

# ANALISIS PENGARUH TURBULENSI TERHADAP PERFORMANSI SISTEM KOMUNIKASI CAHAYA TAMPAK DI BAWAH AIR PADA LINK VERTIKAL

## *ANALYZE THE EFFECT OF TURBULENCY TOWARDS THE PERFORMANCE OF VERTICAL UNDERWATER VISIBLE LIGHT COMMUNICATION LINK*

Mochammad Hafiz Kurnia<sup>1</sup>, Akhmad Hambali<sup>2</sup>, Dharu Arseno<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Universitas Telkom, Bandung

<sup>1</sup>[hafizkurnia@student.telkomuniversity.ac.id](mailto:hafizkurnia@student.telkomuniversity.ac.id), <sup>2</sup>[ahambali@telkomuniversity.ac.id](mailto:ahambali@telkomuniversity.ac.id),

<sup>3</sup>[darseno@telkomuniversity.ac.id](mailto:darseno@telkomuniversity.ac.id)

---

### Abstrak

Seiring dengan perkembangan teknologi VLC, semakin banyak dilakukan penelitian pengiriman informasi menggunakan sistem komunikasi VLC dibawah air atau *Underwater Visible Light Communication* (UVLC). Namun, tidak seperti VLC *indoor* atau skenario atmosfer, UVLC mempunyai tantangan tersendiri yaitu eksponensial koefisien atenuasi air, dan batasan *bandwidth* yang digunakan untuk sumber cahaya LED. Tugas Akhir ini menganalisis pengaruh adanya turbulensi terhadap performansi sistem komunikasi cahaya tampak di bawah air vertikal.

Dalam penelitian Tugas Akhir ini, digunakan dua skenario simulasi. Skenario I menganalisis kinerja sistem UVLC *link* vertikal dengan kedalaman 10 m menggunakan jenis air laut *coastal ocean water* dan *clear ocean water* dengan masing-masing kedalaman 20 m pada kondisi tanpa turbulensi. Kemudian untuk skenario II menganalisis kinerja sistem UVLC *link* vertikal menggunakan jenis air laut *coastal ocean water* dan *clear ocean water* dengan masing-masing kedalaman 20 m pada kondisi adanya turbulensi lemah, sedang dan kuat. Kedua skenario simulasi tersebut diuji berdasarkan nilai daya terima (*Prx*), *Signal to Noise Ratio* (SNR), dan *Bit Error Rate* (BER).

**Kata Kunci** : BER, SNR, turbulensi, UVLC, vertikal.

---

### Abstract

*Along with the development of VLC technology, there are many researches conducted to be carried out on sending information using the Underwater Visible Light Communication (UVLC) communication system. However, unlike indoor VLC system or atmospheric scenarios, UVLC has its own challenges which namely the air exponential attenuation coefficient, and the bandwidth used for the LED light source. This thesis analyzes the effect of turbulence on the performance of a vertical underwater visible light communication.*

*In this thesis research, two simulation scenarios were used. Scenario I analyze the performance of the vertical link UVLC system using coastal ocean water and clear ocean water with a depth of 20 m each under the absence of turbulence conditions. Then for scenario II, analyzed the performance of the vertical link UVLC system using coastal ocean water and clear ocean water with a depth of 20 m each under the presence of weak, middle, and strong turbulence conditions. The two simulation scenarios were tested based on the value of Received Power (*Prx*), Signal to Noise Ratio (SNR), and Bit Error Rate (BER).*

**Keywords** : BER, SNR, turbulence, UVLC, vertical.

---

## 1. Pendahuluan

Banyaknya penggunaan spektrum frekuensi radio menyebabkan *traffic* komunikasi juga semakin padat, oleh karena itu diperlukan teknologi alternatif lain seperti teknologi VLC. VLC

merupakan sistem komunikasi optik nirkabel yang menggunakan cahaya tampak dengan panjang gelombang 390-790 nm [1].

Seiring dengan perkembangan teknologi VLC, semakin banyak dilakukan penelitian pengiriman informasi menggunakan sistem komunikasi VLC dibawah air atau UVLC. UVLC menarik perhatian besar terhadap militer, industri dan komunitas peneliti [2]. Peningkatan permintaan *Optical Wireless Communication* (OWC) dikarenakan adanya ekspansi kegiatan maritim yang berkelanjutan seperti pemantauan lingkungan, pengumpulan data oseanografi, eksplorasi ladang minyak lepas pantai, keamanan pelabuhan dan juga pengawasan taktis [3].

OWC mengacu terhadap transmisi data pada inframerah, cahaya tampak dan pita ultraviolet yang menggunakan sumber cahaya seperti pancaran cahaya dioda (LED), dioda laser (LD) atau laser [4]. Dikarenakan air secara relatif transparan terhadap warna cahaya biru dan hijau (450 nm – 550 nm), LED dapat digunakan sebagai transmitter untuk konektivitas dalam air nirkabel [5]. Fitur-fitur tersebut membuka peluang untuk komunikasi data, dan juga untuk VLC [6].

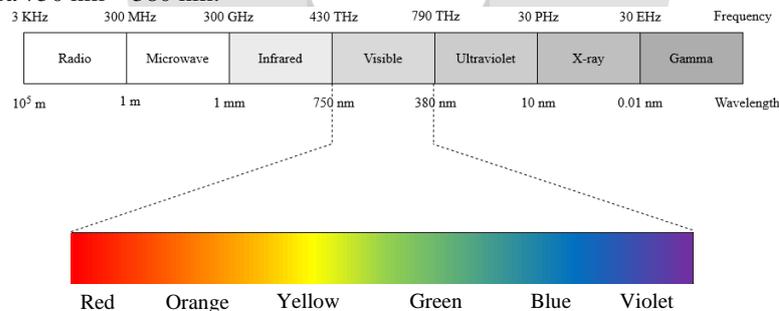
Faktor internal yang mempengaruhi perubahan suhu dan salinitas adalah kedalaman air [7]. Dalam sistem UVLC, terdapat turbulensi optik di bawah air yang terjadi karena adanya perubahan indeks bias air laut dan menyebabkan fluktuasi seketika atas daya rata-rata yang diterima [8]. Dikarenakan profil suhu dan salinitas tidak linier (gradien suhu dan salinitas berubah seiring dengan kedalaman), maka kekuatan dari turbulensi juga bergantung dari kedalaman air laut [5].

