

# Performansi Sistem SS-WDM-MIMO Free Space Optic dengan Beberapa Teknik Modulasi

Rizki Aulia<sup>1</sup>, Rika Susanti<sup>2</sup>, Teddy Purnamirza<sup>3</sup>, Sutoyo<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau  
Email: <sup>1</sup>auliarizki9765@gmail.com, <sup>2</sup>rksusanti@gmail.com, <sup>3</sup>tpambusai@uin-suska.ac.id, <sup>4</sup>sutoyo@uin-suska.ac.id

## Abstrak

Sistem transmisi FSO menawarkan fleksibilitas yang tinggi. Dengan SS-WDM memberikan efisiensi menggunakan satu frekuensi yang diubah menjadi empat frekuensi yang berbeda. Pada penelitian ini digunakan modulasi : ASK, QPSK, EA, dan PolSK menggunakan *bitrate* 2.5, 10, dan 20 Gbps. Dengan daya 0 dbm kemudian disimulasikan menggunakan aplikasi Optisystem Pada *bitrate* 2.5 Gbps modulasi QPSK dan EA dapat mentransmisikan jarak terjauh hingga 45 Km dengan nilai BER masing masing sebesar  $3,17 \times 10^{-12}$  dan  $2,54 \times 10^{-12}$ , modulasi PolSK dapat mentransmisikan hingga 43 Km dengan nilai BER  $1,27 \times 10^{-12}$ . Dan modulasi ASK hingga 42 Km dengan nilai BER  $1,28 \times 10^{-15}$ . Pada *bitrate* 10 Gbps modulasi PolSK mampu mentransmisikan sejauh 43 Km dengan nilai BER  $7,97 \times 10^{-12}$  kemudian modulasi QPSK dan EA dapat mentransmisikan jarak sama jauh hingga 42 Km dengan nilai BER masing masing sebesar  $4,80 \times 10^{-12}$  dan  $1,90 \times 10^{-12}$ . Dan modulasi ASK tidak dapat mentransmisikan pada *bitrate* tinggi. Pada *bitrate* 20 Gbps modulasi EA mampu mentransmisikan sejauh 7 Km dengan nilai BER  $5,83 \times 10^{-15}$  kemudian modulasi QPSK dan PolSK dapat mentransmisikan jarak sama jauh hingga 6 Km dengan nilai BER masing masing sebesar  $1,87 \times 10^{-15}$  dan  $2,37 \times 10^{-13}$ . Dan modulasi ASK tidak dapat mentransmisikan pada *bitrate* ini

**Kata kunci:** FSO, SS-WDM-MIMO, Modulasi, Performansi

## Abstract

The FSO transmission system offers high flexibility, with SS-WDM providing the efficiency of using one frequency which is converted into four different frequencies. In this research used modulation: ASK, QPSK, EA, and PolSK using bitrates of 2.5, 10, and 20 Gbps. Then using power 0 dbm and got simulated using Optisystem. At a bitrate of 2.5 Gbps QPSK and EA modulation can transmit the furthest distance up to 45 Km with a BER value of  $3.17 \times 10^{-12}$  and  $2.54 \times 10^{-12}$ , PolSK modulation can transmit up to 43 Km with a BER value of  $1.27 \times 10^{-12}$ . And ASK modulation up to 42 Km with a BER value of  $1.28 \times 10^{-15}$ . At a bitrate of 10 Gbps PolSK modulation is capable of transmitting as far as 43 Km with a BER value of  $7.97 \times 10^{-12}$  then QPSK and EA modulation can transmit over an equidistant distance of up to 42 Km with a BER value of  $4.80 \times 10^{-12}$  and  $1.90 \times 10^{-12}$ . And ASK modulation cannot transmit at high bitrate. At a bitrate of 20 Gbps EA modulation is capable of transmitting as far as 7 Km with a BER value of  $5.83 \times 10^{-15}$  then QPSK and PolSK modulation can transmit over an equidistant distance of up to 6 Km with a BER value of  $1.87 \times 10^{-15}$  and  $2.37 \times 10^{-13}$ . And ASK modulation cannot transmit at high bitrate

**Keywords:** FSO, SS-WDM-MIMO, Modulation, Performance

## 1. Pendahuluan

Penggunaan jaringan transmisi fiber optik telah digunakan di berbagai belahan dunia semenjak tahun 1990an[1]. Keandalannya dalam kecepatan mentransmisikan data menjadi daya tarik dibanding dengan media transmisi lain [1-2]. Namun terdapat kendala utama yaitu proses pemasangan yang membutuhkan tenaga ahli, dan penggunaan transmisi terpadu menjadi kelemahan terbesar[2]. Pemasangan jaringan transmisi fiber optik menggunakan dua cara yaitu dengan meletakkannya di bawah tanah dan meletakkannya di udara. Dimana proses pemasangan ini sering mengganggu fasilitas umum [2].

