

PERFORMANSI MODULATOR PADA JARINGAN DOWNSTREAM NGPON2

PERFORMANCE OF MODULATOR IN NGPON2 DOWNSTREAM NETWORK

Olyvia Noviyanti¹, Akhmad Hambali², Brian Pamukti³

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

¹olyvianoviyanti@student.telkomuniversity.ac.id, ²ahambali@telkomuniversity.ac.id,

³brianp@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Pada saat ini, teknologi serat optik mampu mengirimkan data dengan laju bit hingga 10 Gbps. Teknologi serat optik yang sedang dikembangkan saat ini yaitu teknologi NG-PON2 dengan kemampuan laju bit hingga lebih dari 10 Gbps. Teknologi NG-PON2 digagas dengan tujuan untuk memenuhi kebutuhan teknologi komunikasi masa depan yang membutuhkan bandwidth yang besar. Modulator optik berfungsi untuk menumpangkan sinyal-sinyal informasi berupa pulsa-pulsa cahaya ke dalam sinyal pembawa (carrier) agar dapat ditransmisikan ke tujuan. Modulator yang kini sering digunakan adalah *Mach-Zehnder Modulator* (MZM) dan *Electro-Absorption Modulator* (EAM). Pada penelitian ini dilakukan analisis terhadap kinerja dari masing-masing modulator dengan ragam format modulasi, khususnya *Non Return to Zero* (NRZ), *Return to Zero* (RZ), *Return to Zero-Differential Phase Shift Keying* (RZ-DPSK) dan *Return to Zero-Differential Quadrature Phase Shift Keying* (RZ-DQPSK). Dengan bitrate 40 Gbps dan jarak simulasi dimulai dari 5 Km hingga 20 Km dengan spasi antar jarak sebesar 1 Km, Analisis kinerja modulator optik berupa nilai LPB, SNR, BER, *Q-factor*. Dengan bantuan perangkat lunak Optisystem dilakukan simulasi kinerja modulator sesuai ragam format modulasi tersebut.

Berdasarkan hasil simulasi, didapatkan nilai performansi daya terima terbaik yaitu -17,569 dBm untuk jarak 5 km dan -21,83 untuk jarak 20 km. SNR sebesar 29,6927 dB untuk jarak 5 km dan 17,7261 dB untuk jarak 20 km. *Q-factor* sebesar 13,0516 untuk jarak 5 km dan 6,0598 untuk jarak 20 km. BER sebesar $3,2033 \times 10^{-39}$ untuk jarak 5 km dan $6,4308 \times 10^{-10}$ untuk jarak 20 km. Berdasarkan nilai tersebut, *Electro-Absorption Modulator* dengan format modulasi NRZ menghasilkan nilai diatas standar parameter kualitas sehingga baik untuk digunakan pada teknologi NG-PON2.

Kata Kunci: NGPON2, MZM,EAM, Format Modulasi

Abstract

Modern optical fiber technology is capable of transmitting data at speed of over 10 Gbps. The technology at development is NG-PON2, which is defined to perform at speed of more than 10 Gbps. NG-PON2 technology was initiated bearing in mind that future communication technology requires a much larger bandwidth. Optical modulator is used to superimpose information signal onto carrier signal in light pulses, so the information could be transmitted to the intended destination. Most commonly used type of modulator is Mach-Zehnder Modulator (MZM) and Electro-Absorption Modulator (EAM). This study analyses the performance of each modulators using various formats of modulation, namely Non Return to Zero (NRZ), Return to Zero (RZ), Return to Zero-Differential Phase Shift Keying (RZ-DPSK) and Return to Zero-Differential Quadrature Phase Shift Keying (RZ-DQPSK). The simulation is conducted on scenarios of at bitrate of 40 Gbps and length ranging from 5 km until 20 km with 1 km step between lengths. The optical modulator performance parameters are LPB, SNR, BER, and Q-factor. Optisystem is aiding the simulation processes on the modulators performance with various formats of modulation.

Based on the simulation results, the best achieve power received values are of -17, 569 dBm attained at 5 km and of -21,83 dBm attained at 20 km, SNR of 29,6927 dB attained at 5 km and of 17,7261 dB attained at 20 km, Q-factor of 7,7798 attained at 5 km and of 6,0598 attained at 20 km, BER of $3,2033 \times 10^{-39}$ attained at 5 km and of $6,4308 \times 10^{-10}$ attained at 20 km. Based on the values, Electro-Absorption Modulator using NRZ modulation format yields performance values above the quality parameters standard, hence suits the NG-PON2 technology

Keyword : NGPON2, MZM,EAM, Modulation Format

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan kebutuhan kapasitas untuk komunikasi optik jarak jauh semakin meningkat. Berdasarkan akan hal tersebut salah satu teknologi *Passive Optical Network* (PON) yang sedang di kembangkan pada saat ini adalah *Next Generation Passive Optical Network* (NG-PON2). NG-PON2 merupakan teknologi yang digagas

dengan tujuan untuk memenuhi kebutuhan teknologi komunikasi masa depan. Teknologi NG-PON2 telah terstandarisasi pada tahun 2015 oleh ITU-T[2].

