

SIMULASI SISTEM TWDM-PON MENGGUNAKAN *HYBRID OPTICAL AMPLIFIER* PADA *NEXT GENERATION PASSIVE OPTICAL NETWORK STAGE 2 (NG-PON 2)*

SIMULATION OF TWDM-PON SYSTEM USING HYBRID OPTICAL AMPLIFIER ON NEXT GENERATION PASSIVE OPTICAL NETWORK STAGE 2 (NG-PON 2)

Eka Yunita Dian Pratiwi¹, Ir. Akhmad Hambali, M.T², Brian Pamukti, S.T, M.T³

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

¹ekayunitadp@student.telkomuniversity.ac.id, ²ahambali@telkomuniversity.ac.id, ³brianp@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Next-Generation Passive Optical Network 2 (NG-PON 2), merupakan teknologi terbaru untuk mengatasi permasalahan keterbatasan *bandwidth* pada teknologi *Passive Optical Network (PON)* saat ini. Pada penelitian ini dilakukan simulasi dan evaluasi performansi jaringan NG-PON 2 dengan metode perubahan *bit rate* 40 Gbps dan 80 Gbps menggunakan 4 dan 8 kanal TWDM dengan masing-masing kanal mempunyai *bit rate* 10 Gbps untuk *downstream* maupun *upstream*. Sistem tersebut memiliki jarak transmisi dari 10, 20, 30, 40, 50 dan 60 km dengan jumlah 64, 128 dan 256 *Optical Network Unit (ONU)*. Sistem ini menggunakan *hybrid optical amplifier (HOA)* sebagai *booster amplifier* dan EDFA sebagai *pre-amplifier*. Simulasi dilakukan untuk mengetahui pengaruh performansi pada NG-PON 2 apabila dilakukan perubahan *bit rate*, jarak transmisi dan jumlah ONU terhadap pengaruh *Bit Error Rate (BER)* di sisi *user* dengan skenario tanpa penguat dan skenario menggunakan penambahan penguat.

Berdasarkan hasil simulasi, performansi sistem terbaik adalah menggunakan penguat yaitu dengan *bit rate* 40 Gbps dengan jumlah 64 ONU dapat mencapai jarak maksimal 60 km. Nilai *Q factor* terbaik didapatkan pada jarak 10 km sebesar 23,66 *downstream* 21,85 *upstream*, BER $3,86 \times 10^{-124}$ *downstream* dan BER $3,16 \times 10^{-106}$ *upstream*, *received power* -7,05 dBm *downstream* dan -7,10 dBm *upstream*, dengan *gain HOA* sebesar 16,54 dB dan *gain EDFA* sebesar 6,31 dB. Penambahan penguat *hybrid optical amplifier* sebagai *booster* dan EDFA sebagai *preamplifier* telah memberikan performansi yang lebih baik dengan semakin banyaknya *user* dan semakin panjang jarak transmisi sehingga nilai BER mendekati $\leq 10^{-9}$.

Kata kunci : NG-PON2, TWDM, *Hybrid Optical Amplifier*, EDFA

Abstract

Next Generation Passive Optical Network Stage 2 (NG-PON 2), is the latest technology to help solve the problem of *bandwidth resource* on *Passive Optical Network (PON)* today. This research simulate and evaluation the performance of *bidirectional NG-PON 2* with 40 Gb/s, and 80 Gb/s *bit rate* method changes using 4 and 8 TWDM channels with each channel has a 10 Gbps for *downstream* and *upstream*. This system has 10, 20, 30, 40 and 50 km *transmission distance* with the number 64, 128 and 256 *Units of Network Optics (ONU)*. This system uses *hybrid optical amplifier (HOA)* as *booster amplifier* and EDFA as a *pre-amplifier*. The simulation is performed to find out the performance on NG-PON 2, *bit rate*, *transmission distance* and number of ONU on the influence of *Bit Error Level (BER)* on the *user* side with scenarios without amplifier and scenario using additional amplifier.

Based on the simulation results, the best system performance is using amplifier that is with *bit rate* 40 Gbps with amount of 64 ONU can reach maximum distance 60 km. The best *Q factor* value obtained in 10 km the value is 23,66 *downstream* 21,85 *upstream*, BER $3,86 \times 10^{-124}$ *downstream* and BER $3,16 \times 10^{-106}$ *upstream*, *received power* -7,05 dBm *downstream* and -7,10 dBm *upstream* with *Gain HOA* 16,54 dB and an EDFA gain 6,31. The addition of a *hybrid optical amplifier* as a *booster* and EDFA as a *preamplifier* has provided better performance with more users and the longer the *transmission distance* so that the BER value is close to $\leq 10^{-9}$.

Keywords: NG-PON2, TWDM, *Hybrid Optical Amplifier*, EDFA

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi telekomunikasi di dunia terjadi dengan pesat terutama pada sistem transmisi, dikarenakan kebutuhan untuk berkomunikasi dan bertukar data dengan cepat, mudah dan mobile. Sistem transmisi yang masih berkembang dan akan terus dikembangkan salah satunya adalah serat optik. 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. Evolusi terbaru dari PON yang diusulkan oleh *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* dan *International Telecommunication Union/Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)* bersama-sama dengan *Full Services Access Network (FSAN)* adalah NG-PON 2 yang menjadikan teknologi lanjutan ini dianggap sebagai *long-term next generation*. Teknologi NG-PON 2 yang telah diusulkan oleh FSAN ini memiliki kapasitas transmisi minimum untuk *downstream* yaitu 40 Gbps dan 10 Gbps untuk *upstream* serta harus tetap kompatibel dengan teknologi sebelumnya. TWDM-PON direkomendasikan sebagai solusi utama untuk merancang dan implementasi teknologi NG-PON2.

