

SIMULASI DAN ANALISIS PENGARUH EDFA PADA SISTEM 80 G TWDM-PON BERBASIS NEXT GENERATION PASSIVE OPTICAL NETWORK STAGE 2

SIMULATIVE AND ANALYSIS EDFA EFFECT OF 80 G TWDM-PON SYSTEM BASED ON NEXT GENERATION PASSIVE OPTICAL NETWORK STAGE 2

Muhammad Yasyir ¹, Akhmad Hambali ², Afief Dias Pambudi ³

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

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

Abstrak

Berdasarkan standar yang ditetapkan oleh ITU-T (G.989.1 hingga G.989.3), generasi terbaru dari *PON* yaitu NG-PON2 dapat mengirimkan data dengan *bitrate downstream* lebih dari sama dengan 40 Gbit/s dan 10 Gbit/s untuk *upstream*. NG-PON2 dapat menjadi salah satu solusi teknologi dalam mengatasi permasalahan terbatas *bandwidth* pada teknologi *PON* saat ini. Dikarenakan penggunaan Teknik TWDM dengan metode agregasi atau *stacking OLT* yang menjanjikan jaringan *broadband* masa depan dengan *bandwidth* sangat besar. Pada penelitian ini dilakukan perancangan dan evaluasi sistem dan jaringan *bi-directional* NG-PON2 dengan teknik TWDM. Dilakukan simulasi perancangan sistem delapan kanal TWDM dengan total *bitrate* 80 Gbit/s pada sisi *downstream* (WDM) dari OLT yang masing-masing *bitrate* tiap kanalnya adalah 10 Gbit/s dan 10 Gbit/s untuk *upstream* (TDM). Kemudian, untuk simulasi perancangan jaringan memiliki tiga titik *splitting* dengan *splitting ratio* 1:256 dan jarak terjauh transmisi adalah 40 km. Serta menambahkan EDFA yang memiliki panjang 1 hingga 5 meter sebagai *pre-amplifier* dan *booster amplifier* dengan *Pump Laser Power* 100 mW hingga 1000 mW serta *Pump Laser Wavelength* 980 dan 1480 nm. Dari hasil simulasi, dilakukan analisis sistem dengan parameter pengukuran *Power Received*, *Q factor* dan BER. Serta, dilakukan analisis *amplifier* terhadap perubahan daya dan panjang gelombang dengan parameter pengukuran *Gain* dan OSNR. Berdasarkan dari hasil simulasi, didapatkan EDFA dengan panjang 2 meter, daya 400 mW, dan panjang gelombang 1480 nm dapat memberikan peningkatan performansi yang terbaik untuk transmisi *downstream* dengan nilai parameter *Q factor* sebesar 9,99 hingga 15,75; BER sebesar $3,33 \times 10^{-56}$ hingga $7,06 \times 10^{-26}$; *Power Received* sebesar -20,12 hingga -19,11 dBm; *Gain* sebesar 14,18 hingga 15,60 dB; dan OSNR sebesar 54,01 hingga 54,37 dB. Sedangkan untuk performansi transmisi *upstream* ditunjukkan EDFA dengan panjang 2 meter, daya 600 mW, dan panjang gelombang 1480 nm dengan nilai parameter *Q factor* sebesar 10,09 hingga 15,40; BER sebesar $7,68 \times 10^{-54}$ hingga $2,75 \times 10^{-24}$; *Power Received* sebesar -14,11 hingga -11,62 dBm, *Gain* sebesar 17,97 hingga 20,44 dB dan OSNR sebesar 54,01 hingga 54,37 dB.

Kata Kunci: TWDM, NG-PON2, EDFA, WDM, TDM.

Abstract

Based on the standards set by the ITU-T (G.989.1 to G.989.3), the latest generation of *PON* is the NG-PON2 that can transmit data with *bitrate* more than equal to 40/10 Gbit/s for DS/US. Currently NG-PON2 can be one of the technology solutions in the *bandwidth-limited* problem on *Passive Optical Network* technology. Due to TWDM techniques with the *Optical Line Terminal* aggregation or *stacking method* that promises future *broadband* networks with enormous *bandwidth*. In this research, will discuss the design and evaluation of NG-PON2 *bi-directional* system and network with TWDM technique. Simulates the design of eight TWDM channel systems with 80 Gbit/s *bitrate downstream* (WDM) from every channel *bitrate* is 10 Gbit/s and 10 Gbit/s for *upstream* (TDM). Then to simulate the design of three *splitting* network with *splitting ratio* 1:256 and the longest distance of transmission is 40 km. Then adds a length EDFA of 1 to 5 meters as a *pre-amplifier* and *booster amplifier* with 100 mW to 1000 mW of *pump laser* power as well as 980 nm and 1480 nm *wavelengths* of the *pump laser* on a system that has been designed. From the results of the simulation, system analysis performed by the *Receive Power*, *Q factor* and BER as a measurement parameter. Also, the *amplifier* analysis is performed on the change of power and wavelength with *Gain* and OSNR as its measurement parameters. Obtained by the simulation result, EDFA with length 2 meters, power 400 mW, and wavelength 1480 nm can provide the best performance improvement for *downstream* transmission with parameter value *Q factor* is 9.99 to 15.75; BER is 3.33×10^{-56} is 7.06×10^{-26} ; *Power Received* is -20.12 to -19.11 dBm; *Gain* is 14.18 to 15.60 dB; dan OSNR is 54.01 to 54.37 dB. And for simulation result on the *upstream* obtained with EDFA with length 2 meters, power 600 mW, and wavelength 1480 nm with parameter value *Q factor* is 10.09 to 15.40; BER is 7.68×10^{-54} to 2.75×10^{-24} ; *Power Received* is -14.11 to -11.62 dBm, *Gain* is 17.97 to 20.44 dB and OSNR is 54.01 to 54.37 dB.

