

PENGARUH EFEK NONLINEAR PADA JARINGAN NG PON2 MENGGUNAKAN MEDIA TRANSMISI HIGHLY NONLINEAR FIBER

EFFECT NONLINEAR IMPACT ON NEXT GENERATION-PASSIVE OPTICAL NETWORK 2 USING HNLF (HIGHLY NONLINEAR FIBER) TRANSMISSION MEDIA)

Muhamad Prasetyo Notonegoro¹, Akhmad Hambal², Brian Pamukti³

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

¹prasytonotonegoro@students.telkomuniversity.ac.id, ²ahambali@telkomuniversity.ac.id,

³brianp@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Teknologi fiber optik yang sekarang sedang dikembangkan yakni *Next Generation Passive Optical Network 2* (NG PON2). NG PON2 diciptakan untuk memenuhi jaringan *broadband* masa depan yang sangat tinggi tingkat kebutuhannya, serta membutuhkan banyak pengembangan. NG PON2 telah di standarisasikan oleh ITU-T G.989 series pada tahun 2015, dengan menggabungkan 4 *Optical Line Terminal* (OLT) menggunakan teknologi *Time and Wavelength Division* (TWDM). Skenario Pengujian yakni dengan menggunakan 32 ONU dan 64 ONU serta membandingkan antara media transmisi *Highly Nonlinear Fiber* dan G.652.C dengan menganalisis efek *nonlinear* yang terjadi pada kedua media transmisi tersebut. Penggunaan 4 panjang gelombang dengan kecepatan 40 Gbps untuk arah *downstream* dan 10 Gbps untuk arah *upstream*.

Berdasarkan data dari simulasi HNLF terjadi efek *nonlinear* yang mempengaruhi hasil peromansi LPB, Q-Faktor dan BER. Pada jarak 21 km dengan 32 ONU HNLF didapatkan hasil LPB = -22,59 dBm, Q-Faktor = 12,53, BER = $1,7 \times 10^{-36}$. Sedangkan untuk SMF LPB = -19,44 dBm, Q-Faktor = 19,83 BER = $7,47 \times 10^{-88}$. Sedangkan pada 64 ONU HNLF didapatkan hasil LPB = -23,49 dBm, Q-Faktor = 10,82, BER = $9,78 \times 10^{-28}$ untuk SMF LPB = -19,72 dBm Q-Faktor = 19,25, BER = $5,36 \times 10^{-83}$. Perbedaan performansi yang terjadi pada kedua media transmisi ini disebabkan oleh *Four Wave Mixing* terjadi yang dihitung didapatkan sebesar -86,64 dBm.

Kata kunci : TWDM, HNLF, NG PON2, *Nonlinear* Efek, *Four Wave Mixing*

Abstract

Optical fiber technology now being developed is Next Generation Passive Optical Network 2 (NG PON2). NG PON2 created for fulfil broadband network future that very high demand, also needs developed. NG PON2 already in standardization ITU-T G.989 series in 2015, with four aggregation OLT using TWDM. The Testing Scenario uses 32 ONU and 64 ONU and compare between HNLF and G.652.C media transmission by analysing *nonlinear* effect that happened in two media transmission. It uses 4 wavelength with 40 Gbps speed for downstream and 10 Gbps speed for upstream.

Based on data HNLF simulation, there is an *nonlinear* effect that affected performance result LPB, Q-factor and BER. The result obtain from 21 km with 32 ONU HNLF is LPB = -22,59 dBm, Q-Faktor = 12,53, BER = $1,7 \times 10^{-36}$. While for SMF LPB = -19,44 dBm, Q-Faktor = 19,83 BER = $7,47 \times 10^{-88}$. Whereas for 64 ONU HNLF obtain LPB = -23,49 dBm, Q-Faktor = 10,82, BER = $9,78 \times 10^{-28}$ for SMF is LPB = -19,72 dBm Q-Faktor = 19,25, BER = $5,36 \times 10^{-83}$. The difference between performance the media transmission caused by *Four Wave Mixing* that get calculation result of -86,64 dBm.