NG-PON2 teknik multiplexing yang digunakan adalah *Time Wavelength Division Multiplexing* (TWDM-PON)[3]. Dengan skema *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) pada saat *downstream* dan skema *Time Division Multiplexing* (TDM) pada saat *upstream*. Adapun untuk memaksimalkan kapasitas link transmisi optik, harus memperhatikan beberapa parameter seperti *bitrate*, jarak transmisi, daya sinyal optik, dll. Salah satu yang paling penting adalah format modulasi. Selain format modulasi yang mempengaruhi kualitas sinyal pada tugas akhir ini penulis menganalisis performansi kinerja modulator eksternal. Agar menghasilkan sistem NG-PON2 yang optimal maka diperlukan jenis modulator yang tepat. Modulator eksternal yang di analisis yaitu *Electro-Absorption Modulator* (EAM) dan *Mach-Zehnder Modulator* (MZM) dengan ragam format modulasi uji berupa NRZ, RZ, RZ-DPSK dan RZ-DQPSK

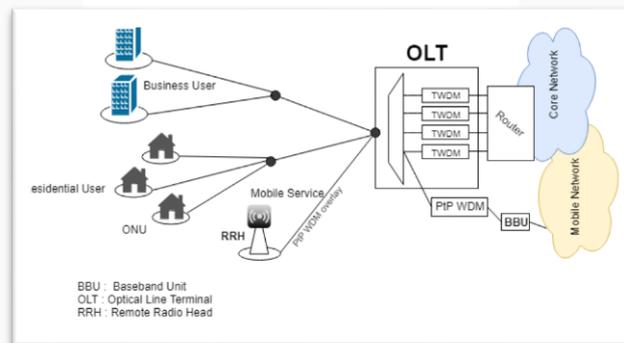
Penelitian [4], telah dilakukan analisis performansi modulator eksternal menggunakan line coding RZ dan NRZ pada jaringan sistem komunikasi optik. Penelitian [5] menggunakan modulator Mach-Zehnder dengan berdasarkan ragam format modulasi NRZ, RZ, RZ-DPSK dan RZ-DQPSK.

Dalam penelitian ini, parameter kualitas yang digunakan yaitu *Q-Factor*, *Bit Error Rate* (BER), SNR, *power received*, *Power Link Budget* (PLB) dan *Rise Time Budget* (RTB). Perancangan jaringan NGPON2 dapat dikategorikan layak apabila nilai minimal *Q-Factor* adalah 6 dan nilai BER maksimal adalah 10^{-9} . Dengan menggunakan beberapa skenario, hasil penelitian ini mampu memberikan perbaikan performansi pada NG-PON2 sehingga dapat dipertimbangkan untuk diimplementasikan pada kondisi nyata. Ada 2 skenario yang digunakan pada tugas akhir ini, pertama pada masing-masing modulator *Electro-Absorption Modulator* (EAM) dan *Mach-Zehnder Modulator* (MZM) masing-masing menggunakan ragam format modulasi, kedua mengubah jarak link jaringan sistem komunikasi optik mulai dari 5 Km sampai dengan 20 Km dengan spasi jarak 1 Km.

2. Dasar Teori

A. Next Generation Passive Optical Network 2 (NG-PON2)

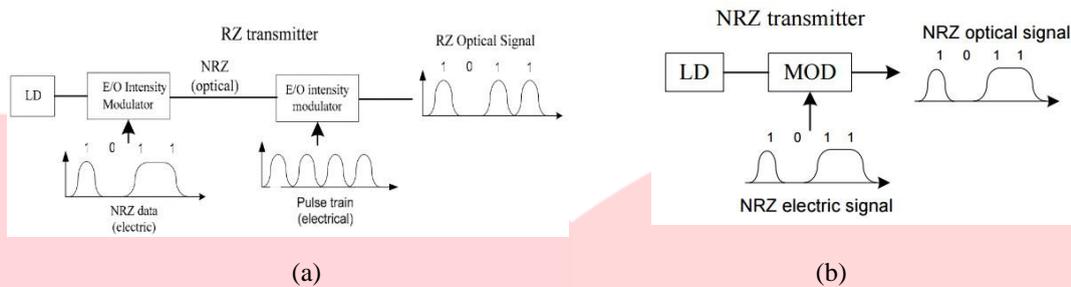
Pada sistem PON sebelumnya menawarkan layanan broadband hanya untuk pelanggan rumahan saja, sistem NG-PON2. Solusi utama dari NG-PON2 yaitu pada TWDM sehingga NG-PON2 juga dapat disebut dengan TWDM-PON, yang merupakan penggabungan antara TDM Konvensional (*Time Division Multiplexing*) dan teknologi WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). TWDM-PON merupakan perangkat utama pada jaringan NG-PON2, ada empat atau delapan panjang gelombang yang dimultipleksikan untuk masing masing *upstream* dan *downstream*. Di sistem jaringan NG-PON2 terdapat 3 tipe berdasarkan bit rate per satuan waktu yaitu 10 Gbps simetris, 2,5 Gbps upstream dan 10 Gbps Downstream, dan 2,5 Gbps simetris. Karena ada empat panjang gelombang yang dimultipleksikan, kapasitas transmisinya meningkat menjadi 40 Gbps simetris, 10/40 Gbps asimetris, dan 40 Gbps simetris.



