

ANALISIS PERFORMANSI PHOTODETEKTOR PIN DAN APD PADA SISTEM KOMUNIKASI CAHAYA TAMPAK DI BAWAH AIR

PERFORMANCE ANALISYS OF PIN PHOTODETECTOR AND APD ON UNDERWATER VISIBLE LIGHT COMMUNICATION

Annisa Izmi Amalia¹, Ir. Akhmad Hambali, M.T.², Brian Pamukti, S.T., M.T.³
^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
¹annisaizmia@student.telkomuniversity.ac.id, ²ahambali@telkomuniversity.co.id,
³brianp@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Underwater Visible Light Communication (UVLC) merupakan sistem komunikasi optik memanfaatkan cahaya tampak yang dimodulasi untuk mentransmisikan data dengan media transmisi berupa air. Media transmisi air laut memiliki *loss* propagasi yang dipengaruhi oleh *beam extinction coefficients*. Hal tersebut, mengakibatkan sistem memiliki *loss* propagasi yang lebih besar dari sistem VLC. Maka dari itu UVLC membutuhkan *photodetector* yang memiliki kualitas yang baik walau dengan kuantitas yang terbatas.

Penelitian ini mengevaluasi performansi *photodetector Positive Intrinsic Negative Photodetector* (PIN) dan *Avalanche Photodetector* (APD). Terdapat dua skenario yang dilakukan pada Tugas Akhir ini. Skenario I menganalisis performansi sistem UVLC menggunakan PIN. Skenario II menganalisis performansi sistem UVLC menggunakan APD. Kedua skenario tersebut akan diuji berdasarkan parameter jarak, daya terima, *Signal to Noise Ratio* (SNR) dan *Bit Error Rate* (BER).

Dari simulasi yang telah dilakukan, didapatkan hasil bahwa *photodetector* APD unggul dalam penerapannya pada sistem UVLC. Dilihat dari segi jarak cakupan, *photodetector* APD 69,2% lebih besar jarak cakupan PIN. Berdasarkan nilai daya terima minimum yang menghasilkan $BER \leq 10^{-3}$, nilai daya terima APD lebih kecil 15,38% lebih kecil daripada PIN. Sedangkan berdasarkan nilai SNR, APD menghasilkan nilai SNR 69,61% lebih besar daripada nilai SNR yang dihasilkan PIN.

Kata kunci : UVLC, *Photodetector*, PIN, APD, BER, Daya terima.

Abstract

Underwater Visible Light Communication (UVLC) is an optical communication system utilizing visible light that is modulated to transmit data with water transmission media. Seawater transmission media possess loss propagation which is affected by beam extinction coefficients. This resulted in the system having a greater propagation loss than the VLC system. Therefore UVLC requires a photodetector that has good quality even with a limited quantity.

This study evaluates the performance of Positive Intrinsic Negative Photodetector (PIN) and Avalanche Photodetector (APD) photodetectors. There are two scenarios carried out in this Final Project. The scenario I analyze the performance of the UVLC system using a PIN. Scenario II analyzes the performance of the UVLC system using APD. Both scenarios will be tested based on distance, acceptability, Signal to Noise Ratio (SNR) and Bit Error Rate (BER) parameters.

From the simulations that have been done, the results show that the APD photodetector is superior in its application to the UVLC system. In terms of coverage distance, the APD photodetector is 69,2% greater than the PIN coverage distance. Based on the minimum acceptability value that produces $BER \leq 10^{-3}$ the APD acceptability value is 15,38% smaller than the PIN. Whereas based on the SNR value, APD produces an SNR value of 69,61% greater than the SNR value generated by the PIN.

Keywords: UVLC, *Photodetector*, PIN, APD, BER, Power received.

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan berjalannya waktu tingkat kebutuhan informasi, teknologi dan komunikasi sangatlah meningkat. Dewasanya ini segala kebutuhan dan kegiatan manusia dapat ditunjang oleh

teknologi dengan kualitas komunikasi yang baik. Kebutuhan akan komunikasi berkecepatan tinggi dengan *bandwidth* yang besar sangat dibutuhkan dalam menangani pencarian dibawah air pada saat terjadi kecelakaan yang terjadi di perairan. Link dengan kecepatan data yang tinggi sangat dibutuhkan oleh banyak kendaraan bawah air, sensor ataupun observatorium. Dalam beberapa kasus dengan alat yang cukup besar, kabel fiber optik dan coaxial digunakan untuk menerima kecepatan data yang tinggi tetapi keduanya membutuhkan teknik yang signifikan serta masalah pemeliharaan [1].

