisiensi optik penerima, L_P merupakan *loss* propagasi dalam air laut (*pure water*), dan H merupakan nilai kanal.

2.4.3. Bit Error Rate

Bit Error Rate (BER) merupakan suatu perbandingan antara kerusakan dan kesalahan bit dengan bit yang terkirimkan keseluruhan. 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 $<10^{-3}$. BER memiliki hubungan dengan *Signal to Noise Ratio* (SNR). Persamaan SNR dapat dituliskan sebagai berikut.

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

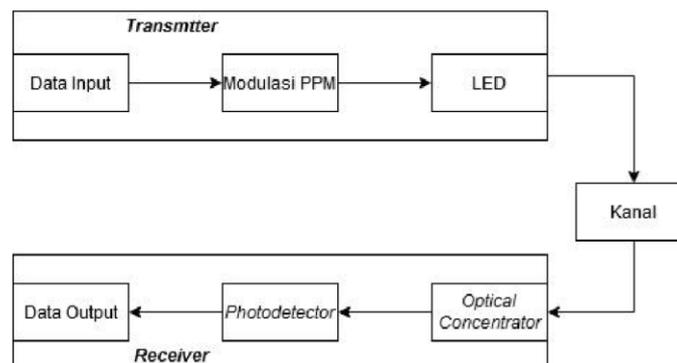
P adalah daya yang diterima *photodetector* (Watt), R adalah responsivitas (A/W), M adalah factor multiplikasi, q adalah *electron charge* ($1,69 \times 10^{-19}$ C), $F(M)$ adalah *Noise Figure* yang merupakan fungsi terhadap factor multiplikasi, B_e adalah Konstanta *Boltzman* ($1,38 \times 10^{-23}$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

$$BER_{PPM} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}}\right) \sqrt{SNR \frac{L}{2} \log_2 L}$$

L adalah tingkatan dari sebuah level dari modulasi PPM sehingga semakin tinggi level dari PPM tersebut maka nilai BER akan semakin baik.

3. Pembasan

3.1. Blok Diagram Sistem

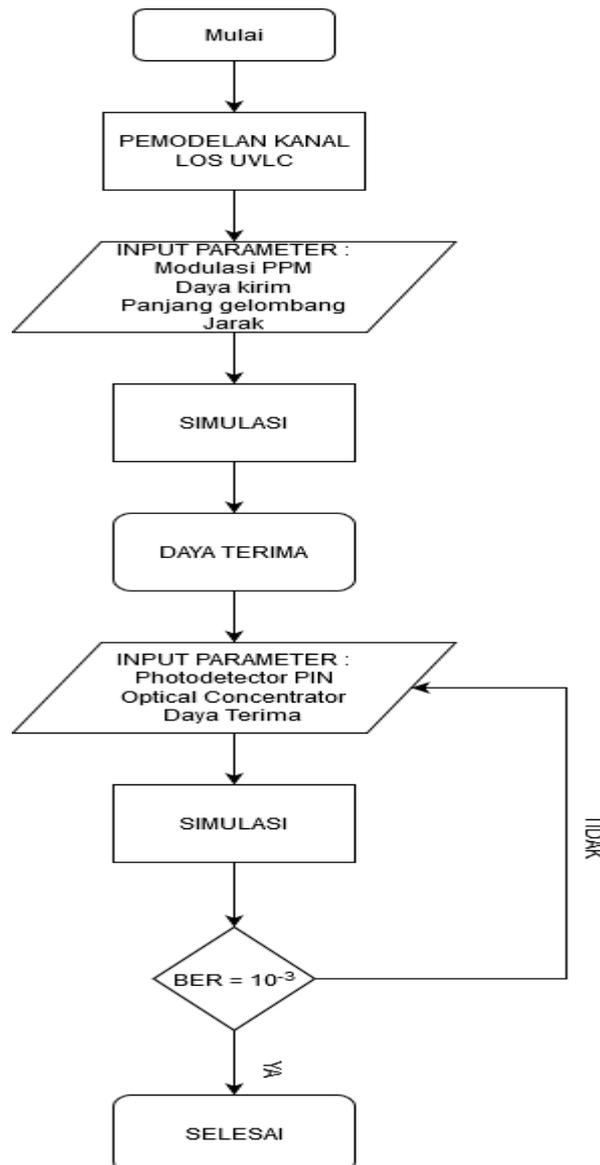


Gambar 3.1. Blok diagram sistem.

