

ANALISIS PENGARUH REDAMAN HUJAN TERHADAP PERFORMANSI SISTEM KOMUNIKASI OPTIK RUANG BEBAS DENGAN MODULASI 16-PSK

ANALYSIS OF RAIN ATTENUATION EFFECT ON FREE SPACE OPTIC COMMUNICATION SYSTEM PERFORMANCE WITH 16-PSK MODULATION

Ridwan Fauzi¹, Kris Sujatmoko², M. Irfan Maulana³

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

¹ridwanfauzi@student.telkomuniversity.ac.id, ²krissujatmoko@telkomuniversity.ac.id,

³muhammadirfanm@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Sistem komunikasi serat optik telah menjadi pilihan untuk kebutuhan komunikasi karena kualitasnya yang baik dan dapat memenuhi kebutuhan komunikasi. Sistem komunikasi *Free Space Optics* (FSO) merupakan sistem komunikasi optik yang memiliki kemampuan untuk memberikan *data-rate* yang tinggi dengan menggunakan ruang bebas sebagai media transmisinya. Kondisi cuaca seperti hujan, kabut dan salju menjadi tantangan utama sistem komunikasi ini. Pada jurnal ini diusulkan sistem komunikasi FSO dengan membandingkan modulasi 16 PSK dan QPSK sebagai pembandingnya, menggunakan jarak 3, 5 dan 10 km pada cuaca hujan dan menggunakan dua panjang gelombang yaitu 1310 nm dan 1550 nm dan menggunakan daya terima 1 watt, 10 watt dan 20 watt. Hasil dari analisis ini bertujuan untuk menganalisa kinerja sistem komunikasi FSO yang akan dikur dengan menggunakan nilai *bit error rate* (BER) pada setiap skenario. Hasilnya dari BER akan dibandingkan untuk mengetahui parameter yang cocok untuk sistem komunikasi ini.

Kata Kunci: FSO, BER, redaman hujan

Abstract

Fiber-optic communication systems have been chosen for communication needs because of their good quality and can meet communication needs. Free Space Optics (FSO) communication system is an optical communication system that provides high data rates by using free space as the transmission media. Weather conditions such as rain, fog, and snow are the main challenges of this system. In this journal, the FSO communication system is proposed with three distances that are 3, 5, and 10 km in rainy weather and uses two optical transmission windows that are 1310 nm and 1550 nm and using receiver power 1 watt, 10 watt, 20 watt. The results of the analysis are to analyzed the performance of the FSO communication system that will be measured using the bit error rate (BER) in each scenario. The results of the BER are compared to find out the most suitable parameter for this communication system.

Key Word: FSO, BER, rain attenuation

1. Pendahuluan

Sistem komunikasi FSO merupakan sistem komunikasi nirkabel yang mengirimkan sinyal optik dengan menggunakan ruang bebas sebagai media transmisinya. Keunggulan FSO yaitu memiliki bandwidth yang tinggi, biaya pemasangan murah, daya rendah dan lebih aman tetapi sistem komunikasi ini sangat dipengaruhi oleh *turbulence* dan redaman kanal atmosfer seperti hujan, kabut dan salju [1].

Pada sistem komunikasi FSO terdapat proses modulasi. Modulasi *On-off-Keying* (OOK) adalah modulasi paling sederhana yang digunakan untuk FSO tetapi kinerja OOK akan berkurang pada kondisi redaman yang tinggi. Proses modulasi pada sistem komunikasi FSO dapat menggunakan teknik modulasi yang lebih tinggi seperti modulasi PSK untuk mendapatkan hasil yang lebih baik. Modulasi PSK merupakan modulasi yang efektif untuk komunikasi nirkabel karena dapat memberikan *data-rate* yang tinggi dan efisiensi *bandwidth* [2].

Pada implementasi sistem komunikasi FSO terdapat beberapa faktor yang perlu diperbaiki seperti penggunaan modulasi untuk mendapatkan nilai *Bit Error Rate* (BER) yang baik dan bagaimana mengatasi kondisi hujan dan redaman atmosfer lainnya. Maka dalam penelitian ini digunakan modulasi 16-PSK untuk menganalisa kualitas BER. Perancangan simulasi sistem komunikasi FSO pada penelitian ini menggunakan dua panjang gelombang dengan jarak 3, 5 dan 10 km dan daya 1, 10 dan 20 watt pada tiga jenis redaman hujan yaitu hujan ringan, hujan sedang dan hujan lebat.