Walaupun kabel fiber optik dapat menyediakan komunikasi data *real time* dalam pengaplikasian komunikasi bawah air, namun biaya yang dibutuhkan besar, fleksibilitas yang kurang, dan dalam banyak kasus praktis kerugian operasional menjadi terbatas. Hal ini menyebabkan peningkatan permintaan terhadap link nirkabel bawah laut [5]. Selain link nirkabel bawah laut, terdapat peningkatan dalam jumlah kendaraan atau perangkat tak berawak untuk digunakan di bawah laut yang perlu melakukan komunikasi dengan sistem perangkat lain di atas permukaan laut. Komunikasi cahaya tampak adalah kandidat yang menjanjikan dengan spektrum yang luas, yaitu 10.000 kali lebih banyak dari Radio Frequency (RF) [6].

Underwater Visible Light Communication (UVLC) merupakan salah satu solusi dari selain kabel optik umbilikal yang telah banyak digunakan pada *Autonomous Underwater Vehicles* (AUV's). Berbeda dengan *Visible Light Communication* (VLC) dalam ruangan dan media ruang bebas, UVLC memiliki beberapa tantangan tersendiri dua diantara beberapa tantangan tersebut adalah nilai eksponensial koefisien atenuasi air dan keterbatasan *bandwidth* pada sumber cahaya [7]. UVLC termasuk merupakan teknologi *Underwater Wireless Optical Communication* (UWOC) yang menggunakan pita tampak pada spektrum elektromagnetik (450-550 nm), air relatif transparan pada terhadap cahaya dan absorpsi membutuhkan nilai minimumnya [8]. Terdapat redaman cahaya pada UVLC oleh air yang disebabkan oleh hamburan dan absorpsi, yang memengaruhi amplitudo, fase, dan sudut tembak cahaya. Ini adalah mekanisme penyerapan utama di laut dan sangat bervariasi dengan panjang gelombang [9].

Light Emitting Diode (LED) dapat digunakan sebagai sumber cahaya pada UVLC untuk kecepatan data nirkabel bawah air dalam rentang puluhan Mbps. LASER dan LED yang digunakan dapat berwarna biru-hijau (450 nm - 550 nm), karena air relative transparan terhadap kedua cahaya tersebut [5][10]. Terdapat dua jenis *photodetector* yang digunakan pada teknologi optik yaitu *Positive Intrinsic Negative Photodetector* (PIN-PD) dan *Avalanche Photodetector* (APD).

Pada Tugas Akhir ini dilakukan penelitian performansi dari *Photodetector* PIN-PD dan APD pada teknologi UVLC berdasarkan parameter Jarak, Daya terima, *Signal to Noise Ratio* (SNR) dan *Bit Error Rate* (BER) pada *Photodetector* sebagai parameter keberhasilan dari penelitian ini.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan penelitian terkait maka rumusan masalah yang menjadi objek penelitian pada tugas akhir, *Photodetector* memiliki responsivitas yang dapat mendeteksi daya terima kurang dari sensitivitasnya. Sehingga apabila daya yang diterima lebih besar dari sensitivitasnya maka *photodetector* tidak dapat bekerja ataupun menerima daya. Penelitian ini difokuskan dengan membandingkan dua jenis *photodetector* yang akan digunakan pada sistem UVLC. Dari jenis kedua *photodetector* tersebut akan dianalisis mana yang lebih memiliki performansi lebih baik ketika diterapkan pada sistem UVLC.

Nilai BER pada sistem komunikasi optik merupakan salah satu parameter kualitas pada UVLC. Gangguan *noise* yang dialami *photodetector* seperti *Bulk Dark*, *Current Noise*, *Shoot Noise*, dan *Noise Thermal*. Sementara pada UVLC terdapat *loss* propagasi air laut yang dipengaruhi oleh *beam extinction coefficients* atau atenuasi keseluruhan pada air laut. *Beam extinction coefficients* adalah kombinasi linier dari koefisien hamburan dan absorpsi pada air laut.

1.3 Tujuan dan Manfaat

Tujuan dari penelitian dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh media air laut terhadap suatu sistem VLC.
2. Menganalisis pengaruh variasi panjang gelombang terhadap sistem UVLC.
3. Menganalisis pengaruh jarak terhadap performa UVLC saat nilai $BER \leq 10^{-3}$.
4. Menganalisis dan mendapatkan *photodetector* terbaik agar transmisi data menggunakan sistem UVLC berjalan dengan baik.