Gambar 3.1 merupakan rancangan sistem UVLC pada penelitian ini. Yang diawali oleh arus listrik dan kode biner atau sinyal digital yang masuk kedalam modulator. Di dalam modulator sinyal input ditumpangkan ke sinyal pembawa dengan modulasi *Pulse Position Modulation* (PPM). 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* lebih optimal. Cahaya yang 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

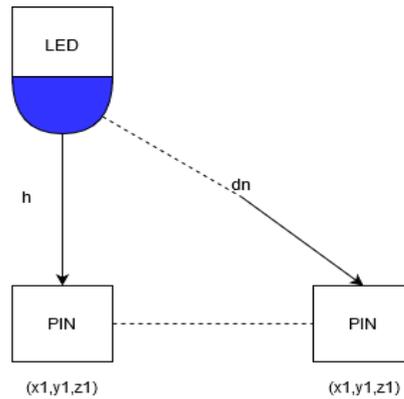
Gambar 3.2 menjabarkan alur dari penelitian Tugas Akhir ini. Blok *process* hingga blok data, merancang simulasi sistem komunikasi UVLC. Kemudian memasukkan beberapa parameter input seperti jenis modulasi, daya kirim, panjang gelombang serta jarak *transmitter – receiver*. Teknik modulasi yang digunakan adalah modulasi L-PPM. 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**, Sebelum memulai simulasi, parameter yang dimasukkan bukan hanya modulasi, tetapi daya kirim juga turut diperhitungkan. kemudian simulasi berjalan sampai nilai BER yang diinginkan tercapai.

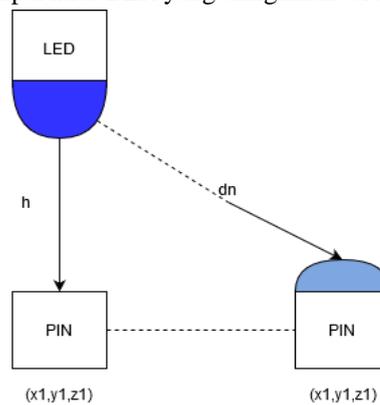


Gambar 3.3 Set-up skenario I

Jika belum, 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.

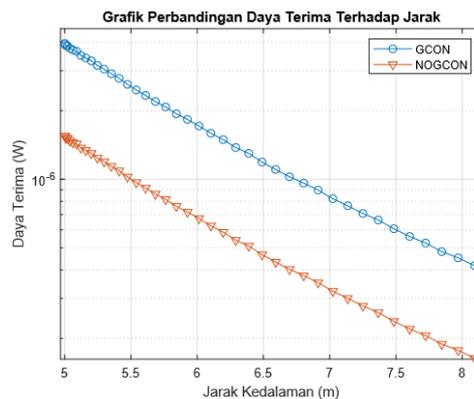


Gambar 3.4 Set-up skenario II

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).

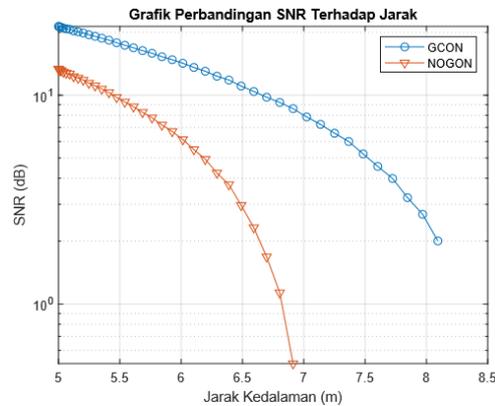
4. Analisis Skenario I dan Skenario II

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*.