Gambar 2 Arsitektur NG-PON2[2]

B. Format Modulasi

Pada format modulasi RZ yang ditunjukkan pada Gambar 2a, transisi level sinyal bangkit selama beberapa atau semua periode bit yang mengandung *timing* informasi. Format RZ membutuhkan dua kali *bandwidth* NRZ dan juga tidak terdapat kemampuan koreksi dan deteksi *error*. Pada *unipolar* RZ, bit "1" direpresentasikan oleh setengah periode bit pertama atau kedua. Bit "0" direpresentasikan pada saat tidak adanya sinyal yang masuk selama periode bit. Kekurangan format RZ *unipolar* yaitu apabila banyak bit "0" selama periode bit yang lama, maka dapat menimbulkan rugi-rugi pada waktu sinkronisasi [6]. Pada format modulasi NRZ ditunjukkan pada Gambar 2b, mengirim setiap data *stream* secara serial dan on-off (*unipolar*) sinyal direpresentasikan sebagai bit "1" dari masukan arus atau cahaya yang masuk dan pada periode bit "0" sebagai tidak adanya cahaya yang masuk dan pulsa yang ditransmisikan. Format NRZ merupakan kode yang sederhana untuk membangkitkan dan mendeteksi sinyal. Kekurangan pada format NRZ yaitu tidak memiliki kemampuan untuk koreksi dan deteksi *error* maupun melakukan *self clocking* [6].

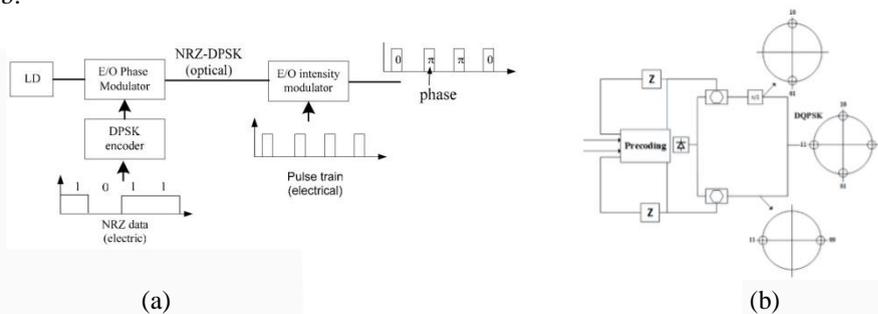


Gambar 2. Blok Transmitter: (a) Format Modulasi RZ [7] (b) Format Modulasi NRZ [7]

RZ-DPSK dapat meningkatkan toleransi sistem untuk distorsi nonlinier dan untuk mencapai jarak transmisi yang lebih jauh. Pada RZ-DPSK, lebar pulsa optik lebih sempit dibandingkan dengan slot bit sehingga daya sinyal optik kembali ke nol setiap slot bit. Untuk menghasilkan sinyal optik RZ-DPSK, digunakan perangkat tambahan yaitu *intensity modulator* [8]. Blok *transmitter* format modulasi RZ-DPSK ditunjukkan pada Gambar 3a.

RZ-DQPSK merupakan salah satu jenis dari PSK yang diperuntukkan pada laju *bit rate* dengan kecepatan tinggi. Sifat dari modulasi DQPSK yaitu mengirim bit dalam empat waktu fasa yaitu $(0, +\pi/2, -\pi/2, \pi)$ ke dalam satu symbol rate dari total bit rate. Bit-bit biner diterjemahkan menjadi: $0 \rightarrow 00; +\pi/2 \rightarrow 10; -\pi/2 \rightarrow 01; \pi \rightarrow 11$.

DQPSK memecah data stream menjadi dua dan menggunakan modulasi DPSK pada setiap stream nya dan menggunakan delay $\pi/2$ pada salah satu stream nya yang kemudian akan disatukan kembali lalu akan menghasilkan empat shift fasa tadi.. Simbol informasi DQPSK dikodekan dalam satu fasa yang kemudian berubah-ubah setiap pergantian simbol satu dengan simbol lainnya. DQPSK lebih melihat perubahan itu sendiri yang diterjemahkan ke dalam fasa dibandingkan melihat satu fasa yang dideteksi secara utuh, sehingga sistem modulator dan demodulatornya menjadi lebih rumit [9]. Blok *transmitter* pada format modulasi RZ-DQPSK ditunjukkan pada Gambar 3b.