Pada penelitian sebelumnya [2] mengenai TWDM-PON dengan menggunakan *Semiconductor Optical Amplifier* (SOA) sebagai *pre-amplifier* dengan bit rate 80 Gb/s dengan performa delapan stacking OLT, panjang link 50 km dan split ratio 1:512 dan diperoleh power budget 38 dB. Pada penelitian lainnya [1] membahas mengenai *hybrid optical amplifier* (Raman EDFA) pada sistem *long haul ultra dense wavelength division multiplexing* menghasilkan keluaran gain yang lebih datar.

Pada Tugas Akhir ini perubahan bit rate 40 Gbps hingga 80 Gbps menggunakan *hybrid optical amplifier* sebagai *booster amplifier* dan EDFA sebagai *pre-amplifier* sehingga dapat diketahui pengaruh perubahan *bit rate* tersebut terhadap BER di sisi user.

2. NG-PON 2 dan TWDM-PON

2.1 NG-PON 2

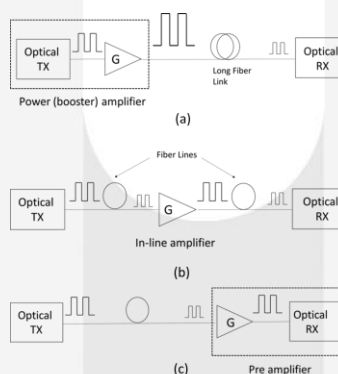
Teknologi NG-PON2 yang telah diusungkan oleh FSAN ini memiliki kapasitas transmisi minimum untuk *downstream* yaitu 40 Gbps dan 10 Gbps *upstream*. Prinsip dasar dari NG-PON 2 yaitu ketika data atau sinyal dikirimkan dari OLT, maka ada bagian di *Optical Distribution Network* (ODN) yang bernama *splitter* yang berfungsi untuk memungkinkan serta optik tunggal dapat mengirim ke berbagai ONU [5]. Dikarenakan data yang dikirimkan dari OLT nantinya berbentuk panjang gelombang maka pada bagian *downstream* akan menggunakan sistem WDM sedangkan bagian *upstream* akan menggunakan sistem TDM karena data yang dikirimkan nantinya berupa *timeslot* [2].

2.2 TWDM-PON

TWDM-PON direkomendasikan sebagai solusi utama untuk merancang dan mengimplementasikan teknologi NG-PON 2, keputusan ini berdasarkan dengan pertimbangan biaya sistem, kematangan teknologi, *loss budget*, *complexity*, dan konsumsi daya [3]. TWDM merupakan penggabungan teknologi TDM dan WDM. Dimana, TDM berperan penting dalam mentransmisikan informasi pada sisi *upstream*, sedangkan WDM berperan pada sisi *downstream*.

2.3 Penguat Optik

Optical amplifier (penguat optik) merupakan solusi yang tepat untuk mengatasi permasalahan rugi-rugi yang terdapat pada serat optik. Terdapat tiga jenis klasifikasi utama penguat optik yang digunakan yaitu *semiconductor optical amplifier* (SOA), EDFA, dan Raman amplifiers. Tetapi pada penelitian ini hanya membahas mengenai *hybrid optical amplifier* (Raman dan EDFA). Berdasarkan pengaplikasiannya ada beberapa jenis penempatan penguat optik yaitu *booster amplifier*, *in-line amplifier*, dan *pre-amplifier* seperti pada gambar 1 berikut [8].



Gambar 1 Penempatan Penguat Optik (a) booster amplifier, (b) in-line amplifier, (c) pre-amplifier

2.4 Hybrid Optical Amplifier

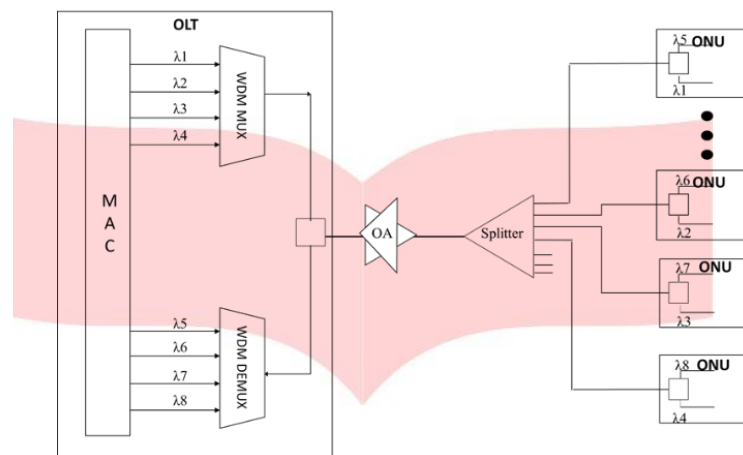
Terdapat satu metode untuk pemanfaatan optimal dari *bandwidth* serat yang tersedia yaitu dengan cara menggunakan berbagai kombinasi dari penguat optik dalam rentang panjang gelombang yang berbeda. Konfigurasi ini disebut sebagai *hybrid amplifier*. Penguat *hybrid* digunakan untuk mengoptimalkan peningkatan *gain-bandwidth* dari sistem berbasis WDM, untuk mengurangi kerugian karena induksi non linieritas dan untuk mencegah penggunaan biaya tinggi yang dibutuhkan untuk memperbaiki *gain flatness* [7]. Dengan konsep *hybrid optical amplifier* keunggulan dari penguat-penguat yang digunakan dapat dimanfaatkan. Kombinasi penguat optik antara Fiber Raman Amplifier dan EDFA dapat dilakukan dengan memanfaatkan kelebihan dan menutupi kekurangan pada kedua penguat ini yang dapat memperkuat gain *bandwidth* yang besar.

