

PENGARUH EDFA PADA SISTEM 160 G TWDM-PON BERBASIS NG-PON2

EDFA EFFECT ON 160 G TWDM-PON BASED ON NG-PON2

Rizky Maulana Arpan ¹, Ir. Akhmad Hambali, M.T.², Afief Dias Pambudi, S.T, M.T.³

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

¹rizkymaulana@student.telkomuniversity.ac.id, ²ahambali@telkomuniversity.ac.id, ³afiefdiaspambudi@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Passive Optical Network (PON) merupakan salah satu teknologi yang menjadi solusi untuk kebutuhan masyarakat yang menginginkan teknologi yang cepat dan efisien. Generasi terbaru dari PON yaitu *Next Generation Passive Optical Network stage 2* (NG-PON2) dapat mengirimkan kecepatan data dengan *bitrate* ≥ 40 Gbps untuk sisi *downstream* dan 10 Gbps untuk sisi *upstream*. TWDM direkomendasikan sebagai solusi utama untuk merancang dan melaksanakan NG-PON2.

Penelitian ini dilakukan perancangan dan simulasi jaringan *bidirectional* NG-PON2 dengan teknik TWDM yang memiliki total *bitrate* 160 Gbps untuk *downstream* dan 80 Gbps untuk *upstream*. Sistem yang dibuat menggunakan enam belas kanal TWDM dengan masing-masing kanal mempunyai *bitrate* 10 Gbps untuk *downstream* dan 2,5 Gbps untuk *upstream*. Kemudian, sistem ini memiliki jarak transmisi sejauh 40 km dengan tiga titik pembagi daya dengan total *split ratio* 1:128. Selain itu, sistem ini juga menggunakan penambahan EDFA sebagai *booster amplifier* dan *pre-amplifier* yang memiliki panjang 1 sampai dengan 5 meter dengan *Pump Laser Power* sebesar 100 mW sampai dengan 1000 mW. Setelah itu, dilakukan analisis terhadap sistem berdasarkan parameter pengukuran *Power Received*, *Q factor* dan BER. Selanjutnya, dilakukan analisis *amplifier* terhadap perubahan panjang EDFA dan daya pompa *laser* dengan parameter pengukuran *Gain* dan OSNR.

Berdasarkan dari hasil simulasi, transmisi *downstream* didapatkan panjang EDFA 2 meter dengan daya pompa 700 mW memberikan performansi yang terbaik dengan parameter *Q factor* sebesar 18,59; BER sebesar $1,9 \times 10^{-77}$; *Power Received* sebesar -18,61 dBm; *Gain* sebesar 10,86 dB; dan OSNR sebesar 54,29. Sedangkan, untuk performansi pada transmisi *upstream* ditunjukkan panjang EDFA 2 meter dengan daya pompa 800 mW dengan nilai parameter *Q factor* sebesar 19,67; BER sebesar $5,6 \times 10^{-85}$; *Power Received* sebesar -15,16 dBm, *Gain* sebesar 14,18 dB dan OSNR sebesar 25,69.

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

Abstract

Passive Optical Network (PON) is one of the technologies that become the solution for the needs of people who want a fast and efficient technology. The next generation of PON is *Next Generation Passive Optical Network stage 2* (NG-PON2) can transmit data speed with *bitrate* ≥ 40 Gbps for *downstream* side and 10 Gbps for *upstream* side. TWDM is recommended as the ultimate solution for designing and implementing NG-PON2.

This research design and simulate *bidirectional* NG-PON2 network with TWDM technique which has total *bitrate* 160 Gbit / s for *downstream* and 80 Gbps for *upstream* is done. The system created using sixteen TWDM channels with each channel has a 10 Gbit / s *bitrate* for *downstream* and 2.5 Gbit / s for *upstream*. Then, this system has 40 km transmission distance with three power divider points with a total *split ratio* of 1: 128. In addition, the system also uses the addition of EDFA as a *booster amplifier* and *pre-amplifier* that has a length of 1 to 5 meters with a *Power Laser Pump* of 100 mW up to 1000 mW. After that, analysis of the system based on measurement parameters such as *Power Received*, *Q factor* and BER. Also, amplifiers were analyzed for EDFA length changes and laser pump power with *Gain* and OSNR measurement parameters.

Based on the simulation results, *downstream* transmission obtained 2 meter long EDFA with 700 mW pump power to give the best performance with *Q factor* parameters is 18.59; BER is 1.9×10^{-77} ; *Power Received* at -18.61 dBm; *Gain* is 10.86 dB; And OSNR is 54.29. On the other hand, for performance on *upstream* transmission is showed by length of 2 meter EDFA using pump power 800 mW with *Q factor* equal to 19,67; $5,6 \times 10^{-85}$ of BER; *Power Received* at -15,16 dBm, 14,18 dB of *Gain* and 25.69 of OSNR.

Keyword : PON, NG-PON2, TWDM, EDFA, *Booster Amplifier*, *Pre-Amplifier*

1. Pendahuluan

Seiring dengan perkembangan zaman, pertumbuhan akan teknologi telekomunikasi semakin pesat . Hal ini didasari oleh kebutuhan masyarakat yang menginginkan teknologi yang cepat dan efisien. Maka ditemukan sebuah teknologi baru yang diharapkan dapat memenuhi kebutuhan masyarakat saat ini. *Passive Optical Network* (PON) merupakan teknologi yang tidak menggunakan catu daya pada bagian splitter yang menghubungkan ke perangkat pengguna akhir. Perkembangan teknologi PON dimulai dari A/BPON, G-PON, GE-PON, XG-PON/NG-PON1, dan NG-PON2 menjadi perkembangan terbaru dari PON yang diusulkan oleh IEEE dan ITU-T bersama-sama dengan *Full Services Access Network* (FSAN) [1] [2].

NG-PON2 dianggap sebagai long-term next generation dan telah diusulkan oleh FSAN untuk *downstream* tidak kurang dari 40 Gbps sampai dengan 160 Gbps dan untuk *upstream* tidak kurang dari 10 Gbps sampai dengan 80 Gbps dan harus tetap kompatibel dengan teknologi sebelumnya [3][4]. Pada April 2012, *Time and Wavelength Division*

Multiplexing PON (TWDM-PON) direkomendasikan sebagai solusi utama untuk merancang dan melaksanakan NG-PON2 [1].

Pada Tugas Akhir ini dilakukan penelitian pada NG-PON2 yang menggunakan TWDM-PON dengan kapasitas transmisi 160 Gbit/s pada sisi *downstream* dan 40 Gbit/s pada sisi *upstream* dengan jarak transmisi sejauh 40 km, serta menggunakan EDFA sebagai *booster amplifier* dan *pre-amplifier* dengan parameter pengujiannya yaitu *Q factor*, *BER*, *Power Received*, *Gain*, dan *OSNR*.

2. Dasar Teori

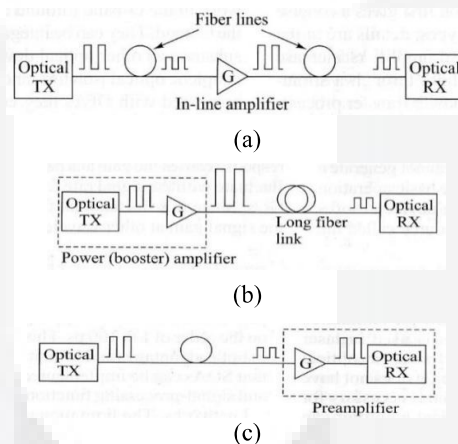
2.1 Next Generation – Passive optical Network stage 2 (NG-PON2)

Berikut ini adalah *requirement* dari sistem NG-PON2 [4], mendukung:

- *Multiple wavelength channel* dengan arsitektur TWDM
- 4 s.d 8 TWDM *channel*, dapat dikonfigurasi untuk pengembangan/penambahan setiap *channel*-nya, sebagai contoh: “*pay as you grow*” atau penegeaan dilakukan ketika ada penambahan *channel* yang berada di OLT.
- Nominal bitrate dari setiap *channel downstream* dan *upstream* [2]:
 - o 10 Gbit/s *downstream* dan 10 Gbit/s *upstream*
 - o 10 Gbit/s *downstream* dan 2.5 Gbit/s *upstream*
 - o 2.5 Gbit/s *downstream* dan 2.5 Gbit/s *upstream*
- Jangkauan fiber minimal 40 km dengan jarak pengembangan yang dapat dikonfigurasi adalah 20 km dan sebagai opsional mencapai 40 km,
- Kemampuan jarak transmisi mencapai 60 km
- Mendukung untuk *split ratio* paling tidak 1:64

2.2 Optical Amplifier

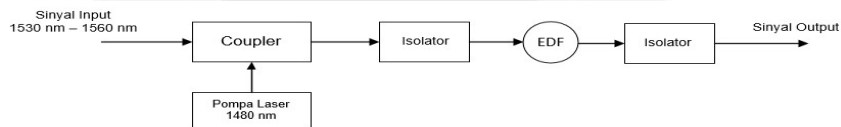
Terdapat 3 jenis penguat optik yang biasa digunakan, yaitu *Semiconductor Optical Amplifier (SOA)*, *Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)*, dan *Raman amplifier*. Tetapi pada penelitian ini hanya membahas mengenai EDFA, yang sering digunakan untuk komunikasi optik pada C-Band dan L-Band (1530-1565) nm. Berdasarkan pengaplikasiannya *optical amplifier* dibagi menjadi tiga kelas [5], yaitu *in-line amplifier*, *booster amplifier* dan *pre-amplifier* seperti yang terlihat pada gambar 1.