2. Konsep Dasar

2.1. Free Space Optic

Free Space Optic (FSO) adalah komunikasi optik yang dibentuk menggunakan teknologi *line-of-sight* (LOS) dan menggunakan *Light Amplification of Stimulated Emission by Radiation* (LASER) sebagai sumber cahayanya untuk melakukan koneksi dengan mentransmisikan sinar tampak melalui media atmosfer. FSO bekerja pada spektrum *unlicensed* dengan panjang gelombang 800-1700 nm. Pada jaringan transmisi FSO, data memiliki tingkat keamanan yang lebih tinggi karena dikirimkan melalui koneksi yang terenkripsi, selain itu sistem ini juga tahan terhadap gangguan elektromagnetik [3].

Sistem komunikasi FSO yang efektif harus memiliki karakteristik seperti kemampuan untuk beroperasi pada daya yang tinggi, menggunakan modulasi yang berkecepatan tinggi, memiliki daya yang rendah dan tahan pada berbagai kondisi cuaca sehingga kinerja untuk sistem *outdoor* akan lebih baik [4].

2.2. Redaman Hujan

Hujan adalah salah satu redaman yang dapat mengganggu proses transmisi pada komunikasi FSO. Redaman hujan di kategorikan pada hamburan *Non-Selective* karena radius tetesan hujan yang berukuran 100-1000 μm lebih besar daripada panjang gelombang sistem FSO. Pengaruh yang ditimbulkan dari redaman hujan yaitu menghambat proses transmisi data dan memperkecil daya yang diterima oleh *receiver* [5].

Indonesia memiliki cuaca yang *ekstrem* dan intensitas hujan yang tinggi. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Indonesia mengelompokkan hujan menjadi tiga jenis yaitu hujan ringan, hujan sedang dan hujan lebat berdasarkan intensitasnya seperti pada tabel 2.1 [6].

Tabel 2.1 Intensitas Curah Hujan di Wilayah Indonesia

Jenis Hujan	Intensitas Hujan (mm/hr)
Hujan Ringan	1-5
Hujan Sedang	5-10
Hujan Lebat	10-20

2.3. Modulasi PSK

Phase shift keying atau PSK merupakan teknik modulasi yang populer pada awalnya digunakan didalam komunikasi radio. Konsep dari modulasi ini adalah merubah sinyal pembawa untuk setiap bilangan biner[6]. Tingkat pergeseran fasa tergantung pada nilai bit. M dalam M-ary PSK menunjukkan derajat yang berbeda dari pergeseran fasa dalam PSK. Pada dasarnya penggunaan setiap modulasi memiliki keunggulan yang berbeda hal ini akan menunjukan kualitas data yang diterima. Beberapa yang mempengaruhi faktor pada modulasi adalah nilai SNR dan BER.

16-PSK secara umum dapat dikatakan sebagai modulasi digital yang membawa data dengan merubah fase dari sinyal referensi atau sinyal pembawa [6], pada modulasi PSK ada beberapa bit yang akan membentuk symbol yang diwakili oleh fase yang berbeda satu dengan lainnya. Pada sekema modulasi 16-PSK titik-titik konstlasi atau hubungan titik-titik bit ditempatkan dengan jarak atau antar symbol yang seragam sepanjang lingkaran konstlasi

3. Perancangan Sistem

3.1. Parameter performansi sistem

Kinerja sistem FSO dengan modulasi 16-PSK pada redaman hujan dihitung dengan menggunakan parameter-parameter sebagai berikut.

Tabel 2.2 Parameter Pengujian Kinerja Sistem

Parameter	Keterangan	Nilai
λ	Panjang Gelombang	1310 nm dan 1550 nm
L	Jarak	3, 5, 10 km
P_t	Daya Transmisi	1, 10, 20 watt
R_b	<i>bit-rate</i>	100 Mbps
B_w	Bandwidth	1,5 GHz
R	Responsitivitas <i>Photodetector</i> APD	0,75
R	Responsitivitas <i>Photodetector</i> PIN	0,6
R_l	Resistansi Beban	50 Ω
I_{d-APD}	Dark Current APD	10 nA
x	<i>Indeks Excess Noise</i> InGaAs	0,7