Gambar 3. Blok Transmitter: (a) Format Modulasi RZ-DPSK [7] (b) Format Modulasi RZ-DQPSK [10]

C. Link Power Budget (LPB)

Dalam suatu perancangan jaringan fiber optik diperlukan parameter yang tepat agar performansi yang dihasilkan maksimal. Salah satunya adalah menggunakan *Power Link Budget* untuk mengkalkulasi nilai daya pada proses transmisi dari penerima ke pengirim. Adapun perhitungan untuk menghitung powerlink budget adalah

$$total = L.af + Nc.ac + Ns.as + Sp + Ms \tag{1}$$

Kemudian untuk menghitung nilai daya yang diterima oleh *photodetector* atau di sisi penerima, dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$Prx = Ptx - \alpha_{tot} \tag{2}$$

D. Signal to Noise Ratio (SNR)

SNR adalah perbandingan antara daya sinyal yang ditransmisikan terhadap daya *noise* yang terjadi pada sistem. Nilai SNR dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :
Atau juga persamaan SNR dapat dituliskan sebagai berikut :

$$SNR = \frac{(P_{in}RM)^2}{2qP_{in}RM^2F(M)B_e + \frac{4K_BTB_e}{R_L}} \tag{3}$$

E. Quality Factor (Q-Factor)

Q-Factor adalah parameter kualitas yang menentukan bagus atau tidaknya suatu link. *Q-Factor* merepresentasikan *Signal to Noise Ratio* (SNR) dalam komunikasi biner pada serat optik. Berikut perhitungan *Q-Factor* menggunakan persamaan berikut [8]:

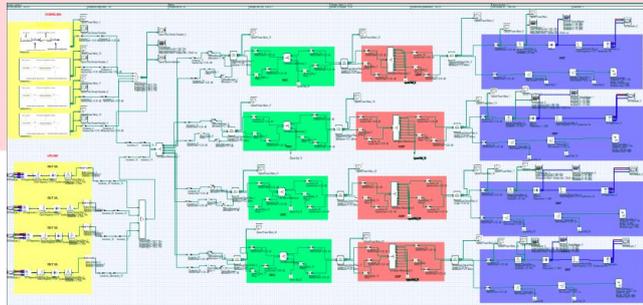
$$Q = \frac{10}{2} \frac{SNR}{20} \tag{4}$$

F. Bit Error Rate (BER)

BER merupakan perbandingan antara bit yang *error* dengan bit yang ditransmisikan. Bit yang *error* dapat disebabkan oleh gangguan, dispersi, ataupun interferensi. Hubungan antara *Q-Factor* dan BER yaitu berdasarkan persamaan berikut [13]:

$$BER = \frac{\exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (5)$$

3. Perancangan Sistem



Gambar 4 Model Sistem

Terdapat beberapa bagian utama pada sistem jaringan pada Gambar 3.2 yaitu bagian pengirim berupa OLT, bagian kanal transmisi, dan bagian penerima berupa ONU. Perancangan sistem ini menggunakan 4 OLT yang terdiri dari transmitter dan receiver. Pada blok transmisi Optical Distribution Network (ODN) yang terdiri dari serat optik G.652c serta dua tingkat titik pembagi dengan total rasio splitter 1:64. Pada sistem NG-PON2 menggunakan sistem transmisi bidirectional yaitu sistem transmisi dua arah pada arah downstream dan upstream dalam satu jaringan. Setelah merancang sistem jaringan NG-PON2, perlu dimasukkan beberapa spesifikasi dan parameter yang telah ditentukan ke sistem tersebut. Pada bagian OLT dan ONU terdapat sistem format modulasi yang menjadi fokus utama Tugas Akhir ini.

A. Parameter Modulator dan Transmitter

Bagian utama yang berfungsi sebagai pengirim informasi dari sentral ke pelanggan yaitu optical transmitter dengan nama perangkat OLT. Pada Tabel 3.1 dijelaskan spesifikasi transmitter yang digunakan sesuai rekomendasi ITU-T G.989.2 dan spesifikasi perangkat OLT MA5800

Pada sisi transmitter menggunakan agregasi 4 OLT dengan bit rate downlink per kanal yaitu 10 Gbps sehingga menghasilkan total agregasi bitrate 40 Gbps. Daya pancar OLT yang dapat digunakan pada transmitter downstream yaitu berkisar 2-6 dBm. Kanal spasi yang digunakan pada Tugas Akhir ini yaitu 100 THz atau 0,85 nm dengan panjang gelombang downstream dan upstream dimulai dari 1596,34 nm dan 1532,68 nm. Frekuensi dan panjang gelombang NG-PON2 pada Tabel 3.2 diterapkan pada Tugas Akhir ini. Pada blok transmitter juga menggunakan format modulasi yang berbeda-beda yaitu RZ, NRZ, RZ-DPSK, dan RZ-DQPSK.