Keywords: TWDM, HNLF NG PON2, Effect *Nonlinear*, *Four Wave Mixing*

1. Pendahuluan

Kabel fiber optik adalah media yang efektif untuk transmisi data jarak jauh. Sinyal informasi diubah menjadi sinyal cahaya dan ditransmisikan melalui kabel fiber optik. Komunikasi fiber optik muncul sebagai teknologi yang paling menojol pada zaman ini karena memiliki *wide bandwidth*, *high data rate*, dan tahan terhadap gangguan seperti *electrical isolation* dan *signal security*. Pada penelitian *International Telegraph Union - Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T) 989.2 membahas *nonlinear raman interactions*. Teknologi NG PON2 telah distandarisasi pada tahun 2015 oleh ITU-T [1].

Highly Nonlinear Fiber (HNLF), yaitu jenis kabel yang digunakan pada percobaan kali ini. *Time and Wavelength Division Multiplexing* (TWDM) di jaringan NG PON2 [2]. Ketika daya pengiriman tinggi terjadi efek *nonlinear* yakni *Four Wave Mixing* (FWM) pada panjang gelombang dan dianalisis juga kekuatan daya terima yang dikirimkan.

Pada tahun 2006 Toshiaki OKUNO, Masaaki HIRANO, Tetsuya NAKANISHI and Masashi ONISHI, melakukan penelitian mengenai 3 macam jenis HNLF pada sistem komunikasi optik. Jenis pertama yakni digunakan untuk *wavelength conversion*, *optical switching* dan *amplification based on FWM*. Jenis kedua digunakan untuk *ultra-short optical pulse transmission* dan *supercontinuum (SC) generation*, dan yang terakhir digunakan untuk *Raman Amplification* [2].

Pada penelitian ini menggunakan TWDM-PON 40 Gbps pada *downstream* dengan jarak 30 km dan juga kabel *Highly Nonlinear Fiber (HNLF)* jenis pertama, yakni pada jaringan NG PON2 untuk menganalisa efek *nonlinear* yang terjadi. Parameter pengujian pada penelitian ini yaitu *Link Power Budget (LPB)*, *Signal to Noise Ratio (SNR)*, *Q-factor*, dan *Bit Error Rate (BER)* dengan menggunakan panjang gelombang 1596.34 nm, 1597.19 nm, 1598.04 nm, dan 1598.89 nm. Serta membandingkan performansi antara kabel fiber optik G.652 C dengan *Highly Nonlinear Fiber (HLNF)*.

2. Dasar Teori

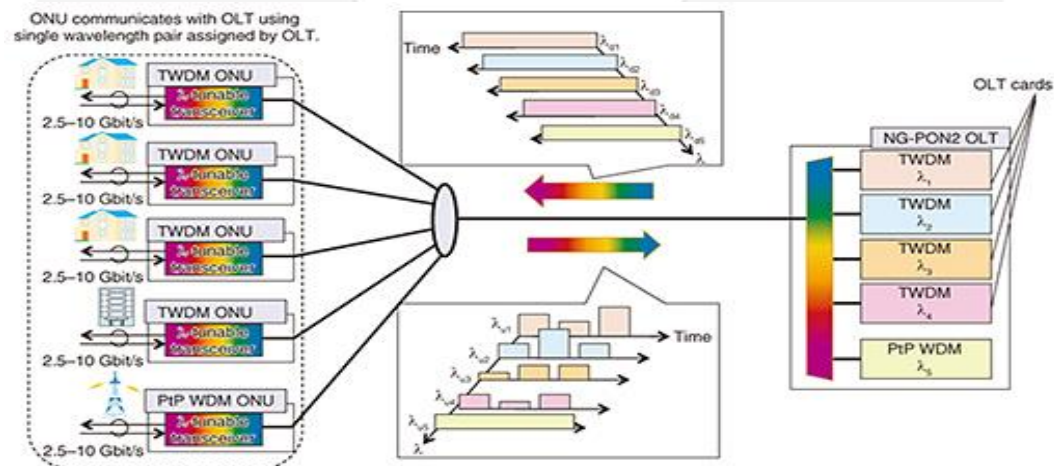
2.1 Next Generation Passive Optical Network 2 (NG PON2)

Penggunaan jaringan *Next Generation Passive Optical Network 2 (NG PON2)* dengan *bandwidth* besar dan kecepatan yang sangat tinggi untuk telekomunikasi masa depan yang sangat dibutuhkannya *bandwidth* besar dan kecepatan yang tinggi, serta tingkat keamanan jaringan yang bagus juga jadi faktor yang sangat mempengaruhi teknologi di masa depan, dengan menggunakan standar ITU-T G.989 series, G.989.1, G.989.2 dan G.989.3 yang telah disetujui pada maret 2013 [3].