Keyword : TWDM, NG-PON2, EDFA, WDM, TDM.

1. Pendahuluan

Layanan *broadband* yang cepat dan efisien menjadi salah satu kebutuhan utama bagi masyarakat modern. Dalam upaya mencari solusi terbaik dalam memenuhi hal tersebut, serat optik terpilih menjadi primadona untuk layanan ini. Dengan terus meningkatnya permintaan *bandwidth* maka sebuah teknologi PON atau lebih dikenal dengan istilah FTTx menjanjikan layanan *triple-play* (voice, data, dan video) dengan performansi yang baik. Berbagai platform aktif dikembangkan oleh operator telekomunikasi terkemuka untuk perkembangan teknologi PON, dimulai dari A/BPON, G-PON, GE-PON, XG-PON/NG-PON1 [1] dan NG-PON2 menjadi teknologi terbaru yang dikenalkan

pada 2014 lalu oleh IEEE dan ITU-T bersama-sama dengan *Full Services Access Network* (FSAN) menjadikan teknologi lanjutan ini dianggap sebagai long-term next generation [2]. Teknologi NG-PON2 yang telah diusungkan oleh FSAN ini memiliki kapasitas transmisi minimum untuk *downstream* minimum 40 Gbit/s dan 10 Gbit/s untuk *upstream* serta harus tetap kompatibel dengan teknologi dan jaringan distribusi sebelumnya. TWDM-PON direkomendasikan sebagai solusi utama untuk merancang dan implementasi teknologi NG-PON2 [1]. Penggunaan kapasitas transmisi 80 Gbit/s telah dianalisis terhadap kapasitas transmisi 40 Gbit/s pada jarak 30 km [3], yang menjadikan kapasitas transmisi 80 Gbit/s sebagai yang terbaik dengan nilai parameter *Q factor* dan BER yang baik. Pada tugas akhir ini dilakukan penelitian pada NG-PON2 menggunakan delapan kanal TWDM berkapasitas transmisi 80 Gbit/s TWDM-PON dengan EDFA sebagai *pre-amplifier* dan *booster amplifier* sehingga dapat diketahui pengaruh karakteristik EDFA pada sistem ini berdasarkan parameter *Q factor*, BER, *Power Rerceive*, *Gain* dan *OSNR* sebagai parameter batas keberhasilan dari rancangan ini.

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

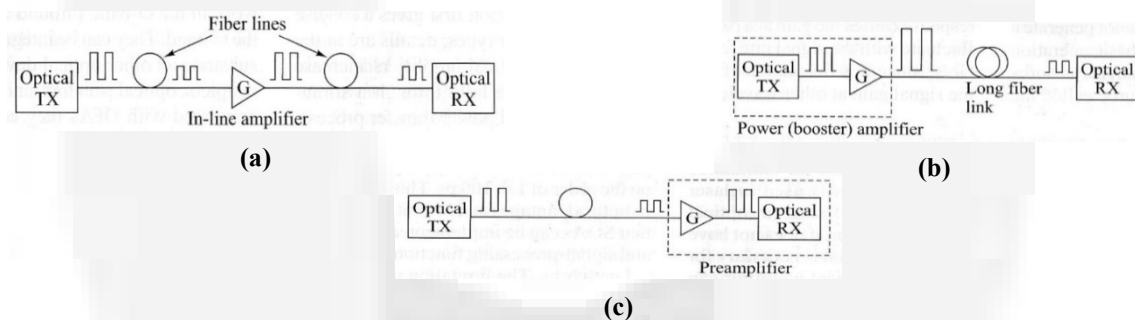
A. Standar NG-PON2

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

- *Multiple wavelength channel* dengan arsitektur TWDM
- 4 hingga 8 TWDM *channel*, dapat dikonfigurasi untuk pengembangan/penambahan setiap *channel*-nya, sebagai contoh: “*pay as you grow*” atau pengedaan dilakukan ketika ada penambahan *channel* yang berada di OLT.
- Nominal bitrate dari setiap *channel downstream* dan *upstream* [5]:
 - 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 1:256

B. Optical Amplifier

Ada tiga jenis *optical amplifier* yang biasa digunakan, yaitu *semiconductor optical amplifier* (SOA), *doped-fiber amplifiers* (DFAs), dan *Raman amplifiers*. Tetapi yang akan dibahas pada bab ini hanyalah *erbium-doped fiber amplifiers* (EDFAs), yang banyak digunakan pada C-band (1530-1565 nm) untuk jaringan komunikasi optik. Secara general aplikasi dari penggunaan *optical amplifier* dibagi menjadi tiga kelas yaitu *in-line amplifier*, *pre-amplifier* dan *booster amplifier*. [6]