EDFA merupakan penguat optik pertama yang digunakan secara luas dalam sistem komunikasi optik. EDFA merupakan serat single mode, dengan inti (*core*) yang di doping dengan ion Er³⁺. EDFA dapat menguatkan sinyal pada serat optik tanpa harus mengubahnya menjadi sinyal elektrik terlebih dahulu. Prinsip kerja dari EDFA yaitu laser digunakan untuk memompa serat optik yang sudah terdoping Erbium dan atom-atom pada EDF akan mengalami berpindah dari tingkat 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. [6]

Distributed Raman Amplifier (DRA) membutuhkan daya pompa jauh lebih tinggi dari EDFA, namun Raman tidak memerlukan doping khusus untuk melakukan penguatan. Dengan menggabungkan *pump light* dari *multiple pump diodes* dengan panjang gelombang yang telah ditentukan, perpaduan spektrum gain, yang akan menjadi jumlah dari spektrum *gain* yang disebabkan oleh pompa individu yang dapat disesuaikan dengan bentuk dan panjang gelombang yang diinginkan. Fleksibilitas spektral dari amplifikasi Raman merupakan salah satu sifat dan keuntungan utamanya. Karakteristik penting lainnya dari amplifikasi Raman adalah ketergantungan polarisasi yang kuat dari koefisien *gain*, yang membutuhkan penggunaan pompa tak terpolarisasi. [6]

3. Perancangan Sistem

3.1 Model Sistem



Gambar 2 Model Sistem TWDM-PON

Model Perancangan sistem jaringan NG-PON 2 berbasis teknologi TWDM mengacu pada Gambar 3.2. Perancangan sistem TWDM-PON yang sesuai dengan NG-PON 2, yang tersusun dari tiga blok penyusun utama yaitu blok OLT, ODN, dan ONU. Perancangan sistem ini menggunakan 4 OLT dan 8 OLT yang terdiri dari *transmitter* dan *receiver*, dengan panjang gelombang tiap *channel* berbeda sesuai dengan standar ITU-T G.989.2 dan nilai *bit rate* tiap *channel downstream* maupun *upstream* sebesar 10 Gbps. Pada sisi ODN menggunakan jarak transmisi 10 hingga 50 km, dengan jumlah 64, 128 dan 256 ONU.

3.2 Parameter Jaringan NG-PON 2

Setelah merancang sistem jaringan NG-PON 2, perlu dimasukkan beberapa spesifikasi dan parameter yang telah ditentukan ke sistem tersebut. Perancangan sistem NG-PON 2, yang tersusun dari tiga blok penyusun utama yaitu blok OLT, ODN, dan ONU. Pada blok OLT terdiri dari blok *transmitter* dan *receiver*, dengan panjang gelombang tiap *channel* berbeda sesuai dengan standar ITU-T G.989.2 dan nilai *bit rate* tiap *channel downstream* maupun *upstream* sebesar 10 Gbps. Pada sistem ini menggunakan tambahan *OA hybrid amplifier* (Raman-EDFA) sebagai *booster amplifier* dan EDFA sebagai *pre-amplifier*. Parameter OLT dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1 Parameter OLT

Item	Unit	Value
Bit Rate per channel (ups/downs)	Gbps	10
Transmit power	dBm	3
Channel Spacing	GHz	100
Bandwidth	GHz	20
Wavelength		
Transmitter	nm	1596,34 - 1602,31
Receiver	nm	1532,68 - 1538,9

Blok *Optical Amplifier* pada penelitian ini menggunakan yaitu *hybrid amplifier* (Raman-EDFA) sebagai *booster amplifier* yang disusun secara seri, dan EDFA sebagai *pre-amplifier*. Nilai parameter-parameter yang digunakan ditentukan berdasarkan studi literatur dan hasil dari optimasi. Parameter dari penguat optik dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Parameter Optical Amplifier

Item	Unit	Value
Fiber Raman Amplifier		
Fiber Length	km	5
Effective interaction area	μm^2	72
Pump power	mW	130,400
Pump wavelength	nm	1380, 1395, 1480, 1497, 1510
Temperature	K	300
Reference wavelength	nm	1550
Upper power reference	nm	1510
Erbium Doped Fiber		
Fiber Length	m	3
Core radius	μm	2,2
Er doping radius	μm	2,2
Er ion density	m^{-3}	1,00E+25
Numerical aperture	-	0,24
Pump power	mW	100 mW
Pump wavelength	nm	1480

Blok ODN tersusun dari dua komponen utama yaitu *Single Mode Fiber* (SMF) dan *passive splitter*. Untuk jarak digunakan jarak 10, 20, 30, 40 dan 50 km, dan tiga jenis *passive splitter* yang digunakan yaitu 1x2, 1x4, dan 1x8, ditunjukkan pada Tabel 3. Sedangkan pada Tabel 4, menunjukkan parameter dari blok ONU yang tersusun atas dua bagian yaitu ONU *transmitter* dan ONU *receiver*.