Dengan kecepatan *downstream* 40 Gbps dan untuk *upstream* 10 Gbps, menjadi sangat dibutuhkan untuk telekomunikasi masa depan. Perbedaan antara NG PON2 dengan generasi PON sebelumnya yakni pada OLT dan ONU serta agregasi OLT. Setiap OLT harus memiliki *tuneable transmitter* dan *tuneable receiver* dengan kapasitas 10 Gbps atau 2,5 Gbps, dan setiap ONU/ONT harus memiliki *tuneable transmitter* dan *tuneable receiver* untuk memindai sinyal *downstream* dan sinyal *upstream*.

NG PON2 berdasarkan ITU-T G.989 [4], yaitu:

- ITU-T G.989.1 40-Gigabit *capable passive optical network*: pembahasan tentang ketentuan umum dari jaringan NG PON2
- ITU-T G.989.2 40-Gigabit *capable passive optical network*: pembahasan spesifikasi *Physical Media Dependent (PMD) layer*, yaitu *wavelength plan*, *optical loss budgets*, *line rates*, *modulation format*, *wavelength channel parameters*, dan *ONU tuning time classes*.
- ITU-T G.989.3 40-Gigabit *capable passive optical network*: berisikan spesifikasi *transmission convergence layer protocol*.



Gambar 1 Arsitektur NG PON2.

Pada Gambar 1 di atas merupakan arsitektur NG PON2 yang dipakai untuk *Point to Multi Point (P2MP)* dengan menggunakan teknik multiplexing *Time and Wavelength Division Multiplexing (TWDM)*. Penggunaan (TWDM PON) direkomendasikan oleh ITU-T G.989 series.

2.2 Time and Wavelength Division Multiplexing (TWDM)

Time and Wavelength Division Multiplexing (TWDM) merupakan teknik yang ditetapkan *Full Service Access Network (FSAN)* untuk jaringan NG PON2, dengan menggabungkan *Time Division Multiplexing (TDM)* dan

Wavelength Division Multiplexing (WDM), TDM berperan penting dalam mentransmisikan informasi pada sisi *upstream*. Sedangkan WDM berperan pada sisi *downstream*, aspek terkuat dari *link* komunikasi optik adalah dapat transmisi banyak panjang gelombang yang berbeda pada satu serat secara bersamaan pada rentang *spektral* 1300 nm – 1600 nm. Teknologi penggabungan sejumlah panjang gelombang berbeda untuk ditransmisikan pada satu serat dikenal dengan *Wavelength Division Multiplexing* (WDM). Secara konseptual, skema dari WDM Gambar 1 memiliki kesamaan dengan *Frequency Division Multiplexing* (FDM) yang digunakan pada *microwave radio* dan sistem satelit. Sama halnya seperti pada FDM, panjang gelombang di WDM di sarankan mempunyai *channel spacing* untuk meminimalisir terjadi efek *interchannel interference*. Panjang gelombang dari TWDM sendiri yakni 1524 nm – 1544 nm untuk *upstream* dan 1596 nm – 1603 nm untuk *downstream* [5].