Gambar 1 Pengaplikasian amplifier (a) *In-line amplifier* (b) *Booster amplifier* (c) *Pre-amplifier* [5]

2.3 Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)

EDFA adalah jenis penguat optik yang menggunakan susunan elemen *erbium* yang akan dimasukkan ke serat optik. Elemen *erbium* tersebut berfungsi sebagai penginisiasi atau perangsang 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] [7].

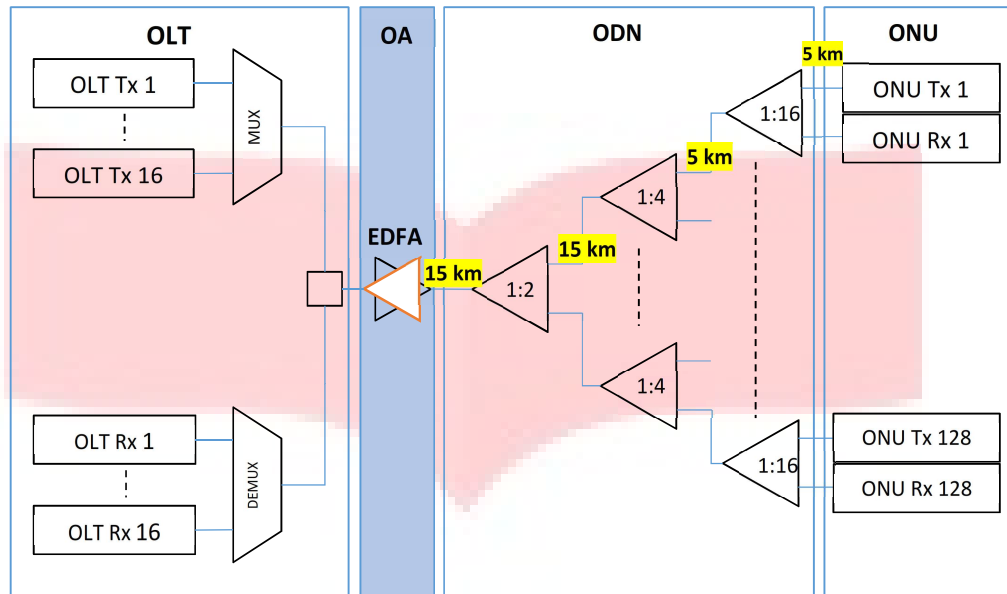


Gambar 2 Blok diagram konfigurasi EDFA [7]

Mekanisme kerja pada EDFA yaitu memasukkan elemen *erbium* ke dalam serat optik melalui proses *pumping*. Proses ini mengakibatkan electron dari hasil pompa akan naik dari pita energi rendah ke pita energi yang lebih tinggi. Sinyal optik yang melewati EDF berfungsi sebagai perangsang sehingga atom-atom yang terdapat di EDF akan melepaskan energi *photon* dan saat itu juga dihasilkan emisi yang bersifat koheren sehingga terjadi penguatan secara optik. *Pump photon* harus memiliki energi yang lebih besar dibandingkan dengan sinyal *photon*, jadi panjang gelombang pump harus lebih pendek dari panjang gelombang sinyal [6][7].

3. PERANCANGAN SISTEM

3.1 Perencanaan Sistem 80 Gbit/s TWDM-PON



Gambar 3 Sistem TWDM-PON

Pada umumnya, *Next Generation Passive Optical Network stage 2* (NG-PON2) tersusun dari tiga blok utama yaitu blok *Optical Line Termination* (OLT), blok *Optical Distribution Network* (ODN), dan blok *Optical Network Unit* (ONU) seperti yang terlihat pada Gambar 3.2. Pada OLT menggunakan enam belas *channel wavelength* dengan panjang gelombang setiap *channel*-nya berbeda dan nilai *bitrate* tiap *channel*-nya sebesar 10 Gbit/s untuk *downstream* dan 5 Gbit/s untuk *upstream*. Pada sisi ODN menggunakan jarak transmisi 40 km dengan menggunakan serat optik jenis *single mode fiber* (SMF) dan menggunakan *split ratio* 1:128 dengan tiga *stacks power splitter bidirectional* (1:2, 1:4, dan 1:16) sehingga jumlah keseluruhan ONU adalah 128. Pada perancangan ini menggunakan tambahan *Optical Amplifier* (OA) yang bertujuan untuk meningkatkan daya terima sinyal. Jenis OA yang digunakan yaitu *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA) dengan panjang gelombang pompa 1480 nm, panjang EDFA mulai dari 1 sampai dengan 5 meter dan parameter *pump power* sebesar 100 mW sampai dengan 1000 mW.

3.2 Parameter Jaringan NG-PON2

Pada umumnya, *Next Generation Passive Optical Network stage 2* (NG-PON2) tersusun dari tiga blok penyusun utama yaitu blok *Optical Line Termination* (OLT), blok *Optical Distribution Network* (ODN), dan blok *Optical Network Unit* (ONU). Pada sistem ini, menggunakan tambahan blok *Optical Amplifier* yang berjenis EDFA. Blok OLT tersusun dari dua bagian yaitu OLT *transmitter* dan OLT *receiver* mengingat dalam simulasi menggunakan sistem bidirectional. OLT *transmitter* terdiri dari *optical source*, *bit sequence generator*, *pulse generator*, dan *optical modulator*. Sedangkan untuk OLT *receiver* terdiri dari *optical filter*, *photodetector*, *electrical filter*, dan *3R regenerator*. Parameter dari blok OLT Tx dan Rx dijelaskan pada tabel 1 berikut.

Tabel 1 Parameter Blok OLT

Parameter	Unit	Value
Transmitter		
Launch power	dBm	3
Line code	-	NRZ
Wavelength band	nm	1596.34 - 1609.19
Number of channel	-	16
Channel spacing	GHz	100
Nominal line rate	Gbit/s	10
Receiver		
Bandwidth Rx	GHz	20
Wavelength band	nm	1532.68 – 1544.53
Gain	-	3
Responsivity	A/W	1
Ionization ratio	-	0.9
Dark current	nA	10

Blok *Optical Amplifier* pada penelitian ini menggunakan EDFA sepanjang 1 sampai dengan 5 meter dipilih sebagai *Pre-Amplifier* untuk *link upstream* dan *Booster Amplifier* untuk *link downstream*. Berikut ini tabel 2 parameter yang digunakan OA.

Tabel 2 Parameter Blok OA

Parameter	Unit	Value
Erbium doped fiber		
Length	m	1 – 5
Er metastable lifetime	ms	10
Core radius	µm	2.2
Er doping radius	µm	2.2
Er ion density	m ⁻³	1e+025
Numerical aperture	-	0.24
Pump laser		
Frequency	nm	1480
Power	mW	100 - 1000

Blok ODN tersusun dari dua komponen utama yaitu serat optik dengan *Single Mode Fiber* (SMF) dan *passive splitter*. Untuk SMF digunakan jarak terjauh cakupannya hingga 40 km, sedangkan total *splitting ratio* yang digunakan yaitu 1:128 dengan menggunakan tiga jenis *passive splitter* yaitu 1x2, 1x4, dan 1x16 seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3 Parameter Blok ODN

Parameter	Unit	Value
Optical Fiber		
Reference wavelength	nm	1550
Length	km	40
Attenuation	dB/km	0.2
Splitter		
Splitter output ports	-	2, 4, dan 16
Max. Insertion loss	dB	3
Return loss	dB	65

Blok ONU tersusun atas dua bagian yaitu Tx ONU dan Rx ONU. Pada Rx ONU terdiri dari *optical filter*, *photodetector*, *electrical filter* dan 3R *regenerator*. Sedangkan, untuk Tx ONU terdiri dari *optical source* dan *optical switches*. Dengan tiap parameter yang digunakan adalah sebagai berikut.