Gambar 1 Penggunaan *optical amplifier* (a) *In-line amplifier* (b) *Booster amplifier* (c) *Pre-amplifier* [6]

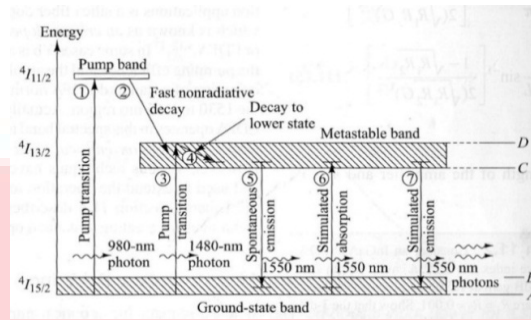
C. Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)

Material yang populer digunakan untuk pada aplikasi *long-haul telecommunication* adalah fiber silika dengan doping erbium, atau yang lebih dikenal dengan *erbium-doped fiber amplifier* (EDFA). Daerah standar operasi EDFA secara normal hal tersebut terbatas di 1530 hingga 1565 nm. Sebenarnya EDFA beroperasi pada spektral C-band atau *conventional band*. Namun, beberapa teknik telah mengusulkan agar dapat digunakan pada daerah operasi L-Band dan S-Band.

Untuk dapat memahami variasi transisi energi dan *range* emisi *photon*, dengan mempertimbangkan kondisi sebagai berikut:

- *Pump band* ditunjukkan pada atas bagian kiri Gambar 2 dengan pelepasan energi dari *ground state* sebesar 1,27 eV untuk panjang gelombang 980 nm.
- Bagian atas dari *metastable band* ditunjukkan Gambar 2 pada level energi D, melepaskan energi dari *ground state* sebesar 0,841 eV untuk panjang gelombang 1480 nm.
- Bagian bawah dari *metastable band* ditunjukkan Gambar 2 pada level C, melepaskan energi dari *groundstate* sebesar 0,814 eV untuk panjang gelombang 1530 nm.

- Bagian bawah dari *metastable band* ditunjukkan Gambar 2 pada level C, melepaskan energi sebesar 0,775 eV dari *ground state* level B untuk panjang gelombang 1600 nm.



Gambar 2 Diagram pita energi Erbium [6]

Hal ini berarti memungkinkan panjang gelombang pompa yang digunakan adalah 980 dan 1480 nm. *Photon* teremisi ketika terjadi transisi elektron antara *metastable* dan *ground state* terjadi pada panjang gelombang 1530 hingga 1600 nm. [6]

D. Parameter Performansi

Terdapat lima parameter pengujian (*Q factor*, BER, *Power Received*, *Gain*, dan OSNR), *Q factor* adalah *signal-to-noise ratio* (SNR) pada *decision circuit* dalam bentuk tegangan atau arus. Atau juga dapat diekspresikan dengan persamaan hubungan antara SNR dengan *Q factor* berikut:

$$SNR = \frac{(P_{in}RM)^2}{2qP_{in}RM^2F(M)B_e + \frac{4K_BTB_e}{R_L}} \quad (1)$$

Dimana, Pin adalah Daya yang diterima APD (watt), R adalah Responsivity (A/W), M adalah Avalanche Photodiode Gain, q adalah Electron Charge (1.69×10^{-19} C), F(M) adalah Noise Figure, Be adalah Receiver Electrical Bandwidth (Hz), K_B adalah konstanta Boltzmann's (1.38×10^{-23} J/K), T adalah suhu ruangan (300 K), dan R adalah Resistansi (Ω) [6]. Atau juga dapat diekspresikan dengan persamaan hubungan antara SNR dengan *Q factor* berikut:

$$SNR = 20 \log 2Q \quad (2)$$

Maka juga bisa didapatkan nilai *Q factor* dari persamaan 2.6, yang diekspresikan sebagai berikut:

$$Q = \frac{10^{\frac{SNR}{20}}}{2} \quad (3)$$

BER merupakan rasio perbandingan *bit error* dengan bit yang dikirimkan keseluruhan. Sedangkan, BER *test* adalah pengujian yang bertujuan menguji seberapa banyak kesalahan pembacaan yang diterima setiap detik. Dari persamaan 2.7 memiliki hubungan matematis dengan BER bila nilai *threshold* diatur ke nilai optimumnya yang dapat diekspresikan dengan persamaan berikut [7]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \cong \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \quad (4)$$