2.3 Nonlinear Effect (NLE)

Bila cahaya dengan intensitas tinggi menyebar melalui media serat optik dapat menyebabkan efek nonlinier. Selain itu interaksi daya pada medium serat optik berindeks refraktif yang dapat berhubungan langsung dengan efek kerr digambarkan sebagai perubahan (biasanya kenaikan) pada indeks bias sebanding dengan intensitas optik yakni efek kerr yang persamaannya ditulis di bawah [6],

$$n_{eff} = n_0 + n_2 I, \quad (1)$$

Dimana n_{eff} adalah effective refractive index, n_0 adalah indeks bias dari serat optik dan n_2 adalah indeks bias nonlinier dan I adalah intensitas daya pada optik *Nonlinear Index* berikut persamaan ditulis di bawah,

$$\Delta n = n_2 I, \quad (2)$$

Perubahan pada indeks bias refraktif yang berbanding lurus dengan intensitas daya dapat menimbulkan modulasi sinyal pada fasa.

$$\Delta \phi = \frac{d\phi_0}{dt} + \frac{d\phi_{n2I}}{dt} \quad (3)$$

2.4 Panjang Efektif dan Area Efektif

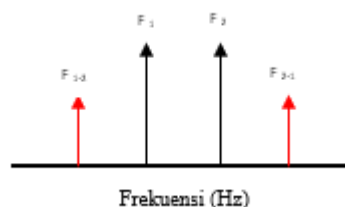
Panjang efektif dan area efektif merupakan faktor yang mempengaruhi efek *nonlinear* pada sistem NG-PON2 yang menggunakan WDM pada sisi *downstream*. Efek ini bergantung juga pada *optical power level* pada fiber. Panjang efektif yang memperhitungkan daya terima pada media transmisi. L_{eff} memiliki persamaan sebagai berikut [7].

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-aL}}{a} \quad (3)$$

Efek *nonlinear* juga dipengaruhi oleh A_{eff} , yakni area yang digunakan untuk mendistribusikan sinyal optik pada media transmisi dan juga mempengaruhi intensitas cahaya yang lewat pada media transmisi.

2.5 Four Wave Mixing (FWM)

Pencampuran empat gelombang adalah fenomena *nonlinear* yang juga disebut sebagai proses parametrik orde ketiga. Proses parametrik berasal dari respon *nonlinear* elektron material yang dibatasi ke medan optik terapan. Secara khusus, polarisasi yang diinduksi dalam media adalah *nonlinear*.



Gambar 3. Dua buah sinyal masukan f_1 dan f_2 dengan muncul sinyal dua baru.

Besarannya diatur oleh kerentanan *nonlinear*. Order urutan ketiga bertanggung jawab atas FWM. Pada Gambar 2.4 menunjukkan kemunculan dua frekuensi baru di luar frekuensi aslinya yang berisi informasi. Secara umum, jika gelombang sebanyak N jumlah dilewatkan ke serat, jumlah FWM dihasilkan produk campuran M dengan rumus,

$$M = N^2(N - 1) / 2 \quad (4)$$

Beberapa produk pencampuran ini terjadi pada atau di dekat beberapa panjang gelombang operasi. Gelombang optik yang baru dihasilkan ini mengganggu sinyal asli. Jadi FWM menurunkan kinerja sistem pada komunikasi optik seperti sistem *Wavelength Division Multiplexing* (WDM). Efek FWM bervariasi dengan tingkat daya pada serat optik. Interferensi FWM tergantung pada bagaimana memilih jumlah saluran atau jarak saluran pada sistem komunikasi serat optik *multichannel* [8].

2.5 Highly Nonlinear Fiber (HNLF)

Highly Nonlinear Fiber adalah jenis kabel fiber optik yang digunakan untuk telah menjadi *platform mixer* yang paling penting untuk saat ini, dan bertanggung jawab untuk sebagian besar kemajuan yang dibuat dalam daya rendah, *bandwidth* tinggi perangkat *parametric*, untuk memberikan *nonlinearity* tinggi dan penyebaran rendah yang tersebar di pita operasional [9]. HNLF konvensional dirancang untuk beroperasi di sekitar frekuensi *cutoff* dimana medan mode dikurung ketat pada intinya, dan dispersi *Wave Guide* memiliki kemiringan terbalik sehubungan dengan dispersi material [10]. HNLF digunakan pada variasi *optical signal processing* seperti *wavelength conversion*, *Raman amplification*, *optical parametric amplification*, *optical MUX/DEMUX*, *optical switching*, *optical sampling* dan *supercontinuum light generation* [2]. HNLF memiliki 3 jenis karakteristik pada tabel berikut :