3.2. Parameter pengukur sistem

1. Signal-to-Noise Ratio (SNR)

Signal-to-Noise Ratio (SNR) adalah perbandingan antara perbandingan besar sinyal yang diterima dengan tingkat noise. Kualitas jaringan FSO salah satunya bisa diukur menggunakan perbandingan daya yang diterima di fotodetektor. perhitungan SNR pada fotodetektor PIN dapat menggunakan persamaan 4 [8].

$$SNR = \frac{I_p^2}{2qB_w(F_n + 1) + 4I_d T} \tag{4}$$

dimana, B_w adalah bandwidth, q adalah satuan unit eletron, I_d adalah dark current, I_p adalah arus primer, T adalah suhu di fotodetektor, F_n adalah noise figure, M adalah faktor multiplikasi fotodetektor PIN, x adalah indeks excess noise dan R_L adalah resistansi fotodetektor.

2. Bit Error Rate (BER)

Bit Error Rate (BER) adalah perbandingan antara jumlah bit yang *error* dengan jumlah total bit yang dikirimkan selama waktu pengamatan. BER digunakan untuk mengukur jumlah bit yang *error* per satuan waktu. Standar nilai BER pada komunikasi optik adalah 10^{-9} . Nilai BER untuk modulasi PSK dan QPSK dapat dihitung menggunakan persamaan 5 dengan k adalah jumlah bit yang digunakan dan persamaan tambahan variabel x pada persamaan 6 [2].

$$BER_{6-psk} = \frac{2}{\log_2 6} \left(\sin_{16}^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{\frac{2 E_b \log_2 6}{\rho_0}} \right) \tag{5}$$

$$BER_{qpsk} = \frac{2}{\log_2 4} \left(\sqrt{\frac{2 E_b}{\rho_0}} \right) \tag{6}$$

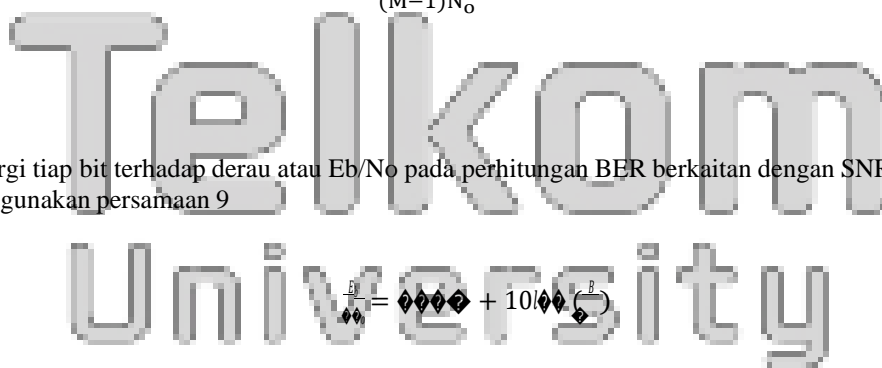
$$\rho_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{h\nu}{\sqrt{2}} \right) \tag{7}$$

Serta persamaan tambahan variabel x pada persamaan 8 dapat menggunakan persamaan

$$x = \sqrt{\frac{3k E_b}{(M-1)N_o}} \tag{8}$$

Rasio energi tiap bit terhadap derau atau E_b/N_o pada perhitungan BER berkaitan dengan SNR yang dapat dihitung menggunakan persamaan 9

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{P}{B} + 10 \log_{10} \left(\frac{B}{f} \right) \tag{9}$$

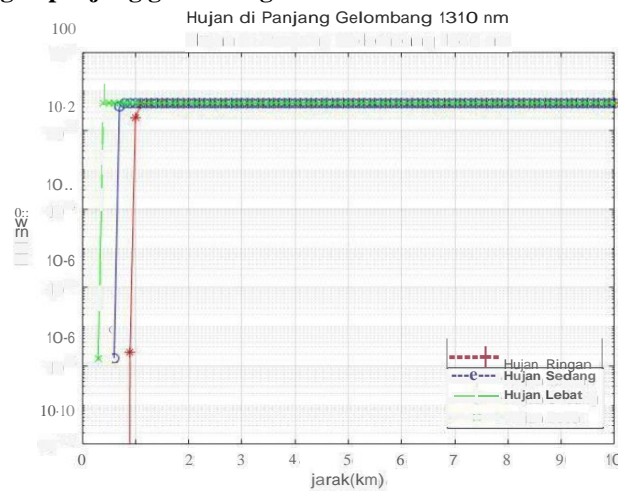


4. Hasil Pengujian

4.1. Analisis Hasil Skenario 1

Pada skenario pertama membandingkan pengaruh modulasi 16 PSK dan QPSK menggunakan dua panjang gelombang 1310 nm dan 1550 nm dengan kondisi hujan ringan, hujan sedang dan hujan lebat. Simulasi dilakukan untuk menentukan pengaruh jarak terhadap nilai *bit error rate* (BER) yang diterima pada jarak 3, 5 dan 10 km dengan menggunakan daya terima 1 watt