Tabel 3 Parameter ODN

Item	Unit	Value
Optical Fiber		
Reference wavelength	nm	1550
Length	km	10 – 50 km
Attenuation	dB/km	00.02
Splitter		
Splitter output port	-	2,4, dan 8
Max insertion loss	dB	3
Return loss	dB	65

Tabel 4 Parameter ONU

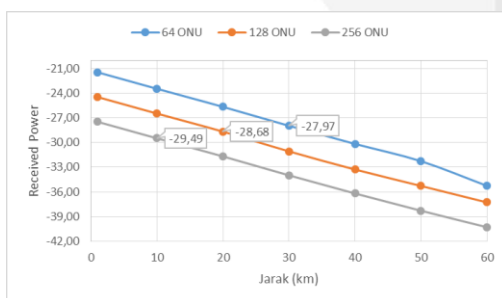
Item	Unit	Value
Launch power	dBm	3
Line code	-	NRZ
Number of channel	-	4 dan 8
Channel Spacing	GHz	100
Bandwidth	GHz	20
Wavelength		
Transmitter	nm	1532,68 - 1538,9
Receiver	nm	1596 - 1602,31
Gain	-	10
Responsivity	A/W	0,059027778
Ionization ratio	-	00.45
Resistance	ohm	50

4. Analisis Hasil Simulasi Sistem

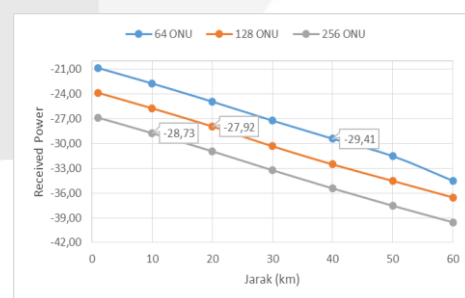
4.1 Analisis Skenario 1 TWDM-PON Tanpa Penguat

Pada skenario pertama dilakukan simulasi sistem 40 Gbps dan 80 Gbps TWDM-PON tanpa menggunakan tambahan penguat. Simulasi tersebut menggunakan tiga titik pembagi dengan jumlah pengguna sebanyak 64, 128, dan 256 ONU. Panjang link yang digunakan yaitu 10, 20, 30, 40 dan 50 km. Sistem tersebut disimulasikan dengan menggunakan parameter-parameter yang telah ditentukan sebelumnya untuk diketahui bagaimana performansi sistem tanpa penguat. Berikut merupakan analisis skenario pertama dengan parameter pengujian *Link Power Budget* (LPB), *Q factor* dan BER.

4.1.1 Analisis Parameter Received Power



Gambar 3 Received Power 40 Gbps Downstream



Gambar 4 Received Power 40 Gbps Upstream

Gambar 3 dan 4 menunjukkan received power 40 Gbps pada sisi *downstream* maupun *upstream*, diperoleh nilai *received power* pada jumlah 64 ONU berada pada *range* standar dengan maksimal jarak 30 km sebesar -27,97 dBm *downstream* dan *upstream* sebesar -29,41 dBm pada jarak 40 km, sedangkan pada jumlah 128 ONU maksimal jarak 20 km sebesar -28,68 dBm *downstream* dan -27,92 *upstream* dan pada jumlah 256 ONU sebesar -29,49 dBm *downstream* dan -28,73 *upstream* dengan maksimal jarak 10 km. Sama halnya dengan *bit rate* 40 Gbps, pada hasil simulasi *received power* dengan *bit rate* 80 Gbps memperoleh nilai yang memenuhi standar pada 64 ONU dengan maksimal jarak 30 km sebesar -27,96 dBm *downstream* dan -27,21 dBm *upstream*.

Berdasarkan hasil parameter *received power* tersebut, daya yang diterima oleh *receiver* pada pelanggan semakin berkurang dikarenakan performansi jaringan TWDM-PON dipengaruhi oleh jarak transmisi dan jumlah pelanggan yang di layani, karena dengan semakin jauh jarak transmisi dan semakin banyak pelanggan maka loss yang dihasilkan akan semakin besar.

4.1.2 Analisis Parameter Q Factor

Nilai *Q factor* yang didapat harus ≥ 6 agar memenuhi standar kelayakan dari kualitas sinyal yang ditransmisikan. Dari hasil simulasi didapatkan nilai *Q factor* dengan bit rate 40 Gbps dan 80 Gbps seperti pada Tabel 6 dan 7.