Oleh karena itu, dalam Tugas Akhir ini penulis melakukan penelitian untuk menganalisis pengaruh dari turbulensi terhadap sistem UVLC pada *link* vertikal dengan mengusulkan sebuah judul “Analisis Pengaruh Turbulensi Terhadap Sistem Komunikasi Cahaya Tampak Di Bawah Air Pada Link Vertikal”. Dalam penelitian ini, menguji nilai performansi dari *Signal to Noise Ratio* (SNR) dan *Bit Error Rate* (BER).

## 2. Dasar Teori

### 2.1. Visible Light Communication (VLC)

*Visible Light Communication* (VLC) atau Sistem Komunikasi Cahaya Tampak merupakan sebuah sistem komunikasi yang memanfaatkan cahaya tampak sebagai media komunikasi antar perangkat atau *device*. Sistem ini menggunakan gelombang elektromagnetik pada spektrum cahaya tampak antara 750 nm – 380 nm.



Gambar 2.1 Spektrum Cahaya VLC

#### 2.1.1 Light-Emitting Diode (LED)

LED merupakan bahan semikonduktor yang memancarkan cahaya monokromatik yang tidak koheren ketika diberi tegangan maju [9]. Karena dalam Tugas Akhir ini menggunakan panjang gelombang air berkisar 500 nm – 560 nm, maka spektrum warna LED yang tepat adalah LED berwarna hijau-kuning dengan tipe SMD 4003 [10].

#### 2.1.2 Photodetector

*Photodetector* merupakan komponen utama dalam *receiver* dalam sistem VLC. Fungsi utama komponen ini ialah untuk mengkonversi sinyal cahaya menjadi listrik. Fotodioda menghasilkan pulsa listrik berdasarkan tingkat iluminasi cahaya yang dihasilkan LED [1].

## 2.2 Underwater Visible Light Communication (UVLC)

UVLC atau sistem komunikasi cahaya tampak di bawah air diterapkan dengan memiliki nilai indeks bias  $>1$ . Teknologi UVLC memanfaatkan LED sebagai sumber optik, oleh karena itu teknologi UVLC merupakan jenis komunikasi jarak pendek.

### 2.2.1 Jenis Air

Menurut [11], jenis air terdiri dari tiga kelas utama: air paling jernih, air perantara dan air paling keruh. Klasifikasi umum lainnya yang dipertimbangkan dalam literatur [12], [13], air dibagi menjadi empat jenis, yaitu air laut murni (*pure seawater*), air laut jernih (*clear ocean water*), air laut pesisir (*coastal ocean water*), air pelabuhan keruh (*turbid harbor*), dan air muara (*estuary water*). Pada Tugas Akhir ini, dua jenis tipe air laut yang digunakan adalah *clear ocean water* dan *coastal ocean* [14].

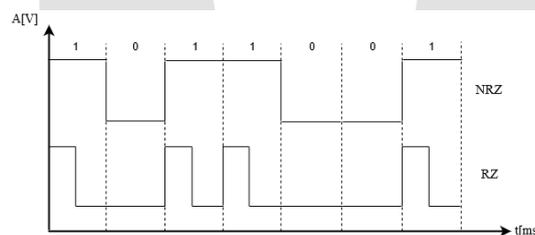
### 2.3 Optical Concentrator

Fungsi dari *Optical Concentrator* yaitu untuk meningkatkan area pengumpulan efektif secara keseluruhan [7]. *Gain* dari *optical concentrator* berkaitan dengan besar indeks refraktif *concentrator* ( $n$ ) dan sudut FoV yang dapat dirumuskan dengan:

$$G_{con} = \frac{n^2}{\sin(FoV)^2} \quad (2.1)$$

### 2.4 Teknik Modulasi

Modulasi merupakan proses penumpangan sinyal informasi ke dalam sinyal pembawa. Dalam penelitian ini, teknik modulasi yang akan digunakan yaitu *On-Off Keying* (OOK). Dalam OOK-NRZ, bit 1 melambangkan terdapatnya pulsa optik pada suatu interval, sedangkan bit 0 melambangkan tidak terdapatnya pulsa optik [15].



Gambar 2.4 Sinyal OOK-NRZ.

### 2.5 Parameter Performansi Sistem

Pada sistem UVLC ini terdapat pemodelan kanal transmisi yaitu kanal LoS. Kanal LoS tersebut dimodelkan dengan *link* vertikal dan turbulensi sehingga dapat menentukan performansi sistem ini, yaitu daya terima, SNR, dan BER.

#### 2.5.1 Kanal Transmisi

Kanal LOS menawarkan *data rate* yang lebih tinggi dengan jangkauan transmisi dari meter hingga kilometer [16]. Pada model kanal ini berfokus pada efek dari perbedaan jenis air berdasarkan nilai absorpsi, nilai *scattering* dan koefisien atenuasi.