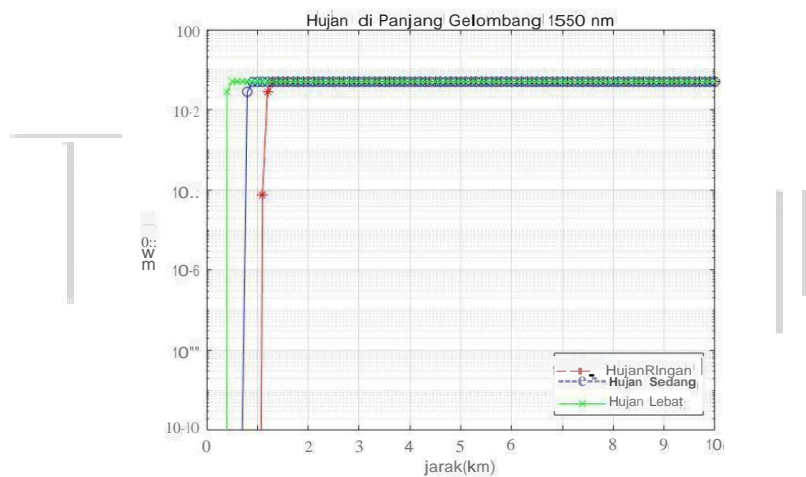
1. Pengujian BER dengan panjang gelombang 1310 nm



Gambar 4.1 Grafik BER perbandingan modulasi 16 PSK dan QPSK dengan panjang gelombang 1310 nm

Dari hasil pengujian dengan membandingkan modulasi 16-PSK dan QPSK pada Panjang gelombang 1310 diberikan daya sebesar 1 watt, nilai BER yang mendekati standar minimum terjadi saat kondisi hujan ringan, dengan modulasi 16-PSK pada jarak 0,89 km dengan nilai BER yaitu $2,44 \times 10^{-10}$. Kemudian pada jarak 3,5 dan 10 km dengan modulasi 16-PSK pada semua kondisi hujan memiliki nilai BER yang tinggi yaitu 0,049 sementara itu dengan modulasi QPSK pada semua kondisi hujan memiliki nilai BER yang lebih tinggi yaitu 0,254.

2. Pengujian BER dengan panjang gelombang 1550 nm



Gambar 4.2 Grafik BER perbandingan modulasi 16 PSK dan QPSK dengan panjang gelombang 1550nm

Dari hasil pengujian dengan membandingkan modulasi 16-PSK dan QPSK pada Panjang gelombang 1550 dengan daya 1 watt, nilai BER yang mendekati standar minimum terjadi saat kondisi hujan ringan, dengan modulasi 16-PSK pada jarak 1,06 km dengan nilai BER yaitu $3,97 \times 10^{-9}$. Kemudian pada jarak 3,5 dan 10 km dengan modulasi 16-PSK pada semua kondisi hujan memiliki nilai BER yang tinggi yaitu 0,049 sementara itu dengan modulasi QPSK pada semua kondisi hujan memiliki nilai BER yang lebih tinggi yaitu 0,254, untuk perbandingan lebih jelas disajikan dalam **table 4.1**

Tabel 4. 1 Tabel perbandingan BER

Jenis Hujan	16-PSK				QPSK			
	1310		1550		1310		1550	
	Jarak (km)	BER	Jarak (km)	BER	Jarak (km)	BER	Jarak (km)	BER
Hujan Ringan	0,89	$2,44 \times 10^{-10}$	1,06	$3,97 \times 10^{-9}$	0,89	$1,25 \times 10^{-11}$	1,05	$3,19 \times 10^{-10}$
Hujan Sedang	0,59	$9,56 \times 10^{-12}$	0,7	$3,88 \times 10^{-10}$	0,59	$4,9 \times 10^{-11}$	0,7	$1,99 \times 10^{-10}$
Hujan Lebat	0,29	$1,57 \times 10^{-8}$	0,35	$1,1 \times 10^{-11}$	0,3	$8,05 \times 10^{-8}$	0,35	$1,0 \times 10^{-10}$