Tabel 5 *Q Factor* 40 Gbps

Jarak (km)	Q Factor 40 Gbps					
	64 ONU		128 ONU		256 ONU	
	Downstream	Upstream	Downstream	Upstream	Downstream	Upstream
1	16,19	14,02	12,75	10,46	8,49	7,05
10	12,91	12,05	9,16	8,13	5,75	5,06
20	10,11	8,56	6,65	5,61	4,01	3,4
30	7,12	6,71	4,28	4,01	1,86	1,2
40	4,69	4,57	2,72	2,5	0	0
50	3,19	3,05	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0

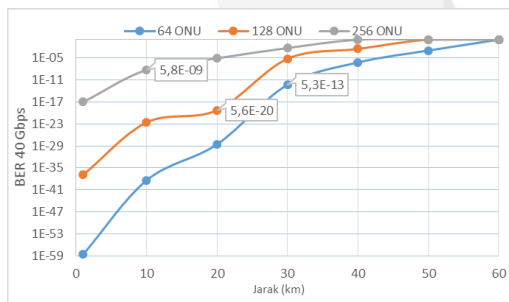
Tabel 6 *Q Factor* 80 Gbps

Jarak (km)	Q Factor 80 Gbps					
	64 ONU		128 ONU		256 ONU	
	Downstream	Upstream	Downstream	Upstream	Downstream	Upstream
1	16,95	16,06	12,36	12,45	8,59	8,16
10	13,47	12,27	9,25	4,46	5,84	2,82
20	10,14	9,24	6,59	3,05	3,95	1,6
30	6,9	6,81	4,43	2,15	1,65	1,21
40	4,57	4,45	2,84	0	0,25	0
50	3,19	3,09	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0

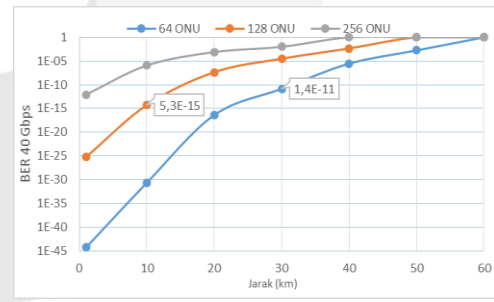
Dari Tabel 5 dan 6 terlihat bahwa nilai *Q factor* dengan skenario tanpa penguat mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya jumlah ONU dan juga untuk jarak yang semakin jauh. Pada sisi *downstream* dan *upstream* nilai *Q factor* dengan jumlah 64 ONU memenuhi standar dengan jarak maksimal 30 km yaitu sebesar 7,12 *downstream* dan 6,71 *upstream*. Pada jumlah 128 ONU nilai *Q factor* memenuhi dengan jarak maksimal 20 km yaitu sebesar 6,65 *downstream* namun pada sisi *upstream* ≤ 6 , sedangkan pada jumlah 256 ONU tidak memenuhi standar dari jarak 10 hingga 60 km yaitu ≤ 6 . Nilai *Q factor* bernilai 0 pada jumlah 128 ONU dengan jarak 50 km dan 256 ONU jarak 40 hingga 60 km, yang menandakan bahwa nilai tersebut tidak memenuhi syarat batas untuk sistem dengan performansi yang baik. Nilai *Q factor* 80 Gbps menunjukkan nilai yang lebih baik, dengan jumlah 64 ONU telah memenuhi standar dengan jarak maksimal 30 km, dan pada jumlah 128 ONU jarak maksimal yaitu 20 km sedangkan pada jumlah 256 jarak 10-50 km tidak memenuhi syarat batas untuk sistem dengan performansi yang baik. Dikarenakan performansi sistem dipengaruhi oleh jarak transmisi dan jumlah pelanggan yang dilayani yang mengakibatkan berkurangnya nilai faktor kualitas yang diterima oleh receiver maka dari itu dibutuhkan penguat pada masing-masing jarak maksimal tersebut.

4.1.3 Analisis Parameter BER

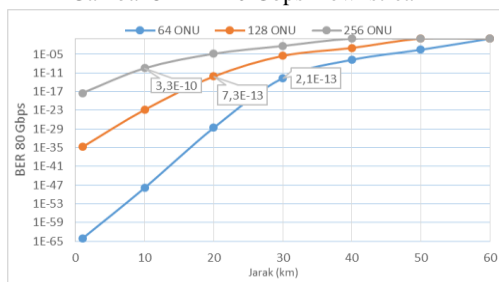
Q factor berkaitan dengan nilai BER yang memiliki nilai minimum untuk menjadi tolak ukur kelayakan pada sistem NG-PON 2. Nilai BER yang didapat maksimum 1×10^{-9} agar memenuhi standar kelayakan dari kualitas sinyal yang dikirim.