Adapun frekuensi dan panjang gelombang yang di gunakan Tugas Akhir pada Tabel berikut. Panjang gelombang dan frekuensi yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah 187,8 THz hingga 187,5 THz.

Tabel 1 Frekuensi dan Panjang Gelombang NG-PON2

Kanal	Downstream	
	Frekuensi (THz)	Panjang Gelombang (nm)
1	187,8	1596,34
2	187,7	1597,19
3	187,6	1598,04
4	187,5	1598,89
5	187,4	1599,75
6	187,3	1600,60
7	187,2	1601,46
8	187,1	1602,31

B. Parameter Media Transmisi

Penghubung antara sentral ke pelanggan pada sistem komunikasi optik disebut Optical Distribution Network (ODN). Pada penelitian ini menggunakan rasio splitter 1:64, jenis kabel yang digunakan yaitu serat optik SMF G.652 dengan kemampuan bidirectional. Spesifikasi SMF G.652 ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 1 Spesifikasi SMF G.652

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Atenuasi	0,3	dB/km
2	Dispersi	17	ps/nm.km
3	<i>Dispersion Slope</i>	0,056	ps/nm ² .km

Mengacu pada rekomendasi PT.Telkom Indonesia mengenai arsitektur jaringan akses serat optik yang menggunakan dua splitter yang disebut two stage [12]. Pada Tugas Akhir ini mengacu pada rekomendasi tersebut dengan menggunakan splitter two stage, splitter pertama 1:2 diletakkan pada sisi ODC dan splitter kedua 1:8 diletakkan pada sisi ODP, ditambah satu splitter feeder di sisi OLT. Karakteristik komponen penyusun blok distribusi dijelaskan pada Tabel 3.4.

Tabel 3 Spesifikasi Komponen Distribusi

No	Komponen	Satuan	Standar Redaman (dB)
1	Konektor SC/UPC	buah	0,25
2	Konektor SC APC/UPC	buah	0,35
3	<i>splicing</i> atau penyambungan	buah	0,2
4	<i>Splitter</i> 1:2	buah	3,6
5	<i>Splitter</i> 1:4	buah	7
6	<i>Splitter</i> 1:8	buah	10,3

A. Parameter Receiver

Spesifikasi receiver ONT sesuai rekomendasi ITU.T dan spesifikasi perangkat ONT MikroTik ditunjukkan pada Tabel

Tabel 4 Spesifikasi *Optical Network Terminal*

No	Parameter	Nilai
1	<i>Photodetector</i>	APD
2	<i>Bandwidth</i>	2,5 GHz
3	<i>Filter type</i>	Bessel
4	<i>Sensitivity</i>	- 28 dBm'
5	<i>Max. Transmission Distance</i>	20 km
6	<i>Temperature</i>	298 K
7	<i>Responsitivity</i>	0,85 A/W
8	<i>Avalanched gain</i>	3
9	<i>Resistance</i>	50 ohm
10	<i>Ionization</i>	0,45

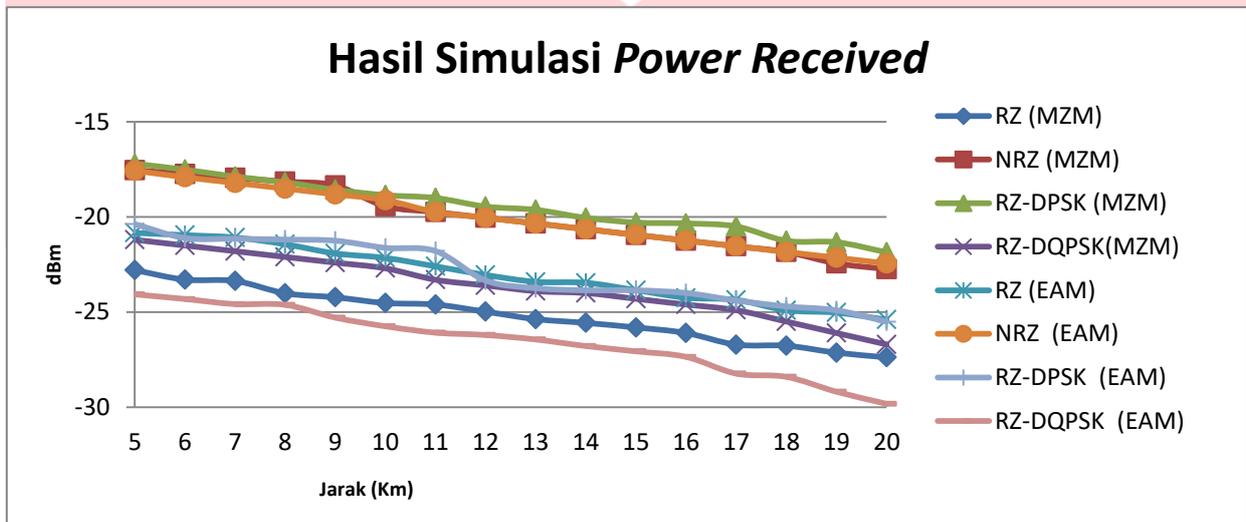
Setelah cahaya ditransmisikan melalui ODN, cahaya tersebut sampai di bagian penerima dengan terlebih dahulu melewati optical filter dan photodiode. Photodiode berfungsi untuk mendeteksi cahaya dan mengubah cahaya yang terdeteksi tersebut menjadi arus listrik. Kemudian setelah cahaya tersebut diubah menjadi arus listrik, arus tersebut melewati Low Pass Filter (LPF) yang berfungsi untuk menghilangkan sinyal-sinyal yang tidak diinginkan. Spesifikasi receiver ONT sesuai rekomendasi ITU.T dan spesifikasi perangkat ONT MikroTik ditunjukkan pada Tabel 3.5. Nilai BER dan Q-Factor dapat diukur dengan menggunakan perangkat 3R Generator dan BER Analyzer sehingga sinyal yang diterima dapat terukur dengan akurat menggunakan perangkat tersebut.