Tabel 1. Jenis HNLF

<i>Fiber Type</i>	<i>Attenuation (dB/km)</i>	<i>Dispersion (ps/nm/km)</i>	<i>Dispersion slope (ps/nm²/km)</i>	λ_c (μm)
Tipe 1	0,5	-2 ~ +2	+0,03	1,4
Tipe 2	0,4	-1 ~ +1	0	1,1
Tipe 3	0,5	-15	+0,01	1,3

Pada HNLF tipe 1 pengaplikasiannya digunakan untuk mengukur *wavelength conversion*, *optical switching* dan *optical parametric amplification* pada FWM dan XPM. Tipe 2 digunakan untuk *ultra short optical pulse transmission* dan *supercontinuum (SC) generation*. Tipe 3 digunakan pada *Raman Amplification* [2]. Pada penelitian ini menggunakan tipe 2 untuk dilakukan pengujian terhadap jaringan akses NG PON2.

2.6 Perhitungan Nonlinear FWM Power

Berikut perhitungan *Nonlinear* untuk *power FWM* pada jaringan NGPON 2 [11].

$$\Delta\beta = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \Delta\lambda^2 (D - D_{so} \Delta\lambda) \quad (5)$$

Keterangan :

- $\Delta\beta$ = *Phase mismatching*
- $\Delta\lambda$ = Spasi kanal (nm)
- λ = Panjang Gelombang *Cut Off* (nm)
- D = *Dispersion* (ps/nm/km)
- D_{so} = *Dispersion slope* (ps/nm²/km)

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \quad (6)$$

Keterangan :

- α = Redaman (dB)
- $\Delta\beta$ = *Phase mismatching*

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad (7)$$

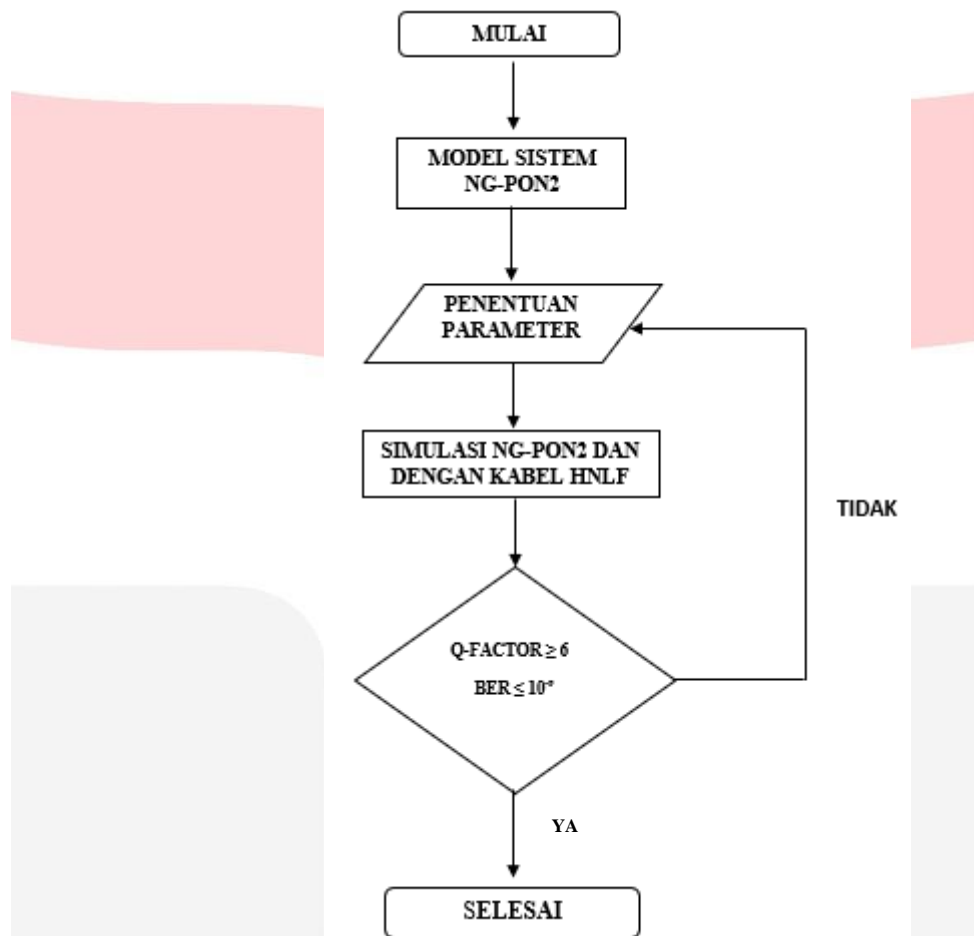
- n_2 = Nilai *nonlinear*
- λ = Panjang gelombang (nm)
- A_{eff} = Area Efektif (μm^2)