Oleh karena itu dibutuhkan teknologi yang dapat mentransmisikan data yang dengan cepat dan tidak mengganggu fasilitas umum. Maka dikembangkan teknologi transmisi optik di ruang bebas atau yang dikenal dengan *Free Space Optic* (FSO) [1]. FSO merupakan teknologi yang sedang berkembang yang digunakan sebagai sistem transmisi alternatif. FSO mengirimkan sinyal berupa cahaya yang berasal dari Laser atau LED yang ditransmisikan melalui atmosfer [1].

FSO menawarkan keunggulan seperti kecepatan penransmisian data hingga satuan Gbps. FSO menawarkan proses pemasangan yang mudah dengan pemasangan pada sisi pengirim dan penerima sehingga biaya pemasangan menjadi rendah[3]. Kemudian frekuensi kanal yang digunakan tidak menggunakan lisensi seperti transmisi *wireless* lainnya sehingga FSO tidak akan terpengaruh oleh interferensi dengan frekuensi radio lainnya dan juga tidak menghasilkan polusi gelombang elektromagnetik [3-4].

FSO menggunakan konsep *line of sight* (LOS) dimana menggunakan gelombang yang dipancarkan secara langsung menuju ke penerima. FSO memiliki kelemahan yaitu rentan terhadap *fading* [3]. *Fading* diminimalisir dengan cara menambah jumlah pengirim dan penerima. Hal ini dapat meningkatkan kualitas sinyal yang ditransmisikan sehingga mampu meningkatkan efisiensi komunikasi optik dan mentoleransi pelemahan akibat *fading* [3].

Telah Dilakukan penelitian mengenai performansi FSO dengan membandingkan jumlah *transmitter* dan *receiver*. Pada penelitian ini [3] menggunakan FSO dengan 1TR/x , 2 TR/x dan 4 TR/x Dari penelitian ini diketahui bahwa MIMO 4 TR/x memiliki performansi yang lebih baik karena mampu mentransmisikan jarak lebih jauh dibandingkan parameter yang lain [3].

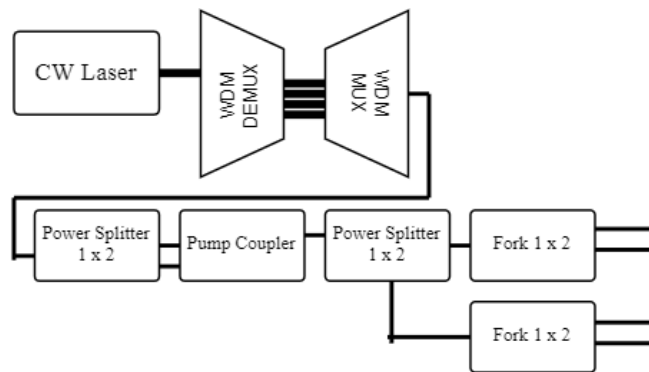
Untuk meningkatkan performansi FSO digunakan teknik *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) dengan teknik ini dapat meningkatkan *bitrate* yang dapat meningkatkan *bandwidth* pada FSO [5]. Telah dilakukan penelitian mengenai penggunaan teknik *Spectrum Slicing Wavelength Division Multiplexing* (SS-WDM) [5]. Teknik ini lebih efisien dibanding WDM karena menggunakan sinyal spektrum yang lebih kecil. Pada penelitian ini[5] membandingkan *multiplexing* antara SS-WDM dan WDM. Diperoleh hasil dengan jarak yang sama bahwa SS-WDM memiliki nilai BER lebih baik dibandingkan WDM [5-6].

Modulasi memiliki peran untuk penggabungan sinyal informasi dengan sinyal pengirim. Sehingga modulasi mampu mempengaruhi laju bit kesalahan data yang diterima oleh receiver [7]. Modulasi dapat mempengaruhi laju kesalahan bit data, oleh karena itu penting dilakukan penelitian mengenai perbandingan performansi modulasi. Pada penelitian [8] diteliti perbandingan mengenai modulasi PoSK dan modulasi ASK. Menghasilkan modulasi PoSK memiliki performansi lebih baik dibandingkan modulasi ASK dengan mampu mentransmisikan jarak lebih jauh.