Lingkungan bawah air ditentukan pada tiga nilai utama, yaitu nilai absorpsi, *scattering*, dan atenuasi. Nilai dari absorpsi, *scattering*, dan koefisien atenuasi pada air dapat dinotasikan pada persamaan berikut:

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

nilai  $b(\lambda)$  dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

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

Nilai dari absorpsi dan *scattering* yang umumnya digunakan pada air laut ditunjukkan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1.** Nilai Absorpsi dan *Scattering* Air [22]

Tipe Air	a (m <sup>-1</sup> )	b (m <sup>-1</sup> )	c (m <sup>-1</sup> )
Clear Ocean	0,114	0,037	0,151
Coastal Water	0,179	0,220	0,339
Turbid Harbor	0,366	1,829	2,195

**2.5.2 Link Vertikal**

Kanal UVLC dapat dibagi menjadi dua jenis utama, yaitu *link* horizontal dan *link* vertikal. Kinerja yang dipelajari pada *link* vertikal yaitu dengan gradien indeks bias dan profil atenuasi. Gradien dapat diperkirakan melalui lapisan kedalaman yang berlapis dengan rata-rata sifat optik yang dihitung. Perkiraan kasar yang akurat tersebut diterapkan agar menyerupai model *link* vertikal [17].

Kualitas dari sistem komunikasi bergantung pada nilai SNR dan daya terima yang digunakan [18]. Persamaan faktor *path loss* link vertikal adalah sebagai berikut:

$$L(\theta) = \frac{1}{A_L} \exp \left\{ -\frac{d_i c_i(\lambda)}{\cos(\theta_i)} \right\} \cdot \prod_{i=1}^N T_{i,i+1} \tag{2.4}$$

dimana  $d_i$  yaitu 10 meter,  $c_i(\lambda)$  adalah koefisien atenuasi dari masing-masing jenis air laut,  $\cos(\theta_i)$  sebesar 30° yaitu bernilai 0.86, dan  $T_{i,i+1}$  yaitu bernilai 1. Serta  $A_L$  adalah luas permukaan tiap layer menggunakan persamaan:

$$A_L = 2\pi \cdot R \cdot (H_{max} + H_{min}) \tag{2.5}$$

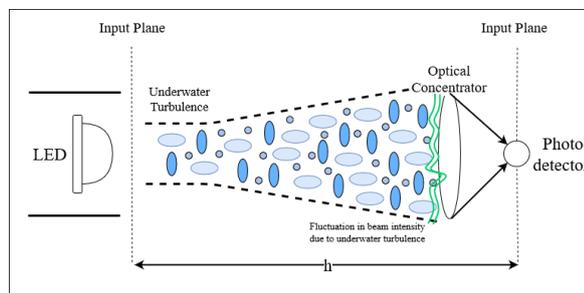
dimana  $R$  yaitu 20 m.  $H_{max} = 1 - \cos \theta_{max}$  dimana  $\theta_{max} = 60^\circ$ , sehingga nilai  $H_{max}$  adalah 0.5.  $H_{min} = 1 - \cos \theta_{min}$  dimana  $\theta_{min} = 0^\circ$ , sehingga nilai  $H_{min}$  adalah 0.

Nilai *received power* dalam dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut [21]:

$$P_{Rx} = P_{Tx} \cdot A_R \cdot G_{con} \cdot \cos \theta \cdot \eta_T \cdot \eta_R \cdot L(\theta) \tag{2.6}$$

dimana  $P_{Tx}$  adalah daya kirim sebesar 25 Watt,  $A_R$  adalah luas area photodetector,  $G_{con}$  adalah nilai *Gain Concentrator* yang bernilai 2.46.  $\eta_T$  adalah nilai efisiensi dari transmitter yang bernilai 0.75,  $\eta_R$  nilai efisiensi dari receiver yang bernilai 0.75,  $\theta$  adalah sudut FWHM sebesar 30° dan  $L(\theta)$  adalah faktor *path loss* pada vertikal UVLC.

**2.5.3 Turbulensi**



**Gambar 2.5** Ilustrasi turbulensi.

Turbulensi mempengaruhi perambatan cahaya di bawah air karena adanya sedikit perubahan dalam indeks bias yang terkait dengan suhu atau salinitas dalam membiaskan cahaya karena melewati lapisan turbulensi, secara efektif menginduksi beberapa hamburan dalam berkas cahaya [22]. Model klasik spektrum Kolmogorov dapat diterapkan pada lingkungan bawah laut [14]. Persamaan model spektrum tersebut adalah:

$$\Phi_n(\kappa) = K_3 \kappa^{-\frac{11}{3}} \quad (2.7)$$

Nilai  $\kappa$  merupakan *wavelength number* yang memiliki persamaan  $2\pi/\lambda$ . Namun, di dalam kondisi air laut konstanta spektrum kolmogorov  $K_3$  nilainya berkisar  $10^{-8}$  hingga  $10^2$ . Pada Tugas Akhir ini, konstanta  $K_3$  menggunakan nilai  $10^{-8}$  hingga  $10^{-6}$  sebagai acuan parameter turbulensi lemah, sedang dan kuat [14] sebagaimana pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2.** Spektrum Kolmogorov

Konstanta Kekuatan Turbulensi ( $K_3$ )	Turbulensi
$10^{-8}$	Lemah
$10^{-7}$	Sedang
$10^{-6}$	Kuat

Selanjutnya adalah menentukan  $\gamma_{scintilasi}$ . Dimana scintilasi adalah faktor-faktor yang menyebabkan atenuasi. Nilai  $\gamma_{scintilasi}$  didapatkan menggunakan persamaan:

$$\gamma_{scintilasi} = 2\sqrt{\Phi_n(\kappa)} \quad (2.8)$$

Sehingga, dengan memperhitungkan nilai  $\gamma_{scintilasi}$  sebagai parameter turbulensi, maka persamaan daya terima dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_{Rx} = P_{Tx} \cdot A_R \cdot G_{con} \cdot \cos \theta \cdot \eta_T \cdot \eta_R \cdot L(\theta) \cdot 10^{\frac{-\gamma R}{10}} \quad (2.9)$$