4. Analisis Hasil Simulasi Sistem

A. Analisis Link Power Budget

Pada hasil simulasi LPB pada Gambar 4.3, didapatkan hasil pada format modulasi yang memiliki LPB tertinggi adalah NRZ (EAM) yaitu -21,83 dBm, Sedangkan format modulasi dengan LPB terendah adalah RZ-DQPSK (EAM) yaitu -29,8237 dBm. Berdasarkan hasil perhitungan manual dan hasil simulasi untuk parameter LPB, format modulasi NRZ (EAM) selalu memiliki daya terima paling tinggi yang disebabkan oleh daya pancar

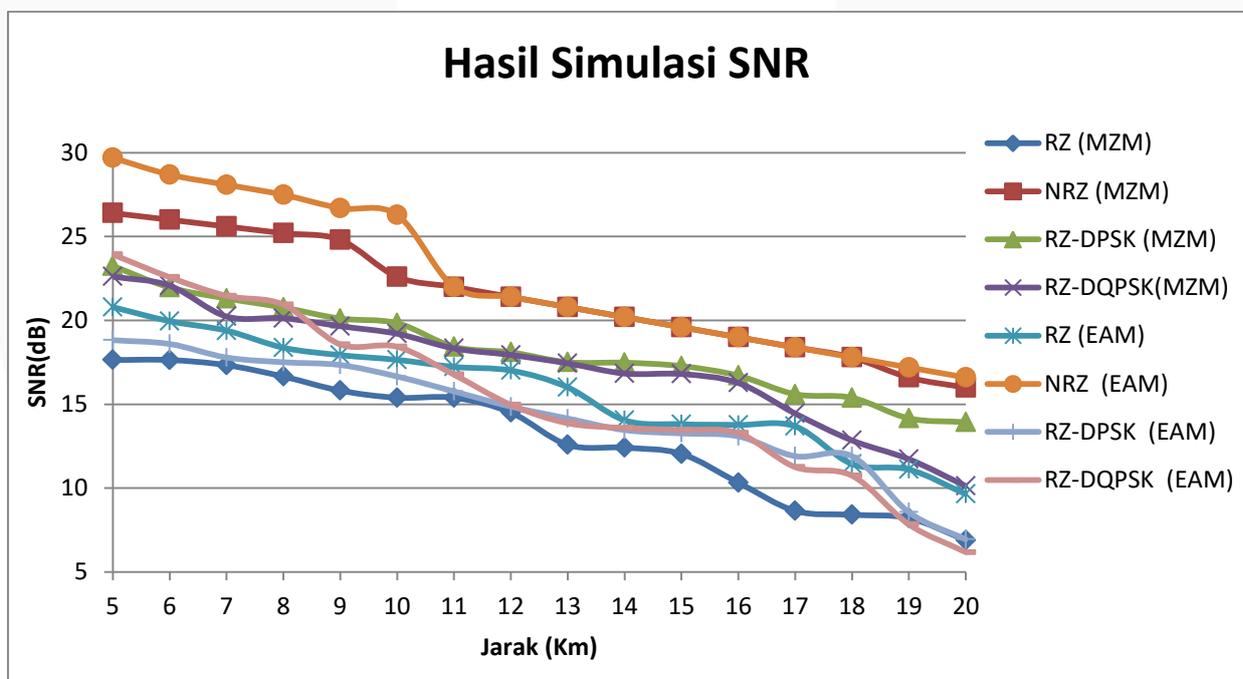
OLT yang lebih tinggi dibandingkan dengan format modulasi lainnya. Namun sebaliknya, format modulasi dengan LPB yang paling rendah yaitu format modulasi RZ-DQPSK, hal ini disebabkan karena daya pancar OLT yang lebih rendah dibandingkan dengan format modulasi lainnya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perbedaan daya pancar OLT mempengaruhi nilai LPB yang dihasilkan oleh setiap format modulasi.