Telah dilakukan perbandingan modulasi ASK dan QPSK. Pada penelitian [9] dapat diketahui bahwa modulasi QPSK memiliki nilai BER lebih baik dibandingkan dengan modulasi ASK pada jarak yang sama [9]. Kemudian dilakukan penelitian terhadap sistem FSO dengan membandingkan beberapa modulasi : MZ *Modulator*, ASK, FSK, PSK, dan EA *Modulator* [10]. Pada penelitian ini melihat performansi beberapa modulasi dengan jarak dan atenuasi tertentu. Diketahui bahwa EA *Modulator* memiliki performansi paling baik diantara modulasi lainnya dengan mampu mentransmisikan jarak lebih jauh dibandingkan modulasi yang lain [10].

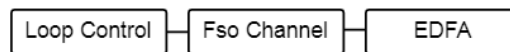
## 2. Metode Penelitian

Sistem transmisi FSO dibagi menjadi tiga yaitu *Transmitter*, Kanal Propagasi, dan *Receiver*. Pada sistem SS-WDM-MIMO FSO *transmitter* berupa sinyal cahaya dipancarkan oleh CW Laser kemudian sinyal masuk ke WDM Demux 1 x 4 untuk dipecah menjadi empat frekuensi yang berbeda yaitu 193,1 193,2 193,3, dan 193,4 THz kemudian masuk ke WDM mux 4 x 1 kemudian sinyal cahaya tersebut dikirimkan ke masing masing modulator [6].



Gambar 1. Layout Transmisi FSO SS-WDM-MIMO

Setelah sinyal diinformasi di modulasikan, kemudian sinyal ditransmisikan ke kanal propagasi. Adapun blok diagram kanal propagasi terdapat pada gambar 2.

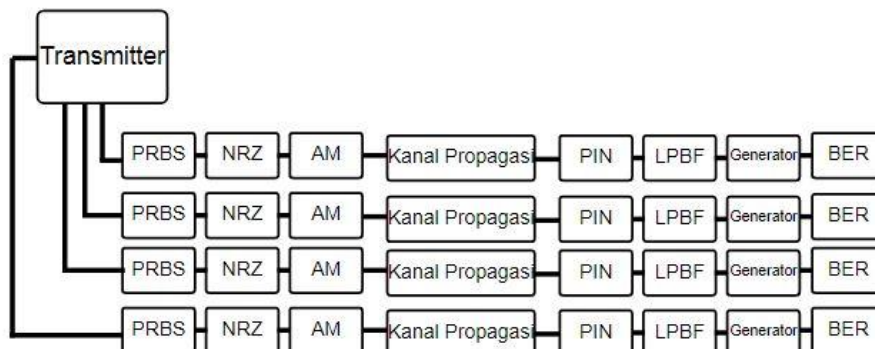


Gambar 2. Kanal Propagasi

Pada FSO Channel dimasukkan parameter atenuasi dan sinyal dikuatkan dengan EDFA sebesar 35 dBm. Pada modulator ditumpangkan sinyal informasi yang berasal dari *Pseudo-Random Bit Sequence Generator* yang menghasilkan *bitrate* sebesar 2,5, 10, dan 20 Gbps. Pada Transmisi FSO modulasi memegang peranan kunci dan mempengaruhi laju kesalahan data yang dibaca oleh *photodetector* sehingga berpengaruh pada jarak transmisi yang dapat ditransmisikan oleh sistem[10].

### 2.1. Blok Diagram Sistem menggunakan *Amplitude Shift Keying (ASK)*

*Amplitude Shift Keying (ASK)* merupakan suatu cara penumpangan sinyal informasi dengan mengubah amplitudo. Pada saat biner 1 direpresentasikan dengan gelombang sinusoidal maksimal dan pada saat biner 0 direpresentasikan dengan gelombang sinusoidal minimum. Dengan ini menghasilkan kecepatan digital yang lebih tinggi[8]. Adapun blok diagram modulasi ASK pada gambar 3.



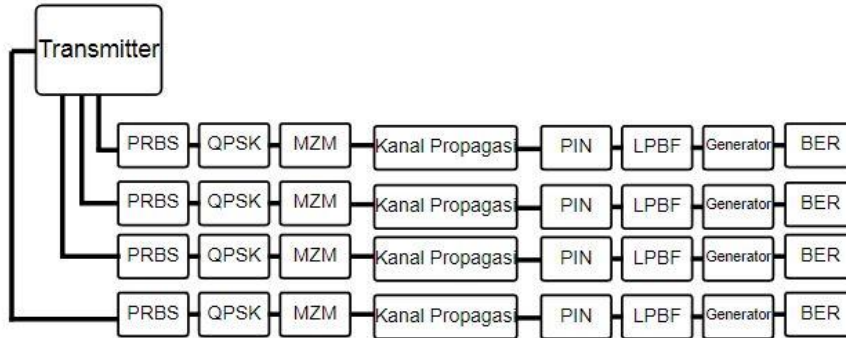
Gambar 3. Blok Diagram Transmitter Modulasi ASK

