

## PERFORMANSI PHOTODETEKTOR PIN DAN APD PADA SISTEM KOMUNIKASI CAHAYA TAMPAK DI BAWAH AIR DENGAN *PULSE POSITION MODULATION*

### (*PERFORMANCE OF PIN PHOTODETECTOR AND APD ON UNDERWATER VISIBLE LIGHT COMMUNICATION WITH PULSE POSITION MODULATION*)

Windy Christalia<sup>1</sup>, Ir. Akhmad Hambali, M.T.<sup>2</sup>, Rizky Satria, S.T., M.T.<sup>3</sup>  
<sup>1,2,3</sup>Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom  
<sup>1</sup>windychr@student.telkomuniversity.ac.id, <sup>2</sup>ahambali@telkomuniversity.co.id,  
<sup>3</sup>satria.riz2007@gmail.com

#### Abstrak

*Underwater Visible Light Communication (UVLC)* merupakan suatu pengembangan dari *Visible Light Communication (VLC)*. Menggunakan dua scenario dengan menggunakan *Positive Intrinsic Negative Photodetector (PIN-PD)* dan *Avalanche Photodetector (APD)* dengan menggunakan *Pulse Position Modulation (PPM)*, serta menggunakan kanal air laut (*pure water*) dengan sumber cahaya dari *Light Emitting Diode (LED)*. Pada UVLC terdapat *loss* propagasi pada *pure water* yang dipengaruhi oleh attenuasi pada air yang terjadi karena kombinasi linier dari koefisien hamburan dan absorpsi. Penelitian ini dikatakan layak apabila menghasilkan BER  $\leq 10^{-3}$ .

**Kata kunci :** *UVLC, photodetector, PIN, APD, PPM, LED, BER.*

#### Abstract

*Underwater Visible Light Communication (UVLC)* is a development of *Visible Light Communication (VLC)*. Using two scenarios using *Positive Intrinsic Negative Photodetector (PIN-PD)* and *Avalanche Photodetector (APD)* using *Pulse Position Modulation (PPM)*, and using *pure water channels with Light Emitting Diode (LED)*. In UVLC there is a loss of propagation in *pure water* that is affected by attenuation in water that occurs due to a linear combination of scattering and absorption coefficient. This research is said to be feasible if it produces BER  $\leq 10^{-3}$ .

**Keywords:** *UVLC, photodetector, PIN, APD, PPM, LED, BER.*

#### 1. Pendahuluan

Seiring berjalannya waktu tingkat kebutuhan teknologi, informasi dan komunikasi semakin tinggi. Hal tersebut terjadi karena hampir semua kegiatan membutuhkan teknologi dan komunikasi sebagai perantaranya, untuk memperoleh informasi yang baik maka dibutuhkan sistem yang baik pula. *Visible Light Communication (VLC)* adalah salah satu teknologi yang menjanjikan yang memanfaatkan infrastruktur VLC[1]. *Bandwidth* yang lebar dan kapasitas transfer informasi yang tinggi sangat dibutuhkan untuk komunikasi dibawah air[2].

*Underwater Visible Light Communication (UVLC)* merupakan salah satu solusi yang dapat digunakan pada *Autonomous Underwater Vehicles (AUVs)*. Berbeda dengan VLC dalam ruangan dan media ruang bebas, UVLC memiliki beberapa tantangan yaitu nilai eksponensial koefisien attenuasi air dan keterbatasan *bandwidth*, pada sumber cahaya[2][3]. UVLC merupakan teknologi *Underwater Optical Communication (UWOC)* yang menggunakan pita tampak pada spektrum elektromagnetik (450 nm - 550 nm), air relatif transparan terhadap cahaya dan absorpsi membutuhkan nilai minimum[4].

*Light Emitting Diode (LED)* dapat digunakan sebagai sumber cahaya pada UVLC untuk kecepatan data nirkabel dibawah air. LED yang digunakan dapat berwarna biru-hijau (450 nm - 550 nm) karena air relatif transparan terhadap kedua cahaya tersebut.[5].