$$P_{fwm} = (\gamma P^3 L_{eff})^2 \quad (8)$$

Keterangan

- P_{fwm} = *Power Four Wave Mixing* (dBm)
- γ = *Fiber nonlinear coefficient*
- P = *Power input* (dB)
- n = *Phase matching efficiency*
- L_{eff} = Jarak efektif (km)

3. Perencanaan Sistem



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Pada Gambar 3 menunjukkan tahapan penelitian yang dilakukan. Skenario yang dipakai yakni mensimulasikan model sistem NG PON2 diperangkat lunak dengan memasukan parameter - parameter seperti *frequency*, *transmit power*, *fiber attenuation*, *dispersion*, *dispersion slope* dan *fiber length*. Kemudian dilakukan pengambilan data - data seperti *Q-factor*, BER, SNR dan LPB. Setelah melakukan pemasukan parameter yang dibutuhkan, lalu mensimulasikan dengan perangkat lunak dan mengukur *Q-Factor*, BER, SNR dan LPB. Setelah simulasi sudah selesai maka dilakukan analisis terhadap efek *nonlinearity* yang terjadi pada media transmisi kabel G.652 dan HNLF yang memiliki nilai parameter yang berbeda. Parameter yang digunakan untuk sistem yakni *transmitter*, media *transmitter*, dan *receiver*.

Tabel 2. Parameter Transmitter

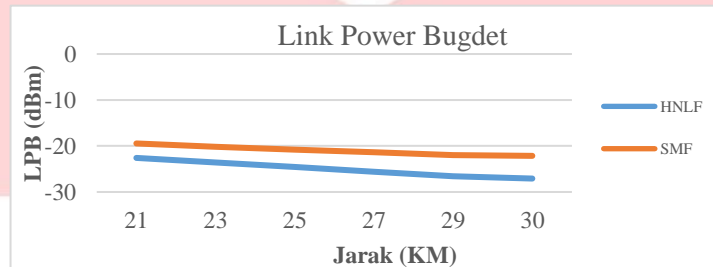
No	Transmitter			Receiver		
	Parameter	Value	Unit	Parameter	Value	Unit
1	Number of Output Ports	4	Amount	Number of Output Ports	4	Amount
2	Frequency	1550	nm	Frequency	1550	nm
3	Frequency Spacing	100	THz	Frequency Spacing	100	THz
4	Bandwidth	20	GHz	Bandwidth	20	GHz
5	Filter Type	bessel	Type	Filter Type	bessel	Type
6	Photodetector	APD	Type	Photodetector	APD	Type
7	Responsivity	0,75	A/W	Responsivity	0,75	A/W
8	Dark Current	10	nA	Dark Current	10	nA

4. Hasil dan Analisis Simulasi Sistem

Hasil dari simulasi menggunakan 2 skenario yakni dengan total splitter ratio 1:32 dan 1:64 pada media transmisi HNLf dan G.652 C. Parameter yang diuji pada penelitian ini yakni *Link Power Budget* (LPB), *Signal to Noise Ratio* (SNR), *Bit Error Rate* (BER), dan *Q-factor*, serta melihat efek *nonlinear* yang terjadi pada sistem dan *power fwm*.

1. Pengujian menggunakan 32 ONU LPB pada HNLf dan SMF

Hasil pengujian pada sisi *downstream* didapatkan nilai LPB sebagai berikut. Daya kirim yang digunakan pada simulasi yakni 5 dBm.