Sinyal informasi dari PRBS diolah kemudian dibentuk oleh *NRZ Pulse Generator* kemudian dilanjutkan ke *Amplitudo Modulator*. Disini sinyal informasi ditumpangkan ke sinyal

cahaya dan ditransmisikan ke Kanal Propagasi[9]. Kemudian sinyal di terima oleh PIN *Photodiode* dan di filter oleh *Low Pass Bessel Filter* dan dibangkitkan menjadi sinyal digital oleh Generator dan di validasi oleh BER Analyzer

## 2.2 Blok Diagram Sistem menggunakan *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK)

*Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) merupakan pengembangan dari modulasi PSK dimana mentransmisikan dua bit sinyal informasi dalam satu waktu[9]. Pengiriman sinyal informasi dibagi menjadi 4 fase, fase 0 maka mewakili bit (0,0) pada fase  $\frac{3\pi}{2}$  akan mewakili bit (1,1) pada fase  $\pi$  akan menghasilkan bit (1,0) dan pada fase  $\frac{\pi}{2}$  menghasilkan bit (0,1)[7]. Adapun blok diagram modulasi QPSK pada gambar 4.

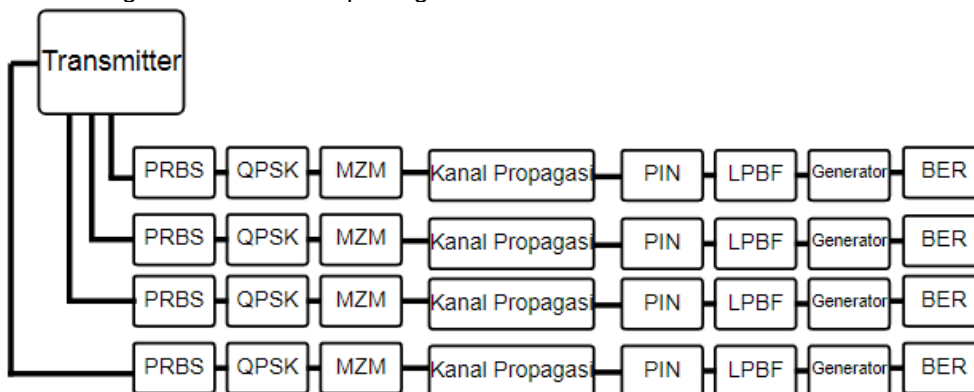


Gambar 4. Blok Diagram *Transmitter* Modulasi QPSK

Sinyal informasi dari PRBS diolah kemudian dibentuk oleh QPSK Pulse Generator kemudian di lanjutkan ke *Mach-Zender Modulator*. Disini sinyal informasi ditumpangkan ke sinyal cahaya dan ditransmisikan ke Kanal Propagasi[9]. Kemudian sinyal di terima oleh PIN Photodiode dan di filter oleh *Low Pass Bessel Filter* dan dibangkitkan menjadi sinyal digital oleh Generator dan di validasi oleh BER Analyzer

## 2.3 Blok Diagram Sistem menggunakan *Electro Retention Modulator* (EA Modulator)

*Electro Retention Modulator* merupakan sebuah alat semikonduktor yang digunakan untuk penyerapan medan listrik yang dihasilkan oleh laser[10]. EA Modulator digunakan dengan demodulasi intensitas sinar laser melalui tegangan listrik. EA Modulator menggunakan hukum Franz-Keldysh [11]. EA Modulator menawarkan kecepatan data tinggi dengan daya rendah. Adapun blok diagram modulasi EA pada gambar 5

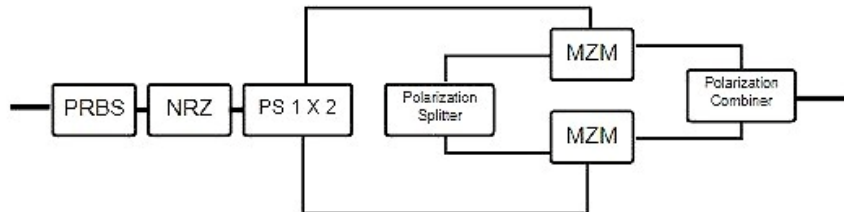


Gambar 5. Blok Diagram *Transmitter* Modulasi EA

Sinyal informasi dari PRBS diolah kemudian dibentuk oleh *NRZ Pulse Generator* kemudian dilanjutkan ke *Electro Absorption Modulator*. Disini sinyal informasi ditumpangkan ke sinyal cahaya dan ditransmisikan ke *FSO channel* [11]. Kemudian sinyal di terima oleh PIN Photodiode dan di filter oleh *Low Pass Bessel Filter* dan dibangkitkan menjadi sinyal digital oleh Generator dan di validasi oleh BER Analyzer