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, Sudut Tembak, *Bit Error Rate* (BER) sebagai parameter keberhasilan. Pada penelitian ini menggunakan sumber cahaya yaitu LED dan menggunakan *Pulse Position Modulation*.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Underwater Visible Light Communication

*Underwater Visible Light Communication* (UVLC) merupakan pemanfaatan teknologi *Visible Light Communication* (VLC) pada media air. Berbeda dengan VLC yang diterapkan pada media udara (*free space*) dengan nilai indeks bias 1, UVLC diterapkan pada media air dengan nilai indeks bisa  $> 1$ . Teknologi UVLC menggunakan LED sebagai sumber cahaya, karena teknologi UVLC merupakan komunikasi jarak pendek. LED berwarna biru dan hijau biasa digunakan sebagai perangkat sumber optic pada UVLC karena air relative transparan (450 nm – 550 nm).

Terdapat dua fenomena utama yang dapat mempengaruhi kinerja UVLC yaitu absorpsi dan hamburan. Hamburan memiliki efek yang berbeda pada setiap jenis air. Hamburan pada air laut murni dideskripsikan sebagai hamburan *Rayleigh* karena lebih jelas pada Panjang gelombang yang lebih pendek karena adanya kandungan garam dan ion didalam air laut[6]. Sementara hamburan air laut disebabkan oleh partikel organik dan anorganik yang ada pada dalam air. Adapun factor lain yang menyebabkan hamburan dalam air seperti suhu, tekanan salinitas karena perubahan indeks bias yang terbentuk pada batas optik dan dengan demikian menyimpang dari jalur propagasi[2].

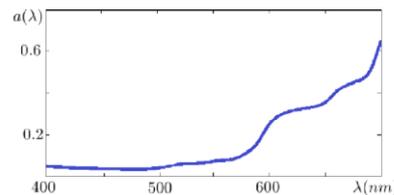
Pada UVLC terdapat faktor *loss* propagasi, faktor tersebut diformulasikan dengan persamaan sebagai berikut[2],

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

di mana  $c(\lambda)$  adalah nilai *beam extinction coefficients*,  $\lambda$  adalah panjang gelombang cahaya tampak yang digunakan dan  $z$  adalah jarak. Persamaan (2.2) nilai *loss* propagasi terjadi karena pengaruh oleh nilai *beam extinction coefficients*, nilai ini dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut[2],

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

di mana  $a(\lambda)$  adalah koefisien absorpsi pada air laut sementara  $b$  adalah nilai koefisien hamburan *Rayleigh* air laut jernih. Nilai koefisien absorpsi pada air laut bisa juga didapatkan berdasarkan Gambar 2.1



**Gambar 2.1** Kombinasi nilai spektrum absorpsi pada air laut[2].

Perubahan arah sinar optik dikarenakan hamburan didominasi oleh ukuran partikel. Hamburan *Rayleigh* terjadi jika ukuran partikel lebih kecil dari panjang gelombang cahaya. Hamburan dalam *pure water* dijelaskan dengan baik oleh hamburan *Rayleigh* karena lebih jelas pada panjang gelombang yang lebih pendek karena adanya garam dan ion didalamnya[2]. Pada kasus ini nilai koefisien hamburan *Rayleigh* dipresentasikan dengan persamaan sebagai berikut[2],

$$b_w(\lambda) = 0,005826 \left( \frac{400}{\lambda} \right)^{4,322}, \quad (2.3)$$

### 2.2 Kanal Transmisi

Pada penelitian ini menggunakan kanal *Line of Sight* (LOS), karena memiliki *data rate* yang lebih tinggi daripada kanal *Non-Line of Sight* (NLOS), *data rate* memiliki nilai lebih dari ratusan Mbps[8] dan lebih tahan terhadap *noise* dari sumber cahaya dan lingkungannya.

Berdasarkan *Optical Wireless Communication* suatu komunikasi yang menggunakan LED sebagai sumber cahaya serta *photodetector* yang luas. Terdapat distribusi sudut dari pola intensitas radiasi yang dimodelkan dengan pancaran Lambertian. Parameter Lambertian ( $m_l$ ), parameter ini berhubungan dengan *Full Width an Half Maximum* (FWHM) atau *semi-angle* setengah daya ( $\theta$ ) yang dapat dilihat pada persamaan sebagai berikut,

$$m_l = \frac{-\ln 2}{\ln 10(\cos \Phi_{1/2})}, \quad (2.4)$$

dengan *Full Width an Half Maximum* (FWHM) sebesar  $70^{\circ}$ . Kanal *Line of Sight* (LOS) diformulasikan kedalam persamaan sebagai berikut[10],

$$H = \frac{(m_l+1)A_{det} \cdot \cos^{(m_l+1)}(\Phi)}{2\pi d^2}, \quad (2.5)$$

di mana  $A_{det}$  adalah area *photodetector* pada penerima,  $d$  adalah jarak antara *receiver* terhadap *transmitter*,  $\Phi$  adalah sudut terhadap *transmitter*.