Gambar 4 Grafik Simulasi Power Received

B. Analisis Signal to Noise Ratio

Pada sistem komunikasi optik, nilai SNR tidak boleh kurang dari 10,79 dB [11]. Berdasarkan standar tersebut dari hasil perhitungan dan hasil simulasi SNR, sistem tersebut dengan format modulasi NRZ dan RZ-DQPSK menghasilkan nilai yang ideal karena SNR yang dihasilkan lebih dari 10,79 dB. Sedangkan pada format modulasi RZ (MZM) pada jarak 16 Km tidak masuk kedalam kategori ideal karena hasil SNR dibawah nilai 10,79 dB. Begitu juga dengan format modulasi RZ-DQPSK(EAM) pada jarak 17-20 Km, format modulasi RZ-DPSK(EAM) pada jarak 19-20 Km dan format modulasi RZ(EAM) pada jarak 20 Km juga tidak termasuk dalam kategori ideal. Untuk nilai SNR tertinggi yaitu format modulasi NRZ (EAM) senilai 26,742 dB

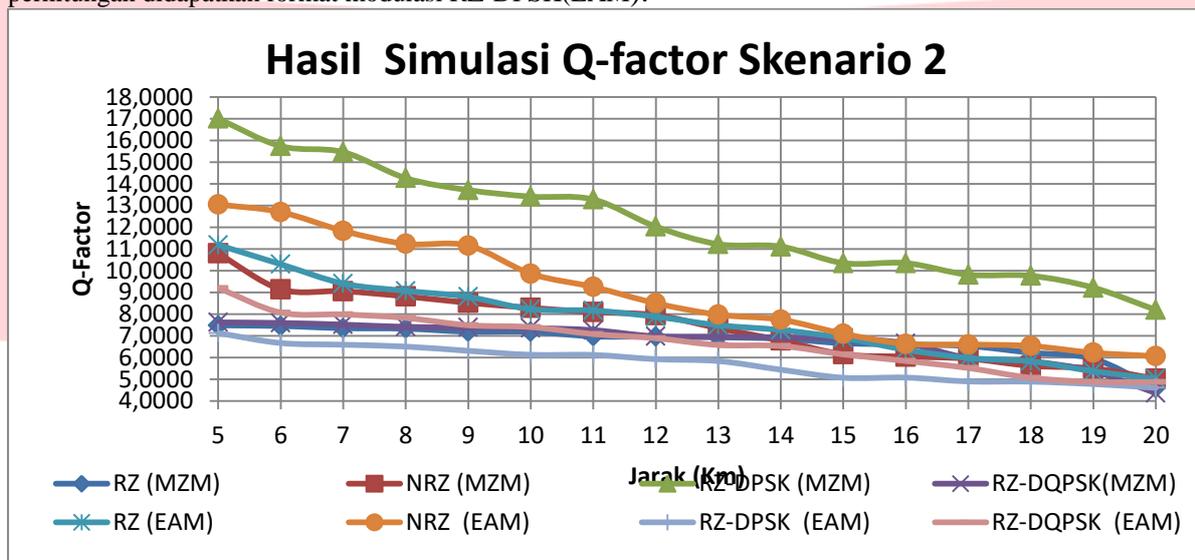


Gambar 5 Grafik Simulasi Signal to Noise Ratio

C. Analisis Q-factor

Nilai Q-Factor menyatakan kualitas suatu jaringan komunikasi optik, semakin besar nilai Q-Factor maka sinyal optik dapat terdeteksi dengan baik. Berdasarkan hasil perhitungan dan hasil simulasi didapatkan nilai Q-

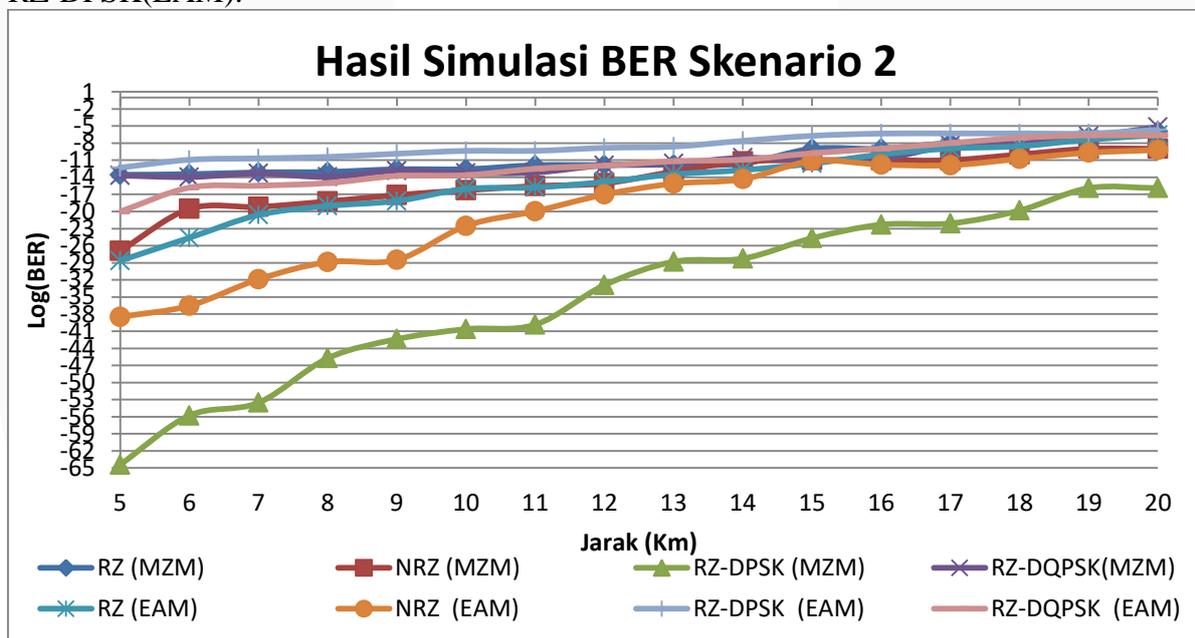
Factor terbesar dengan format modulasi NRZ(EAM). Sedangkan nilai *Q-Factor* terendah pada hasil perhitungan didapatkan format modulasi RZ-DPSK(EAM).