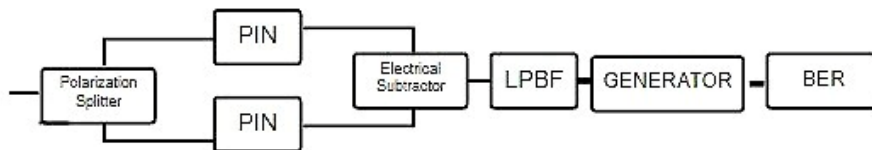
## 2.4 Blok Diagram Sistem menggunakan *Polarisation Shift Keying (PoISK)*

*Polarisation Shift Keying (PoISK)* memanfaatkan karakteristik gabungan pancaran cahaya dari laser dengan cara multi level transmisi [8]. Cara ini menjadikan pancaran cahaya lebih kuat dibandingkan modulasi yang lainnya. PoISK memiliki keuntungan lebih fleksibel dalam meletakkan titik *transmitter* dan *receiver* dan PoISK lebih tahan terhadap penyerapan cahaya oleh atmosfer yang sehingga tidak mengurangi intensitas cahaya [8]. Adapun blok diagram modulasi PoISK pada sisi pengirim pada gambar 6.



Gambar 6. Blok Diagram *Transmitter* Modulasi PoISK

Sinyal informasi dari PRBS diolah kemudian dibentuk oleh *NRZ Pulse Generator* kemudian sinyal cahaya dipecah oleh *polarization splitter* untuk masuk ke dua *Mach-Zender Modulator*. Kemudian sinyal tersebut disatukan kembali oleh *Polarization Combiner* dan diteruskan ke *FSO channel* [8]. Kemudian setelah dari kanal propagasi sinyal diterima oleh *receiver*. Adapun blok diagram pada gambar 7.



Gambar 7. Blok Diagram *Receiver* Modulasi PoISK

Setelah sinyal melalui kanal propagasi sinyal cahaya di terima oleh PIN Photodiode dan di filter oleh *Low Pass Bessel Filter* dan dibangkitkan menjadi sinyal digital oleh Generator dan di validasi oleh BER Analyzer

Model sistem disimulasikan dengan *bitrate* sebesar 2.5, 10, dan 20 Gbps, dengan frekuensi CW laser 193,1 THz dan daya 25 dBm dan simulasikan menggunakan aplikasi Optisystem pada kondisi cuaca cerah dengan nilai parameter atenuasi sebesar 0,23 dBm [6].

Tabel 1. Parameter Sistem

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Bit rate</i>	2,5, 10, 20	Gbps
<i>Frequency</i>	193,1	nm
<i>Power</i>	25	dBm
<i>Attenuation</i>	0,23	dBm

Untuk memverifikasi sistem FSO dengan teknologi SS-WDM-MIMO digunakan nilai Bit Error Rate dengan acuan nilai sebesar  $\leq 10^{-12}$  [12].