Tabel 4 Parameter Blok ONU

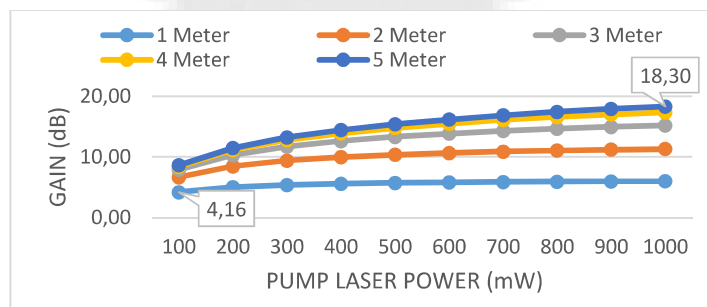
Parameter	Unit	Value
Transmitter		
Launch power	dBm	3
Line code	-	NRZ
Wavelength band	nm	1532.68 – 1544,53
Nominal line rate	Gbit/s	2.5
Number of channel	-	16
Channel spacing	GHz	100
Receiver		
Wavelength band	nm	1596.34 – 1609.19
Bandwidth	GHz	20
Gain	-	3
Responsivity	A/W	1
Ionization ratio	-	0.9
Dark current	nA	10

4. HASIL PERANCANGAN DAN ANALISIS PENGARUH EDFA PADA SISTEM TWDM-PON

4.1 Analisis Pengaruh EDFA Pada Sisi Downstream TWDM-PON

Analisis *downstream* yang dilakukan berdasarkan hasil dari komponen *Dual Port WDM Analyzer* untuk mendapatkan nilai dari parameter maksimum *Gain* dan maksimum OSNR serta untuk mendapatkan nilai dari parameter maksimum *Q factor* dan minimum BER menggunakan komponen *BER Analyzer*, sedangkan untuk mendapatkan nilai dari maksimum *Power Received* menggunakan komponen *Optical Power Meter* (OPM).

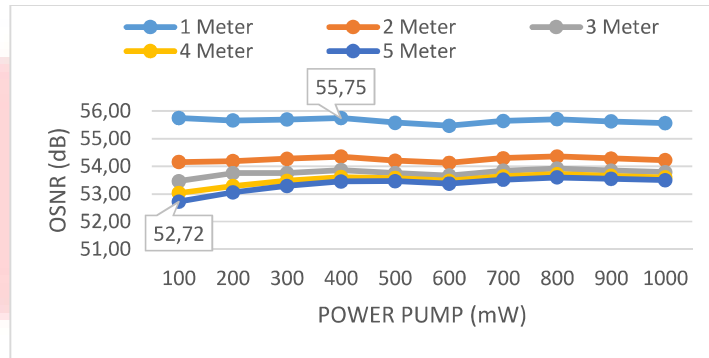
4.1.1 Parameter Gain



Gambar 4 Max. gain ONU dengan EDFA sebagai booster amplifier

Seperti yang ditunjukkan pada gambar diatas, nilai *Gain* tertinggi yaitu 18,30 dB berada pada panjang EDFA 5 meter dengan daya pompa sebesar 1000 mW sedangkan nilai *Gain* terendah yaitu 4,16 dB berada pada panjang EDFA 1 meter dengan daya pompa 100 mW. Oleh sebab itu, dapat disimpulkan bahwa pada panjang EDFA 5 meter menghasilkan energi dari inversi populasi EDFA yang lebih besar dibandingkan pada panjang EDFA 1, 2, 3, dan 4 meter.

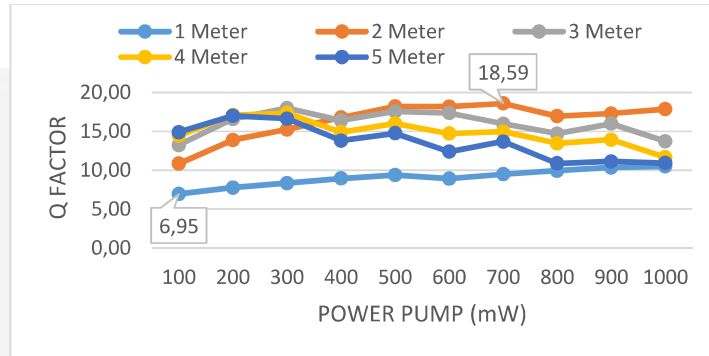
4.1.2 Parameter OSNR



Gambar 5 Max. OSNR ONU dengan EDFA sebagai booster amplifier

Nilai OSNR tertinggi yaitu 55,75 dB pada panjang EDFA 1 meter dengan daya pompa 400 mW sedangkan nilai OSNR terendah yaitu 52,72 dB pada panjang EDFA 5 meter dengan daya pompa 100 mW.

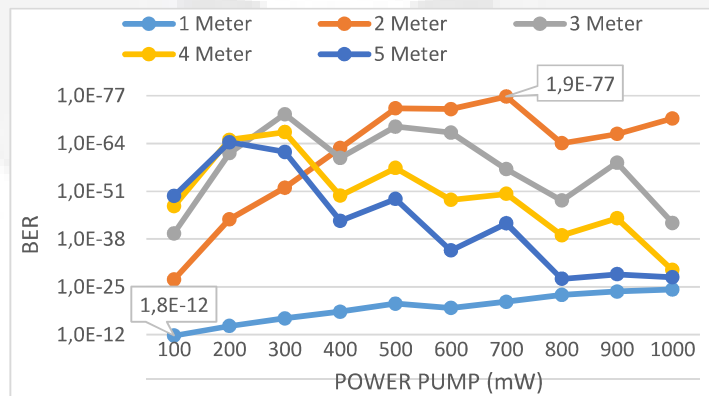
4.1.3 Parameter Q factor



Gambar 6 Max. Q factor ONU dengan EDFA sebagai booster amplifier

Gambar 6 menampilkan nilai *Q factor* tertinggi didapatkan pada panjang EDFA 2 meter dengan daya pompa 700 mW (18,59) sedangkan nilai *Q factor* terendah yaitu 6,95 pada panjang EDFA 1 meter dengan daya pompa 100 mW. Nilai *Q factor* yang dihasilkan dari setiap panjang EDFA telah memenuhi standar yang ditetapkan.

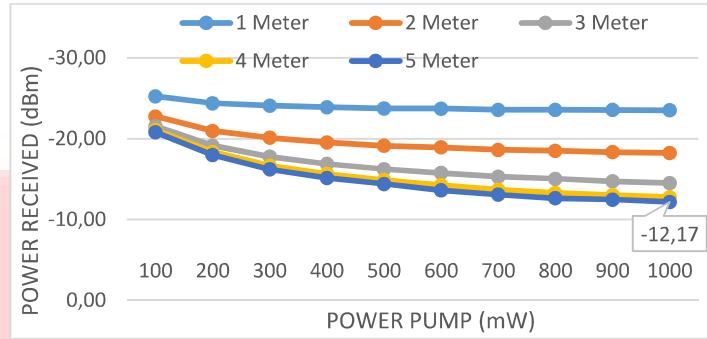
4.1.4 Parameter BER



Gambar 7 Min. BER ONU dengan EDFA sebagai booster amplifier

Apabila nilai BER semakin kecil (BER maksimum 1×10^{-9}) maka kualitas sinyal yang ditransmisikan semakin baik. Oleh karena itu, nilai BER tertinggi didapatkan pada panjang EDFA 2 meter dengan daya pompa 700 mW ($1,9 \times 10^{-77}$) sedangkan nilai *Q factor* terendah yaitu $1,8 \times 10^{-12}$ pada panjang EDFA 1 meter dengan daya pompa 100 mW dan juga nilai BER yang dihasilkan dari setiap panjang EDFA telah memenuhi standar yang ditetapkan.

4.1.5 Parameter Power Received



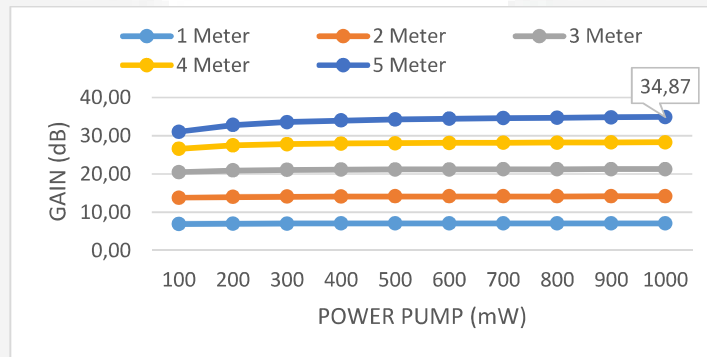
Gambar 8 Max. Power Received ONU dengan EDFA sebagai booster amplifier

Mengacu pada standar parameter *Power Received* yaitu -30 s.d -7 dBm, pada Gambar 4.7 diperoleh nilai panjang EDFA 1 meter sampai dengan 5 meter berada diantara *range* standar yang telah ditentukan. Selain itu juga nilai *Power Received* yang diperoleh dipengaruhi oleh panjang EDFA dan juga daya pompa karena semakin panjang EDFA dan semakin besar daya pompa maka semakin besar juga *Gain* yang dihasilkan. Dikarenakan nilai *Gain* yang semakin besar, maka akan memberikan nilai terbaik pada *power received*. Nilai *power received* terbaik yaitu -12,17 dBm yang berada pada panjang EDFA 5 meter dengan daya pompa 1000 mW.

4.2 Analisis Pengaruh EDFA Pada Sisi Upstream TWDM-PON

Seperti halnya pada analisis *downstream*, pada analisis *upstream* juga menggunakan komponen *Dual Port WDM Analyzer*, *BER Analyzer*, dan *Optical Power Meter (OPM)*.