### 2.3 Light Emitting Diode

*Light Emitting Diode* (LED) adalah sumber cahaya semikonduktor yang memancarkan cahaya ketika ada arus yang mengalir melaluinya. Elektron dalam semikonduktor bergabung dengan lubang elektron, melepaskan energi berbentuk foton. Warna caya ditentukan oleh energi yang dibutuhkan oleh elektron untuk melintasi celah pita semikonduktor[11]. LED dapat digunakan sebagai pemancar untuk konektivitas nirkabel di bawah air dengan kecepatan data puluhan Mb/s. LED yang digunakan dapat berwarna biru-hijau (450 nm - 550 nm) karena air relatif transparan terhadap kedua cahaya tersebut[5].

### 2.4 Photodetektor

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* [8].

#### 2.4.1 Positive Intrinsic Negative Photodetector

*Positive Intrinsic Negative Photodetector* (PIN-PD) merupakan salah satu photodetector berbahan semikonduktor pada sistem komunikasi serat optik. Perangkat PIN-PD memiliki nilai multiplikasi ( $M$ ) sebesar 1. Perangkat PIN-PD dapat mengubah energi foton yang datang menjadi arus elektrik jika energi foton tersebut besarnya tidak kurang dari energi celah pita pada bahan semikonduktor.

#### 2.4.2 Avalanche Photodetector

*Avalanche Photodetector* (APD) merupakan suatu detektor optik berbahan semikonduktor yang digunakan pada sistem komunikasi optik seperti PIN-PD. Ada perbedaan dengan PIN-PD, APD memberikan penguatan arus yang melekat saat proses ionisasi elektron berulang. Hal ini memuncak dalam meningkatkan tingkat sensitivitas semenjak arus foton yang dikuatkan sebelum mengalami *Noise Thermal* yang terhubung dengan rangkaian penerima[8]. Oleh karena itu nilai responsivitas APD mencakup faktor multiplikasi (*gain*). Nilai multiplikasi pada APD bernilai lebih besar dari 1 ( $M_{APD} > 1$ ), nilai multiplikasi pada APD.

### 2.5 Pulse Position Modulation

Modulasi merupakan proses penumpangan sinyal informasi yang terdapat pada rentang frekuensi ke dalam sinyal pembawa (*carrier*). Pada Tugas Akhir ini modulasi yang akan digunakan adalah *Pulse Position Modulation* (PPM). PPM merupakan modulasi yang terdapat perubahan pulsa dari sumber cahaya. Simbol L pada PPM merupakan sebuah pulsa yang memiliki daya konstan yang menempati satu slot dengan resolusi bit  $M > 0$  adalah bilangan bulat. Keuntungan dari skema PPM ini adalah penghapusan ketergantungan ambang pada daya input. Akan tetapi modulasi ini juga memiliki kekurangan pada *bandwidth* dan kompleksitas yang lebih. Dalam teknik modulasi ini diperlukan sinkronisasi dalam mendemodulasi suatu sinyal.

### 2.6 Parameter Performansi Sistem

#### 2.6.1 Jarak Receiver terhadap Transmitter

Semakin jauh jarak *receiver* terhadap *transmitter*, maka akan semakin kecil intensitas cahaya yang ditangkap oleh photodetektor. Berlaku dengan kondisi sebaliknya, semakin dekat jarak *receiver* terhadap *transmitter*, maka semakin besar intensitas cahaya yang dapat ditangkap. Hal ini berbanding lurus dengan nilai intensitas cahaya, nilai daya yang diterima dipengaruhi oleh jumlah intensitas cahaya yang ditangkap. Semakin kecil intensitas cahaya yang ditangkap oleh photodetektor maka semakin kecil nilai daya yang diterima, begitupun sebaliknya semakin besar intensitas cahaya yang ditangkap maka semakin besar nilai daya yang akan diterima. Besar nilai jarak antara *receiver* dan *transmitter* ( $d$ ) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$d = \sqrt{(x_r - x_t)^2 + (Y_r - Y_t)^2 + (Z_r - Z_t)^2}, \quad (2.6)$$

di mana  $X_t$  dan  $X_r$  adalah koordinat posisi pada *transmitter* dan *receiver* yang terletak pada sumbu x, sedangkan  $Y_t$  dan  $Y_r$  adalah koordinat posisi pada *transmitter* dan *receiver* yang terletak pada sumbu y, serta  $Z_t$  dan  $Z_r$  adalah koordinat posisi pada *transmitter* dan *receiver* pada sumbu z.