Pada Tabel 4.1 dijelaskan data perbandingan nilai BER terbaik pada kedua modulasi dan setiap kondisi hujan. Pada simulasi skenario pertama nilai BER terbaik dihasilkan pada modulasi 16 -PSK dan panjang gelombang 1550 nm dengan kondisi hujan ringan dan jarak 1,06 km sebesar $3,97 \times 10^{-9}$, maka dapat dibuktikan bahwa semakin besar panjang gelombang dan semakin rendah redaman yang terjadi akan dihasilkan jarak tempuh yang semakin jauh dengan nilai BER yang rendah. Untuk jarak 3, 5, 10 km hasil ber disajikan pada **Tabel 4.2**

Tabel 4.2 hasil nilai BER pada jarak 3, 5 dan 10

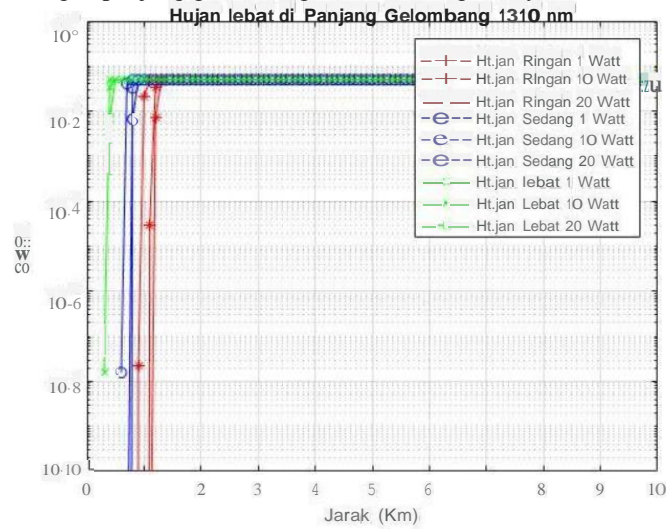
L	16 PSK					
	1310			1550		
	Ringan	Sedang	Lebat	Ringan	Sedang	Lebat
3	0.04965144	0.049651436	0.049651436	0.049651436	0.04965144	0.04965144
5	0.04965144	0.049651436	0.049651436	0.049651436	0.04965144	0.04965144
10	0.04965144	0.049651436	0.049651436	0.049651436	0.04965144	0.04965144
L	QPSK					
	1310			1550		
	Ringan	Sedang	Lebat	Ringan	Sedang	Lebat
3	0.374999999	0.375	0.375	0.374999509	0.375	0.375
5	0.375	0.375	0.375	0.375	0.375	0.375
10	0.375	0.375	0.375	0.375	0.375	0.375

Pada table 4.2 menunjukan hasil untuk perbandingan modulasi dengan menggunakan Panjang gelombang 1310 dan 1550 pada jarak 3, 5 10 km menggunakan daya sebesar 1 watt. Menunjukan hasil yang didapat pada kondisi jarak tersebut tidak memenuhi nilai BER nilai yang ditunjukan pada **tabel 4.2** . Menunjukan pengaruh hujan pada redaman hujan ringan dimodulasi 16 PSK memiliki nilai yang cukup baik karena bandwidth yang dimiliki oleh modulasi 16 PSK mempengaruhi BER yang dikirimkan ke penerima sehingga mampu memberikan nilai yang cukup baik meskipun belum memenuhi standar komunikasi optik yaitu 10^{-9}

4.2. Analisis Hasil Skenario 2

Pada skenario kedua menggunakan dua panjang gelombang 1310 nm dan 1550 nm dengan kondisi hujan ringan, hujan sedang dan hujan lebat. Pada skenario kedua ini digunakan dua daya berbeda yaitu 1 watt , 10 watt dan 20 watt. Simulasi dilakukan untuk menentukan pengaruh jarak terhadap nilai *bit error rate* (BER) yang diterima pada jarak 3, 5 dan 10 km.