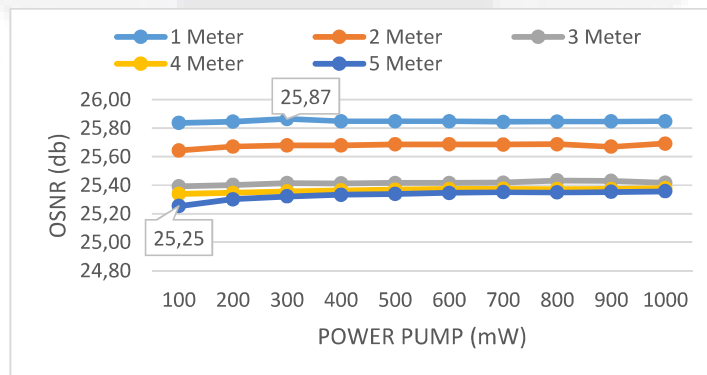
4.2.1 Parameter Gain



Gambar 9 Max. gain ONU dengan EDFA sebagai pre-amplifier

Gambar 9 menampilkan nilai *Gain* yang didapat dari hasil simulasi, dimana semakin besar nilai *Gain* yang didapat berbanding lurus dengan semakin besarnya nilai panjang EDFA dan daya pompa digunakan. Seperti yang ditunjukkan pada gambar diatas, nilai *Gain* tertinggi yaitu 34,87 dB berada pada panjang EDFA 5 meter dengan daya pompa sebesar 1000 mW

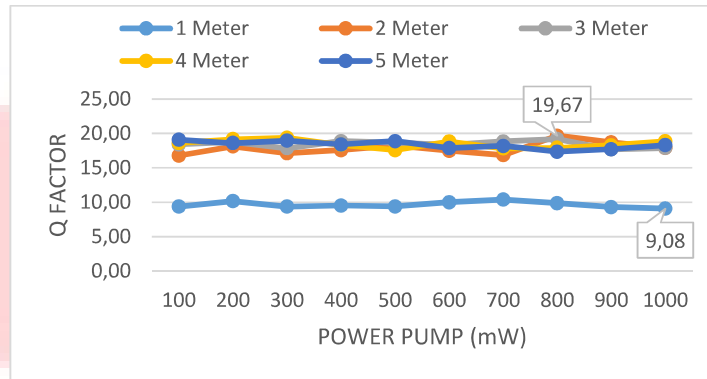
4.2.2 Parameter OSNR



Gambar 10 Max. OSNR ONU dengan EDFA sebagai pre-amplifier

Nilai OSNR tertinggi yaitu 25,87 dB pada panjang EDFA 1 meter dengan daya pompa 300 mW sedangkan nilai OSNR terendah yaitu 25,25 dB pada panjang EDFA 5 meter dengan daya pompa 100 mW.

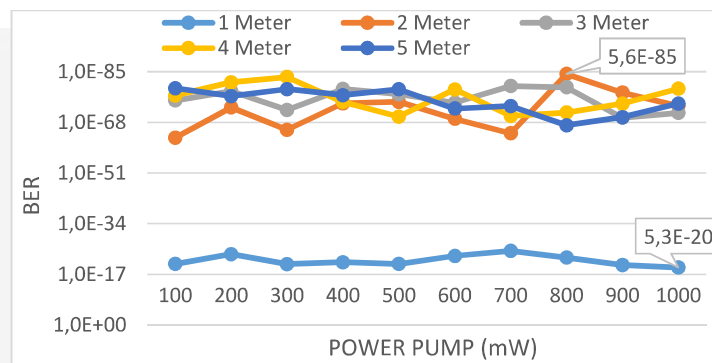
4.2.3 Parameter Q factor



Gambar 11 Max. Q factor ONU dengan EDFA sebagai pre-amplifier

Gambar 10 menampilkan nilai Q factor tertinggi didapatkan pada panjang EDFA 2 meter dengan daya pompa 800 mW (19,67) sedangkan nilai Q factor terendah yaitu 9,08 pada panjang EDFA 1 meter dengan daya pompa 1000 mW. Nilai Q factor yang dihasilkan dari setiap panjang EDFA telah memenuhi standar yang ditetapkan.

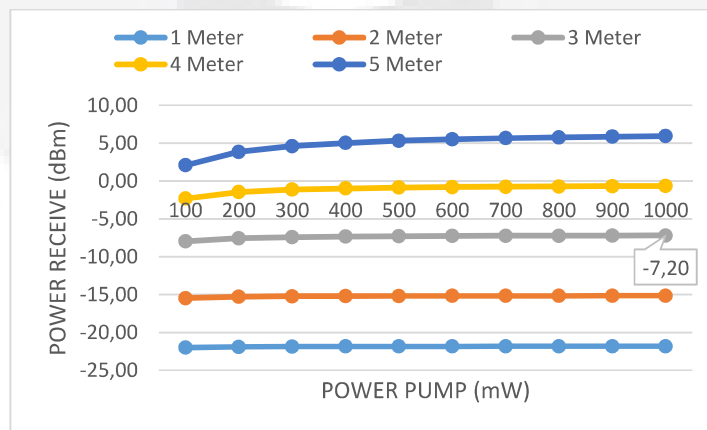
4.2.1 Parameter BER



Gambar 12 Min. BER ONU dengan EDFA sebagai pre-amplifier

Nilai BER tertinggi didapatkan pada panjang EDFA 2 meter dengan daya pompa 800 mW ($5,6 \times 10^{-85}$) sedangkan nilai BER terendah yaitu $5,3 \times 10^{-20}$ pada panjang EDFA 1 meter dengan daya pompa 1000 mW dan juga nilai BER yang dihasilkan dari setiap panjang EDFA telah memenuhi standar yang ditetapkan.

4.2.1 Parameter Power Received



Gambar 13 Max. Power Received ONU dengan EDFA sebagai pre-amplifier

Mengacu pada standar parameter Power Received yaitu -30 s.d -7 dBm, pada Gambar 13 diperoleh nilai panjang EDFA 1, 2, dan 3 meter berada diantara range standar yang telah ditentukan. Sedangkan panjang EDFA 4 dan 5 meter memiliki nilai yang tidak berada pada standar yang ditentukan, hal ini dikarenakan Gain yang dihasilkan terlalu

besar sehingga *Power Received* menjadi besar juga. Nilai *Power Received* terbaik yaitu -7,20 dBm yang berada pada panjang EDFA 3 meter dengan daya pompa 1000 mW.

5.1 Kesimpulan

1. Jaringan NG-PON2 160 Gbit/s dengan menggunakan EDFA sebagai *booster amplifier* mendapatkan nilai *downstream* terbaik untuk *Q factor* = 18,59 dB dan *BER* = $1,9 \times 10^{-77}$ yang terdapat pada panjang EDFA 2 meter dengan daya pompa 700 mW, dan juga nilai parameter lainnya yang terbaik berdasarkan *Q factor* dan BER yaitu untuk *power received* = -18,61 dBm, *gain* = 10,86 dB, dan *OSNR* = 54,29 dB.
2. NG-PON2 dengan menggunakan EDFA sebagai *pre-amplifier* mendapatkan nilai *upstream* terbaik untuk *Q factor* = 19,67 dB dan *BER* = $5,6 \times 10^{-85}$ yang terdapat pada panjang EDFA 2 meter dengan daya pompa 800 mW, dan juga nilai parameter lainnya yang terbaik berdasarkan *Q factor* dan BER yaitu untuk *power received* = -15,16 dBm, *gain* = 14,18 dB, dan *OSNR* = 25,69 dB.

5.2 Saran

1. Disarankan menggunakan tambahan EDFA *flattening gain*.
2. Disarankan menambahkan jumlah ONU menjadi 256, 512, dan 1024.
3. Disarankan dilakukan penelitian pengaruh *four wave mixing* (FWM) atau *effect non-linier* lainnya terhadap sistem NG-PON2.
4. Disarankan dilakukan penelitian dengan menggunakan *Hybrid Amplifier*.

DAFTAR REFERENSI

- [1] S. Bindhaiq, A. S. M. Supa'at, N. Zulkifli, A. B. Mohammad, R. Q. Shaddad, M. A. Elmagzoub dan A. Faisal, "Recent development on time and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation passive optical network stage 2 (NG-PON2)," ELSEVIER, 2014.
- [2] B. Pamukti, "Evaluation of Performance NG-PON2 using Arrayed Waveguide Grating and Dispersion Compensation Fibre", Bandung, Indonesia: Telkom University, 2016.
- [3] E. A. Mohammed, "Next generation Passive Optical Network Stage Two (NG-PON2)," Thesis The Islamic University – Gaza, 2014.
- [4] ITU-T, "G.989.1 : 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements," International Telecommunication Union, 2013.
- [5] G. Keiser, "Chapter 11 Optical Amplifier," dalam *Optical Fiber Communication Fifth Edition*, Singapore, Mc Graw Hill Education, 2015, p. 398.
- [6] I. Ardiansyah, "Analisis Performansi Penguat Optik Hybrid dengan Array Waveguide Grating (AWG) pada Jaringan Transport", Bandung, Indonesia: Telkom University, 2017.
- [7] S. Hanafie, "Analisis Perbandingan Performansi Sistem DWDM Menggunakan Penguat SOA, EDFA, dan ROA Berbasis Soliton," Bandung, Indonesia: Telkom University, 2013.

