

PENGARUH EDFA SEBAGAI *BOOSTER* DAN *PRE-AMPLIFIER* PADA SISTEM 40G TWDM-PON BERBASIS *NEXT GENERATION PASSIVE OPTICAL NETWORK STAGE 2*

EDFA EFFECT AS BOOSTER AND PRE-AMPLIFIER OF 40G TWDM-PON SYSTEM BASED ON NEXT GENERATION PASSIVE OPTICAL NETWORK STAGE 2

Lita Harpaning Pertiwi¹, Akhmad Hambali², Brian Pamukti³

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

¹harpaning10@gmail.com, ²ahambali@telkomuniversity.ac.id, ³brianp@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Next Generation Passive Optical Network Stage 2 (NG-PON2) merupakan generasi terbaru dari *Passive Optical Network (PON)*. *Bit rate* mencapai 10 Gbps untuk *upstream* dan 40 Gbps untuk *downstream*. *Time Wavelength Division Multiplexing (TWDM)* merupakan solusi utama NG-PON2.

Berdasarkan hasil simulasi, hasil terbaik pada jarak 20 Km untuk *upstream* maupun *downstream*. Pada 64 *user downstream* hasil terbaik yaitu *Q Factor* 35,86 dengan *power pump* 200 mW, pada *pump power* 500 mW didapatkan *received power* - 11,16 dBm dan SNR 41,91 dB. Sedangkan pada 128 *user* hasil terbaik *Q Factor* 32,30 *pump power* 250 mW, pada *power pump* 500 mW didapatkan *received power* - 14,34 dBm dan SNR 40,27 dB. Gain tertinggi untuk *downstream* yaitu 18,32 *power pump* 500 mW disemua jarak dan *user*. Untuk 64 *user upstream* hasil terbaik yaitu *Q Factor* 27,49 dengan *power pump* 500 mW, *received power* -10,012 dBm, SNR 30,04 dB, dan Gain tertinggi 51,13. Pada 128 *user upstream* hasil terbaik yaitu *Q Factor* 23,59 *power pump* 500 mW, *received power* -11,054 dBm, SNR 28,97 dB dengan *power pump* 150 mW dan jarak 30 Km, dan Gain tertinggi 51,78 *power pump* 500 mW dan jarak 50 Km.

Kata kunci : NG-PON2, TWDM, EDFA, *Booster Amplifier*, *Pre-Amplifier*

Abstract

Next Generation Passive Optical Network Stage 2 (NG-PON2) is the latest generation of *Passive Optical Network (PON)*. *Bit rate* reaches 10 Gbps for *upstream* and 40 Gbps for *downstream*. *Time Wavelength Division Multiplexing (TWDM)* is the main solution of NG-PON2.

Based on the simulation results, the best results at a distance of 20 Km for *upstream* and *downstream*. In 64 *user downstream* the best result is *Q Factor* 35.86 with *power pump* 200 mW, at *pump power* 500 mW got *received power* - 11.16 dBm and SNR 41.91 dB. Meanwhile in 128 users the best results *Q Factor* 32.30 *pump power* 250 mW, the *power pump* 500 mW obtained *received power* - 14.34 dBm and SNR 40.27 dB. Highest gain for *downstream* is 18.32 *power pump* 500 mW at all distance and *user*. For 64 *upstream users* the best result is *Q Factor* 27.49 with 500 mW *power pump*, *received power* -10.012 dBm, SNR 30.04 dB, and highest gain 51.13. Up to 128 best *upstream users* are *Q Factor* 23.59 *power pump* 500 mW, *power recived* -11.054 dBm, SNR 28.97 dB with 150 mW *power pump* and 30 Km distance, and highest gain 51.78 *power pump* 500 mW and 50 Km.

Keywords: NG-PON2, TWDM, EDFA, *Booster Amplifier*, *Pre-Amplifier*

1. Pendahuluan

Sistem akses serat optik berdasarkan *passive optical network (PON)* saat ini sedang digunakan pada skala pasar masal oleh banyak operator jaringan di seluruh dunia [1]. PON secara luas dianggap sebagai teknologi yang menjanjikan untuk *fiber-to-the-home (FTTH)*. NG-PON2 menjadi teknologi terbaru yang dikenalkan oleh IEEE dan ITU-T bersama-sama dengan *Full Services Access Network (FSAN)* pada tahun 2014 [2]. *Time wavelength division multiplexing-PON (TWDM-PON)* dipilih oleh komunitas FSAN dalam pertemuan bulan April 2012 sebagai solusi utama untuk NG-PON2.