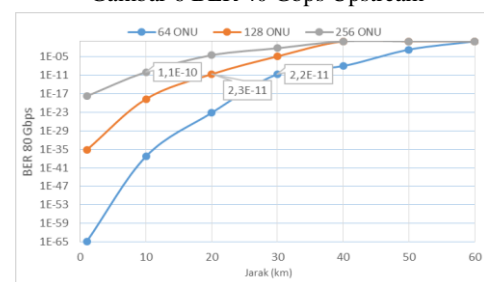
Gambar 5 BER 40 Gbps Downstream



Gambar 6 BER 40 Gbps Upstream



Gambar 7 BER 80 Gbps Downstream



Gambar 8 BER 80 Gbps Upstream

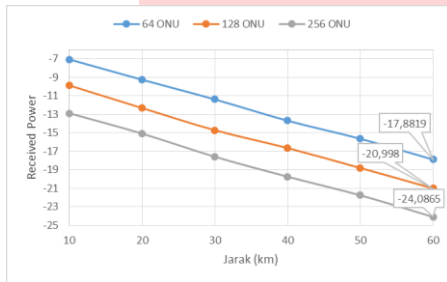
Berdasarkan hasil simulasi dengan bit rate 40 Gbps pada Gambar 5 dan 6, Nilai BER pada 64 ONU lebih besar dibandingkan dengan jumlah ONU lainnya dengan jarak maksimal 30 km yaitu sebesar $5,3 \times 10^{-13}$ dwnostream dan $1,4 \times 10^{-11}$ upstream. Sedangkan pada jumlah 128 ONU nilai BER hanya terpenuhi dengan jarak maksimal 20 km yaitu sebesar $5,6 \times 10^{-20}$ downstream dan $5,3 \times 10^{-15}$ upstream. Pada jumlah 256 ONU nilai BER sudah tidak memenuhi nilai referensi dari jarak 10 km. Nilai BER 80 Gbps pada pada jumlah 64 ONU terpenuhi dengan jarak maksimal 30 km yaitu sebesar $2,1 \times 10^{-13}$ downstream dan $2,2 \times 10^{-11}$ upstream. Pada jumlah 128 memenuhi nilai BER dengan jarak maksimal 20 km sebesar $7,3 \times 10^{-13}$ downstream dan $2,3 \times 10^{-11}$ upstream, sedangkan pada jumlah 256 ONU terpenuhi hanya pada jarak 10 km yaitu sebesar $3,3 \times 10^{-10}$ downstream dan $1,1 \times 10^{-10}$ upstream.

4.2 Analisis Skenario 2 TWDM-PON Menggunakan Penguat

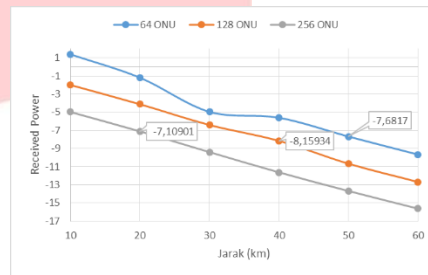
Pada skenario kedua dilakukan simulasi sistem 40 Gbps dan 80 Gbps TWDM-PON menggunakan penguat dengan *hybrid optical amplifier* (Raman-EDFA) sebagai *booster amplifier* dan EDFA sebagai *pre-amplifier*. Berikut merupakan analisis skenario menggunakan penguat dengan parameter *gain*, *Q factor*, BER dan *received power*.

4.2.1 Analisis Parameter LPB

Nilai parameter *received power* didapatkan dari daya yang diterima oleh ONU dari daya transmisi OLT yang telah dikuatkan oleh *hybrid optical amplifier* sebagai *booster amplifier* dan EDFA sebagai *preamplifier*.



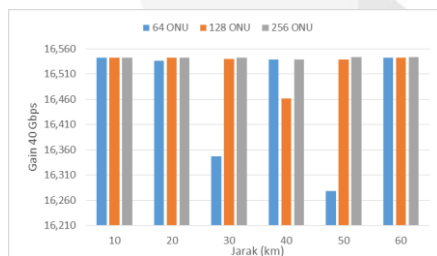
Gambar 9 Received power 40 Gbps Downstream



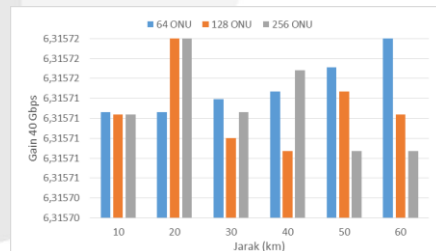
Gambar 10 Received power 40 Gbps Upstream

Berdasarkan hasil simulasi pada Gambar 9 dan 10, nilai *received power* memenuhi standar hingga jarak 60 km untuk masing-masing jumlah pengguna. Nilai yang diperoleh pada sisi *downstream* yaitu sebesar -17,89 dan -7,68 dBm *upstream* pada jumlah 64 ONU, -20,98 dBm *downstream* dan -8,15 dBm *upstream* pada jumlah 128 ONU, dan -24,08 dBm *downstream* dan -7,01 *upstream* pada jumlah 256 ONU. Hasil simulasi parameter *received power* 80 Gbps, diperoleh nilai *received power* terbaik pada jumlah 64 ONU sebesar -7,66 dBm pada sisi *downstream* dan -7,69 dBm pada sisi *upstream*. Pada jumlah 128 ONU didapatkan -10,45 dBm pada sisi *downstream* dan -10,19 dBm pada sisi *upstream*, sedangkan pada jumlah 256 nilai *received power* terbaik yaitu sebesar -13,12 dBm *downstream* dan -9,31 dBm pada sisi *upstream*.