Adapun manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian adalah Tugas Akhir ini dapat menambah khazanah ilmu pengetahuan. Selain itu, juga dapat memberikan gambaran serta

membantu pihak lain dalam melakukan analisis pembuatan *prototype* UVLC agar terciptanya suatu pengembangan komunikasi yang efisien.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang membatasi Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan perangkat lunak untuk menghitung dan mensimulasi sistem UVLC serta parameter uji terkait.
2. Menggunakan dua jenis *photodetector*, PIN dan APD berbahan silikon.
3. Penelitian dilakukan pada satu jenis kanal pada air (pure water).
4. Penelitian menggunakan satu jenis sumber cahaya, yaitu LED.
5. Penelitian menggunakan tiga jenis panjang gelombang cahaya tampak, yaitu 455 nm, 473 nm serta 532 nm.
6. Penelitian menggunakan satu jenis modulasi, yaitu modulasi OOK-NRZ.
7. Parameter pengujian performa UVLC berdasarkan nilai SNR dan BER.
8. Bit rate yang digunakan sebesar 2 Gbps.

1.5 Metode Penelitian

Dalam Tugas Akhir ini penelitian dilakukan melalui simulasi pada perangkat lunak. Parameter utama yang menjadi acuan dalam analisis performa sistem UVLC adalah nilai SNR dan BER yang dihasilkan. Parameter lain yang akan diinput kedalam simulasi seperti daya kirim dari LED dan perpindahan posisi serta jarak dari *receiver*.

Penelitian diaplikasikan pada dua buah skenario. Skenario pertama merupakan analisis performansi sistem UVLC menggunakan *photodetector* PIN. Sedangkan skenario kedua merupakan analisis performansi sistem UVLC menggunakan APD.

2. Dasar Teori

2.1 Underwater Visible Light Communication

Underwater Visible Light Communication (UVLC) merupakan suatu pengembangan teknologi komunikasi optik, memanfaatkan spektrum cahaya tampak (350 nm - 850 nm) yang dimodulasi untuk mentransmisikan data dengan media transmisi berupa 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 mengubah indeks bias yang terbentuk pada batas optik dan dengan demikian menyimpang dari jalur propagasi [1].

Hamburan memiliki efek yang berbeda pada setiap 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 [11]. Sama halnya seperti pada sistem komunikasi lain, pada sistem komunikasi UVLC juga terdapat faktor *loss* propagasi didalamnya. Faktor *loss* propagasi diformulasikan sebagai berikut,

$$L_p(\lambda, z) = \exp^{-c(\lambda)z}, \quad (2.1)$$

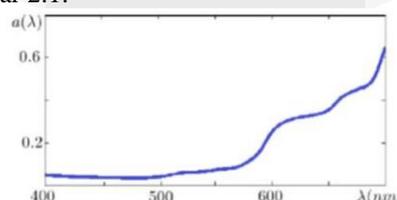
dengan $c(\lambda)$ adalah nilai *beam extinction coefficients*, λ merupakan panjang gelombang cahaya tampak yang digunakan dan z adalah jarak. Dari persamaan (2.2) nilai *loss* propagasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai *beam extinction coefficients*, nilai *beam extinction coefficients* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda), \quad (2.2)$$

dengan $a(\lambda)$ merupakan koefisien absorpsi pada air laut sementara b merupakan nilai koefisien hamburan Rayleigh air laut jernih. Nilai koefisien absorpsi keseluruhan pada air laut dibagi menjadi empat faktor yang direpresentasikan dengan persamaan,

$$a(\lambda) = C_w a_w(\lambda) + C_{phy} a_{phy}(\lambda) + C_g a_g(\lambda) + C_n a_n(\lambda), \quad (2.3)$$

dengan C adalah jumlah partikel organik dan anorganik, $a_w(\lambda)$ merupakan absorpsi pada air jernih, $a_{phy}(\lambda)$ merupakan absorpsi karena fitoplankton, $a_g(\lambda)$ adalah absorpsi karena gelbstoff, dan $a_n(\lambda)$ adalah suspensi materi non-algal. Nilai koefisien absorpsi keseluruhan pada air laut bias juga didapatkan berdasarkan Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Diagram respon relatif *photodetector* pada berbagai bahan [1].

Sementara nilai koefisien hamburan *Rayleigh* direpresetasikan dengan persamaan berikut,

$$b_w(\lambda) = 0,005826 \left(\frac{400}{\lambda} \right)^{4,322}, \quad (2.4)$$

2.2 Photodetector

Suatu *photodetector* harus memenuhi syarat kinerja yang ketat seperti tingkat sensitivitas tinggi dalam rentang panjang gelombang operasionalnya, tingkat noise rendah dan bandwidth yang memadai untuk mengakomodasi kecepatan data yang dibutuhkan, hal tersebut untuk menunjang sinyal optik yang pada umumnya lemah setelah melalui saluran komunikasi. Pengaruh suhu fluktuasi pada respon *photodetector* harus minimal dan perangkat *photodetector* memiliki masa operasi yang sama. Panjang gelombang di mana *photodetector* merespon cahaya tergantung pada bahan *photodetector* [4].