Gambar 6. Grafik Simulasi *Q-factor*

D. Analisis Bit Error Rate

Berdasarkan hasil simulasi BER didapatkan nilai-nilai yang sangat ideal menurut referensi BER yang direkomendasikan pada ITU-T, syarat dikatakan BER tersebut bagus atau tidak maka tidak lebih dari 10^{-9} atau jika dikalikan dengan log maka bernilai -9. Berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi, didapatkan hasil BER yang paling kecil yaitu format modulasi NRZ (EAM) . Sedangkan BER yang besar berdasarkan perhitungan yaitu format modulasi RZ-DPSK(EAM):



Gambar 7 Grafik Simulasi BER

5. Kesimpulan

Modulator dan format modulasi mempengaruhi kualitas sinyal yang diterima oleh photodetector. Berdasarkan penelitian ini terbukti bahwa format modulasi mempengaruhi parameter kualitas *power received*, *Signal Noise to Ratio*, *Q-Factor*, dan *Bit Error Rate*. Berdasarkan hasil simulasi, didapatkan nilai performansi daya terima terbaik yaitu -17,569 dBm untuk jarak 5 km dan -21,83 untuk jarak 20 km. SNR sebesar 29,6927 dB untuk jarak 5 km dan 17,7261 dB untuk jarak 20 km. *Q-factor* sebesar 13,0516 untuk jarak 5 km dan 6,0598

untuk jarak 20 km. BER sebesar $3,2033 \times 10^{-39}$ untuk jarak 5 km dan $6,4308 \times 10^{-10}$ untuk jarak 20 km. Berdasarkan nilai tersebut, *Electro-Absorption* Modulator dengan format modulasi NRZ menghasilkan nilai diatas standar parameter kualitas sehingga baik untuk digunakan pada teknologi NG-PON2.

DAFTAR REFERENSI

- [1] ITU-T G.989.2, "40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2) : Physical media dependent (PMD) layer specification," 2014.
- [2] A.M. Odlyzko, Internet traffic growth: sources and implications, in: Proceedings of the Optical Transmission Systems and Equipment for WDM Networking II, Orlando, FL, USA, September 2003.
- [3] K. Asaka and J.-i. Kani, "Standardization Trends for Next-Generation Passive Optical Network Stage 2 (NG-PON2)," vol. 13, p. 2, 2015.
- [4] Putri, Anastiti (2018). "Analisis Performa Sistem Komunikasi Optik Eksternal Modulator Dengan Variasi Bit Rate". Universitas Brawijaya. Malang.
- [5] Angesti, Wildand. (2015). "Simulasi Kinerja Modulator Optik Tipe Mach-Zehnder Berdasarkan Ragam Format Modulasi". Universitas Diponegoro. Semarang
- [6] Mahloo, Mozghan. (2015). Transport Solutions for Future Broadband Access Networks (Hal. 11-17). Stockholm: KTH Royal Institute of Technology.
- [7] Gerd Keiser, Optical Fiber Communication, Boston: McGraw-Hill, 2015.
- [8] Y. Luo, X. Zhou and F. Effenberger, Time-and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation Network PON Stage 2 (NG-PON2), vol. 31, Journal of Lightwave Technology, February 2013, pp. 587-693.
- [9] Yahya, Esmael H.M, "Thesis: Mach Zehnder Interferometer", Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia, 2006/2007
- [10] S. Zhang, "Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System," Thesis, pp. 18-29.
- [11] L. Zhao, H. Shankar and A. Nachum, "40G DPSK and DQPSK Modulation," Inphi Corporation.
- [12] NITS Academy, Konfigurasi FTTH (Fiber to the Home), Bandung: Telkom Corporate University.