#### 2.5.4 Signal to Noise Ratio

*Signal to Noise Ratio* (SNR) merupakan suatu parameter yang digunakan untuk mengukur kualitas dari sinyal yang tercampur oleh *noise* atau derau. Perhitungan SNR dapat diperoleh dengan persamaan berikut [5]

$$SNR = \frac{(P_{Rx} \cdot Re \cdot M)^2}{\sigma_q^2 + \sigma_{th}^2 + \sigma_{bg}^2} \quad (2.10)$$

dimana  $P_{Rx}$  adalah daya terima pada *receiver*,  $Re$  adalah nilai responsivitas,  $M$  adalah faktor multiplikasi PIN yang bernilai 1,  $\sigma_q^2$  adalah *quantum noise*,  $\sigma_{th}^2$  adalah *thermal noise*, dan  $\sigma_{bg}^2$  adalah *background noise*.

$$\sigma_q^2 = 2 \cdot q \cdot B \cdot P_{Rx} \cdot R \quad (2.11)$$

$$\sigma_{th}^2 = \frac{4kT_e B}{R_L} \quad (2.12)$$

dimana, nilai  $q = 1.6 \times 10^{-19}$ ,  $B = 2$  GHz,  $k = 1.38 \times 10^{-23}$ ,  $T_e = 300$  K,  $R_L = 50 \Omega$ . Terdapat juga *background noise* atau  $\sigma_{bg}^2$  diperoleh menggunakan persamaan  $P_{BG}$  *Black Body*, yaitu [16]:

$$P_{BG} BB = \frac{2h_p c^2 \gamma_a A_R (\pi FOV^2) \Delta \lambda T_A T_F}{\lambda^5 \left( \exp\left(\frac{h_p}{\lambda k T_e}\right) - 1 \right)} \quad (2.13)$$

#### 2.5.5 Bit Error Rate

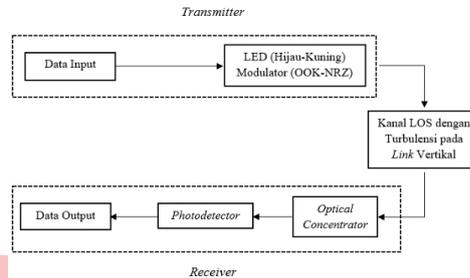
Dalam transmisi telekomunikasi, *Bit Error Rate* (BER) adalah presentase dari bit-bit yang memiliki *error* relatif terhadap jumlah total bit yang diterima dalam suatu transmisi [28]. Perhitungan BER untuk modulasi OOK-NRZ dapat menggunakan persamaan berikut,

$$BER_{OOK-NRZ} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{SNR} \right) \quad (2.14)$$

### 3. Perancangan dan Simulasi Sistem

#### 3.1 Desain Sistem

Pada penelitian ini, perancangan simulasi yang digunakan untuk komunikasi antara perahu dengan penyelam menggunakan lampu LED yang dimodulasi oleh format *On-Off Keying Non-Return to Zero* (OOK-NRZ). Desain simulasi dari sistem dapat dilihat pada Gambar 3.1.

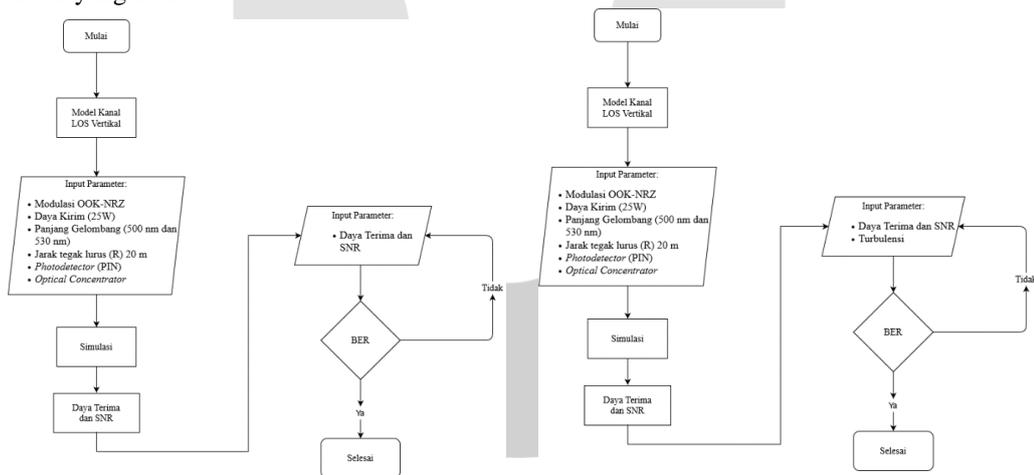


Gambar 3.1 Diagram blok sistem.

Pada Gambar 3.1 ditunjukkan blok diagram dari sistem UVLC pada Tugas Akhir ini. Sistem ini diawali oleh arus listrik dan kode biner atau sinyal digital sebagai input yang masuk ke LED. Di dalam LED, sinyal input tersebut ditumpangkan ke sinyal pembawa yaitu proses modulasi menggunakan modulasi OOK-NRZ.

#### 3.2 Flowchart Penelitian

Berikut merupakan *flowchart* atau diagram alir penelitian pada Tugas Akhir ini dengan dua skenario yang berbeda.



Gambar 3.2. Flowchart penelitian skenario I dan skenario II.

Gambar 3.2 menjelaskan alur dari penelitian Tugas Akhir pada skenario I dan skenario II.

#### 3.3 Parameter Input

Dalam melakukan simulasi, tentunya ada beberapa parameter yang berfungsi dalam mendukung penelitian. Terdapat beberapa nilai parameter dari berbagai elemen yang dimasukkan ke dalam simulasi. Parameter-parameter input pada simulasi akan dipaparkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Parameter Input Penelitian

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Transmitter	Jenis	LED	Receiver	Jenis Fotodetektor	PIN
	Jumlah	5 buah		FOV	70°
	Daya Kirim (P <sub>Tx</sub> )	5 Watt		Responsitivitas	0.6
	FWHM	30°		Lain – lain	Bandwidth

	Panjang Gelombang ( $\lambda$ )	Clear Water = 500 nm Coastal Water = 530 nm	Area fotodetektor	1 cm <sup>2</sup>	Indeks Refraktif Photodetector	1.474	Nilai absorpsi air laut	0.114 = clear 0.179 = coastal
	Jenis Air	Clear dan Coastal Ocean Water						
	Kanal	Line of Sight (Vertikal)						

### 3.4 Simulasi dan Perhitungan

Pada Tugas Akhir ini penulis melakukan 2 skenario untuk membuktikan pengaruh besaran turbulensi pada sistem UVLC vertikal sesuai dengan parameter yang di uji, yaitu daya terima, SNR, dan BER. Skenario I yaitu transmisi sistem UVLC vertikal tidak dipengaruhi oleh nilai turbulensi. Skenario II transmisi sistem UVLC vertikal dipengaruhi oleh nilai turbulensi yang berbeda-beda, yaitu turbulensi lemah, sedang, dan kuat.