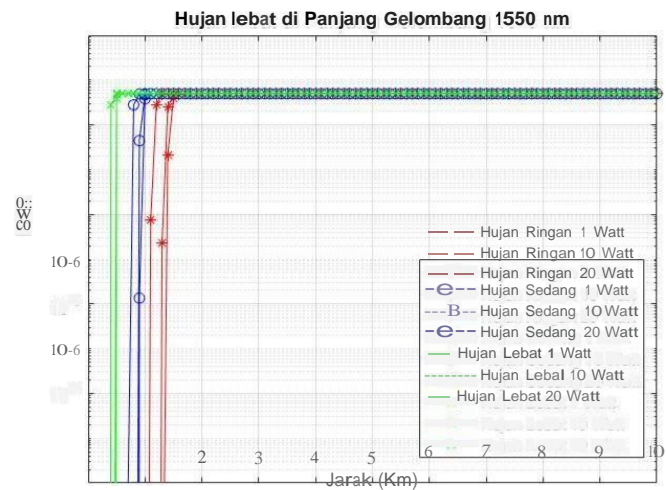
1. Pengujian BER dengan panjang gelombang 1310 nm dengan daya 1, 10 dan 20 watt



Gambar 4.3 Grafik BER terhadap jarak dengan panjang gelombang 1310 nm dengan perbandingan daya 1, 10 dan 20 watt

Dari hasil pengujian dengan membandingkan tiga daya 1, 10 dan 20 watt pada Panjang gelombang 1310 nilai BER yang mendekati standar minimum terjadi saat kondisi hujan ringan, dengan modulasi 16-PSK pada jarak 1,12 km dengan nilai BER yaitu $7,79 \times 10^{-10}$. Kemudian pada jarak 3,5 dan 10 km dengan daya 10 dan 20 watt pada semua kondisi hujan memiliki nilai BER yang tinggi yaitu 0,049.

2. Pengujian BER dengan panjang gelombang 1310 nm dengan daya 1 watt dan 5 watt



Gambar 4.4 Grafik BER terhadap jarak dengan panjang gelombang 1550 nm dengan perbandingan daya

Dari hasil pengujian dengan membandingkan tiga daya 1, 10 dan 20 watt pada Panjang gelombang 1550 nilai BER yang mendekati standar minimum terjadi saat kondisi hujan ringan, dengan modulasi 16-PSK pada jarak 1,33 km dengan nilai BER yaitu $4,99 \times 10^{-9}$. Kemudian pada jarak 3,5 dan 10 km dengan daya 10 dan 20 watt pada semua kondisi hujan memiliki nilai BER yang tinggi yaitu 0,049. Untuk perbandingan lebih jelas disajikan dalam table 4.2

Tabel 4.2 hasil perbandingan daya terhadap jarak

Jenis Hujan	1310 nm			1550 nm		
	Daya (Watt)	Jarak (km)	BER	Daya (Watt)	Jarak (km)	BER
Hujan Ringan	10	1,07	$2,71 \times 10^{-9}$	10	1,26	$2,34 \times 10^{-10}$
	20	1,12	$7,79 \times 10^{-10}$	20	1,33	$4,99 \times 10^{-9}$
Hujan Sedang	10	0,71	$1,44 \times 10^{-10}$	10	0,84	$1,37 \times 10^{-10}$
	20	0,75	$4,96 \times 10^{-9}$	20	0,88	$4,6 \times 10^{-11}$
Hujan Lebat	10	0,36	$9,79 \times 10^{-8}$	10	0,42	$1,37 \times 10^{-10}$
	20	0,37	$1,6 \times 10^{-12}$	20	0,44	$4,6 \times 10^{-11}$

Pada Tabel 4.2 dijelaskan data perbandingan nilai BER terbaik pada kedua modulasi dan setiap kondisi hujan. Pada simulasi skenario pertama nilai BER terbaik dihasilkan pada daya 20 watt dan panjang gelombang 1550 nm dengan kondisi hujan ringan dan jarak 1,33 km sebesar $4,99 \times 10^{-9}$, maka dapat dibuktikan bahwa semakin besar panjang gelombang dan semakin rendah redaman yang terjadi akan dihasilkan jarak tempuh yang semakin jauh dengan nilai BER yang rendah. Sementara untuk hasil BER pada perbandingan daya 1, 10 dan 20 watt pada jarak 3, 5 dan 10 km disajikan pada tabel 4.4