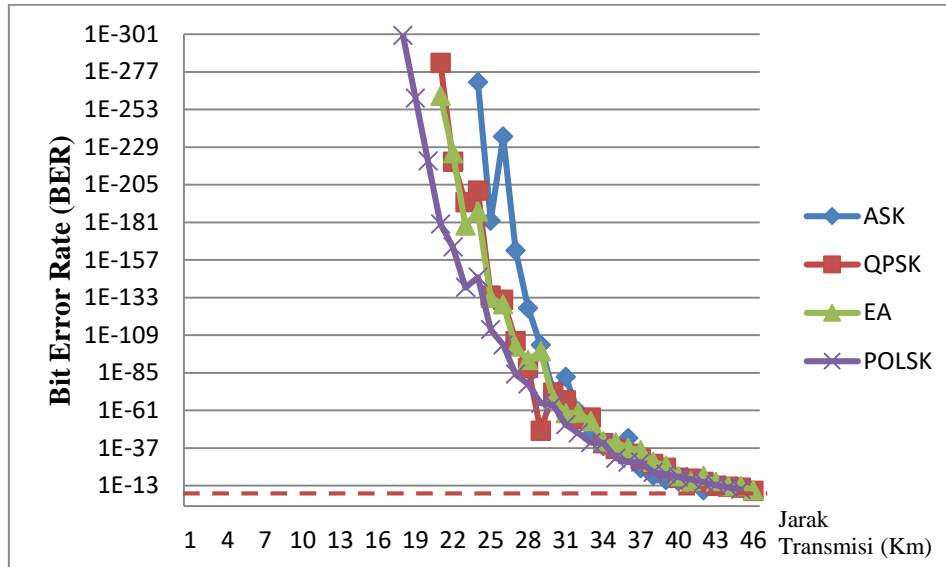
## 3. Hasil dan Analisa

Dengan menggunakan parameter pada tabel 1 dapat digunakan sebagai parameter yang disimulasikan menggunakan aplikasi Optisystem 15. sehingga didapatkan jarak transmisi

pada modulasi ASK, QPSK, EA dan PoSK pada sistem SS-WDM-MIMO FSO dengan *bitrate* 2.5, 10, dan 20 Gbps.

### 3.1. Jarak Transmisi Maksimum pada *Bitrate* 2,5 Gbps untuk Beberapa Modulasi

Sistem ini disimulasikan menggunakan Optik system 15 dengan menggunakan satu *bitrate* sebesar 2,5 Gbps. Adapun grafik hasil jarak transmisi terhadap modulasi pada gambar 8.

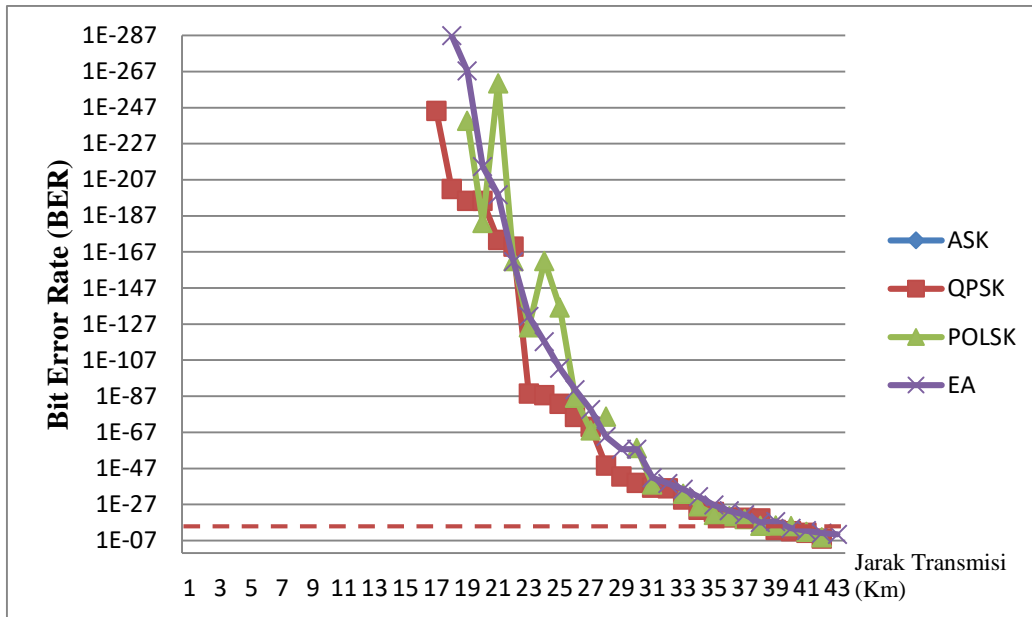


**Gambar 8.** Jarak Transmisi terhadap BER pada *Bitrate* 2,5 Gbps

Setelah dilakukan simulasi, didapatkan hasil jarak transmisi sistem SS-WDM-MIMO menggunakan modulasi ASK, QPSK, PoSK dan EA pada Gambar 8. Dengan menggunakan sistem ini modulasi QPSK dan EA dapat mentransmisikan jarak terjauh hingga 45 Km dengan nilai BER masing masing sebesar  $3,17 \times 10^{-12}$  dan  $2,54 \times 10^{-12}$ , modulasi PoSK dapat mentransmisikan hingga 43 Km dengan nilai BER  $1,27 \times 10^{-12}$ . Dan modulasi ASK hingga 42 Km dengan nilai BER  $1,28 \times 10^{-15}$ . Dengan *bitrate* 2.5 Gbps hasil jarak transmisi pada masing masing modulasi memiliki nilai yang hampir sama jauhnya hingga diatas 40 Km.