Pada Tugas Akhir ini dilakukan analisis simulasi performansi terhadap jaringan akses NG-PON2 dengan menggunakan empat kanal TWDM dengan *bit rate* 40 Gbps untuk *downstream* dan 10 Gbps untuk *upstream*. Penelitian ini dirancang menggunakan serat tipe G.652 C dengan penambahan *Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)* sebagai *booster* dan *pre-amplifier* dengan panjang EDFA 10 m. Sistem tersebut akan dibandingkan kedalam dua sub-skenario yaitu dengan perbandingan *user*. Jumlah *user* yang digunakan yaitu 64 dan 128 *user*, kemudian masing-masing akan dibandingkan kedalam perbandingan jarak 20-50 Km dengan spasi jarak 10 Km. Setelah itu, akan dibandingkan beberapa *power pump* yaitu 50-500 mW dengan spasi *power pump* 50 mW. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh posisi penguat EDFA sebagai *booster amplifier* dan *pre-amplifier* pada NG-PON2 dengan kecepatan transmisi 40 Gbps untuk *downstream* dan 10 Gbps untuk *upstream* dengan jarak transmisi yang berbeda-beda.

Struktur penulisan dari jurnal ini yaitu bagian II berisi tentang teori terkait NG-PON2 maupun EDFA sebagai *booster* dan *pre-amplifier*. Pada bagian III berisi tentang model sistem jaringan NG-PON2, sedangkan hasil simulasi dan analisis terdapat pada bagian IV. Bagian V berisi tentang kesimpulan dari jurnal ini.

2. Dasar Teori

2.1. Perkembangan *Passive Optical Network* (PON)

Passive Optical Network (PON) adalah jaringan telekomunikasi yang menggunakan point-to-multipoint dengan menggunakan *passive splitter* [2][3]. Adapun tahapan evolusi PON adalah sebagai berikut:

2.1.1 APON/BPON

ATM Passive Optical Network (APON) dan *Broadband Passive Optical Network* (BPON) adalah teknologi PON yang berbasis *Asynchronous Transfer Mode* (ATM). ITU-T G.983 merupakan standar PON pertama ini digunakan terutama untuk aplikasi bisnis. BPON merupakan perkembangan dari APON, teknologi ini mempunyai *bandwidth* yang lebih besar untuk mendukung sistem *Wavelength Division Multiplexing* (WDM).

2.1.2 GPON

ITU-T G.984 adalah standar untuk *Gigabit Passive Optical Network* (GPON). GPON mendukung kecepatan yang besar dan peningkatan dalam sisi pengamanan. Teknologi ini memiliki *bandwidth* 2,488 Gbps untuk *downstream* dan 1,244 Gbps untuk *upstream*.

2.1.3 GEAPON

EPON atau *Gigabit Ethernet Passive Optical Network* (GEAPON) yang merupakan PON berbasis *ethernet* untuk paket data. Teknologi ini memiliki *bandwidth* 1 Gbps untuk *upstream* dan *downstream*. IEEE.802.3ah adalah standar yang dikeluarkan oleh IEEE pada tahun 2004 untuk EPON atau GEAPON (*Ethernet* PON).

2.1.4 XG-PON1

Pada tahun 2010, ITU-T mengeluarkan standar ITU-T G.987 untuk teknologi XG-PON1. Prinsip pada XG-PON1 ini sama seperti GPON, yang membedakan hanya kapasitas. Kapasitas transmisi pada XG-PON1 yaitu 10 Gbps untuk *downstream* dan 2,48 Gbps untuk *upstream*.

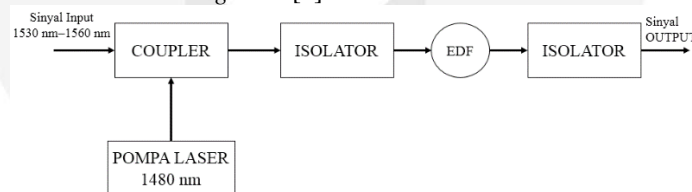
2.1.5 *Next Generation Passive Optical Network Stage 2* (NG-PON2)

ITU-T G.989 ini merupakan standar yang dikeluarkan oleh ITU-T untuk teknologi *Next-Generation Passive Optical Network stage 2* (NG-PON2). NG-PON2 merupakan evolusi terbaru dari PON. NG-PON2 merupakan sebuah sistem PON dengan kapasitas 40 Gbps untuk *downstream* dan 10 Gbps untuk *upstream*. Kecepatan transmisi pada NG-PON2 juga mencapai 160 Gbps pada arah *downstream* dan 80 pada arah *upstream*. Pada saat ini, jaringan distribusi optik menggunakan *split ratio* 1:64 hingga 1:128. Akan tetapi pada teknologi NG-PON2 mampu menggunakan *split ratio* paling tidak 1:256 [4].