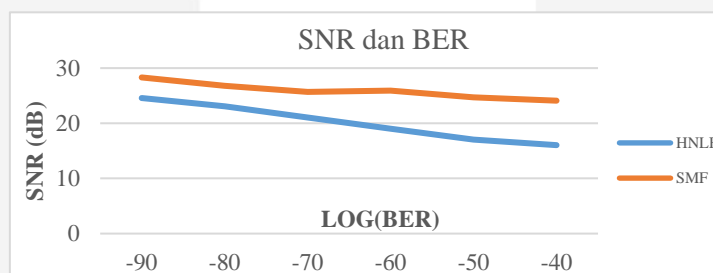


Gambar 4. Hasil Simulasi LPB

Pada Gambar 4. merupakan hasil dari simulasi untuk media transmisi HNLf dan SMF, untuk jarak 21 km - 19,449 dBm dan untuk SMF mendapatkan hasil -22,593 dBm. Pada LPB efek nonlinear tidak mempengaruhi performansi pada LPB. Pada jarak 30 km HNLf mendapatkan hasil -27,087 dBm sedangkan pada SMF mendapatkan

2. Pengujian menggunakan 32 ONU HNLf dan SMF SNR Terhadap BER

Berikut hasil pengujian pada sisi *downstream* didapatkan hasil pada SNR terhadap BER menggunakan daya kirim sebesar 5 dBm.

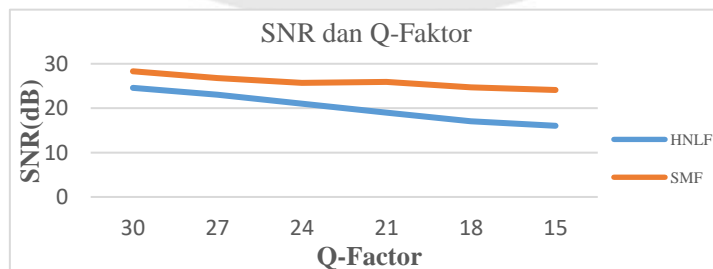


Gambar 5. Hasil Simulasi SNR Terhadap BER

Pada Gambar 5 di atas merupakan hasil simulasi dari SNR terhadap BER, hasil di atas didapatkan untuk HNLf SNR yakni sebesar 24,57 dB dan untuk SMF 28,30 dB untuk jarak 21 km. BER pada HNLf didapatkan hasil $1,70 \times 10^{-36}$ untuk SMF $7,47 \times 10^{-88}$ untuk jarak 21 km. hubungan antara BER dan SNR semakin menurun nilai BER maka nilai SNR semakin membesar. Efek *nonlinear* yang terjadi pada sistem yakni *Four Wave Mixing* yakni ketika dua gelombang atau lebih di transmisikan secara bersamaan. Efek *nonlinear* yang terjadi pada simulasi berdampak kepada BER yaitu menurunnya nilai BER pada HNLf karena nilai A_{eff} , *dispersion*, *dispersion slope* dan nilai n_2 pada HNLf lebih kecil dibandingkan dengan SMF.

3. Pengujian menggunakan 32 ONU SNR dengan Q-Faktor.

Berikut hasil pengujian pada sisi *downstream* untuk SNR terhadap Q-Faktor, menggunakan daya kirim sebesar 6 dBm.



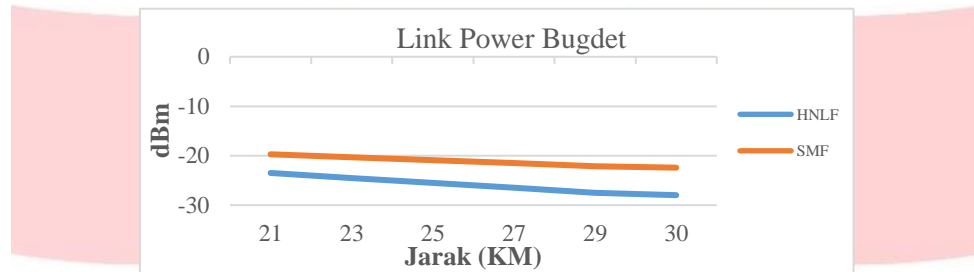
Gambar 6. Q-Faktor Terhadap SNR

Pada Gambar 6 merupakan hasil simulasi dari SNR terhadap Q-Faktor, rangkuman hasil di atas untuk HNLf SNR yakni sebesar 24,57 dB dan untuk SMF 28,30 dB untuk jarak 21 km. Q-Faktor untuk HNLf 12,53 dan pada

SMF didapatkan 19,83 pada jarak 21 km. Perbedaan yang terjadi pada Q-Faktor disebabkan oleh A_{eff} , *dispersion*, *dispersion slope*, atenuasi, n_2 .