### 3.2. Jarak Transmisi Maksimum pada *Bitrate* 10 Gbps untuk Beberapa Modulasi

Kemudian dilakukan simulasi kedua untuk *bitrate* sebesar 10 Gbps. Adapun hasil jarak transmisi terhadap modulasi pada gambar 9.

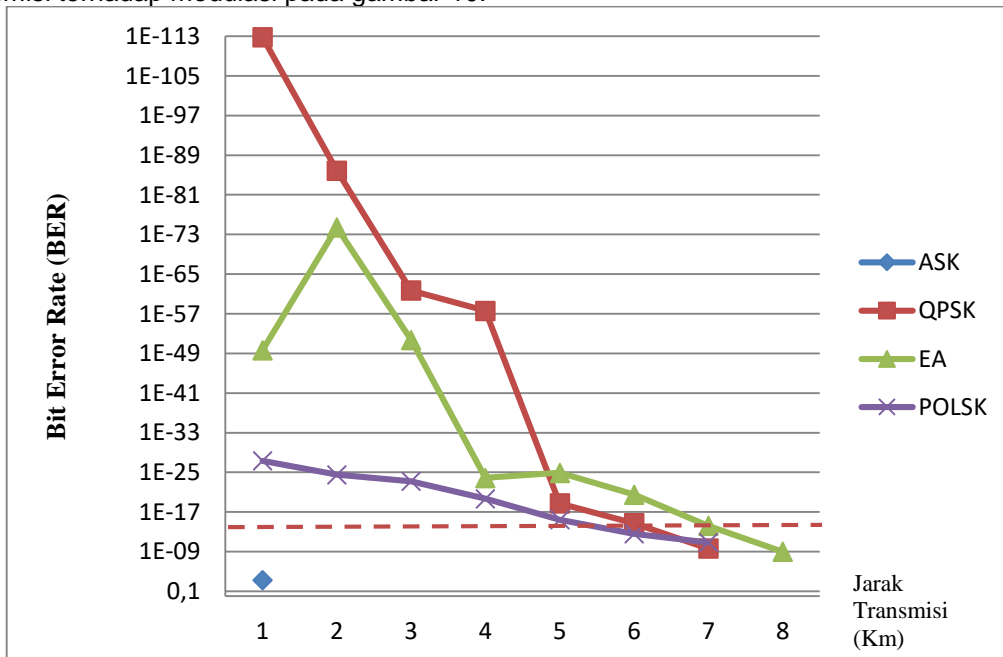


Gambar 9. Jarak Transmisi terhadap BER pada *Bitrate* 10 Gbps

Pada Gambar 9 dapat dilihat grafik BER Terhadap jarak transmisi menggunakan bitrate 10 Gbps. Dengan menggunakan sistem ini modulasi PoLSK mampu mentransmisikan sejauh 43 Km dengan nilai BER  $7,97 \times 10^{-12}$  kemudian modulasi QPSK dan EA dapat mentransmisikan jarak sama jauh hingga 42 Km dengan nilai BER masing masing sebesar  $4,80 \times 10^{-12}$  dan  $1,90 \times 10^{-12}$ . Dan modulasi ASK tidak dapat mentransmisikan sinyal informasi pada *bitrate* ini. Pada *bitrate* ini modulasi QPSK, EA dan PoLSK memiliki performansi yang sangat bagus dengan mampu mentransmisikan sinyal informasi hingga jarak 40 Km.

### 3.3. Jarak Transmisi Maksimum pada *Bitrate* 20 Gbps untuk Beberapa Modulasi

Kemudian dilakukan simulasi ketiga untuk *bitrate* sebesar 20 Gbps. Adapun hasil jarak transmisi terhadap modulasi pada gambar 10.



Gambar 10. Jarak Transmisi terhadap BER pada *Bitrate* 20 Gbps

Pada gambar 10 dengan menggunakan bitrate 20 Gbps hasil simulasi sistem modulasi EA mampu mentransmisikan sejauh 7 Km dengan nilai BER  $5,83 \times 10^{-15}$  kemudian modulasi QPSK dan PoLSK dapat mentransmisikan jarak sama jauh hingga 6 Km dengan nilai BER masing-masing sebesar  $1,87 \times 10^{-15}$  dan  $2,37 \times 10^{-13}$ . Dan modulasi ASK tidak dapat mentransmisikan pada *bitrate* ini. Modulasi QPSK, EA dan PoLSK mampu mentransmisikan jarak maksimum hanya selang satu Km. Adapun jarak transmisi maksimum pada keseluruhan model sistem dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Jarak Transmisi Maksimum pada Berbagai Modulasi