TWDM-PON merupakan solusi utama dari PON, setiap panjang gelombang dibagi antara beberapa unit jaringan optik (ONUs) dengan menggunakan teknik *multiplexing* berdasarkan pembagian waktu. *Time division multiplexing* (TDM) digunakan untuk mentransmisikan informasi disisi *upstream* sedangkan *wavelength division multiplexing* (WDM) digunakan untuk mentransmisikan informasi pada sisi *downstream* [5].

2.2 Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)

EDFA merupakan jenis penguat optik yang menggunakan susunan elemen *erbium* yang akan dimasukan ke serat optik. Elemen *erbium* tersebut berfungsi sebagai penginisiasi agar nantinya level daya dari sinyal optik dapat meningkat. EDFA memberikan penguatan pada panjang gelombang 1550 nm dengan *noise figure* rendah dan dapat diaplikasikan pada sistem komunikasi *ultra long-haul* [6].



Gambar 2. 1 Blok konfigurasi EDFA [7].

2.3 Gain

Gain adalah perbandingan antara sinyal *output* dengan sinyal *input* dalam bilangan logaritmis dengan satuan desibel (dB), yang dapat direpresentasikan dengan persamaan berikut [8]:

$$G = \frac{P_{s,out}}{P_{s,in}} \leq 1 + \frac{\lambda_p P_{p,in}}{\lambda_s P_{s,in}} \quad (2.1)$$

2.4 Parameter Performansi

Adapun parameter performansi yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

2.4.1 *Link Power Budget* (LPB)

Dalam perancangan jaringan fiber optik dibutuhkan suatu parameter yang tepat sehingga akan mendapatkan hasil yang maksimal. LPB adalah total redaman suatu *link* optik dari sumber optik hingga ke penerima. LPB ini dirancang agar tidak melebihi ambang batas daya yang dibutuhkan. ITU-T G.989.2 telah menetapkan untuk ODN kelas N1 *received power* minimal -28 dBm [9]. Untuk menghitung LPB dapat digunakan persamaan berikut ini:

$$atot = L.af + Nc.ac + Ns.as + Sp \quad (2.2)$$

Untuk menghitung nilai daya yang diterima oleh *photodetector* atau disisi penerima, dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Prx = Ptx - atot + G \tag{2.3}$$

2.4.2 Signal to Noise Ratio (SNR)

SNR adalah nilai hasil perbandingan dari daya sinyal yang ditransmisikan dengan daya gangguan (*noise*) yang terjadi di dalam sistem. Biasanya nilai SNR dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut [8]:

$$SNR = \frac{(Pr.R.M)^2}{2.q.Pr.R.M^2.F(M).Be+(4.K_B.T.Be/R_L)} \tag{2.4}$$

2.4.3 Q Factor

Quality factor atau *Q Factor* adalah faktor kualitas untuk menentukan baik buruknya performansi sebuah sistem. Untuk mendapatkan nilai *Q-factor* dapat didekatkan dengan persamaan berikut:

$$Q = \frac{10 \frac{SNR}{20}}{2} \tag{2.5}$$

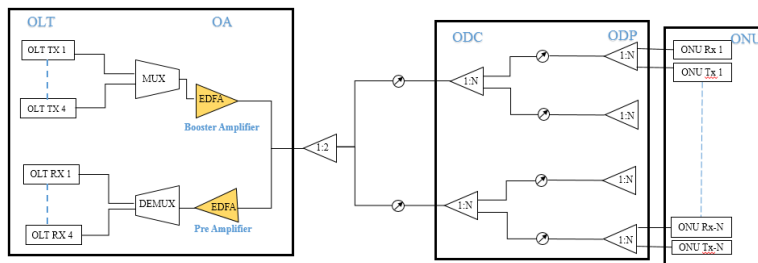
2.4.4 Bit Error Rate (BER)

BER merupakan perbandingan antara kesalahan atau kerusakan bit terhadap jumlah bit yang dikirimkan secara keseluruhan. Cara pembacaan nilai BER yaitu, misal nilai BER 10^5 , maka dapat dinyatakan bahwa ada satu bit yang rusak dari 100.000 atau 10^5 bit yang dikirimkan. Untuk mendapatkan nilai BER dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$BER = \frac{\exp(-\frac{Q^2}{2})}{Q\sqrt{2\pi}} \tag{2.6}$$

3. Pembahasan

Pada penelitian model sistem jaringan NG-PON2 dibagi menjadi dua bagian. Model sistem pertama yaitu model sistem jaringan NG-PON2 menggunakan EDFA sebagai *booster amplifier* disisi *downstream*. Sedangkan model sistem kedua yaitu model sistem jaringan NG-PON2 menggunakan EDFA sebagai *pre-amplifier* disisi *upstream*. Adapun model sistem jaringan NG-PON2 adalah sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Model sistem sebagai *booster* dan *pre-amplifier*.