PENGARUH EDFA PADA SISTEM 160 G TWDM-PON BERBASIS NG-PON2

EDFA EFFECT ON 160 G TWDM-PON BASED ON NG-PON2

Rizky Maulana Arpan ¹, Ir. Akhmad Hambali, M.T.², Afief Dias Pambudi, S.T, M.T.³

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

¹rizkymaulana@student.telkomuniversity.ac.id, ²ahambali@telkomuniversity.ac.id, ³afiefdiaspambudi@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Passive Optical Network (PON) merupakan salah satu teknologi yang menjadi solusi untuk kebutuhan masyarakat yang menginginkan teknologi yang cepat dan efisien. Generasi terbaru dari PON yaitu *Next Generation Passive Optical Network stage 2* (NG-PON2) dapat mengirimkan kecepatan data dengan *bitrate* ≥ 40 Gbps untuk sisi *downstream* dan 10 Gbps untuk sisi *upstream*. TWDM direkomendasikan sebagai solusi utama untuk merancang dan melaksanakan NG-PON2.

Penelitian ini dilakukan perancangan dan simulasi jaringan *bidirectional* NG-PON2 dengan teknik TWDM yang memiliki total *bitrate* 160 Gbps untuk *downstream* dan 80 Gbps untuk *upstream*. Sistem yang dibuat menggunakan enam belas kanal TWDM dengan masing-masing kanal mempunyai *bitrate* 10 Gbps untuk *downstream* dan 2,5 Gbps untuk *upstream*. Kemudian, sistem ini memiliki jarak transmisi sejauh 40 km dengan tiga titik pembagi daya dengan total *split ratio* 1:128. Selain itu, sistem ini juga menggunakan penambahan EDFA sebagai *booster amplifier* dan *pre-amplifier* yang memiliki panjang 1 sampai dengan 5 meter dengan *Pump Laser Power* sebesar 100 mW sampai dengan 1000 mW. Setelah itu, dilakukan analisis terhadap sistem berdasarkan parameter pengukuran *Power Received*, *Q factor* dan BER. Selanjutnya, dilakukan analisis *amplifier* terhadap perubahan panjang EDFA dan daya pompa *laser* dengan parameter pengukuran *Gain* dan OSNR.

Berdasarkan dari hasil simulasi, transmisi *downstream* didapatkan panjang EDFA 2 meter dengan daya pompa 700 mW memberikan performansi yang terbaik dengan parameter *Q factor* sebesar 18,59; BER sebesar $1,9 \times 10^{-77}$; *Power Received* sebesar -18,61 dBm; *Gain* sebesar 10,86 dB; dan OSNR sebesar 54,29. Sedangkan, untuk performansi pada transmisi *upstream* ditunjukkan panjang EDFA 2 meter dengan daya pompa 800 mW dengan nilai parameter *Q factor* sebesar 19,67; BER sebesar $5,6 \times 10^{-85}$; *Power Received* sebesar -15,16 dBm, *Gain* sebesar 14,18 dB dan OSNR sebesar 25,69.

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

Abstract

Passive Optical Network (PON) is one of the technologies that become the solution for the needs of people who want a fast and efficient technology. The next generation of PON is *Next Generation Passive Optical Network stage 2* (NG-PON2) can transmit data speed with *bitrate* ≥ 40 Gbps for *downstream* side and 10 Gbps for *upstream* side. TWDM is recommended as the ultimate solution for designing and implementing NG-PON2.

This research design and simulate *bidirectional* NG-PON2 network with TWDM technique which has total *bitrate* 160 Gbit / s for *downstream* and 80 Gbps for *upstream* is done. The system created using sixteen TWDM channels with each channel has a 10 Gbit / s *bitrate* for *downstream* and 2.5 Gbit / s for *upstream*. Then, this system has 40 km transmission distance with three power divider points with a total *split ratio* of 1: 128. In addition, the system also uses the addition of EDFA as a *booster amplifier* and *pre-amplifier* that has a length of 1 to 5 meters with a *Power Laser Pump* of 100 mW up to 1000 mW. After that, analysis of the system based on measurement parameters such as *Power Received*, *Q factor* and BER. Also, amplifiers were analyzed for EDFA length changes and laser pump power with *Gain* and OSNR measurement parameters.

Based on the simulation results, *downstream* transmission obtained 2 meter long EDFA with 700 mW pump power to give the best performance with *Q factor* parameters is 18.59; BER is 1.9×10^{-77} ; *Power Received* at -18.61 dBm; *Gain* is 10.86 dB; And OSNR is 54.29. On the other hand, for performance on *upstream* transmission is showed by length of 2 meter EDFA using pump power 800 mW with *Q factor* equal to 19,67; $5,6 \times 10^{-85}$ of BER; *Power Received* at -15,16 dBm, 14,18 dB of *Gain* and 25.69 of OSNR.

Keyword : PON, NG-PON2, TWDM, EDFA, *Booster Amplifier*, *Pre-Amplifier*

1. Pendahuluan

Seiring dengan perkembangan zaman, pertumbuhan akan teknologi telekomunikasi semakin pesat . Hal ini didasari oleh kebutuhan masyarakat yang menginginkan teknologi yang cepat dan efisien. Maka ditemukan sebuah teknologi baru yang diharapkan dapat memenuhi kebutuhan masyarakat saat ini. *Passive Optical Network* (PON) merupakan teknologi yang tidak menggunakan catu daya pada bagian splitter yang menghubungkan ke perangkat pengguna akhir. Perkembangan teknologi PON dimulai dari A/BPON, G-PON, GE-PON, XG-PON/NG-PON1, dan NG-PON2 menjadi perkembangan terbaru dari PON yang diusulkan oleh IEEE dan ITU-T bersama-sama dengan *Full Services Access Network* (FSAN) [1] [2].

NG-PON2 dianggap sebagai long-term next generation dan telah diusulkan oleh FSAN untuk *downstream* tidak kurang dari 40 Gbps sampai dengan 160 Gbps dan untuk *upstream* tidak kurang dari 10 Gbps sampai dengan 80 Gbps dan harus tetap kompatibel dengan teknologi sebelumnya [3][4]. Pada April 2012, *Time and Wavelength Division*

Multiplexing PON (TWDM-PON) direkomendasikan sebagai solusi utama untuk merancang dan melaksanakan NG-PON2 [1].

Pada Tugas Akhir ini dilakukan penelitian pada NG-PON2 yang menggunakan TWDM-PON dengan kapasitas transmisi 160 Gbit/s pada sisi *downstream* dan 40 Gbit/s pada sisi *upstream* dengan jarak transmisi sejauh 40 km, serta menggunakan EDFA sebagai *booster amplifier* dan *pre-amplifier* dengan parameter pengujiannya yaitu *Q factor*, *BER*, *Power Received*, *Gain*, dan *OSNR*.

2. Dasar Teori

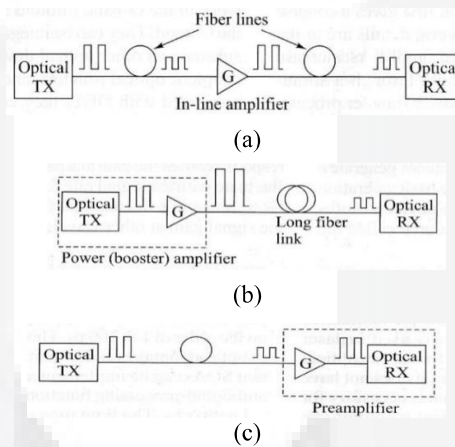
2.1 Next Generation – Passive optical Network stage 2 (NG-PON2)

Berikut ini adalah *requirement* dari sistem NG-PON2 [4], mendukung:

- *Multiple wavelength channel* dengan arsitektur TWDM
- 4 s.d 8 TWDM *channel*, dapat dikonfigurasi untuk pengembangan/penambahan setiap *channel*-nya, sebagai contoh: “*pay as you grow*” atau pengadaan dilakukan ketika ada penambahan *channel* yang berada di OLT.
- Nominal bitrate dari setiap *channel downstream* dan *upstream* [2]:
 - o 10 Gbit/s *downstream* dan 10 Gbit/s *upstream*
 - o 10 Gbit/s *downstream* dan 2.5 Gbit/s *upstream*
 - o 2.5 Gbit/s *downstream* dan 2.5 Gbit/s *upstream*
- Jangkauan fiber minimal 40 km dengan jarak pengembangan yang dapat dikonfigurasi adalah 20 km dan sebagai opsional mencapai 40 km,
- Kemampuan jarak transmisi mencapai 60 km
- Mendukung untuk *split ratio* paling tidak 1:64

2.2 Optical Amplifier

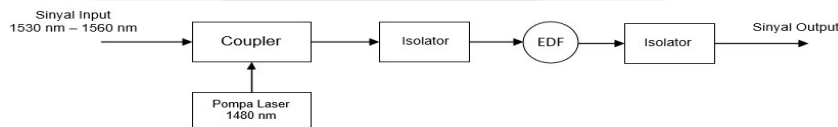
Terdapat 3 jenis penguat optik yang biasa digunakan, yaitu *Semiconductor Optical Amplifier (SOA)*, *Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)*, dan *Raman amplifier*. Tetapi pada penelitian ini hanya membahas mengenai EDFA, yang sering digunakan untuk komunikasi optik pada C-Band dan L-Band (1530-1565) nm. Berdasarkan pengaplikasiannya *optical amplifier* dibagi menjadi tiga kelas [5], yaitu *in-line amplifier*, *booster amplifier* dan *pre-amplifier* seperti yang terlihat pada gambar 1.