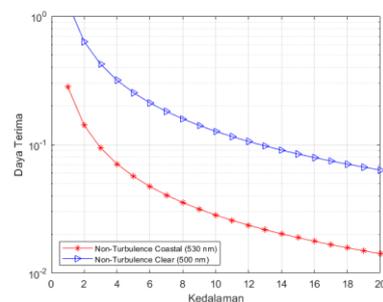
## 4. Analisis Simulasi Sistem

Skenario yang di uji dalam simulasi dilakukan dengan membandingkan kedalaman terhadap daya terima, SNR dan BER dengan kondisi tanpa turbulensi dan kondisi dengan adanya turbulensi.

### 4.1 Analisis Simulasi Skenario I

Pada skenario I, daya yang dikirim sebesar 25 Watt dari satu buah LED berwarna hijau-kuning dan dengan sudut FWHM sebesar 30°. Perhitungan yang digunakan adalah kanal LoS dengan link vertikal dimana menggunakan dua jenis air yang berbeda, yaitu *coastal ocean water* dan *clear ocean water*. Dalam skenario ini dilakukan dengan kondisi tanpa turbulensi. Jarak tegak lurus air (R) masing-masing sebesar 20 m.

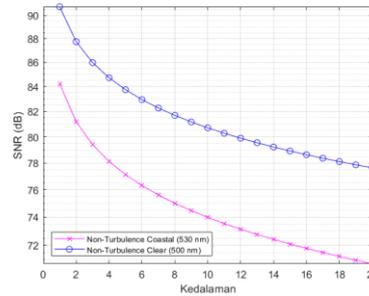
#### 4.1.1 Analisis Nilai Daya Terima pada Skenario I



Gambar 4.1. Kurva kedalaman terhadap daya terima pada skenario I.

Pada Gambar 4.1 menunjukkan kurva dari kedalaman air terhadap daya terima dengan kondisi tanpa turbulensi. Nilai daya terima yang dihasilkan dengan jenis air *coastal ocean water* pada kedalaman 5 meter yaitu sebesar  $5,6 \times 10^{-2}$  W. Sedangkan nilai daya terima yang dihasilkan dengan jenis air *clear ocean water* pada kedalaman 5 meter yaitu sebesar  $2,5 \times 10^{-1}$  W. Berdasarkan kurva pada gambar tersebut dapat diketahui bahwa semakin dekat kedalaman *receiver* dari *transmitter*, maka nilai daya terima pada *photodetector* semakin besar.

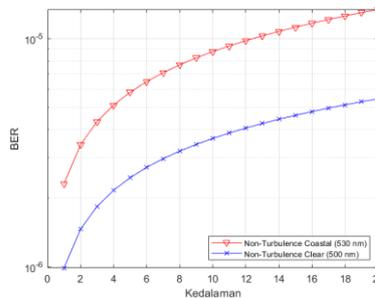
#### 4.1.2 Analisis Nilai SNR pada Skenario I



Gambar 4.2. Kurva kedalaman terhadap SNR pada skenario I.

Pada Gambar 4.2 dapat dianalisis dari Kurva SNR bahwa semakin jauh kedalaman *receiver* dari *transmitter*, maka nilai SNR yang dihasilkan juga semakin kecil. Pada jenis air *coastal ocean water* nilai SNR pada kedalaman 5 meter yaitu sebesar 77,12 dB. Kemudian, pada jenis air *clear ocean water* nilai SNR pada kedalaman 5 meter yaitu sebesar 83,73 dB. Nilai SNR yang semakin kecil seiring dengan bertambahnya kedalaman air disebabkan oleh *noise* dan daya terima.

4.1.3 Analisis Nilai BER pada Skenario I



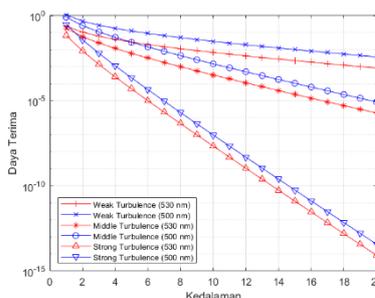
Gambar 4.3. Kurva kedalaman terhadap BER pada skenario I.

Pada Gambar 4.3 diketahui bahwa dari Kurva BER dengan daya kirim 25 W menghasilkan *error rate* yang beragam. Pada jenis air *coastal ocean water* dimulai dari kedalaman 5 m nilai BER bernilai 5,824 x 10<sup>-6</sup>. Kemudian pada jenis air *clear ocean water* dimulai dari kedalaman 5 m nilai BER bernilai 2,459 x 10<sup>-6</sup>. Dapat disimpulkan dari nilai pada kurva tersebut, bahwa semakin jauh kedalaman *receiver* dari *transmitter*, maka nilai BER akan semakin tinggi.

4.2 Analisis Simulasi Skenario II

Pada skenario II, daya yang dikirim sebesar 25 Watt dari satu buah LED berwarna hijau-kuning dan dengan sudut pancar sebesar 30°. Perhitungan yang digunakan adalah kanal LoS dengan *link* vertikal dimana menggunakan dua jenis air *coastal ocean water* dan *clear ocean water*. Dalam skenario ini dilakukan dengan kondisi terdapat turbulensi, yaitu turbulensi lemah, turbulensi sedang, dan turbulensi kuat. Jarak tegak lurus air (R) sebesar 20 m pada masing-masing jenis air.