Power Received adalah nilai yang diterima dari sinyal *input* yang mengalami degradasi sinyal atau *attenuation*. Dapat direpresentasikan dengan persamaan berikut:

$$Power Received = P_{s,in} - \alpha_{total} \quad (5)$$

Dimana, $P_{s,in}$ adalah daya sinyal input, dan α adalah *attenuation* atau redaman total sistem. *Gain* adalah perbandingan antara sinyal *output* dengan sinyal *input* dalam bilangan logaritmis dengan satuan desibel (dB), yang dapat direpresentasikan dengan persamaan berikut:

$$G = \frac{P_{s,out}}{P_{s,in}} \quad (6)$$

Daya sinyal *Input* dan *output* dari EDFA dapat dinyatakan dalam istilah prinsip konversi energi:

$$P_{s,out} \leq P_{s,in} + \frac{\lambda_p}{\lambda_s} P_{p,in} \quad (7)$$

Dimana $P_{p,in}$ adalah daya *input* pompa, λ_p adalah panjang gelombang pompa, dan λ_s adalah panjang gelombang sinyal. Dapat ditulis ulang persamaan 2.6 dalam persamaan *amplifier Gain* G. Dengan asumsi tidak adanya emisi spontan, maka

$$G = \frac{P_{s,out}}{P_{s,in}} \leq 1 + \frac{\lambda_p P_{p,in}}{\lambda_s P_{s,in}} \quad (8)$$

Hal ini menunjukkan hubungan penting antara daya *input* sinyal dan *Gain*. Bila daya sinyal *input* sangat besar sehingga $P_{s,in} \gg \frac{\lambda_p}{\lambda_s} P_{p,in}$, maka *Gain amplifier* maksimal akan seragam. Dari persamaan 2.8 dapat dilihat untuk mencapai *Gain* maksimum tertentu, daya sinyal *input* tidak dapat melebihi nilai yang diberikan oleh

$$P_{s,in} \leq \frac{\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_s} \right) P_{p,in}}{G-1} \quad (9)$$

Selain dari *power pump*, *Gain* juga tergantung dari panjang serat EDFA. *Gain* maksimum pada panjang EDFA, diberikan oleh

$$G_{max} = \exp(\rho \sigma_e L) \quad (10)$$

Dimana ρ adalah konsentrasi *erbium* dalam fiber ($1 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$), σ_e adalah *cross-section emission* ($3.5 \times 10^{-25} \text{ m}^2$) [8], dan L adalah panjang serat EDFA (1 s.d 5 m). ketika menentukan *Gain* maksimal, persamaan 2.8 dan 2.10 harus dipertimbangkan secara bersamaan. Akibatnya, *Gain* EDFA maksimum didapatkan dari nilai minimum pada dua ekspresi *Gain* sebagai berikut [6]:

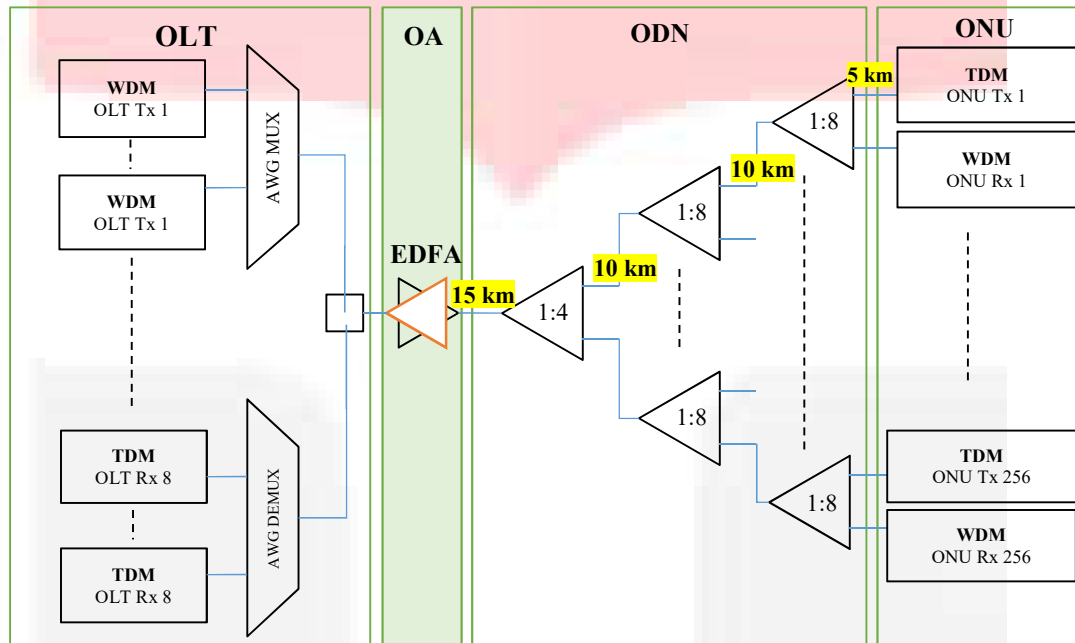
$$G \leq \min \left\{ \exp(\rho \sigma_e L), 1 + \frac{\lambda_p P_{p,in}}{\lambda_s P_{s,in}} \right\} \quad (11)$$