Parameter jaringan yang digunakan pada penelitian ini sesuai dengan ketentuan dari ITU-T G.989 series dan spesifikasi perangkat, adapun parameter tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Parameter OLT.

No.	Parameter	Nilai
1	Bit rate per channel (downstream)	10 Gbit/s
2	Bit rate per channel (upstream)	2,5 Gbit/s
3	Line code	NRZ
4	Minimum Power	2 dBm
5	Maximum Power	6 dBm
6	Sensitivity	-7 s.d -27,5 dBm
7	Channel Spacing	100 GHz
8	Number of channel	4

Tabel 3. 2 Parameter ONT.

No.	Parameter	Nilai
1	Photodetector	APD
2	Minimum Transmitter Power	0,5 dBm
3	Maximum Transmitter Power	5 dBm
4	Minimum Receiver Sensitivity	-27 dBm
5	Maximum Receiver Sensitivity	-8 dBm
6	Responsivity	0,85 A/W
7	Ionization Ratio	0,45

Tabel 3. 3 Perencanaan Panjang Gelombang.

Kanal	Downstream		Upstream	
	Frekuensi	Pj. Gelombang	Frekuensi	Pj. Gelombang
1	187,8	1596,34	196,6	1532,68
2	187,7	1597,19	196,5	1533,47
3	187,6	1598,04	196,4	1534,25
4	187,5	1598,89	196,3	1535,04

Tabel 3. 4 Karakteristik Single Mode Fiber (SMF).

No.	Parameter	Satuan	Nilai
1	Tipe Serat	-	G.652.C
2	Attenuasi	(dB/Km)	0,3
3	Dispersi	(ps/nm.Km)	17,46
4	Penurunan Dispersi	(ps/nm ² .Km)	0,056

Tabel 3. 5 Karakteristik Komponen ODN

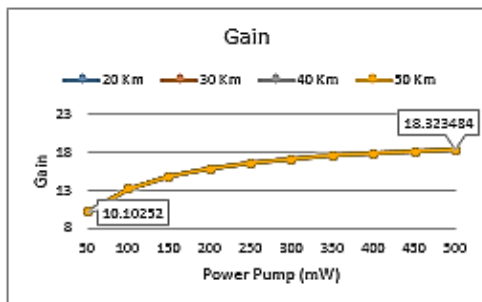
No.	Komponen	Satuan	Redaman (dB)
1	Konektor SC/UPC	buah	0,25
2	Konektor SC APC/UPC	buah	0,35
3	Sambungan	buah	0,10
4	Splitter 1:2	buah	3,70
5	Splitter 1:4	buah	7,25
6	Splitter 1:8	buah	10,38
7	Splitter 1:16	buah	14,10
8	Splitter 1:32	buah	17,45

4. Analisis

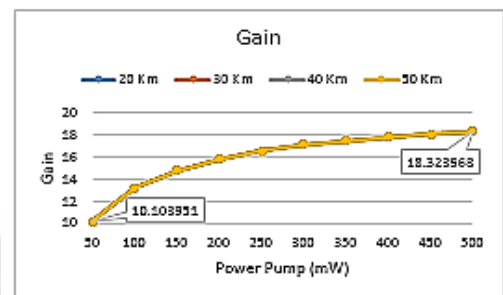
4.1. Analisis Menggunakan EDFA Sebagai *Booster Amplifier*

4.1.1. Grafik *Gain*

Berdasarkan simulasi skenario I dengan menggunakan EDFA sebagai *booster amplifier* disisi *downstream* didapatkan hasil *Gain* sebagai berikut:



(a)



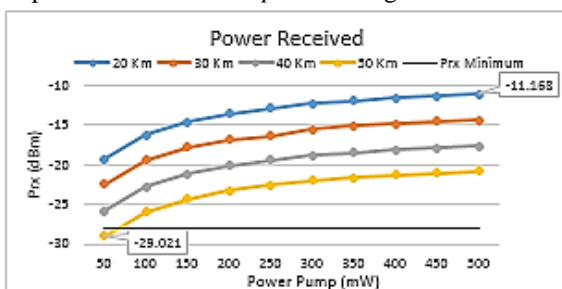
(b)

Gambar 4. 1 Hasil simulasi *gain* (a) 64 user (b) 128 user.