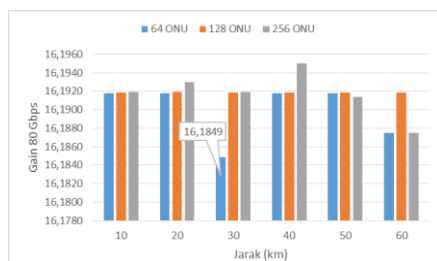
4.2.2 Analisis Parameter Gain



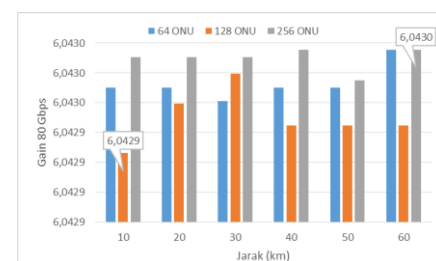
Gambar 11 Gain 40 Gbps downstream



Gambar 12 Gain 40 Gbps upstream



Gambar 13 Gain 80 Gbps downstream



Gambar 14 Gain 80 Gbps upstream

Gambar 11 dan 12 menunjukkan nilai *gain* dengan bit rate 40 Gbps pada sisi *downstream* dan *upstream*. Nilai *gain* tertinggi pada sisi *downstream* didapatkan pada jumlah 256 ONU dengan jarak 50 km sebesar 16,543 dB, dan pada sisi *upstream* *gain* tertinggi sebesar 6,31572 pada jumlah pada jumlah 128 dan 256 ONU jarak 20 km dan pada jumlah 64 ONU dengan jarak 60 km. Gambar 13 dan 12 menunjukkan nilai *gain* dengan bit rate 80 Gbps dengan nilai tertinggi sebesar 16,195 *downstream* dan 6,043 *upstream*.

4.2.3 Analisis Parameter Q Factor

Pada Tabel 9 dan Tabel 10 menampilkan nilai *Q factor* dengan bit rate 40 Gbps dan 80 Gbps menggunakan penguat pada sisi *downstream* dan *upstream*. Nilai *Q factor* meningkat memenuhi syarat nilai *Q factor* ≥ 6 dibandingkan sebelum menggunakan penguat. Nilai *Q factor* pada jumlah 64 ONU jarak 60 km memenuhi nilai referensi yaitu 7,56 pada sisi *downstream* dan 6,40 pada sisi *upstream*. Nilai *Q factor* terendah pada 256 ONU jarak 60 km sebesar 5,55 *downstream* dan 4,79 *upstream*, yang menyatakan bahwa nilai tersebut tidak memenuhi syarat performansi sistem yang baik. Penggunaan penguat pada bit rate 80 Gbps hanya menunjukkan performansi sistem yang baik hingga jarak maksimal yaitu 50 km.

Tabel 7 Q Factor 40 Gbps Penguat

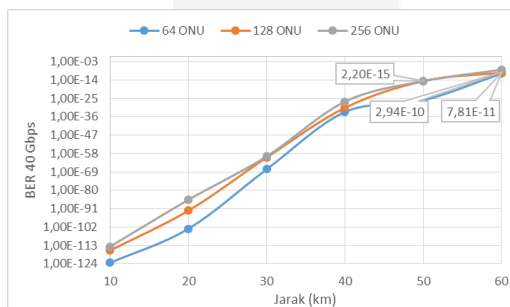
Jarak (km)	Q Factor 40 Gbps					
	ONU					
	64		128		256	
	Downstream	Upstream	Downstream	Upstream	Downstream	Upstream
10	23,66	21,85	22,93	21,56	22,69	18,26
20	21,59	19,78	20,4	17,83	19,66	14,49
30	17,4	16,14	16,44	14,16	16,35	12,09
40	12,07	12,4	11,58	10,33	10,04	9,46
50	8,26	10,24	7,84	8,84	7,84	7,77
60	7,56	6,4	6,19	6,01	5,55	4,79

Tabel 8 Q Factor 80 Gbps Penguat

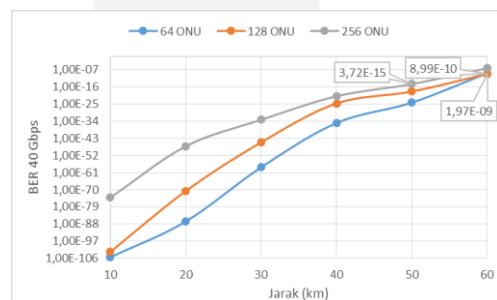
Jarak (km)	Q Factor 80 Gbps					
	ONU					
	64		128		256	
	Downstream	Upstream	Downstream	Upstream	Downstream	Upstream
10	23,38	22,6	23,05	20,88	22,44	15,94
20	20,65	20,03	20,08	16,01	20,03	12,67
30	16,95	16,97	16,37	14,18	16,17	11,92
40	11,8	12,36	11,31	11,15	11,18	8,44
50	7,95	10,62	7,73	8,05	7,41	7,04
60	7,19	5,63	5,51	5,53	5,75	4,62

4.2.4 Analisis Parameter BER

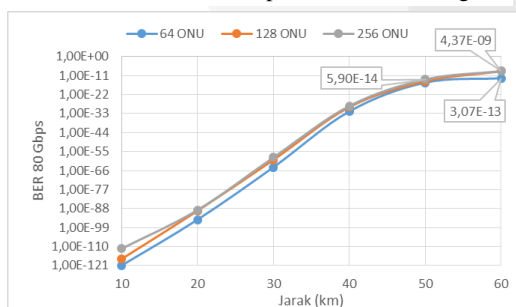
Berikut merupakan hasil simulasi BER menggunakan penguat, dimana nilai BER yang didapat maksimum 1×10^{-9} agar memenuhi standar kelayakan dari kualitas sinyal yang dikirim.