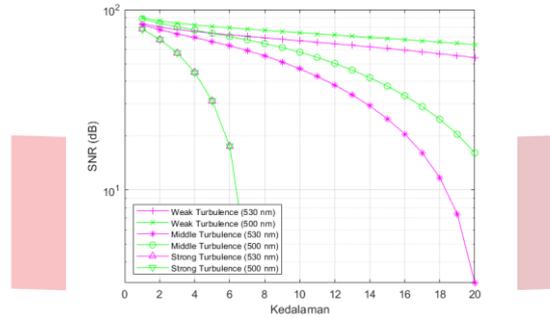
4.2.1 Analisis Nilai Daya Terima pada Skenario II



Gambar 4.4. Kurva kedalaman terhadap daya terima pada skenario II.

Pada Gambar 4.4 menunjukkan kurva dari daya terima terhadap kedalaman air dengan kondisi adanya turbulensi. Pada kurva tersebut terdapat tiga macam turbulensi berdasarkan nilai parameter  $K_3$  yaitu turbulensi lemah, turbulensi sedang, dan turbulensi kuat. Pada jenis air *coastal ocean water*, nilai daya terima dengan turbulensi sedang yang dihasilkan pada kedalaman 5 meter sebesar  $4,8 \times 10^{-3}$  W. Kemudian pada jenis air *clear ocean water*, nilai daya terima dengan turbulensi sedang yang dihasilkan pada kedalaman 5 meter sebesar  $2,74 \times 10^{-2}$  W. Pengaruh kekuatan turbulensi terhadap daya terima dikarenakan pengaruh dari parameter  $K_3$  yang berbeda-beda.

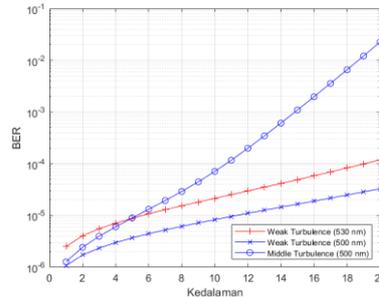
#### 4.2.2 Analisis Nilai SNR pada Skenario II



**Gambar 4.5.** Kurva Kedalaman terhadap SNR pada Skenario II

Pada Gambar 4.5 dapat dianalisis dari Kurva SNR dengan tiga kekuatan turbulensi yang berbeda. Pada jenis air *coastal ocean water*, Nilai SNR pada kedalaman 5 m pada tingkat turbulensi lemah 73,57 dB, pada tingkat turbulensi sedang 65,15 dB, dan pada tingkat turbulensi kuat 24,35 dB. Selanjutnya pada jenis air *clear ocean water*, nilai SNR pada kedalaman 5 m pada tingkat turbulensi lemah 80,65 dB, pada tingkat turbulensi sedang 73,83 dB, dan pada tingkat turbulensi kuat 43,80 dB.

#### 4.2.3 Analisis Nilai BER pada Skenario II



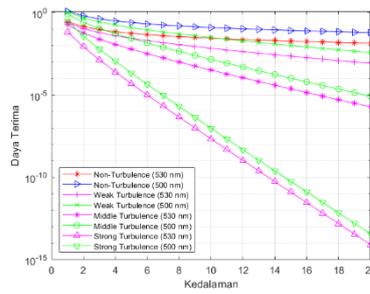
**Gambar 4.6.** Kurva Kedalaman terhadap BER pada Skenario II

Pada Gambar 4.6 diketahui bahwa dari Kurva BER dengan daya kirim 25 W menghasilkan *error rate* yang beragam sesuai dengan tingkat turbulensi. Pada jenis air *coastal ocean water*, dimulai dari kedalaman 5 m nilai BER  $9,26 \times 10^{-6}$  pada kondisi turbulensi lemah, nilai BER  $2,79 \times 10^{-5}$  pada kondisi turbulensi sedang, dan nilai BER sebesar  $6,88 \times 10^{-3}$  pada kondisi turbulensi kuat. Selanjutnya pada jenis air *clear ocean water*, dimulai dari kedalaman 5 m nilai BER sebesar  $3,67 \times 10^{-6}$  pada kondisi turbulensi lemah, nilai BER sebesar  $8,94 \times 10^{-5}$  pada kondisi turbulensi sedang, dan nilai BER sebesar  $4,77 \times 10^{-4}$  pada kondisi turbulensi kuat.

### 4.3 Analisis Perbandingan Skenario I dan Skenario II

Analisis ini merupakan analisis perbandingan dari skenario I terhadap skenario II. Dalam perbandingan ini dilakukan analisis performansi dengan kondisi tanpa turbulensi dan kondisi terdapat turbulensi, yaitu turbulensi lemah, turbulensi sedang, dan turbulensi kuat.

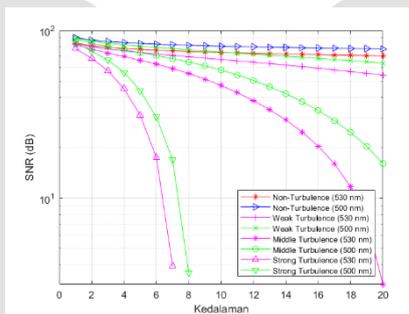
#### 4.3.1 Analisis Perbandingan Daya Terima pada Skenario I dan Skenario II



**Gambar 4.7.** Kurva perbandingan kedalaman terhadap daya terima pada skenario I dan skenario II.

Pada kurva Gambar 4.7 dapat dilakukan analisis, bahwa turbulensi mempengaruhi nilai daya yang diterima oleh receiver. Pada jenis air *coastal ocean water*, nilai daya terima skenario I dengan kondisi tanpa turbulensi pada kedalaman 5 meter sebesar  $5,6 \times 10^{-2}$  W. Lalu, di skenario II dengan kedalaman yang sama yaitu 5 meter, dengan kondisi turbulensi sedang dihasilkan daya terima sebesar  $4,8 \times 10^{-3}$  W. Sedangkan pada jenis air *clear ocean water*, nilai daya terima skenario I dengan kondisi tanpa turbulensi pada kedalaman 5 m sebesar  $2,53 \times 10^{-1}$  W. Lalu, di skenario II dengan kedalaman yang sama yaitu 5 meter, dengan kondisi turbulensi sedang dihasilkan daya terima sebesar  $2,74 \times 10^{-2}$  W. Dapat disimpulkan melalui angka numerik, bahwa dengan adanya turbulensi menurunkan nilai daya terima pada kedalaman yang sama.