Optical Signal to Noise Ratio (OSNR) adalah perbandingan antara tingkat daya sinyal dengan daya *noise* dalam bentuk desibel (dB). Atau juga nilai OSNR bisa didapat dengan menggunakan hubungan antara *Q factor* dan OSNR [6] dari persamaan berikut :

$$\text{OSNR} = \frac{1}{2} Q(Q + \sqrt{2}) \quad (12)$$

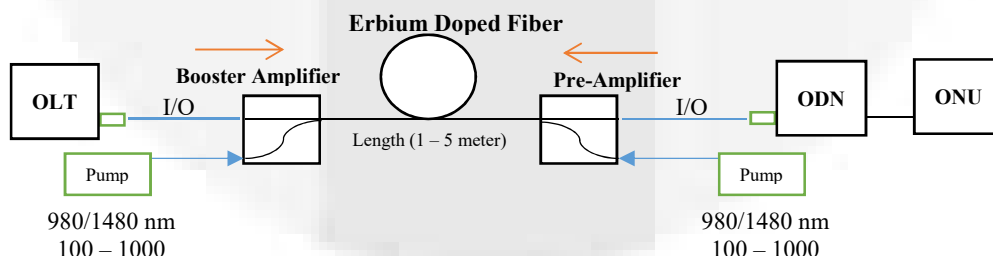
3. Perencanaan Sistem 80 Gbit/s TWDM-PON

A. Perancangan Jaringan dan Amplifier



Gambar 3 Sistem TWDM-PON

Perancangan ini menggunakan teknik TWDM-PON dengan kombinasi antara teknik multiplexing TDM dengan WDM. Dimana, TDM berperan penting dalam mentransmisikan informasi pada sisi upstream. Sedangkan WDM berperan pada sisi downstream. Secara umum blok sistem NG-PON2, terdiri dari OLT, ODN dan ONU Gambar 3. OLT terletak di *Central Office* (CO) dengan delapan *channel wavelength* yang dimana tiap *channel* memiliki *bitrate* 10 Gbit/s dan memiliki panjang gelombang yang berbeda setiap *channel*-nya, maka nilai total *bitrate* dari sistem ini adalah 80 Gbit/s. ODN memiliki *splitt ratio* 1:256 dengan tiga titik pembagi (1:4, 1:8 dan 1:8), sehingga apabila satu *channel* dengan satu serat maka jumlah ONU keseluruhan adalah 2048. Jarak transmisi ODN yang dicapai hingga 40 km dengan menggunakan serat optik jenis *single mode fiber* (SMF).



Gambar 4 Perencanaan Amplifier

Optical Amplifier merupakan komponen tambahan sistem yang berfungsi untuk meningkatkan daya terima sinyal, konfigurasi sistem ditunjukkan Gambar 4. Pada penelitian ini menggunakan penambahan OA jenis DFA dengan *doped rare-earth element erbium* (Er³⁺) atau lebih dikenal dengan sebutan EDFA. panjang EDFA yang digunakan adalah 1 hingga 5 meter, panjang gelombang pompa 980 dan 1480 nm, dan daya pompa 100 hingga 1000 mW.

B. Parameter Jaringan dan Amplifier

Blok OLT tersusun dari dua bagian yaitu OLT *transmitter* dan OLT *receiver* mengingat dalam simulasi ini menggunakan sistem *bidirectional*. OLT *transmitter* terdiri dari *bit sequence generator*, *pulse generator*, *optical modulator* dan *optical source*. Untuk OLT *receiver* terdiri dari *optical filter* dan *photodetector*. 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	1532,68 – 1538,19
Nominal line rate	Gbit/s	10
Number of channel	-	8
Channel spacing	GHz	100
Receiver		
Wavelength band	nm	1596,34 – 1602,31
Bandwidth	GHz	20

Blok *Optical Amplifier* terdiri dari *doped fiber*, satu atau lebih *pump laser* dan *coupler wavelength*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. *Coupler* dapat menangani kombinasi panjang gelombang 980/1550 nm atau 1480/1550 nm untuk menggabungkan sinyal *pump* dan sinyal optis secara efisien ke *optical amplifier*. *Pump laser* biasanya disuntikkan dari arah yang sama dengan arah sinyal datang. Hal tersebut lebih dikenal dengan *codirectional pumping*, dan juga ada kemungkinan *pump laser* disuntikkan berlawanan arah dengan arah sinyal datang yang dikenal dengan sebutan *counter directional pumping*. Pada penelitian ini menggunakan EDFA sepanjang 1 hingga 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
Pump laser		
Frequency	nm	980
		1480
Power	mW	100 - 1000

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 3 Parameter ONU

Parameter	Unit	Value
Transmitter		
Launch power	dBm	3
Line code	-	NRZ
Wavelength band	nm	1532,68 – 1538,19
Nominal line rate	Gbit/s	10
Number of channel	-	8
Channel spacing	GHz	100
Receiver		
Wavelength band	nm	1596,34 – 1602,31

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 untuk memenuhi *splitting ratio* 1:256 blok ODN menggunakan dua jenis *passive splitter* yaitu 1x4 dan 1x8 seperti yang ditunjukkan pada table 4.

Tabel 4 Blok Parameter ODN

Parameter	Unit	Value
Optical Fiber		
Reference wavelength	nm	1550
Length	km	40
Attenuation	dB/km	0,2
Splitter		
Splitter output ports	-	4 dan 8

4. Analisis Pengaruh EDFA pada Sistem 80 G TWDM-PON

Tabel 5 Perbandingan hasil simulasi (*downstream*)

		Parameter				
		Gain	Power Received	Q factor	BER	OSNR
Pump	980 nm					√
	1480 nm	√	√	√	√	

Dari kelima parameter pengujian untuk kedua pompa laser, didapatkan konfigurasi terbaik EDFA terbaik untuk jaringan NG-PON2 dengan melakukan pertimbangan terhadap parameter *Q factor* dan BER pada setiap skenario penelitian yang dilakukan, maka diperoleh panjang gelombang *pump laser* terbaik untuk *downstream* adalah 1480 nm, dengan konfigurasi EDFA terbaik dengan panjang 2 meter dan daya pompa 400 mW dengan perolehan *Q factor* sebesar 15,75 dan BER sebesar $3,33 \times 10^{-56}$.