Jenis modulasi	Jarak Transmisi Maksimum (Km)		
	2,5 Gbps	10 Gbps	20 Gbps
ASK	42	0	0
QPSK	45	42	6
EA	45	42	7
PoLSK	43	43	6

Dari hasil simulasi modulasi PoLSK dan EA memiliki keandalan yang tinggi pada saat digunakan di *bitrate* 2,5 Gbps. Kemudian pada *bitrate* 10 Gbps Modulasi PoLSK memiliki keandalan dibandingkan dengan modulasi yang lainnya. Dan pada *bitrate* 20 Gbps Modulasi ASK memiliki keandalan dalam mentransmisikan informasi. Modulasi ASK tidak mampu mentransmisikan sinyal informasi dengan nilai BER  $\leq 10^{-12}$ .

#### 4. Kesimpulan

Pada *bitrate* 2,5 Gbps seluruh modulasi dapat mentransmisikan sinyal hingga diterima oleh receiver dengan jarak hingga 40 Km. Pada *bitrate* 10 dan 20 Gbps modulasi QPSK, EA dan PoLSK mampu mentransmisikan data dengan baik, namun modulasi ASK tidak dapat beroperasi pada *bitrate* 10 dan 20 Gbps.

#### Referensi

- [1] G. Keiser, *Optical fiber communications*, 2. ed. New York: McGraw Hill, 1991.
- [2] J. Hecht, *City of light: the story of fiber optics*. New York: Oxford University Press, 1999.
- [3] N. R. Chauhan dan M. K. Vala, "System Design and Performance Analysis of the Free Space Optics (FSO) System in Atmospheric Turbulence," Vol. 04, no. 04, hlm. 5.
- [4] J. Mikołajczyk *dkk.*, "Analysis of Free-Space Optics Development," *Metrology and Measurement Systems*, vol. 24, no. 4, hlm. 653–674, Des 2017, doi: 10.1515/mms-2017-0060.
- [5] F. Rashidi, J. He, dan L. Chen, "Spectrum slicing WDM for FSO communication systems under the heavy rain weather," *Optics Communications*, vol. 387, hlm. 296–302, Mar 2017, doi: 10.1016/j.optcom.2016.11.070.
- [6] K. Prabu, S. Charanya, M. Jain, dan D. Guha, "BER analysis of SS-WDM based FSO system for Vellore weather conditions," *Optics Communications*, vol. 403, hlm. 73–80, Nov 2017, doi: 10.1016/j.optcom.2017.07.012.
- [7] G. Kaur, H. Singh, dan A. Singh Sappal, "Free Space Optical Using Different Modulation Techniques – A Review," *IJETT*, vol. 43, no. 2, hlm. 109–115, Jan 2017, doi: 10.14445/22315381/IJETT-V43P218.
- [8] J. Jeyaseelan, D. S. Kumar, dan B. E. Caroline, "PoLSK and ASK Modulation Techniques Based BER Analysis of WDM-FSO System for Under Turbulence Conditions," *Wireless Pers Commun*, vol. 103, no. 4, hlm. 3221–3237, Des 2018, doi: 10.1007/s11277-018-6004-y.
- [9] M. Ashraf, G. Baranwal, D. Prasad, S. Idris, dan M. T. Beg, "Performance Analysis of ASK and PSK Modulation Based FSO System Using Coupler-Based Delay Line Filter under Various Weather Conditions," *OPJ*, vol. 08, no. 08, hlm. 277–287, 2018, doi: 10.4236/opj.2018.88023.
- [10] A. S. Madhuri, G. Immadi, V. Mounika, A. TarunTeja, T. Aakash, dan N. S. Srinivasa, "Performance Evaluation of Free Space Optics Using Different Modulation Techniques at Various Link Ranges," vol. 8, no. 4, hlm. 5, 2019.
- [11] B. Ftaich-Frigui, C. Aupetit-Berthelemot, A. Belhouji, M. Mouhamadou, dan C. Kazmierski, "Use of a reflective electro-absorption modulator and semiconductor optical amplifier for converged wireless over fiber access networks," dalam *36th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Torino, Italy, Sep 2010, hlm. 1–3. doi: 10.1109/ECOC.2010.5621357.
- [12] S. Burdah, O. N. Samijayani, A. Syahriar, R. Ramdhani, dan R. Alamtaha, "Performance Analysis of Q Factor Optical Communication in Free Space Optics and Single Mode Fiber," *ujeee*, vol. 6, no. 3, hlm. 167–175, Jul 2019, doi: 10.13189/ujeee.2019.060311.