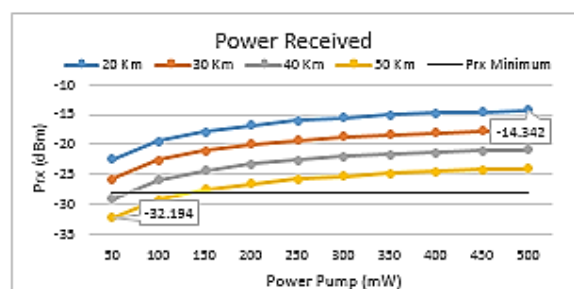
Berdasarkan hasil simulasi, *power pump* mempengaruhi besarnya *gain*. Hubungan *gain* dengan *power pump* yaitu berbanding lurus. Nilai *gain* pada sisi *downstream* sebagai *booster amplifier* dihasilkan nilai yang sama besar walaupun dengan jarak transmisi dan jumlah *user* yang berbeda-beda. Penempatan EDFA sebagai *booster amplifier*, nilai *power input signal* (P_{sin}) sama karena belum terpengaruh oleh redaman apapun.

4.1.2. Grafik *Received Power*

Berdasarkan simulasi skenario I dengan menggunakan EDFA sebagai *booster amplifier* disisi *downstream* didapatkan hasil *received power* sebagai berikut:



(a)



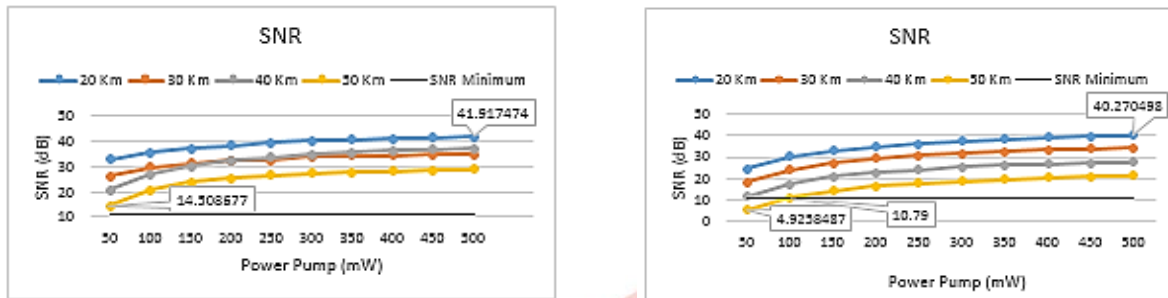
(b)

Gambar 4. 2 Hasil simulasi (a) 64 user (b) 128 user.

Berdasarkan hasil simulasi *power pump* mempengaruhi *received power*, hubungannya yaitu berbanding lurus. Sedangkan hubungan *received power* dengan jarak yaitu berbanding terbalik.

4.1.3. Grafik SNR

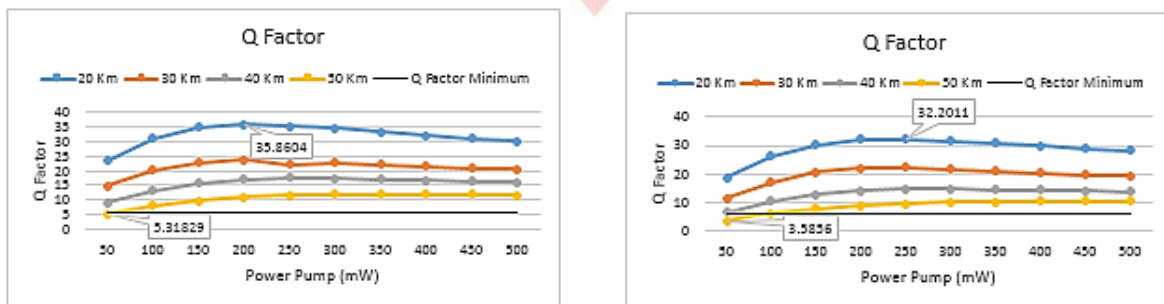
Berdasarkan simulasi skenario I dengan menggunakan EDFA sebagai *booster amplifier* disisi *downstream* didapatkan faktor yang mempengaruhi nilai SNR yaitu *received power*, hubungannya adalah berbanding lurus. Sedangkan hasil SNR pada simulasi sebagai berikut:



(a) (b)
Gambar 4. 3 Hasil simulasi SNR (a) 64 user (b) 128 user.