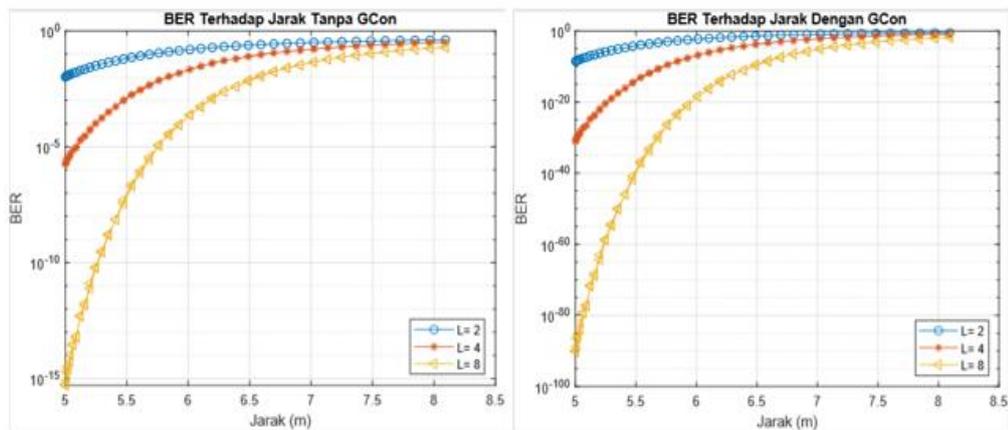
Gambar 4.1 Grafik Perbandingan Daya Terima Terhadap Jarak

Pada **Gambar 4.1** menjelaskan grafik daya terima terhadap jarak. Dalam gambar tersebut mendapatkan hasil analisis bahwa dalam grafik berwarna *orange* menjelaskan daya terima tanpa *concentrator*, dalam jarak minimum 5 meter daya terima maksimum sebesar 1.5487×10^{-6} W dan dalam jarak maksimum 8.093 meter daya terima maksimum sebesar 1.6201×10^{-7} W. Dalam grafik berwarna biru menjelaskan daya terima menggunakan *concentrator*, dalam jarak minimum 5 meter daya terima maksimum sebesar 3.9242×10^{-6} W dan dalam jarak maksimum 8.093 meter daya terima maksimum sebesar 4.186×10^{-7} W.



Gambar 4.2 Perbandingan SNR Terhadap Jarak

Pada **Gambar 4.2** menjelaskan grafik perbandingan SNR terhadap jarak. Dalam gambar tersebut mendapatkan hasil analisis bahwa dalam grafik berwarna *orange* menjelaskan nilai SNR tanpa *concentrator*, dalam jarak minimum 5 meter nilai SNR sebesar 13.3168 dB dan dalam jarak maksimum 6.91 meter nilai SNR sebesar 0.5072 dB. Dalam grafik berwarna biru menjelaskan SNR menggunakan *concentrator*, dalam jarak minimum 5 meter nilai SNR sebesar 21.2745 dB dan dalam jarak maksimum 8.093 meter nilai SNR sebesar 1.9965 dB.



Gambar 4.3. Perbandingan BER Terhadap Jarak Dua Skenario

Gambar 4.3. menunjukkan perbandingan BER terhadap jarak dua skenario. Nilai baik BER diasumsikan $\leq 10^{-3}$, Skenario I sisi sebelah kiri merupakan kondisi tanpa *concentrator*, Ketika 2-PPM nilai BER tidak mencapai $\leq 10^{-3}$, Ketika 4-PPM nilai BER mencapai $\leq 10^{-3}$ dalam jarak 5.54 m dengan nilai BER sebesar 1.76×10^{-3} , Ketika 8-PPM nilai BER mencapai $\leq 10^{-3}$ dalam jarak 6.38 m dengan nilai BER sebesar 7.48×10^{-3} . Sedangkan Skenario II sisi sebelah kanan merupakan kondisi dengan *concentrator*, Ketika 2-PPM nilai BER mencapai $\leq 10^{-3}$ dalam jarak 6.1 m dengan nilai BER sebesar 8.431×10^{-3} , Ketika 4-PPM nilai BER mencapai $\leq 10^{-3}$ dalam jarak 7.02 m dengan nilai BER sebesar 6.212×10^{-3} , Ketika 8-PPM nilai BER mencapai $\leq 10^{-3}$ dalam jarak 7.8 m dengan nilai BER sebesar 6.082×10^{-3} .