2.2.1 Positive Intrinsic Negative Photodetector

Positive Intrinsic Negative Photodetector (PIN-PD) merupakan salah satu *photodetector* berbahan semikonduktor pada sistem komunikasi optik. Perangkat PIN-PD terdiri dari bahan semikonduktor jenis p dan n yang dipisahkan oleh daerah *n-doped intrinsic* 'i' yang sangat ringan. Ketiga bahan tersebut dapat disebut sebagai zona pada PIN-PD (Gambar 2.5). Zona pertama *p-doped* merupakan zona untuk membuat kelebihan *hole*, zona kedua *n-doped* merupakan zona untuk membuat kelebihan *pole* dan zona ketiga *intrinsic* 'i' berfungsi sebagai daerah penyerapan. Dengan memaksimalkan kinerja *photodetector* lebar zona *intrinsic* dapat dioptimalkan [3]. Perangkat PIN-PD memiliki nilai multiplikasi (M) sebesar 1.

2.2.2 Avalanche Photodetector

Avalanche Photodetector (APD) merupakan suatu detektor optik berbahan semikonduktor yang umum digunakan pada sistem komunikasi optik seperti PIN-PD. Berbeda dengan PIN-PD, APD memberikan penguatan arus yang melekat saat proses yang disebut dengan ionisasi elektron berulang. Hal ini memuncak dalam meningkatkan tingkat sensitivitas semenjak arus foton yang diperkuat (dikalikan) sebelum mengalami *noise thermal* yang terhubung dengan rangkaian penerima [4]. Oleh karena itu nilai responsivitas pada APD mencakup faktor multiplikasi

2.3. On-Off Keying

Modulasi On-Off Keying (OOK) merupakan modulasi yang paling umum digunakan untuk *Intensity Modulation/Direct Detection* (IM/DD) pada komunikasi optik. Hal tersebut dikarenakan oleh kesederhanaan dalam pengimplementasiannya. Bit pulsa 1 direpresentasikan oleh pulsa optik yang menempati seluruh atau sebagian dari durasi bit sementara bit pulsa 0 direpresentasikan dengan tidak adanya pulsa optik [4]. Format sinyal modulasi NRZ menunjukkan bahwa untuk bit pulsa 1 digambarkan menempati seluruh durasi bit, sementara untuk bit pulsa 0 digambarkan dengan tidak adanya pulsa pada seluruh durasi bit. Format sinyal NRZ mudah untuk dikodekan maupun didekodekan, kelebihan utama dari format NRZ dari format RZ adalah format ini menggunakan bandwidth yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan format RZ. Namun, format NRZ tidak memiliki kemampuan koreksi atau monitoring kesalahan. Pada penerapannya, format NRZ digunakan pada sistem komunikasi berkecepatan tinggi, dengan rentang kecepatan 155 Mbps hingga 10 Gbps [12].

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 ditangkap oleh *photodetector*. Begitu pun kondisi sebaliknya, semakin dekat jarak *receiver* terhadap *transmitter* atau sumber cahaya, maka akan semakin besar intensitas cahaya yang dapat ditangkap. Berbanding lurus dengan nilai intensitas cahaya, nilai daya yang diterima dipengaruhi oleh jumlah intensitas cahaya yang ditangkap. Semakin kecil intensitas cahaya yang ditangkap *photodetector* maka semakin kecil nilai daya yang diterima, sebaliknya semakin besar intensitas cahaya yang ditangkap maka semakin besar nilai daya yang diterima. Besar nilai jarak antara *receiver* dan *transmitter* (d) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$d = \sqrt{(X_r - X_t)^2 + (Y_r - Y_t)^2 + (Z_r - Z_t)^2}, \quad (2.5)$$

dengan X_t dan X_r merupakan koordinat posisi *transmitter* dan *receiver* pada sumbu x, sementara Y_t dan Y_r merupakan koordinat posisi *transmitter* dan *receiver* pada sumbu y, serta Z_t dan Z_r koordinat posisi *transmitter* dan *receiver* pada sumbu z yang merepresentasikan tinggi *transmitter* terhadap *receiver*.