4.1.4. Grafik Q Factor

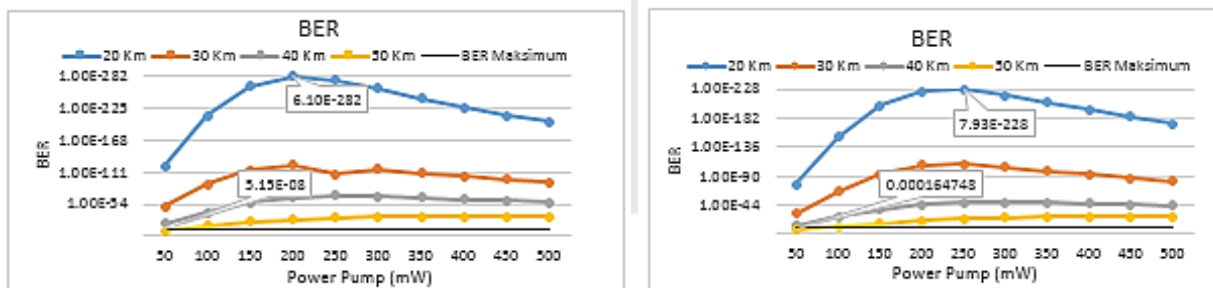
Berdasarkan simulasi skenario I dengan menggunakan EDFA sebagai *booster amplifier* disisi *downstream* didapatkan hasil *Q Factor* sebagai berikut:



(a) (b)
Gambar 4. 4 Hasil simulasi (a) 64 user (b) 128 user.

4.1.5. Grafik BER

Berdasarkan simulasi skenario I dengan menggunakan EDFA sebagai *booster amplifier* disisi *downstream* didapatkan faktor yang mempengaruhi BER adalah *Q Factor*. Adapun hasil BER pada simulasi sebagai berikut:

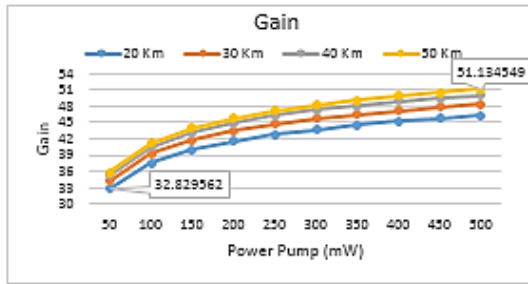


(a) (b)
Gambar 4. 5 Hasil simulasi (a) 64 user (b) 128 user.

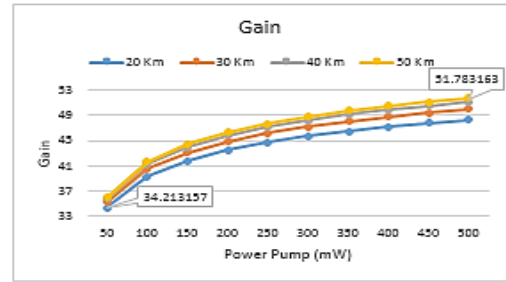
4.2. Analisis Menggunakan EDFA Sebagai Pre-Amplifier

4.2.1 Grafik Gain

Berdasarkan simulasi skenario II dengan menggunakan EDFA sebagai *pre-amplifier* disisi *downstream* didapatkan hasil *gain* sebagai berikut:



(a)



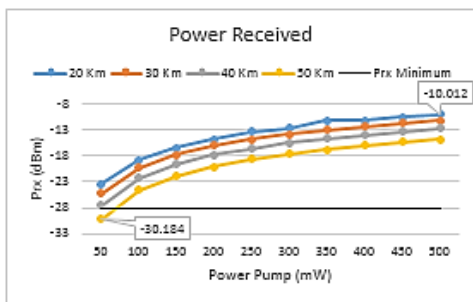
(b)

Gambar 4. 6 Hasil simulasi (a) 64 user (b) 128 user.

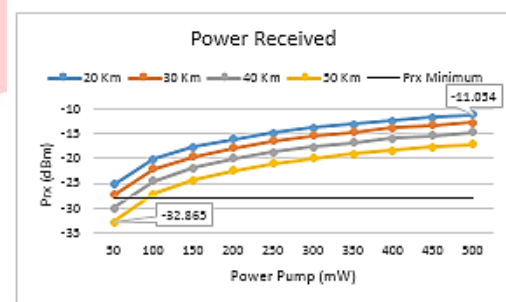
Berdasarkan hasil simulasi pada sisi *upstream* sebagai *pre-amplifier* didapatkan hasil gain yang berbeda-beda. Hal ini dikarenakan P_{sin} pada EDFA sebagai *pre-amplifier* bernilai berbeda-beda, penempatan EDFA pada sisi *upstream* nilai P_{sin} telah terpengaruh oleh redaman selama transmisi.