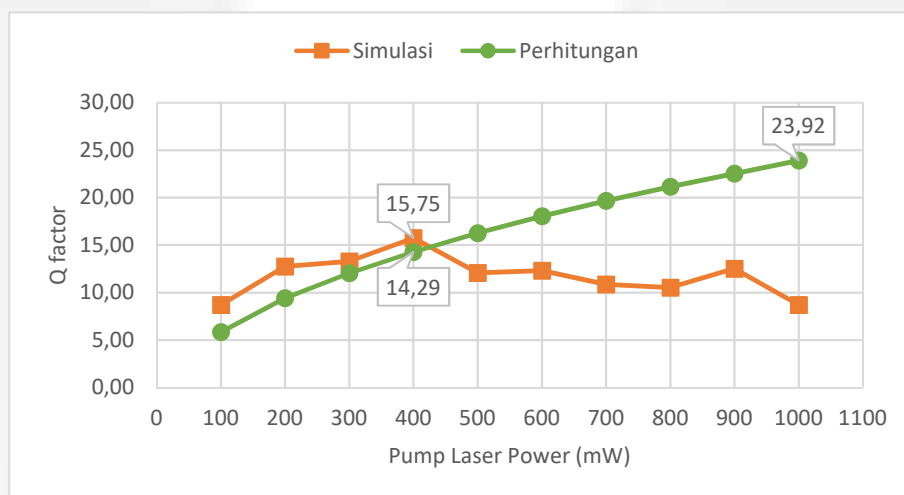
Tabel 6 Perbandingan hasil simulasi (*upstream*)

		Parameter				
		Gain	Power Received	Q factor	BER	OSNR
Pump	980 nm	√	√			√
	1480 nm			√	√	

Dari kelima parameter pengujian untuk kedua pompa laser, didapatkan konfigurasi terbaik EDFA terbaik untuk jaringan NG-PON2 dengan melakukan pertimbangan terhadap parameter *Q factor* dan BER pada setiap skenario penelitian yang dilakukan, maka diperoleh panjang gelombang *pump laser* terbaik untuk *upstream* adalah 1480 nm, dengan konfigurasi EDFA terbaik dengan panjang 2 meter dan daya pompa 600 mW dengan perolehan *Q factor* sebesar 15,40 dan BER sebesar $7,68 \times 10^{-54}$.

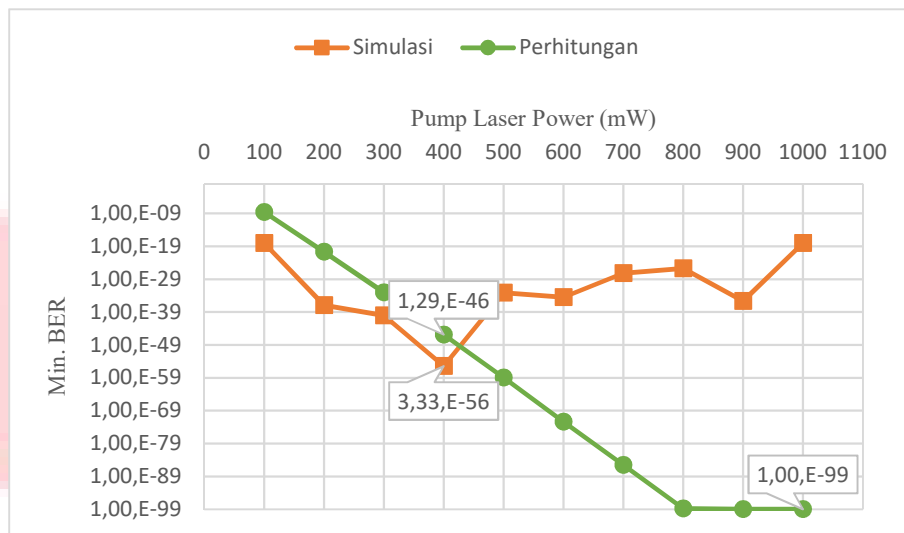
A. Analisis Perbandingan Pada Sisi *Downstream*

Hasil Simulasi dibandingkan dengan Perhitungan parameter performansi dengan konfigurasi EDFA sebagai *Booster Amplifier* dengan panjang 2 meter dan panjang gelombang pompa 1480 nm, maka didapatkan grafik *Q factor* sebagai berikut.