Gambar 1 Pengaplikasian amplifier (a) *In-line amplifier* (b) *Booster amplifier* (c) *Pre-amplifier* [5]

2.3 Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)

EDFA adalah jenis penguat optik yang menggunakan susunan elemen *erbium* yang akan dimasukkan ke serat optik. Elemen *erbium* tersebut berfungsi sebagai penginisiasi atau perangsang 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] [7].

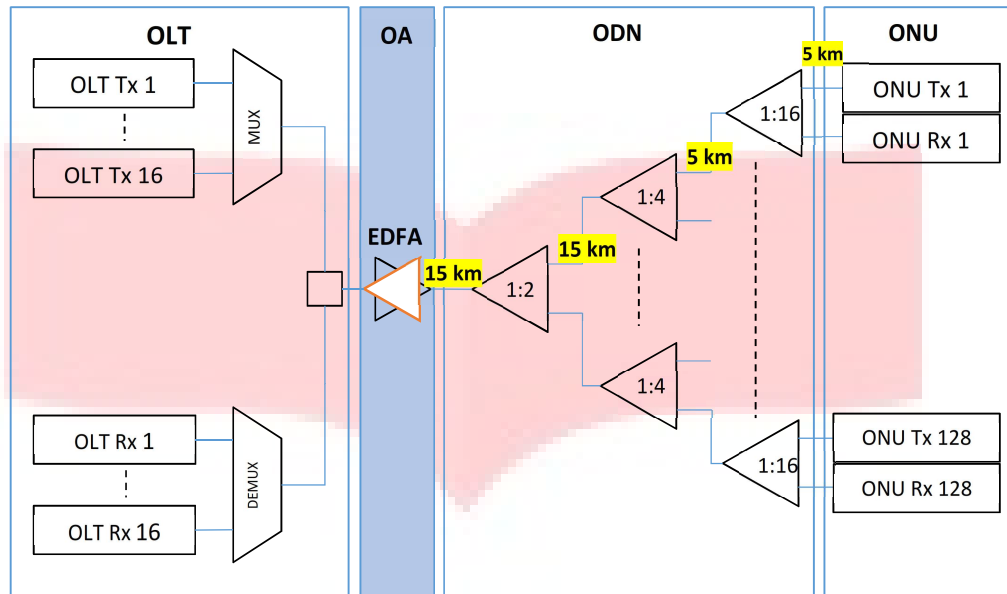


Gambar 2 Blok diagram konfigurasi EDFA [7]

Mekanisme kerja pada EDFA yaitu memasukkan elemen erbium ke dalam serat optik melalui proses *pumping*. Proses ini mengakibatkan electron dari hasil pompa akan naik dari pita energi rendah ke pita energi yang lebih tinggi. Sinyal optik yang melewati EDF berfungsi sebagai perangsang sehingga atom-atom yang terdapat di EDF akan melepaskan energi *photon* dan saat itu juga dihasilkan emisi yang bersifat koheren sehingga terjadi penguatan secara optik. *Pump photon* harus memiliki energi yang lebih besar dibandingkan dengan sinyal *photon*, jadi panjang gelombang pump harus lebih pendek dari panjang gelombang sinyal [6][7].

3. PERANCANGAN SISTEM

3.1 Perencanaan Sistem 80 Gbit/s TWDM-PON



Gambar 3 Sistem TWDM-PON

Pada umumnya, *Next Generation Passive Optical Network stage 2* (NG-PON2) tersusun dari tiga blok utama yaitu blok *Optical Line Termination* (OLT), blok *Optical Distribution Network* (ODN), dan blok *Optical Network Unit* (ONU) seperti yang terlihat pada Gambar 3.2. Pada OLT menggunakan enam belas *channel wavelength* dengan panjang gelombang setiap *channel*-nya berbeda dan nilai *bitrate* tiap *channel*-nya sebesar 10 Gbit/s untuk *downstream* dan 5 Gbit/s untuk *upstream*. Pada sisi ODN menggunakan jarak transmisi 40 km dengan menggunakan serat optik jenis *single mode fiber* (SMF) dan menggunakan *split ratio* 1:128 dengan tiga *stacks power splitter bidirectional* (1:2, 1:4, dan 1:16) sehingga jumlah keseluruhan ONU adalah 128. Pada perancangan ini menggunakan tambahan *Optical Amplifier* (OA) yang bertujuan untuk meningkatkan daya terima sinyal. Jenis OA yang digunakan yaitu *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA) dengan panjang gelombang pompa 1480 nm, panjang EDFA mulai dari 1 sampai dengan 5 meter dan parameter *pump power* sebesar 100 mW sampai dengan 1000 mW.

3.2 Parameter Jaringan NG-PON2

Pada umumnya, *Next Generation Passive Optical Network stage 2* (NG-PON2) tersusun dari tiga blok penyusun utama yaitu blok *Optical Line Termination* (OLT), blok *Optical Distribution Network* (ODN), dan blok *Optical Network Unit* (ONU). Pada sistem ini, menggunakan tambahan blok *Optical Amplifier* yang berjenis EDFA. Blok OLT tersusun dari dua bagian yaitu OLT *transmitter* dan OLT *receiver* mengingat dalam simulasi menggunakan sistem bidirectional. OLT *transmitter* terdiri dari *optical source*, *bit sequence generator*, *pulse generator*, dan *optical modulator*. Sedangkan untuk OLT *receiver* terdiri dari *optical filter*, *photodetector*, *electrical filter*, dan *3R regenerator*. Parameter dari blok OLT Tx dan Rx dijelaskan pada tabel 1 berikut.

Tabel 1 Parameter Blok OLT

Parameter	Unit	Value
Transmitter		
Launch power	dBm	3
Line code	-	NRZ
Wavelength band	nm	1596.34 - 1609.19
Number of channel	-	16
Channel spacing	GHz	100
Nominal line rate	Gbit/s	10
Receiver		
Bandwidth Rx	GHz	20
Wavelength band	nm	1532.68 – 1544.53
Gain	-	3
Responsivity	A/W	1
Ionization ratio	-	0.9
Dark current	nA	10

Blok *Optical Amplifier* pada penelitian ini menggunakan EDFA sepanjang 1 sampai dengan 5 meter dipilih sebagai *Pre-Amplifier* untuk *link upstream* dan *Booster Amplifier* untuk *link downstream*. Berikut ini tabel 2 parameter yang digunakan OA.

Tabel 2 Parameter Blok OA

Parameter	Unit	Value
Erbium doped fiber		
Length	m	1 – 5
Er metastable lifetime	ms	10
Core radius	µm	2.2
Er doping radius	µm	2.2
Er ion density	m ⁻³	1e+025
Numerical aperture	-	0.24
Pump laser		
Frequency	nm	1480
Power	mW	100 - 1000

Blok ODN tersusun dari dua komponen utama yaitu serat optik dengan *Single Mode Fiber* (SMF) dan *passive splitter*. Untuk SMF digunakan jarak terjauh cakupannya hingga 40 km, sedangkan total *splitting ratio* yang digunakan yaitu 1:128 dengan menggunakan tiga jenis *passive splitter* yaitu 1x2, 1x4, dan 1x16 seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3 Parameter Blok ODN

Parameter	Unit	Value
Optical Fiber		
Reference wavelength	nm	1550
Length	km	40
Attenuation	dB/km	0.2
Splitter		
Splitter output ports	-	2, 4, dan 16
Max. Insertion loss	dB	3
Return loss	dB	65

Blok ONU tersusun atas dua bagian yaitu Tx ONU dan Rx ONU. Pada Rx ONU terdiri dari *optical filter*, *photodetector*, *electrical filter* dan 3R *regenerator*. Sedangkan, untuk Tx ONU terdiri dari *optical source* dan *optical switches*. Dengan tiap parameter yang digunakan adalah sebagai berikut.