4.2.2 Grafik Received Power

Berdasarkan simulasi skenario II dengan menggunakan EDFA sebagai *pre-amplifier* disisi *downstream* didapatkan hasil *received power* sebagai berikut:



(a)



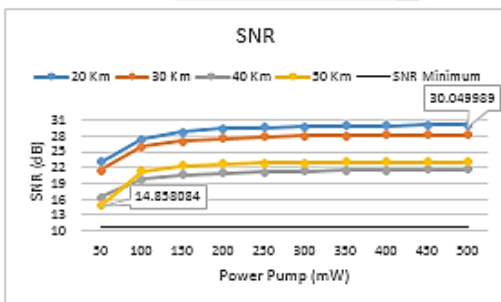
(b)

Gambar 4. 7 Hasil simulasi (a) 64 user (b) 128 user.

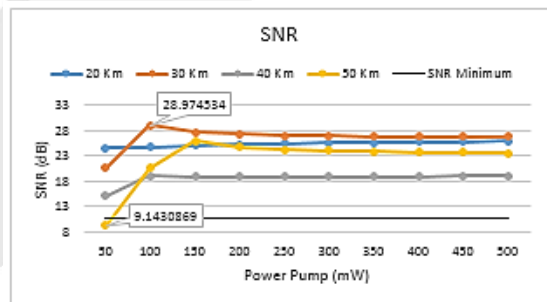
Berdasarkan hasil simulasi power pump mempengaruhi received power, hubungannya yaitu berbanding lurus. Sedangkan hubungan *received power* dengan jarak yaitu berbanding terbalik.

4.2.3 Grafik SNR

Berdasarkan simulasi skenario II dengan menggunakan EDFA sebagai *pre-amplifier* disisi *downstream* didapatkan hasil SNR sebagai berikut:



(a)



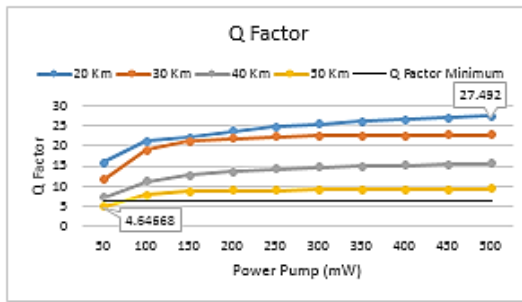
(b)

Gambar 4. 8 Hasil simulasi (a) 64 user (b) 128 user.

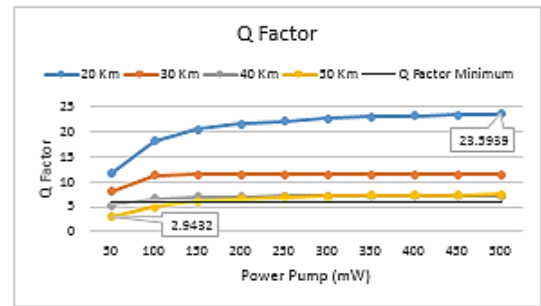
Berdasarkan hasil simulasi, nilai SNR tertinggi pada 64 user yaitu 30,04 dB pada jarak 20 Km dengan *power pump* 100 mW. Sedangkan pada 128 user, didapat hasil tertinggi yaitu 28,97 dB pada jarak 30 Km dengan *power pump* 100 mW.

4.2.4 Grafik Q Factor

Berdasarkan simulasi skenario II dengan menggunakan EDFA sebagai *pre-amplifier* disisi *downstream* didapatkan hasil *Q Factor* sebagai berikut:



(a)



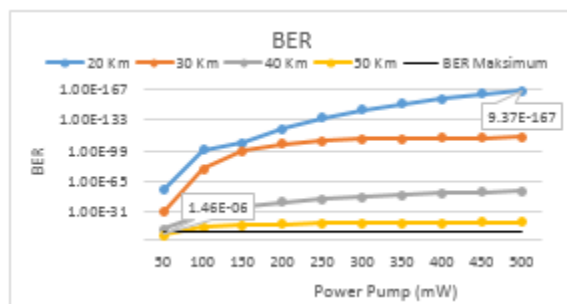
(b)

Gambar 4. 9 Hasil simulasi (a) 64 user (b) 128 user.