Gambar 5 *Q factor* simulasi dan perhitungan (*downstream*)

Jika ditinjau dari Gambar 5, nilai *Q factor* dari persamaan (3) terus meningkat yang diakibatkan oleh daya terima dari persamaan (5) yang mempengaruhi nilai SNR pada persamaan (1), proses perhitungan dilakukan tanpa adanya faktor *random sequence*, efek non-linier saat proses *multiplexing* ataupun oleh *pulse dispersion* yang diakibatkan oleh material fiber yang terjadi pada simulasi yang menyebabkan nilai yang didapatkan tidak memiliki perubahan yang pasti. Maka nilai *Q factor* terbaik diperoleh dengan perhitungan yaitu 23,92. Dan apabila ditinjau dari *Q factor* terbaik sebesar 15,75 dari Simulasi diperoleh dengan konfigurasi pompa 400 mW, sedangkan pada Perhitungan diperoleh 14,29 yang memiliki selisih keduanya sebesar 1,46.



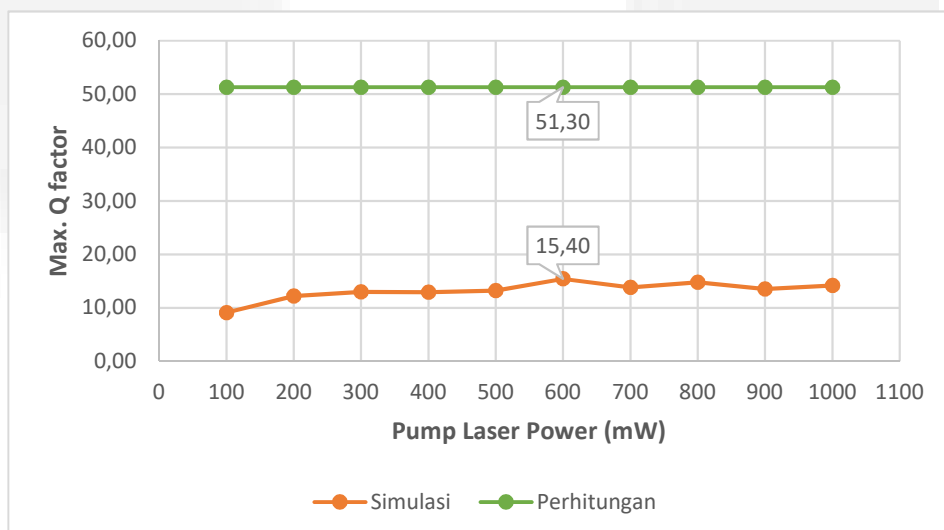
Gambar 6 BER simulasi dan perhitungan (downstream)

Jika ditinjau dari Gambar 6, nilai BER dari Perhitungan terus meningkat bersamaan dengan meningkatnya daya pompa dikarenakan persamaan (4) bersifat eksponensial, dari persamaan tersebut nilai Q factor sangat mempengaruhi peningkatan dari nilai BER. Hal tersebut tidak terjadi pada proses Simulasi, dikarenakan proses Perhitungan dilakukan tanpa adanya faktor *random sequence*, efek non-linier ataupun *pulse dispersion* yang diakibatkan oleh material fiber yang dimana hal tersebut terjadi pada proses simulasi yang menyebabkan nilai didapatkan memiliki perubahan yang konstan.

Diperoleh konfigurasi terbaik pada pompa 400 mW dengan perolehan nilai BER simulasi terbaik sebesar $3,33 \times 10^{-56}$ dan apabila ditinjau dari Perhitungan BER terbaik yang diperoleh sebesar $1,29 \times 10^{-46}$ dengan selisih keduanya sebesar $1,29 \times 10^{-46}$. Dengan perolehan selisih sebesar 1,46 untuk parameter Q factor dan BER sebesar $1,29 \times 10^{-46}$, maka dapat disimpulkan faktor *random sequence* atau efek non-linier atau juga oleh *pulse dispersion* yang diakibatkan oleh material fiber memberikan dampak yang menyebabkan tidak stabilnya perolehan nilai parameter saat proses Simulasi.

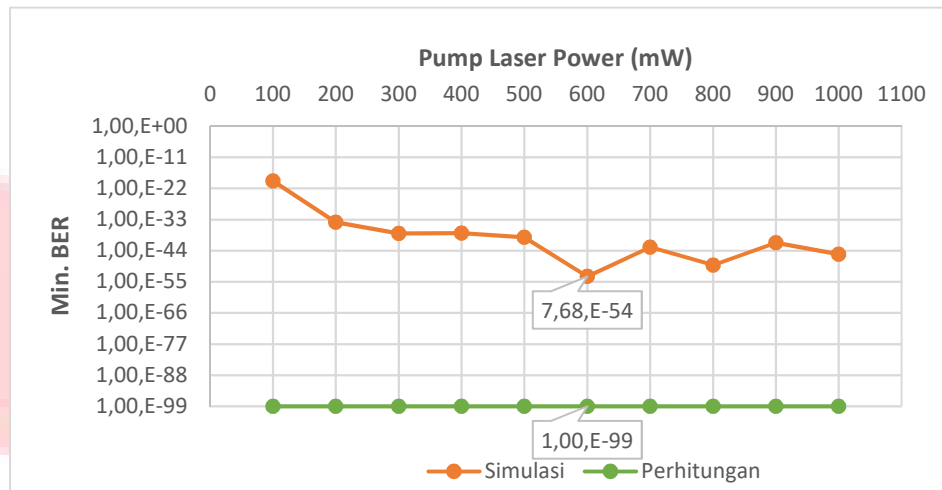
B. Analisis Perbandingan Pada Sisi Upstream

Perbandingan antara hasil Simulasi dan Perhitungan parameter performansi dengan konfigurasi EDFA sebagai *Pre-Amplifier* dengan panjang 2 meter dan panjang gelombang pompa 1480 nm, maka didapatkan grafik Q factor sebagai berikut.