2.4.2 Daya Terima

Pada suatu sistem komunikasi terdapat daya yang dikirim dari *transmitter* dan diterima di *receiver*. Daya terima adalah besarnya nilai yang diterima dari sinyal input yang mengalami atenuasi [3]. *Received Power* direpresentasikan dengan persamaan,

$$P_{Rx} = P_{s,in} - \alpha_{TOTAL}, \quad (2.6)$$

dengan $P_{s,in}$ adalah daya sinyal input, dan α_{TOTAL} adalah nilai redaman total atau atenuasi. Sementara dalam keadaan *Line of Sight* (LOS) berdasarkan pengujian yang dilakukan oleh S. Arnon [13] *Received Power* dalam keadaan LOS direpresentasikan sebagai berikut.

$$P_{Rx} = P_T \eta_T \eta_R L_p H, \quad (2.7)$$

dengan P_T adalah daya optik *transmitter* rata-rata, η_T dan η_R adalah efisiensi optik *transmitter* dan *receiver*, L_p adalah *loss* propagasi air laut, dan H adalah nilai dari 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 [14]. BER dapat diartikan kecepatan laju data serta waktu yang dibutuhkan untuk suatu proses pengiriman data, atau BER menentukan seberapa banyak proses pengiriman kembali data yang dikirim. Sehingga apabila nilai BER tinggi maka suatu proses transmisi memiliki laju data yang lambat dan membutuhkan waktu yang banyak serta proses pengiriman data kembali terus berulang-ulang. BER memiliki hubungan dengan *Signal to Noise Ratio* (SNR). Persamaan SNR dapat dituliskan sebagai berikut.

$$SNR = \frac{(P_{Rx} \cdot R \cdot M)^2}{2q \cdot P_{Rx} \cdot R \cdot M^2 \cdot F(m) B_e + \frac{4K_B \cdot T \cdot B_e}{R_L}} \quad (2.8)$$

dengan, P_{Rx} adalah daya yang diterima *photodetector* (Watt), R adalah responsivitas (A/W), M adalah faktor multiplikasi, q adalah electron charge ($1,69 \times 10^{-19}$ C), $F(m)$ adalah *Noise Figure*, B_e adalah *Receiver Electrical Bandwidth* (Hz), K_B adalah Konstanta *Boltzmann* ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), T adalah suhu ruangan (300°K), dan R adalah Resistansi (W).

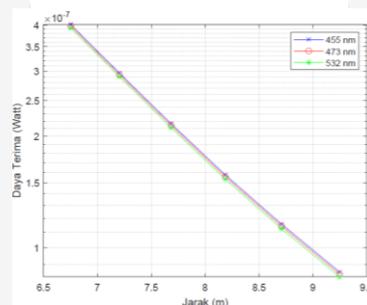
Nilai BER untuk modulasi OOK-NRZ dapat ditentukan dengan persamaan berikut,

$$BER_{OOK-NRZ} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{SNR} \right). \quad (2.9)$$

3. Pembahasan

3.1 Analisis Performansi Sistem UVLC

Pada sistem *Underwater Visible Light Communication* (UVLC) yang dirancang dan disimulasikan terdapat beberapa parameter pada kanal, pada kanal UVLC terdapat *loss* propagasi yang dipengaruhi oleh *beam extinction coefficients*. Nilai *beam extinction coefficients* merupakan kombinasi linier dari koefisien hamburan dan absorpsi pada air laut. *Loss* propagasi pada kanal air laut UVLC berpengaruh pada daya yang diterima oleh *receiver*. Semakin besar nilai *loss* propagasi yang terjadi maka nilai daya yang diterima akan semakin kecil begitu pula pada kondisi sebaliknya.



Gambar 3.1. Grafik daya yang diterima oleh *receiver* pada sistem UVLC terhadap jarak.

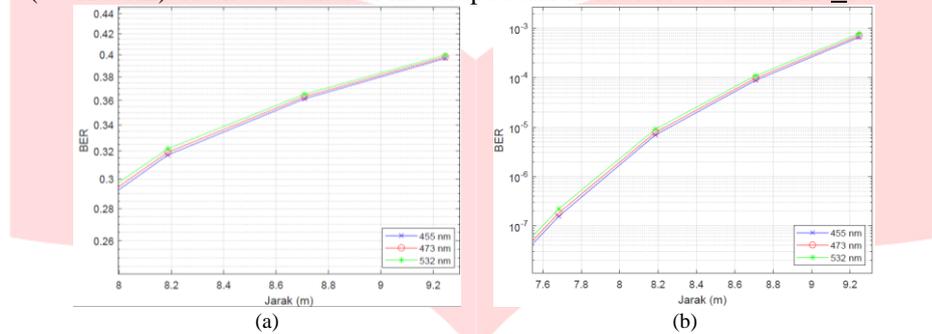
Berdasarkan Gambar 3.1, nilai daya terima semakin kecil seiring dengan *receiver* yang semakin menjauhi sumber cahaya. Dengan nilai daya terima terkecil sebesar $8,8667 \times 10^{-8}$ W pada jarak terjauh dari sistem UVLC yaitu 9,247 m. Pada nilai daya terima semakin kecil seiring dengan jarak yang semakin menjauhi sumber cahaya. Dengan nilai daya terima terkecil sebesar 8.5894×10^{-8} W pada jarak terjauh dari sistem UVLC. Hal ini terjadi karena semakin jauh jarak *photodetector* terhadap sumber cahaya, maka intensitas cahaya yang diterima akan semakin kecil, sehingga daya yang diterima akan semakin kecil.