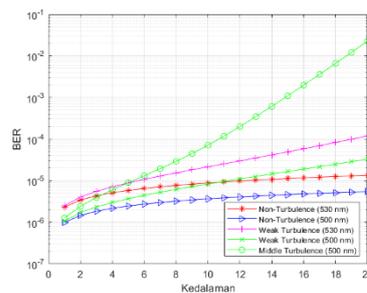
**4.3.2 Analisis Perbandingan SNR pada Skenario I dan Skenario II**



**Gambar 4.8.** Kurva perbandingan kedalaman terhadap SNR pada skenario I dan skenario II.

Pada Gambar 4.8 dapat dianalisis dari Kurva SNR pada skenario I dan skenario II. Tingkat turbulensi mempengaruhi nilai SNR yang dihasilkan pada sistem ini, dimana semakin besar tingkat turbulensi maka nilai SNR yang dihasilkan akan semakin menurun. Pada jenis air *coastal ocean water*, di skenario I dengan kondisi tanpa turbulensi, nilai SNR yang dihasilkan pada kedalaman 20 meter sebesar 70,73 dB. Lalu, di skenario II dengan kedalaman yang sama yaitu 20 meter dengan kondisi turbulensi sedang dihasilkan nilai SNR sebesar -5,64 dB. Sedangkan pada jenis air *clear ocean water* di skenario I dengan kondisi tanpa turbulensi, nilai SNR yang dihasilkan pada kedalaman 20 meter sebesar 77,62 dB. Lalu, di skenario II dengan kedalaman yang sama yaitu 20 meter, dengan kondisi turbulensi sedang dihasilkan nilai SNR sebesar 16,08 dB.

**4.3.3 Analisis Perbandingan BER pada Skenario I dan Skenario II**



**Gambar 4.9.** Kurva perbandingan kedalaman terhadap BER pada skenario I dan skenario II.

Pada Gambar 4.9 diketahui bahwa dari Kurva BER dengan daya kirim 25 W menghasilkan *error rate* yang beragam pada skenario I dan skenario II. Tingkat turbulensi mempengaruhi nilai BER yang dihasilkan pada sistem ini, dimana semakin tinggi tingkat turbulensi maka BER yang dihasilkan juga akan semakin besar. Pada jenis air *coastal ocean water*, di skenario I dengan kondisi tanpa turbulensi, nilai BER pada kedalaman 5 m sebesar  $5,82 \times 10^{-6}$ . Lalu, di skenario II dengan kedalaman yang sama yaitu 5 m dihasilkan nilai BER sebesar  $2,79 \times 10^{-5}$  dengan kondisi turbulensi sedang. Sedangkan pada jenis air *clear ocean water*, di skenario I dengan kondisi tanpa turbulensi, nilai BER pada kedalaman 5 m yaitu sebesar  $2,45 \times 10^{-6}$ . Lalu, di skenario II dengan kedalaman yang sama yaitu 5 m, dihasilkan nilai BER sebesar  $8,94 \times 10^{-5}$  dengan kondisi turbulensi sedang.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan data hasil simulasi dan analisis penelitian pada Bab IV mengenai performansi skenario I tanpa adanya turbulensi dan performansi skenario II dengan adanya turbulensi, penulis dapat menarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari perbandingan nilai daya terima, SNR dan BER pada skenario I dan skenario II pada jenis air *coastal ocean water* dan *clear ocean water*, dihasilkan nilai parameter paling baik di skenario I pada kedalaman 5 meter dengan jenis air *clear ocean water* yaitu daya terima sebesar  $2,53 \times 10^{-1}$  W, SNR sebesar 83,73 dB dan BER  $2,459 \times 10^{-6}$ . Hal ini membuktikan semakin ideal kedalaman dan jenis air, maka daya terima, SNR, dan BER yang dihasilkan semakin baik.
2. Perbedaan jenis air yang dilakukan pada dua skenario yang berbeda dapat mempengaruhi nilai hasil performansi sistem. Dalam skenario I tanpa turbulensi dengan jenis air *clear ocean water* di kedalaman 20 meter nilai SNR yaitu sebesar 77,62 dB sedangkan dengan jenis *coastal ocean water* di kedalaman dan skenario yang sama nilai SNR yaitu sebesar 70,73 dB. Hal ini disebabkan oleh perbedaan koefisien atenuasi pada jenis air *coastal ocean water* yang lebih tinggi dibandingkan dengan koefisien atenuasi pada jenis air *clear ocean water*.
3. Terdapatnya turbulensi pada air laut dapat mempengaruhi performansi sistem UVLC link vertikal. Performansi sistem dapat dikatakan baik apabila nilai SNR  $\geq 30$  dB. Pada simulasi skenario I dengan jenis air *clear ocean water* dapat mencapai kedalaman 20 meter dengan SNR 77,62 dB, kemudian pada skenario II dengan turbulensi lemah dapat mencapai kedalaman 20 meter dengan SNR 80,65 dB, dengan turbulensi sedang hanya mencapai kedalaman 16 meter dengan SNR 33,34 dB, sedangkan dengan turbulensi kuat hanya mencapai kedalaman 6 meter dengan SNR 30,41 dB.
4. Di kedalaman air yang sama yaitu 5 meter dan pada jenis air *clear ocean water*, SNR yang dihasilkan berbeda pada kondisi tanpa turbulensi dan terdapatnya turbulensi. Pada simulasi skenario I SNR yang dihasilkan adalah 83,73 dB pada kondisi tanpa turbulensi, sedangkan pada simulasi skenario II dihasilkan nilai SNR 80,65 dB pada turbulensi lemah, SNR 73,83 dB pada turbulensi sedang, dan SNR 43,80 dB pada turbulensi kuat. Hal ini menunjukkan bahwa turbulensi dapat mempengaruhi performansi sistem menjadi lebih buruk sesuai dengan kekuatan dari turbulensi tersebut.