Gambar 7 Q factor simulasi dan perhitungan (upstream)

Jika ditinjau dari Gambar 7, nilai Q factor dari perhitungan tidak mengalami perubahan dikarenakan adanya keseragaman nilai *gain* pompa yang dibatasi oleh *gain* panjang EDFA yang kemudian akan juga mempengaruhi nilai dari SNR sehingga didapati nilai Q factor yang konstan, analisis Perhitungan dilakukan tanpa adanya faktor *random sequence* atau efek non-linier atau juga oleh *pulse dispersion* yang diakibatkan oleh material fiber maupun saat proses *multiplexing* yang terjadi pada Simulasi yang menyebabkan nilai dari parameter yang didapatkan tidak memiliki perubahan yang pasti. Nilai Q factor Perhitungan diperoleh sebesar 51,30 dan apabila ditinjau dari Q factor terbaik sebesar 15,40 dari Simulasi diperoleh dengan konfigurasi pompa 400 mW.



Gambar 8 BER simulasi dan perhitungan (upstream)

Hal serupa juga terjadi pada parameter BER dari Perhitungan dikarenakan persamaan (4) memiliki korelasi dengan (3), maka hal serupa juga terjadi pada parameter ini. Perhitungan dilakukan tanpa adanya faktor *random sequence*, efek non-linier ataupun oleh *pulse dispersion* yang diakibatkan oleh material fiber yang dimana hal tersebut terjadi pada proses simulasi yang menyebabkan nilai dari parameter didapatkan dari simulai tidak memiliki perubahan yang pasti. Perolehan nilai BER simulasi terbaik sebesar $7,68 \times 10^{-54}$ dan apabila ditinjau dari Perhitungan BER terbaik yang diperoleh sebesar $1,00 \times 10^{-99}$ dengan selisih keduanya sebesar $7,68 \times 10^{-54}$. Dengan perolehan selisih sebesar 15,40 untuk parameter *Q factor* dan BER sebesar $7,68 \times 10^{-54}$, maka dapat disimpulkan faktor *random sequence* atau efek non-linier atau juga oleh *pulse dispersion* yang diakibatkan oleh material fiber memberikan dampak yang menyebabkan tidak stabilnya perolehan nilai parameter saat proses Simulasi.

5. Kesimpulan

NG-PON2 berkecepatan transmisi 80 Gbit/s berbasis teknik TWDM dengan konfigurasi EDFA sebagai *Booster Amplifier* dengan panjang 2 meter dan panjang gelombang pompa 1480 nm dengan daya *pump laser* 400 mW, maka didapatkan nilai parameter pada analisis Simulasi diperoleh *Q factor* sebesar 15,75 dan BER sebesar $3,33 \times 10^{-56}$, lebih baik jika dibandingkan dengan berdasarkan analisis Perhitungan didapatkan nilai *Q factor* 14,29 sebesar dan BER sebesar $1,29 \times 10^{-46}$. Sedangkan, pada konfigurasi EDFA sebagai *pre-amplifier* dengan panjang gelombang *pump laser* 1480 nm dan daya *pump laser* 600 mW, nilai parameter pada analisis Perhitungan diperoleh *Q factor* sebesar 51,30 dan BER sebesar $1,00 \times 10^{-99}$, lebih baik jika dibandingkan dengan analisis Simulasi didapatkan nilai *Q factor* sebesar 15,40 dan BER sebesar $7,68 \times 10^{-54}$.

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)," 2014.
- [2] M. Carroll, Z. Ye and D. Remein, "FSAN & ITU-T Activities on Next-Generation PON Stage-2 (NG-PON2), IEEE 802.3 NGEAPON ad hoc meeting (Beijing, March 2014)," FSAN (Full Service Access Network), Beijing, 2014.
- [3] A. S. Putri, A. Hambali dan A. D. Pambudi, Simulasi Dan Analisis Pengaruh Agregasi OLT Pada Performansi Jaringan NG-PON2, Bandung: Telkom University, 2017.
- [4] ITU-T, "G.989.1 : 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements," International Telecommunication Union, 2013.
- [5] B. Pamukti, Evaluation of Performance NG-PON2 using Arrayed Waveguide Grating and Dispersion Compensation Fibre, Bandung, Indonesia: Telkom University, 2016.
- [6] G. Keiser, "Chapter 11 Optical Amplifier," in *Optical Fiber Communication Fifth Edition*, Singapore, Mc Graw Hill Education, 2015, p. 398.
- [7] ITU-T, "G.976 : Test methods applicable optical fibre submarine cable system (Annex A)," International Telecommunication Union, 2014.
- [8] A. Hambali and A. Syahriar, Analisa Karakteristik Gain Serat Optik Erbium Doped Amplifier, Depok: Universitas Indonesia, 2003.