Photodetector merupakan salah satu perangkat yang sangat penting untuk menangkap sinyal optis yang dipancarkan oleh *Light Emitting Diode* (LED) kemudian mengubahnya menjadi sinyal elektrik. Penggunaan variasi panjang gelombang pada setiap skenario menghasilkan hasil yang

tidak begitu berbeda antar panjang gelombang satu dengan lainnya. Hal ini terjadi karena nilai absorpsi air laut pada tiap gelombang yang memiliki nilai dengan selisih yang sangat kecil.

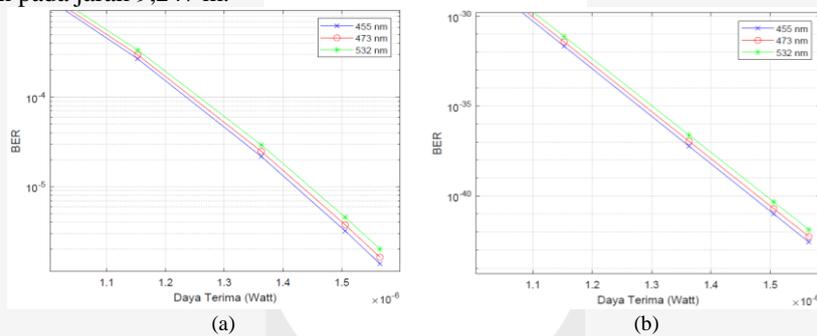
3.2 Analisis Skenario I dan II

Pada penelitian ini, skenario I menunjukkan simulasi menggunakan *photodetector Positive Intrinsic Negative* (PIN). Simulasi membandingkan jarak, daya terima pada photodetector, serta *Signal to Noise Ratio* (SNR) terhadap *Bit Error Rate* (BER) dari masing-masing panjang gelombang yang diinputkan. Simulasi menggunakan teknik modulasi *On-Off Keying - Non-Return to Zero* (OOK-NRZ). Hasil dari simulasi ini berupa besar nilai SNR dan nilai $BER \leq 10^{-3}$.



Gambar 3.2. Grafik perbandingan nilai SNR terhadap jarak menggunakan (a) *photodetector* PIN dan (b) *photodetector* APD.

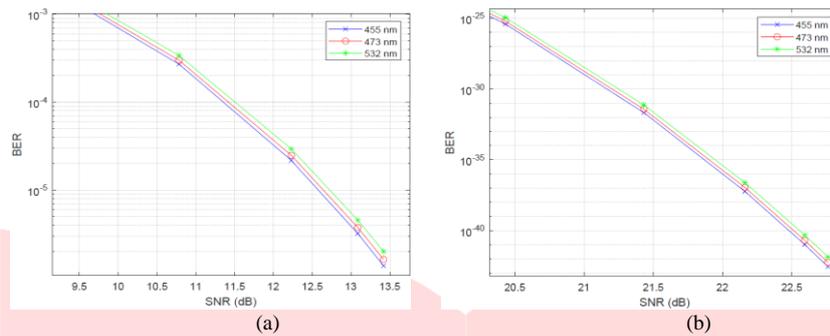
Gambar 3.2 menunjukkan perbandingan jarak *receiver-transmitter* terhadap nilai BER. Semakin dekat jarak *receiver* terhadap *transmitter*, maka nilai BER yang dihasilkan akan semakin baik, begitu pula kondisi sebaliknya. Hal tersebut disebabkan karena semakin jauh *photodetector* dari sumber cahaya maka intensitas cahaya yang ditangkap akan semakin sedikit sehingga nilai BER yang dihasilkan akan semakin tinggi, artinya tingkat kesalahan bit yang dikirim semakin tinggi. Pada penggunaan PIN, setiap panjang gelombang nilai $BER \leq 10^{-3}$ didapatkan pada jarak 5,464 m. Sedangkan pada penggunaan APD, setiap panjang gelombang nilai $BER \leq 10^{-3}$ didapatkan pada jarak 9,247 m.



Gambar 3.3. Grafik perbandingan nilai BER terhadap daya terima menggunakan (a) *photodetector* PIN dan (b) *photodetector* APD.