### 2.6.2 Daya Terima

Daya terima pada *receiver* disebut juga *Received Power*. *Received Power* adalah besarnya nilai yang diterima dari sinyal *input* yang mengalami atenuasi[7]. *Received Power* direpresentasikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_{Received} = P_{s,in} - \alpha_{TOTAL} \quad (2.7)$$

di mana  $P_{s,in}$  adalah sinyal daya *input* dan  $\alpha_{TOTAL}$  adalah nilai redaman total atau atenuasi. Sementara dalam keadaan *Line of Sight* (LOS) berdasarkan pengujian yang dilakukan oleh S. Arnon[10] *Received power* dalam keadaan LOS direpresentasikan sebagai berikut

$$P_{Rx} = P_T \eta_T \eta_R L_P H, \quad (2.8)$$

di mana,  $P_T$  adalah daya optik *transmitter* rata-rata,  $\eta_T$  adalah efisiensi optik *transmitter* dan  $\eta_R$  adalah efisiensi optik *receiver*,  $L_P$  adalah *loss* propagasi pada air laut (*pure water*), dan  $H$  adalah nilai kanal.

### 2.6.3 Bit Error Rate

*Bit Error Rate* (BER) adalah perbandingan dari jumlah bit kesalahan relatif terhadap jumlah total bit yang diterima dalam suatu transmisi[9]. Jika nilai BER tinggi maka suatu proses transmisi akan memiliki laju data yang lambat dan membutuhkan waktu yang banyak serta proses pengiriman data kembali terus berulang-ulang. Akan tetapi, jika nilai BER rendah maka akan memiliki laju data yang cepat sehingga membutuhkan waktu yang lebih singkat.

BER memiliki hubungan dengan *Signal to Noise Ratio* (SNR). Persamaan SNR dituliskan sebagai berikut,

$$SNR = \frac{P_{in} R M^2}{2q P_{in} R M^2 F(M) B_e + \frac{4K_B T B_e}{R_L}} \quad (2.9)$$

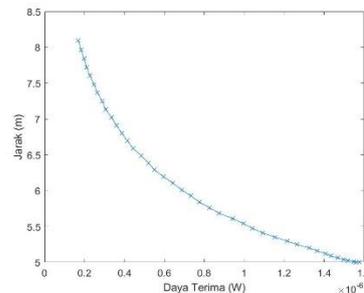
di mana  $P_{in}$  merupakan daya yang diterima photodetektor (*Watt*),  $R$  merupakan Responsivitas ( $A/W$ ),  $M$  merupakan Faktor Multiplikasi,  $q$  merupakan *Electron Change* ( $1,69 \times 10^{-19} C$ ),  $F(M)$  merupakan *Noise Figure*,  $B_e$  adalah *Receiver Electrical Bandwidth* ( $Hz$ ),  $K_B$  merupakan Konstanta Boltzman ( $1,38 \times 10^{-23} J/K$ ),  $T$  merupakan suhu ruangan ( $300^0 K$ ), dan  $R$  merupakan Resistansi ( $\Omega$ ). Nilai BER untuk modulasi *Pulse Position Modulation* (PPM) ditentukan dengan persamaan sebagai berikut,

$$BER_{PPM} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{SNR \frac{L}{2} \log_2 L} \right) \quad (2.10)$$

## 3. Pembahasan

### 3.1 Analisis Performansi Sistem UVLC

Pada sistem *Underwater Visible Light Communication* (UVLC) memiliki *loss* propagasi yang dipengaruhi oleh *beam extinction coefficients*. Nilai *beam extinction coefficients* merupakan kombinasi linier dari koefisien hamburan dan absorpsi pada air laut (*pure water*). *Loss* propagasi pada kanal air laut (*pure water*) 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.