5. Kesimpulan

Dari dua scenario simulasi yang telah mendapatkan hasil, maka mendapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari daya terima terhadap jarak, semakin jauh jarak *transmitter* ke *receiver* daya yang diterima oleh *receiver* semakin kecil begitu pula sebaliknya, data tersebut dibuktikan pada hasil jarak 8.093 meter daya yang diterima tanpa *concentrator* sebesar 1.6201×10^{-7} W sedangkan dengan *concentrator* sebesar 4.186×10^{-7} W. Serta untuk jarak 5 meter daya yang diterima tanpa *concentrator* sebesar 1.5487×10^{-6} W, sedangkan dengan *concentrator* sebesar 3.9242×10^{-6} W.
2. Dari SNR terhadap jarak, semakin jauh jarak *transmitter* ke *receiver*, maka nilai SNR akan semakin kecil, begitu pula sebaliknya. Data tersebut dibuktikan pada hasil pada jarak 8.093 meter nilai SNR tanpa *concentrator* sebesar -6.193 dB sedangkan dengan *concentrator* sebesar 1.996 dB. Serta untuk jarak 5 meter nilai SNR tanpa *concentrator* sebesar 13.316 dB, sedangkan dengan *concentrator* sebesar 21.2745 dB.
3. Dari BER terhadap jarak, semakin jauh jarak *transmitter* ke *receiver*, maka nilai BER akan semakin kurang baik, begitu pula sebaliknya. Nilai BER juga dipengaruhi oleh nilai SNR, nilai SNR semakin besar maka nilai BER akan semakin baik. Tinggi dari level modulasi juga mempengaruhi nilai BER, semakin tinggi level modulasi maka nilai BER akan semakin baik. Data tersebut dibuktikan pada hasil skenario I yang merupakan kondisi tanpa *concentrator*, Ketika 2-PPM nilai BER tidak mencapai $\leq 10^{-3}$ dengan jarak 5 sampai 8.093 m. Ketika 4-PPM nilai BER mencapai $\leq 10^{-3}$ dalam jarak 5.54 m dengan nilai BER sebesar 1.76×10^{-3} , Ketika 8-PPM nilai BER mencapai $\leq 10^{-3}$ dalam jarak 6.38 m dengan nilai BER sebesar 7.48×10^{-3} . Sedangkan Skenario II yang merupakan kondisi dengan *concentrator*, Ketika 2-PPM nilai BER mencapai $\leq 10^{-3}$ dalam jarak 6.1 m dengan nilai BER sebesar 8.431×10^{-3} , Ketika 4-PPM nilai BER mencapai $\leq 10^{-3}$ dalam jarak 7.02 m dengan nilai BER sebesar 6.212×10^{-3} , Ketika 8-PPM nilai BER mencapai $\leq 10^{-3}$ dalam jarak 7.8 m dengan nilai BER sebesar 6.082×10^{-3} .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. Mahsun, D. Darlis, and S. Aulia, "Perancangan dan implementasi perangkat pengirim data digital teknologi visible light communication dengan kecepatan 1 mbps," eProceedings of Applied Science, vol. 2, no. 3, 2016.
- [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] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Underwater optical wireless communication," *IEEE access*, vol. 4, pp. 1518–1547, 2016.
- [4] W. C. Cox, J. A. Simpson, and J. F. Muth, "Underwater optical communication using software defined radio over led and laser based links," in 2011-MILCOM 2011 Military Communications Conference. IEEE, 2011, pp. 2057–2062.
- [5] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab* ®. CRC press, 2019.
- [6] S. A. A. Ameer and H. Shahad, "Characteristics review of optical concentrators," 2017.
- [7] S. J. Wojtczuk, X. Zhang, and W. J. MacNeish III, "Enhanced visible nearinfrared photodiode and non-invasive physiological sensor," Aug. 20 2019, uS Patent 10,383,520.
- [8] A. Pradana, N. Ahmadi, T. Adiono, W. A. Cahyadi, and Y.-H. Chung, "Vlc physical layer design based on pulse position modulation (ppm) for stable illumination," in 2015 international symposium on intelligent signal processing and communication systems (ISPACS). IEEE, 2015, pp. 368–373.
- [9] M.A.Arfaoui, M.D. Soltani, I. Tavakkolnia, A. Ghayeb, C. Assi, H. Haas, and M. Safari, "Snr statistics of indoor mobile vlc users with random device orientation," in 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2019, pp. 1–6.