Tabel 4 Parameter Blok ONU

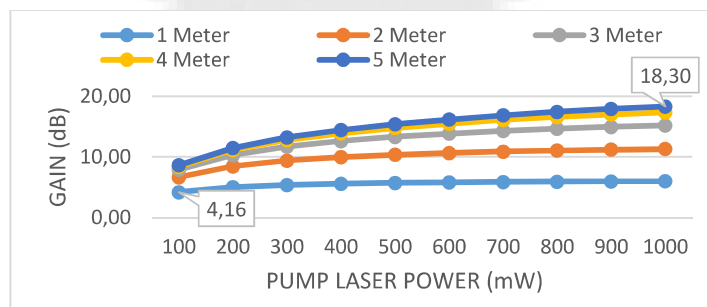
Parameter	Unit	Value
Transmitter		
Launch power	dBm	3
Line code	-	NRZ
Wavelength band	nm	1532.68 – 1544,53
Nominal line rate	Gbit/s	2.5
Number of channel	-	16
Channel spacing	GHz	100
Receiver		
Wavelength band	nm	1596.34 – 1609.19
Bandwidth	GHz	20
Gain	-	3
Responsivity	A/W	1
Ionization ratio	-	0.9
Dark current	nA	10

4. HASIL PERANCANGAN DAN ANALISIS PENGARUH EDFA PADA SISTEM TWDM-PON

4.1 Analisis Pengaruh EDFA Pada Sisi Downstream TWDM-PON

Analisis *downstream* yang dilakukan berdasarkan hasil dari komponen *Dual Port WDM Analyzer* untuk mendapatkan nilai dari parameter maksimum *Gain* dan maksimum OSNR serta untuk mendapatkan nilai dari parameter maksimum *Q factor* dan minimum BER menggunakan komponen *BER Analyzer*, sedangkan untuk mendapatkan nilai dari maksimum *Power Received* menggunakan komponen *Optical Power Meter* (OPM).

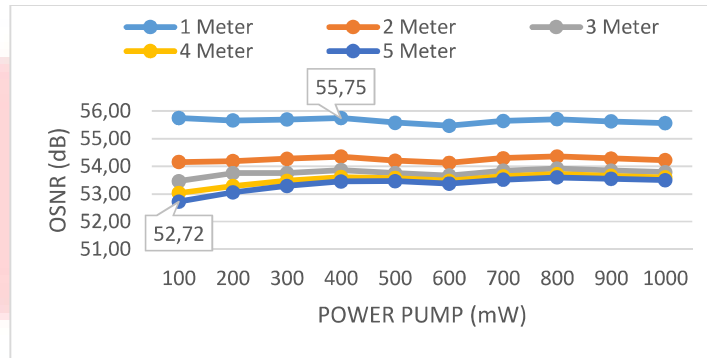
4.1.1 Parameter Gain



Gambar 4 Max. gain ONU dengan EDFA sebagai booster amplifier

Seperti yang ditunjukkan pada gambar diatas, nilai *Gain* tertinggi yaitu 18,30 dB berada pada panjang EDFA 5 meter dengan daya pompa sebesar 1000 mW sedangkan nilai *Gain* terendah yaitu 4,16 dB berada pada panjang EDFA 1 meter dengan daya pompa 100 mW. Oleh sebab itu, dapat disimpulkan bahwa pada panjang EDFA 5 meter menghasilkan energi dari inversi populasi EDFA yang lebih besar dibandingkan pada panjang EDFA 1, 2, 3, dan 4 meter.

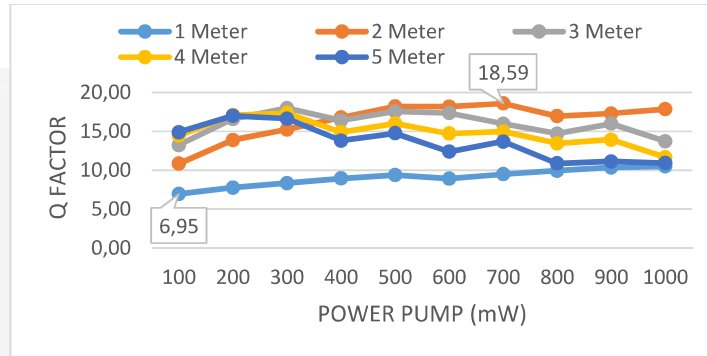
4.1.2 Parameter OSNR



Gambar 5 Max. OSNR ONU dengan EDFA sebagai booster amplifier

Nilai OSNR tertinggi yaitu 55,75 dB pada panjang EDFA 1 meter dengan daya pompa 400 mW sedangkan nilai OSNR terendah yaitu 52,72 dB pada panjang EDFA 5 meter dengan daya pompa 100 mW.

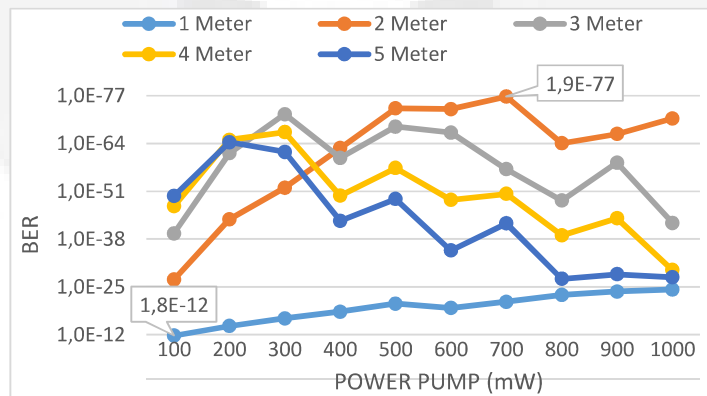
4.1.3 Parameter Q factor



Gambar 6 Max. Q factor ONU dengan EDFA sebagai booster amplifier

Gambar 6 menampilkan nilai *Q factor* tertinggi didapatkan pada panjang EDFA 2 meter dengan daya pompa 700 mW (18,59) sedangkan nilai *Q factor* terendah yaitu 6,95 pada panjang EDFA 1 meter dengan daya pompa 100 mW. Nilai *Q factor* yang dihasilkan dari setiap panjang EDFA telah memenuhi standar yang ditetapkan.

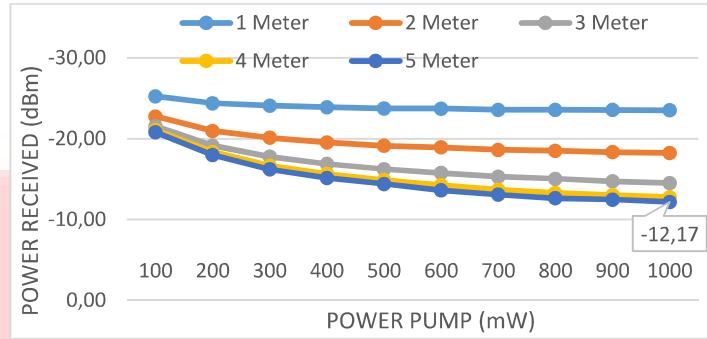
4.1.4 Parameter BER



Gambar 7 Min. BER ONU dengan EDFA sebagai booster amplifier

Apabila nilai BER semakin kecil (BER maksimum 1×10^{-9}) maka kualitas sinyal yang ditransmisikan semakin baik. Oleh karena itu, nilai BER tertinggi didapatkan pada panjang EDFA 2 meter dengan daya pompa 700 mW ($1,9 \times 10^{-77}$) sedangkan nilai *Q factor* terendah yaitu $1,8 \times 10^{-12}$ pada panjang EDFA 1 meter dengan daya pompa 100 mW dan juga nilai BER yang dihasilkan dari setiap panjang EDFA telah memenuhi standar yang ditetapkan.

4.1.5 Parameter Power Received



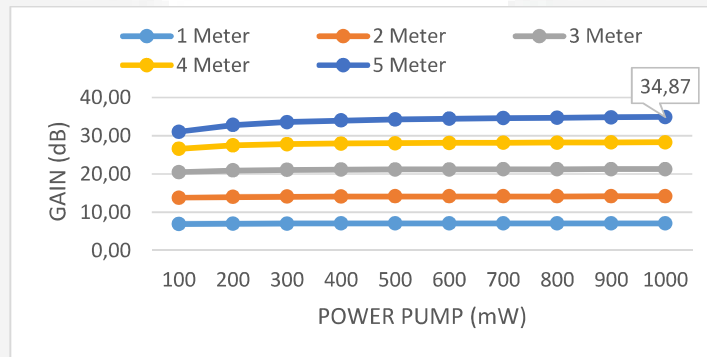
Gambar 8 Max. Power Received ONU dengan EDFA sebagai booster amplifier

Mengacu pada standar parameter *Power Received* yaitu -30 s.d -7 dBm, pada Gambar 4.7 diperoleh nilai panjang EDFA 1 meter sampai dengan 5 meter berada diantara *range* standar yang telah ditentukan. Selain itu juga nilai *Power Received* yang diperoleh dipengaruhi oleh panjang EDFA dan juga daya pompa karena semakin panjang EDFA dan semakin besar daya pompa maka semakin besar juga *Gain* yang dihasilkan. Dikarenakan nilai *Gain* yang semakin besar, maka akan memberikan nilai terbaik pada *power received*. Nilai *power received* terbaik yaitu -12,17 dBm yang berada pada panjang EDFA 5 meter dengan daya pompa 1000 mW.

4.2 Analisis Pengaruh EDFA Pada Sisi Upstream TWDM-PON

Seperti halnya pada analisis *downstream*, pada analisis *upstream* juga menggunakan komponen *Dual Port WDM Analyzer*, *BER Analyzer*, dan *Optical Power Meter (OPM)*.