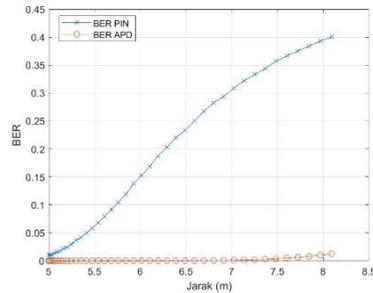


Gambar 3.1 Grafik daya terima oleh *receiver* pada sistem UVLC terhadap jarak.

Pada Gambar 3.1, nilai daya semakin kecil seiring dengan jarak yang semakin jauh dari sumber cahaya. Dengan nilai daya terkecil  $1,688 \times 10^{-7} W$  pada jarak terjauh sistem UVLC 8,093 m. Sedangkan pada kondisi sebaliknya, pada jarak 5 m, nilai daya terima sebesar  $1,566 \times 10^{-6} W$ . Hal ini terjadi karena semakin jauh jarak *photodetector* pada sumber cahaya, maka intensitas cahaya yang diterima akan semakin kecil.

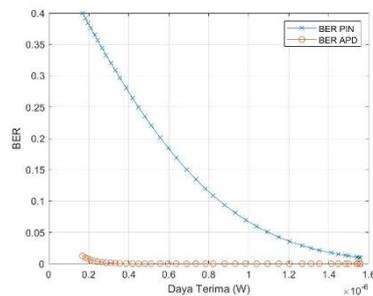
### 3.2 Analisis Skenario I dan Skenario II

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 *Pulse Position Modulation* (PPM).



Gambar 3.2 Grafik perbandingan nilai BER terhadap jarak.

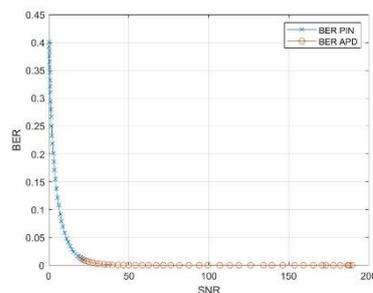
Pada Gambar 3.2 menunjukkan tentang perbandingan jarak *receiver-transmitter* terhadap nilai BER. Semakin dekat jarak *receiver* terhadap *transmitter*, maka nilai BER yang dihasilkan akan semakin baik. Pada panjang gelombang 455 nm, menggunakan PIN jarak maksimalnya sebesar 8,093 m dan menghasilkan nilai BER sebesar 0,4001. Sedangkan menggunakan APD jarak maksimalnya sebesar 8,093 m dengan nilai BER sebesar 0,0126.



Gambar 3.3 Grafik perbandingan nilai BER terhadap daya terima.

Pada Gambar 3.3 menunjukkan perbandingan daya terima terhadap nilai BER. Semakin tinggi daya terima maka nilai BER akan semakin kecil. Semakin tinggi nilai daya terima maka nilai BER yang didapatkan akan semakin baik. Hal ini dikarenakan semakin besar daya yang diterima menghasilkan tingkat kemungkinan kesalahan bit *error* semakin kecil. Pada panjang gelombang 455 nm, PIN menghasilkan nilai BER sebesar 0,0099 dengan daya terima sebesar  $1,558 \times 10^6$ .

Sedangkan pada APD, semakin tinggi daya yang diterima maka akan semakin kecil nilai BER yang didapatkan semakin kecil, berlaku untuk kondisi sebaliknya. Hal ini terjadi karena semakin besar daya yang akan diterima oleh *photodetector* akan menghasilkan tingkat probabilitas kesalahan bit yang dikirim semakin kecil. Pada panjang gelombang 455 nm menghasilkan nilai BER sebesar  $3,192 \times 10^{-12}$  dan daya terima sebesar  $1,569 \times 10^6$ .



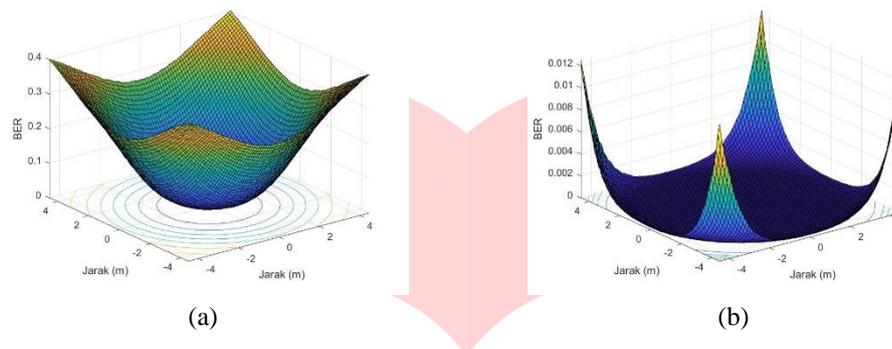
Gambar 3.4 Grafik perbandingan nilai BER terhadap SNR.