Tabel 4.4 hasil BER pada perbandingan daya 1, 10 dan 20 watt di jarak 3, 5 dan 10 km

L	1 Watt					
	1310			1550		
	Ringan	Sedang	Lebat	Ringan	Sedang	Lebat
3	0.3749995	0.375	0.375	0.0496514	0.0496514	0.0496514
5	0.375	0.375	0.375	0.0496514	0.0496514	0.0496514
10	0.375	0.375	0.375	0.0496514	0.0496514	0.0496514
L	10 Watt					
	1310			1550		
	Ringan	Sedang	Lebat	Ringan	Sedang	Lebat
3	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514
5	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514
10	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514
L	20 Watt					
	1310			1550		
	Ringan	Sedang	Lebat	Ringan	Sedang	Lebat
3	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514
5	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514
10	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514	0.0496514

Dari **Tabel 4.4** dijelaskan bahwa pengaruh daya terhadap jarak sangat berpengaruh namun untuk mencapai jarak yang cukup jauh penggunaan daya serta Panjang gelombang yang tinggi dapat menghasilkan daya pancar yang jauh, meskipun demikian dengan ditunjukkannya hasil nilai BER yang dipengaruhi oleh daya penggunaan panjang gelombang juga mempengaruhi performansi komunikasi sistem FSO.

5. Kesimpulan

Pengujian yang dilakukan pada panjang gelombang 1310 nm dan 1550 nm dengan kondisi hujan ringan, hujan sedang dan hujan lebat menunjukkan bahwa sistem FSO dengan modulasi 16-PSK memiliki kinerja yang bagus dibandingkan dengan QPSK karena modulasi 16-PSK memiliki kinerja yang baik untuk mengirimkan data serta ditunjang dengan titik konstalasi sehingga dapat mengirimkan bandiwdt yang baik pula. Pada panjang gelombang 1550 nm dengan kondisi hujan ringan. Pengaruh daya yang diberikan pada Panjang gelombang 1310 nm dan 1550 nm memberikan hasil yang baik ketika diberikan daya tinggi, dengan kondisi hujan sedang pengaruh daya terhadap jarak dapat mencapai 1,6 km dengan nilai BER sebesar $4,99 \times 10^{-9}$. ini berarti daya sangat berpengaruh untuk jarak. Dalam pengujian nilai BER terhadap jarak dengan jarak 1 km, 3 km dan 10 km nilai BER minimum didapatkan pada kondisi hujan ringan dengan jarak 0,89 km pada Panjang gelombang 1310, dengan nilai BER sebesar $2,44 \times 10^{-10}$, sedangkan untuk Panjang gelombang 1550 pada hujan ringan mencapai jarak 1,06 km denganniilai BER sebesar $3,97 \times 10^{-9}$



6. Referensi

- [1] Jha, P. K., Kachare, N., Kalyani, K., & Kumar, D. S. (2018). Performance analysis of FSO using relays and spatial diversity under log-normal fading channel. *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Energy Systems, ICEES 2018*, 121–125.
- [2] Kaur, J., Miglani, R., Malhotra, J. S., & Gaba, G. S. (2015). Performance analysis of M-ary PSK modulated FSO links over turbulent AWGN channel. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(15), 35322–35327.
- [3] MAJUMDAR, A. K. (2015). Advanced Free Space Optics (Fso) - a System Approach. In *Springer* (Vol. 140).
- [4] Malik, A., & Singh, P. (2015). Free Space Optics: Current Applications and Future Challenges. *International Journal of Optics*, 2015(November 2015).
- [5] Alkholdi and K. Altowij, "Effect of Clear Atmospheric Turbulence on Quality of Free Space Optical Communications in Western Asia," *Opt. Commun. Syst.*, no. March 2012, 2012.
- [6] BMKG, "Kondisi cuaca ekstrem dan iklim tahun 2010-2011," *Press Release*, pp. 7–9, 2010.
- [7] Sadinov, S. M. (2017). Simulation study of M-ARY PSK1 watt modulation techniques using Matlab/Simulink. *2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO 2017 - Proceedings*, (1), 547–554.
- [8] O. Kharraz and D. Forsyth, "PIN and APD photodetector efficiencies in the longer wavelength range 1300-1550 nm," *Optik (Stuttg.)*, vol. 124, no. 16, pp. 2574–2576, 2013.



Telkom
University