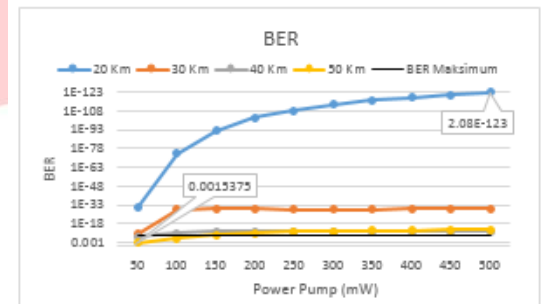
Berdasarkan hasil simulasi, hubungan power pump dengan Q Factor yaitu berbanding lurus. Sedangkan hubungan Q Factor dengan jarak berbanding terbalik.

4.2.5 Grafik BER

Berdasarkan simulasi skenario II dengan menggunakan EDFA sebagai *pre-amplifier* disisi *downstream* didapatkan hasil BER sebagai berikut:



(a)



(b)

Gambar 4. 10 Hasil simulasi (a) 64 user (b) 128 user.

Berdasarkan hasil simulasi, hubungan *power pump* dengan BER yaitu berbanding terbalik. Semakin besar *power pump* yang digunakan maka akan semakin kecil nilai BER yang didapatkan. Sedangkan hubungan BER dengan jarak yaitu berbanding lurus, yaitu semakin pendek jarak yang digunakan maka akan semakin kecil nilai BER yang didapatkan. Selain itu, faktor yang mempengaruhi besar kecilnya nilai BER adalah Q Factor. Hubungan BER dengan Q Factor yaitu berbanding terbalik, semakin besar nilai Q Factor maka akan semakin kecil nilai BER yang dihasilkan. Semakin kecil BER yang didapatkan, maka akan semakin kecil kemungkinan *error* yang dapat terjadi.

5. Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan pada Tugas Akhir ini didapat kesimpulan, yaitu pada transmisi *downstream* didapatkan hasil terbaik yaitu pada jarak 20 Km. Pada 64 user arah *downstream* didapatkan Q Factor = 35,86 dengan *power pump* 200 mW, dengan *power pump* 500 mW didapatkan *received power* = -11,16 dBm, SNR = 41,91 dB. Sedangkan pada 128 user arah *downstream* didapatkan Q Factor = 32,30 dengan *pump power* 250 mW, dengan *pump power* 500 mW didapatkan *received power* = -14,34 dBm, SNR = 40,27 dB. *Gain* tertinggi untuk arah *downstream* disemua jarak dan user sebesar 18,32 dengan *power pump* 500 mW. Pada 64 user arah *upstream* didapatkan hasil terbaik yaitu pada *power pump* 500 mW dengan hasil Q Factor = 27,49, *received power* sebesar -10,012 dBm, SNR = 30,04 dB dan *Gain* tertinggi = 51,13 dengan *power pump* 500 mW dan jarak 50 Km. Pada 128 user arah *upstream* didapatkan hasil terbaik pada *power pump* 500 mW dengan nilai Q Factor = 23,59 dan *received power* sebesar -11,054 dBm, sedangkan SNR = 28,97 dB dengan *power pump* 150 mW dan jarak 30 Km, *Gain* tertinggi = 51,78 dengan *power pump* 500 mW dan jarak 50 Km.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Nessel, "NG-PON2 Technology and Standards," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, p. 5, 2015.
- [2] FSAN, "FSAN Highlights & NG-PON2 Standards Update," February 2015.
- [3] N. R. Yulizar, Analisis Perancangan Teknologi Hybrid GPON dan XGPON pada Jaringan FTTH di Perumahan Batununggal, Telkom University, 2015.
- [4] ITU-T, G.989.1 : 40-Gigabit-capable passive optical networks(NG-PON2) : General requirements, International Telecommunication Union, 2013.
- [5] ITU-T, G.989.2 : 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2) : Physical media dependent (PMD) layer specification, International Telecommunication Union, 2014.
- [6] R. M. Arpan, Pengaruh EDFA Pada Sistem 160G TWDM-PON Berbasis NG-PON2, Telkom University, 2017.
- [7] S. Hanafie, Analisis Perbandingan Performansi Sistem DWDM Menggunakan Penguat SOA, EDFA, Dan ROA Berbasis Soliton, Bandung: Telkom University, 2013.
- [8] G. Keiser, in *Optical Fiber Communication Fifth Edition*, Mc Graw Hill Education.
- [9] I. Ardiansyah, Analisis Performansi Penguat Optik Hybrid Dengan Array Waveguide Grating (AWG) Pada Jaringan Transport, Telkom University, 2017.