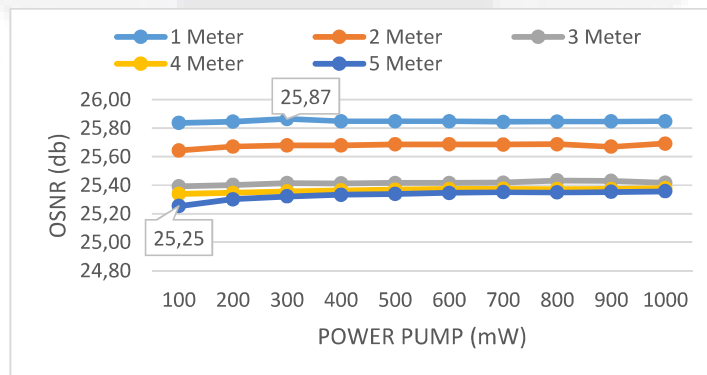
4.2.1 Parameter Gain



Gambar 9 Max. gain ONU dengan EDFA sebagai pre-amplifier

Gambar 9 menampilkan nilai *Gain* yang didapat dari hasil simulasi, dimana semakin besar nilai *Gain* yang didapat berbanding lurus dengan semakin besarnya nilai panjang EDFA dan daya pompa digunakan. Seperti yang ditunjukkan pada gambar diatas, nilai *Gain* tertinggi yaitu 34,87 dB berada pada panjang EDFA 5 meter dengan daya pompa sebesar 1000 mW

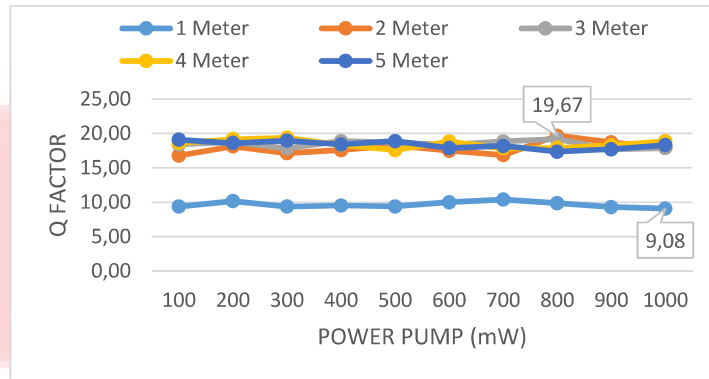
4.2.2 Parameter OSNR



Gambar 10 Max. OSNR ONU dengan EDFA sebagai pre-amplifier

Nilai OSNR tertinggi yaitu 25,87 dB pada panjang EDFA 1 meter dengan daya pompa 300 mW sedangkan nilai OSNR terendah yaitu 25,25 dB pada panjang EDFA 5 meter dengan daya pompa 100 mW.

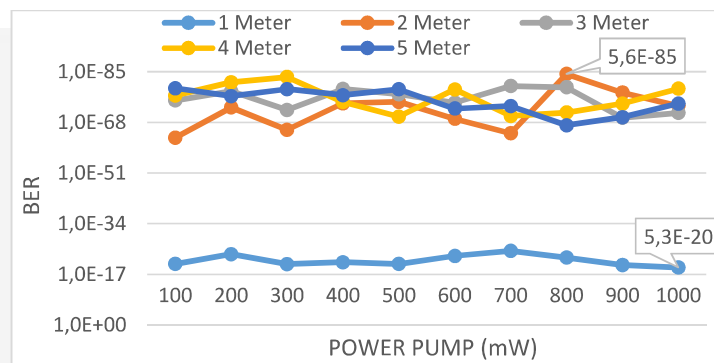
4.2.3 Parameter Q factor



Gambar 11 Max. Q factor ONU dengan EDFA sebagai pre-amplifier

Gambar 10 menampilkan nilai Q factor tertinggi didapatkan pada panjang EDFA 2 meter dengan daya pompa 800 mW (19,67) sedangkan nilai Q factor terendah yaitu 9,08 pada panjang EDFA 1 meter dengan daya pompa 1000 mW. Nilai Q factor yang dihasilkan dari setiap panjang EDFA telah memenuhi standar yang ditetapkan.

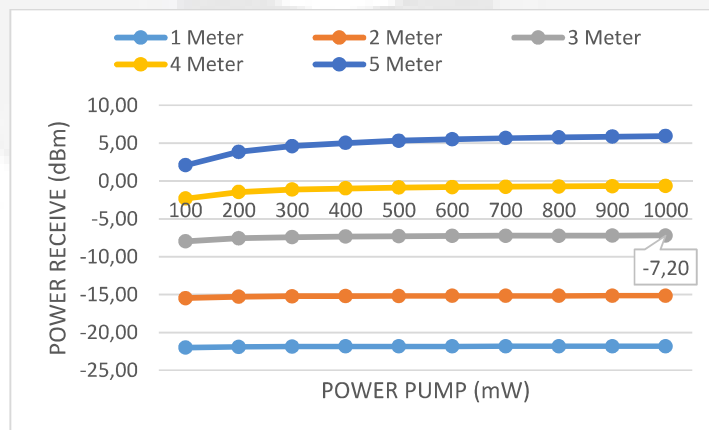
4.2.1 Parameter BER



Gambar 12 Min. BER ONU dengan EDFA sebagai pre-amplifier

Nilai BER tertinggi didapatkan pada panjang EDFA 2 meter dengan daya pompa 800 mW ($5,6 \times 10^{-85}$) sedangkan nilai BER terendah yaitu $5,3 \times 10^{-20}$ pada panjang EDFA 1 meter dengan daya pompa 1000 mW dan juga nilai BER yang dihasilkan dari setiap panjang EDFA telah memenuhi standar yang ditetapkan.

4.2.1 Parameter Power Received



Gambar 13 Max. Power Received ONU dengan EDFA sebagai pre-amplifier

Mengacu pada standar parameter Power Received yaitu -30 s.d -7 dBm, pada Gambar 13 diperoleh nilai panjang EDFA 1, 2, dan 3 meter berada diantara range standar yang telah ditentukan. Sedangkan panjang EDFA 4 dan 5 meter memiliki nilai yang tidak berada pada standar yang ditentukan, hal ini dikarenakan Gain yang dihasilkan terlalu

besar sehingga *Power Received* menjadi besar juga. Nilai *Power Received* terbaik yaitu -7,20 dBm yang berada pada panjang EDFA 3 meter dengan daya pompa 1000 mW.

5.1 Kesimpulan

1. Jaringan NG-PON2 160 Gbit/s dengan menggunakan EDFA sebagai *booster amplifier* mendapatkan nilai *downstream* terbaik untuk *Q factor* = 18,59 dB dan *BER* = $1,9 \times 10^{-77}$ yang terdapat pada panjang EDFA 2 meter dengan daya pompa 700 mW, dan juga nilai parameter lainnya yang terbaik berdasarkan *Q factor* dan BER yaitu untuk *power received* = -18,61 dBm, *gain* = 10,86 dB, dan *OSNR* = 54,29 dB.
2. NG-PON2 dengan menggunakan EDFA sebagai *pre-amplifier* mendapatkan nilai *upstream* terbaik untuk *Q factor* = 19,67 dB dan *BER* = $5,6 \times 10^{-85}$ yang terdapat pada panjang EDFA 2 meter dengan daya pompa 800 mW, dan juga nilai parameter lainnya yang terbaik berdasarkan *Q factor* dan BER yaitu untuk *power received* = -15,16 dBm, *gain* = 14,18 dB, dan *OSNR* = 25,69 dB.

5.2 Saran

1. Disarankan menggunakan tambahan EDFA *flattening gain*.
2. Disarankan menambahkan jumlah ONU menjadi 256, 512, dan 1024.
3. Disarankan dilakukan penelitian pengaruh *four wave mixing* (FWM) atau *effect non-linier* lainnya terhadap sistem NG-PON2.
4. Disarankan dilakukan penelitian dengan menggunakan *Hybrid Amplifier*.

DAFTAR REFERENSI

- [1] S. Bindhaiq, A. S. M. Supa'at, N. Zulkifli, A. B. Mohammad, R. Q. Shaddad, M. A. Elmagzoub dan A. Faisal, "Recent development on time and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation passive optical network stage 2 (NG-PON2)," ELSEVIER, 2014.
- [2] B. Pamukti, "Evaluation of Performance NG-PON2 using Arrayed Waveguide Grating and Dispersion Compensation Fibre", Bandung, Indonesia: Telkom University, 2016.
- [3] E. A. Mohammed, "Next generation Passive Optical Network Stage Two (NG-PON2)," Thesis The Islamic University – Gaza, 2014.
- [4] ITU-T, "G.989.1 : 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements," International Telecommunication Union, 2013.
- [5] G. Keiser, "Chapter 11 Optical Amplifier," dalam *Optical Fiber Communication Fifth Edition*, Singapore, Mc Graw Hill Education, 2015, p. 398.
- [6] I. Ardiansyah, "Analisis Performansi Penguat Optik Hybrid dengan Array Waveguide Grating (AWG) pada Jaringan Transport", Bandung, Indonesia: Telkom University, 2017.
- [7] S. Hanafie, "Analisis Perbandingan Performansi Sistem DWDM Menggunakan Penguat SOA, EDFA, dan ROA Berbasis Soliton," Bandung, Indonesia: Telkom University, 2013.