Gambar 3.3 menunjukkan perbandingan daya terima terhadap nilai BER. Pada *Photodetector* PIN Panjang gelombang 455 nm menghasilkan nilai BER sebesar 0,3968 dengan nilai daya terima sebesar $8,667 \times 10^{-8}$ W. Panjang gelombang 473 nm nilai BER sebesar 0,3982 dengan nilai daya terima sebesar $8,544 \times 10^{-8}$ W. Sedangkan pada panjang gelombang 532 nilai BER yang dihasilkan sebesar 0,3999 dengan nilai daya terima sebesar $8,398 \times 10^{-8}$ W.

Sedangkan pada APD, pada panjang gelombang 455 nm nilai BER didapatkan pada daya terima sebesar $8,667 \times 10^{-8}$ W adalah $6,5708 \times 10^{-4}$. Pada panjang gelombang 473 nm nilai BER didapatkan pada daya terima sebesar $8,544 \times 10^{-8}$ adalah $7,0989 \times 10^{-4}$. Sedangkan pada panjang gelombang 532 nm nilai BER didapatkan pada daya terima sebesar $8,398 \times 10^{-8}$ W sebesar $7,8163 \times 10^{-4}$. Data tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi daya yang diterima maka nilai BER semakin kecil, begitu pula kondisi sebaliknya.



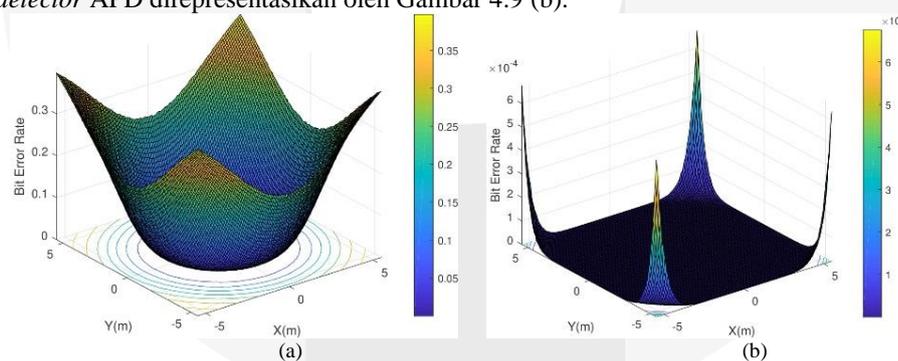
Gambar 3.4. Grafik perbandingan nilai BER terhadap SNR menggunakan *photodetector* PIN.

Gambar 3.4 menunjukkan perbandingan nilai SNR terhadap nilai BER. Semakin besar nilai SNR maka semakin kecil nilai BER yang didapatkan, begitu pula kondisi sebaliknya. Hal ini dikarenakan nilai SNR merupakan perbandingan antara sinyal yang dikirim terhadap *noise* yang terjadi, sehingga nilai SNR yang tinggi menghasilkan tingkat bit error yang rendah. Artinya, jumlah *noise* yang mengganggu sinyal yang dikirim lebih kecil dari sinyal yang dikirim. Pada *photodetector* PIN, panjang gelombang 455 nm nilai BER yang dihasilkan sebesar 0,3968 dengan SNR sebesar -11,645 dB. Pada panjang gelombang 473 nm nilai BER yang dihasilkan sebesar 0,3982 dengan SNR sebesar -11,764 dB. Sedangkan pada panjang gelombang 532 nm nilai BER yang dihasilkan sebesar 0,3999 dengan SNR sebesar -11,915 dB.

Sedangkan APD, pada panjang gelombang 455 nm nilai BER yang didapatkan sebesar $6,5708 \times 10^{-4}$ dengan nilai SNR sebesar 10,1378 dB. Pada panjang gelombang 473 nm nilai BER yang didapatkan pada SNR sebesar 10,0774 dB dengan nilai BER sebesar $7,0989 \times 10^{-4}$. Sedangkan pada panjang gelombang 532 nm nilai BER yang didapatkan pada SNR sebesar 10,0019 dB dengan nilai BER sebesar $7,8163 \times 10^{-4}$.

4.3 Distribusi BER

Idealnya pada sistem *Underwater Visible Light Communication* (UVLC), apabila posisi atau letak suatu *receiver* semakin dekat dengan sumber cahaya, tingkat error pada bit akan semakin kecil, sehingga data yang diterima akan semakin banyak. Begitu pula sebaliknya, apabila posisi atau letak *receiver* semakin jauh dari sumber cahaya, maka tingkat error bit akan semakin besar, sehingga data yang diterima akan semakin sedikit. Hal ini mempengaruhi distribusi nilai BER pada sistem UVLC. Nilai BER yang dihasilkan oleh PIN cukup besar hingga cakupan daerah yang memiliki nilai $BER \leq 10^{-3}$ kecil. Distribusi nilai BER menggunakan *photodetector* PIN direpresentasikan oleh Gambar 4.5 (a). Namun berbeda dengan *photodetector* PIN, faktor multiplikasi yang dimiliki *photodetector* APD menghasilkan nilai BER yang sangat kecil dengan cakupan daerah yang memiliki nilai $BER \leq 10^{-3}$ yang luas. Distribusi nilai BER menggunakan *photodetector* APD direpresentasikan oleh Gambar 4.9 (b).