Pada Gambar 3.4 menunjukkan perbandingan nilai BER terhadap nilai SNR. Semakin besar nilai SNR maka semakin kecil nilai BER yang akan didapatkan. 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. Pada gelombang 455 nm menghasilkan nilai BER sebesar 0,0100 dengan SNR sebesar 21,69dB.

Sedangkan pada APD Semakin besar nilai SNR, maka semakin kecil BER yang akan didapatkan. Hal ini terjadi karena SNR adalah perbandingan antara sinyal yang dikirimkan terhadap *noise*, sehingga nilai SNR yang tinggi akan menghasilkan tingkat bit *error* menjadi rendah. Pada gelombang 455 nm menghasilkan nilai BER sebesar  $3,192 \times 10^{-12}$  dengan SNR sebesar 189.4 dB.

### 3.3 Distribusi BER

Pada sistem *Underwater Visible Light Communication* (UVLC), apabila posisi *receiver* semakin dekat dengan sumber cahaya maka tingkat *error* pada bit akan semakin kecil, sehingga daya yang diterima akan semakin banyak. 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.



**Gambar 3.5** Distribusi BER menggunakan (a) PIN (b) APD pada modulasi PPM.

Pada posisi *receiver* yang berbeda akan mempengaruhi nilai BER pada sistem UVLC. Semakin dekat posisi *receiver* dengan sumber cahaya, maka tingkat *error* bit akan semakin kecil, sehingga data yang diterima akan semakin besar, berlaku sebaliknya. Berbeda dengan *photodetector* PIN, APD memiliki faktor multiplikasi yang menghasilkan nilai BER yang sangat kecil dengan cakupan daerah yang memiliki nilai  $BER \leq 10^{-3}$  yang luas.

### 4. Kesimpulan

Dari penelitian dan simulasi Tugas Akhir yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Panjang gelombang yang digunakan adalah 455 nm memiliki nilai daya maksimum sebesar  $1,566 \times 10^{-6}$  W.
2. Sistem komunikasi pada penelitian ini menghasilkan jarak terjauh sebesar 8,093 m.
3. Sistem komunikasi pada penelitian ini menghasilkan daya terima sebesar  $7,0603 \times 10^{-11}$ .
4. Pada perbandingan nilai BER antara PIN dan APD menghasilkan nilai BER APD sebesar 31 kali lebih kecil daripada BER yang dihasilkan oleh PIN.
5. Pada perbandingan nilai SNR antara PIN dan APD menghasilkan nilai SNR APD sebesar 8,73 kali lebih kecil daripada SNR yang dihasilkan oleh PIN.

### Daftar Pustaka

- [1] Rajan Sagotra, Reena Aggarwal, "Visible Light Communication" *International Journal of Computer Trends and Technology* (IJCTT)-volume4Issue4-April 2013.
- [2] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Underwater optical wireless communication," IEEE access, vol. 4, pp. 1518–1547, 2016.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] S. Corporation. (2016) *Bluecomm underwater optical communication*. [Online]. Available: <https://www.sonardyne.com/app/uploads/2016/06/BlueComm.pdf>
- [6] E. Hulburt, "Optics of distilled and natural water," *Josa*, vol. 35, no. 11, pp.698–705, 1945.
- [7] G. Keiser, *Optical fiber communications*. McGraw-Hill Singapore, 2010.
- [8] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®*. CRC press, 2017.

- [9] 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.
- [10] S. Arnon, "Underwater optical wireless communication network," *Optical Engineering*, vol. 49, no. 1, p. 015001, 2010.
- [11] Edwards, Kimberly D. "[Light Emitting Diodes](#)". *University of California at Irvine*. p. 2. Retrieved January 12, 2019.
- [12] Y. E. Taissir "Performance Comparison between OOK, PPM and PAM Modulation Schemes for Free Space Optical (FSO) Communication Systems: Analytical Study," *International Journal of Computer Application*, vol 79- No 11, October 2013.