---

#### Referensi:

- [1] T. Adiono and A. Pradana, "Experimental Evaluation for PWM and OFDM Based Visible Light Communication," no. October, pp. 2–3, 2016.
- [2] C. Wang, H. Y. Yu, and Y. J. Zhu, "A long distance underwater visible light communication system with single photon avalanche diode," *IEEE Photonics J.*, vol. 8, no. 5, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1109/JPHOT.2016.2602330.
- [3] C. M. G. Gussen, P. S. R. Diniz, M. L. R. Campos, W. A. Martins, F. M. Costa, and J. N. Gois, "A Survey of Underwater Wireless Communication Technologies," *J. Commun. Inf. Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 242–255, 2016, doi: 10.14209/jcis.2016.22.
- [4] M. Elamassie and M. Uysal, "Performance Characterization of Vertical Underwater VLC Links in the Presence of Turbulence," *2018 11th Int. Symp. Commun. Syst. Networks Digit. Signal Process. CSNDSP 2018*, 2018, doi: 10.1109/CSNDSP.2018.8471888.

- [5] M. Elamassie, F. Miramirkhani, and M. Uysal, "Performance characterization of underwater visible light communication," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 1, pp. 543–552, 2019, doi: 10.1109/TCOMM.2018.2867498.
- [6] O. W. Communications, *Ghassemlooy, Z. Popoola, W. Rajbhandari, S - Optical Wireless Communications System and Channel Modelling with MATLAB®-CRC Press LLC (2019).pdf*. 2018.
- [7] S. I. Patty, "Jurnal Ilmiah Platax DISTRIBUSI SUHU , SALINITAS DAN OKSIGEN TERLARUT DI PERAIRAN KEMA , SULAWESI UTARA 1 Distribution Temperature , Salinity And Dissolved Oxygen In Waters Kema , North Sulawesi Jurnal Ilmiah Platax," *Ilm. Platax*, vol. 1, no. 3, pp. 148–157, 2013.
- [8] Z. Zeng, S. Fu, H. Zhang, Y. Dong, and J. Cheng, "A Survey of Underwater Optical Wireless Communications," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 204–238, 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2618841.
- [9] Suyatno<sup>1</sup> and E. Kurniawati<sup>2</sup>, "Analisa Implementasi Visible Light Communication (Vlc) Menggunakan Rgb Led Berbasis Arduino," *J. ICT*, vol. 9, no. 17, pp. 32–41, 2018.
- [10] S. M. D. Led, "Data Sheet 2835 SMD LED Nationstar LED," pp. 1–8
- [11] M. Lan zagorta, *Underwater communications*, vol. 6. 2012.
- [12] B. M. Cochenour, L. J. Mullen, and A. E. Laux, "Characterization of the beam-spread function for underwater wireless optical communications links," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 33, no. 4, pp. 513–521, 2008, doi: 10.1109/JOE.2008.2005341.
- [13] C. Gabriel, M. A. Khalighi, S. Bourennane, P. Léon, and V. Rigaud, "Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–12, 2013, doi: 10.1364/JOCN.5.000001.
- [14] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Underwater Optical Wireless Communication," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1518–1547, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2552538.
- [15] L. Andrej *et al.*, "Features and range of the FSO by use of the OFDM and QAM modulation in different atmospheric conditions," *Wirel. Sensing, Localization, Process. IX*, vol. 9103, no. May, p. 910300, 2014, doi: 10.1117/12.2050279
- [16] F. Seguel, I. Soto, P. Adasme, N. Krommenacker, and P. Charpentier, "Potential and challenges of VLC based IPS in underground mines," *2017 1st South Am. Colloq. Visible Light Commun. SACVLC 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/SACVLC.2017.8267610.
- [17] N. Anous, M. Abdallah, M. Uysal, and K. Qaraqe, "Performance Evaluation of LOS and NLOS Vertical Inhomogeneous Links in Underwater Visible Light Communications," *IEEE Access*, vol. 6, no. March, pp. 22408–22420, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2815743.
- [18] M. S. M. Gismalla and M. F. L. Abdullah, "Optimization of received power and SNR for an indoor attocells network in visible light communication," *J. Commun.*, vol. 14, no. 1, pp. 64–69, 2019, doi: 10.12720/jcm.14.1.64-69.
- [19] S. Arnon and D. Kedar, "Non-line-of-sight underwater optical wireless communication network," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 26, no. 3, p. 530, 2009, doi: 10.1364/josaa.26.000530.
- [20] S. Woods, W. Hou, W. Goode, E. Jarosz, and A. Weidemann, "Measurements of turbulence for quantifying the impact of turbulence on underwater imaging," *2011 IEEE/OES/CWTM 10th Work. Conf. Curr. Waves Turbul. Meas. CWTM 2011*, pp. 179–183, 2011, doi: 10.1109/CWTM.2011.5759548
- [21] S. M. J. Alam, M. R. Alam, G. Hu, and M. Z. Mehrab, "Bit Error Rate Optimization in Fiber Optic Communications," *Int. J. Mach. Learn. Comput.*, vol. 1, no. 5, pp. 435–440, 2011, doi: 10.7763/ijmlc.2011.v1.65.