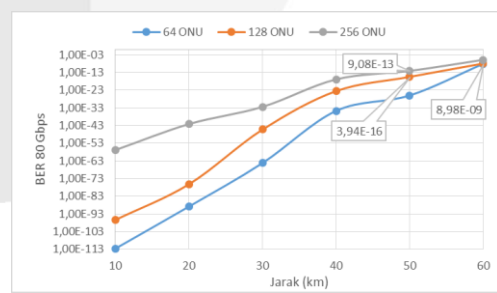
Gambar 15 BER 40 Gbps Downstream Penguat



Gambar 16 BER 40 Gbps Upstream Penguat



Gambar 17 BER 80 Gbps Downstream Penguat



Gambar 18 BER 80 Gbps Upstream Penguat

Gambar 15 dan 16 menunjukkan hasil simulasi BER 40 Gbps, nilai BER pada jumlah 64 ONU telah memenuhi nilai referensi hingga jarak 60 km yaitu sebesar $7,81 \times 10^{-11}$ *downstream* dan $1,97 \times 10^{-9}$ *upstream*, dan pada jumlah 128 ONU jarak 60 km sebesar $2,94 \times 10^{-10}$ *downstream* dan $8,99 \times 10^{-10}$ *upstream*. Sedangkan pada jumlah 256 ONU nilai BER yang dihasilkan hanya mencapai jarak maksimal 50 km yaitu sebesar $2,2 \times 10^{-15}$ *downstream* dan $3,72 \times 10^{-15}$ *upstream*. Sama halnya dengan bit rate 80 Gbps, nilai BER memenuhi syarat nilai referensi $\leq 10^{-9}$ hingga jarak 60 km hanya pada jumlah 64 ONU yaitu sebesar $3,07 \times 10^{-13}$ *downstream* dan $8,98 \times 10^{-9}$ *upstream*. Pada jumlah 128 ONU sebesar $4,37 \times 10^{-9}$ *downstream* dan $3,94 \times 10^{-16}$ *upstream*, sedangkan pada jumlah 256 ONU jarak maksimal yang dapat dicapai yaitu 50 km dengan nilai BER sebesar $5,90 \times 10^{-14}$ *downstream* dan $9,08 \times 10^{-13}$ *upstream*.

4.2 Kesimpulan

Berdasarkan hasil parameter *Q factor*, *Bit Error Rate*, dan *received power* didapatkan performansi terbaik pada sistem NG-PON 2 yaitu dengan *bit rate* 40 Gbps menggunakan penguat dengan masing-masing sub skenario dapat mencapai jarak maksimal yaitu 60 km. Diperoleh nilai tertinggi untuk parameter tersebut berada jumlah pelanggan 64 ONU dan panjang link transmisi 10 km. Nilai *Q factor* yaitu sebesar 23,66 pada sisi *downstream* dan 21,85 pada sisi *upstream*. BER sebesar $3,86 \times 10^{-124}$ pada sisi *downstream* dan $3,16 \times 10^{-106}$ pada sisi *upstream*, dan *received power* -7,05 dBm pada sisi *downstream* dan -7,10 dBm pada sisi *upstream*. Nilai dari parameter tersebut meningkat setelah digunakan penambahan penguat *hybrid optical amplifier* sebagai *booster amplifier* dan EDFA sebagai *preamplifier*. Hal tersebut menunjukkan konfigurasi menggunakan penguat lebih optimal untuk jumlah pengguna yang lebih besar dan jarak transmisi yang semakin jauh.

Daftar Pustaka:

- [1] A. Hambali., B. Pamukti ,” *Performance analysis of hybrid optical amplifier in long-haul ultra-dense wavelength division multiplexing system*”, in *International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCREC)*, Yogyakarta, Indonesia, 2017.
- [2] Luo, Yuanqiu, “ *Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next Generation PON Stage 2 (NG-PON2)*,” *Journal of Lightwave Technology*, vol.31,2013
- [3] S. Bindhaiq, “ *Recent Development on Time and Wavelength Division Multiplexed passive Optical Network (TWDM-PON) for Next Generation Passive Optical Network Stage 2 (NG-PON2)*,” *Optical Switching and Networking Journal 15 (2015) 53-66*.
- [4] D.Nesset, “*NG-PON2 technology and standards*,” in *Eur. Conf. Opt.Comm. (ECOC)*, Cannes, September 2014, tutorial paper M0.4.1.1.
- [5] IEEE P802.3av task force, www.ieee802.org/3/av/
- [6] John-Zyskind., & Atul-Srivasta,”*Optical Amplified WDM Networks*”. Academic Press, Boston.2010
- [7] S. Bindhaiq, “ *80-Gb/s Wavelength Stacked Time and Wavelegth Division Multiplexing-Passive Optical Network for the Next Generation-PON Second Stage*,” *International Conference on Photonics*, 2014
- [8] Keiser, G., “*Chapter 11 Optical Amplifier*,” dalam *Optical Fiber Communication Fifth Edition*, Singapore, Mc Graw Hill Education, 2015.