Gambar 4.5. Distribusi BER menggunakan (a) *photodetector* PIN dan (b) *photodetector* APD pada modulasi OOK-NRZ dengan panjang gelombang 455 nm.

4. Kesimpulan

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

1. Berdasarkan panjang gelombang yang digunakan pada rentang panjang gelombang 450 nm - 550 nm memiliki nilai absorpsi air laut yang tidak begitu berbeda sehingga besar daya yang diterima pada panjang gelombang yang berbeda memiliki selisih nilai yang kecil. Pada sistem UVLC panjang gelombang 455 nm memiliki performansi paling baik. Pada panjang gelombang 455 nm nilai daya terima maksimum sebesar $1,556 \times 10^{-6}$ W. Untuk Panjang

- gelombang 473 nm nilai daya terima maksimum sebesar $1,553 \times 10^{-6}$ W. Sementara untuk panjang gelombang 532 nm nilai daya terima maksimum sebesar $1,539 \times 10^{-6}$ W.
2. Apabila dilihat dari segi jangkauan jarak, *photodetector Avalanche Photodetector* (APD) lebih baik daripada *photodetector Positive Intrinsic Negative* (PIN). Hal ini berdasarkan pada saat BER mencapai nilai kurang dari 10^{-3} pada penggunaan APD jarak maksimum antara receiver dan transmitter sejauh 9,247 m. Sementara pada PIN komunikasi nilai BER mencapai nilai kurang dari 10^{-3} pada saat jarak antara receiver dan transmitter sejauh 5,464 m.
 3. Berdasarkan segi daya terima oleh *photodetector*, *photodetector* APD juga lebih baik daripada *photodetector* PIN, hal ini dikarenakan APD memiliki faktor multiplikasi dan responsivitas yang lebih tinggi dari PIN. BER yang dihasilkan oleh APD pada daya terima -40,62 dBm sebesar $6,5708 \times 10^{-4}$. Sedangkan BER yang dihasilkan oleh PIN pada daya terima yang sama sebesar 0,3968. Kedua hasil tersebut didapatkan berdasarkan nilai daya terima pada jarak propagasi terjauh.
 4. Berdasarkan nilai SNR yang dihasilkan oleh *photodetector*, *photodetector* APD menghasilkan nilai SNR maksimum sebesar 22,7616 dB sedangkan PIN menghasilkan nilai SNR maksimum sebesar 13,420 dB. Hal tersebut berarti *photodetector* APD memberikan kualitas sinyal yang lebih baik dan aman dari gangguan *noise*.

Daftar Pustaka:

- [1] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Underwater optical wireless communication," IEEE access, vol. 4, pp. 1518–1547, 2016.
- [2] W. van Etten and J. Van Der Plaats, "Fundamentals of optical fiber communications," Prentice-Hall international series in optoelectronics, 1991.
- [3] G. Keiser, Optical fiber communications. McGraw-Hill Singapore, 2010.
- [4] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab R. CRC press, 2017.
- [5] M. Elmassie, F. Miramirkhani, and M. Uysal, "Performance characterization of underwater visible light communication," IEEE Transactions on Communications, vol. 67, no. 1, pp. 543–552, 2019.
- [6] A. R. Darlis, W. A. Cahyadi, D. Darlis, and Y. H. Chung, "underwater visible light communication using maritime channel," in Proc. Conf. Korea Inst. Signal Process. Syst.(KISPS), 2016, pp. 1–3.
- [7] 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.
- [8] M.A. Khalighi, C. Gabriel, T. Hamza, S. Bourennane, P. Leon, and V. Rigaud, "Underwater wireless optical communication; recent advances and remaining challenges," in 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). IEEE, 2014, pp. 1–4.
- [9] 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.
- [10] S. Corporation. (2016) Bluecomm underwater optical communication. [Online]. Available: <https://www.sonardyne.com/app/uploads/2016/06/BlueComm.pdf>
- [11] E. Hulburt, "Optics of distilled and natural water," Josa, vol. 35, no. 11, pp. 698–705, 1945.
- [12] R. Ramaswami, K. Sivarajan, and G. Sasaki, Optical networks: a practical perspective. Morgan Kaufmann, 2009.
- [13] S. Arnon, "Underwater optical wireless communication network," Optical Engineering, vol. 49, no. 1, p. 015001, 2010.
- [14] 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.