4. Pengujian menggunakan 64 ONU LPB pada HNLF dan SMF

Pada skenario 2 ini menggunakan 64 ONU pada media transmisi HNLF dan SMF. Daya kirim yang digunakan pada skenario 2 ini yakni sebesar 8 dBm. Berikut hasil simulasi yang telah dilakukan pada *software*.

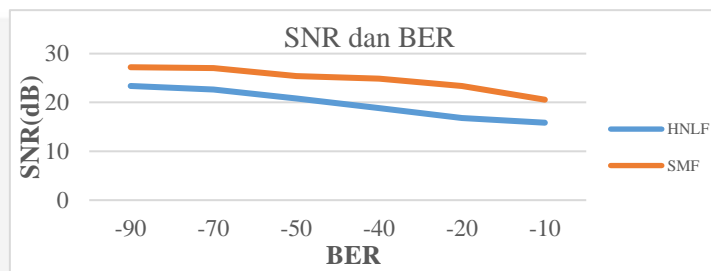


Gambar 7. Hasil Simulasi LPB HNLF dan SMF.

Pada Gambar 7 yakni didapatkan hasil simulasi pada jarak 21 km untuk media transmisi HNLF sebesar -23,49 dBm sedangkan untuk SMF didapatkan sebesar -19,72 dBm, sedangkan untuk jarak terjauh 30 km HNLF sebesar -27,98 dBm sedangkan untuk SMF sebesar -22,42 dBm.

5. Pengujian menggunakan 64 ONU SNR terhadap BER.

Perbandingan antar SNR dengan BER pada skenario 2 ini pada sisi *downstream* pada gambar di bawah.

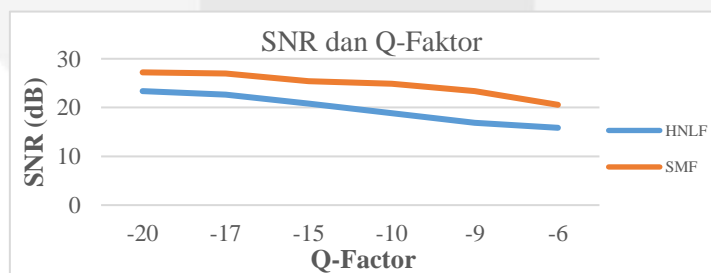


Gambar 8. Hasil Simulasi SNR Terhadap BER.

Pada Gambar 8 menunjukkan hasil dari simulasi SNR terhadap BER pada jarak 21 km HNLF mendapatkan 23.37 dB untuk SNR sedangkan SMF mendapatkan 27.21. BER yang didapatkan pada HNLF jarak 21 km yakni 9.78×10^{-28} sedangkan untuk SMF yakni sebesar 5.36×10^{-83} . Hal ini disebabkan karena adanya efek *nonlinear* yang terjadi pada kedua kabel HNLF dan SMF. Parameter yang mempengaruhi efek *nonlinear* yakni A_{eff} , *Dispersion*, *Dispersion slope*, Atenuasi, dan n_2 .

6. Pengujian menggunakan 64 ONU SNR terhadap Q-Faktor.

Pada pengujian SNR terhadap Q-Faktor menggunakan daya kirim sebesar 8 dBm berikut hasil pengujian yang tertera di bawah.



Gambar 9. Hasil Simulasi SNR Terhadap Q-Faktor.

Pada Gambar 9 menunjukkan hasil dari simulasi antara SNR terhadap Q-Faktor, pada jarak 21 km HNLF mendapatkan nilai Q – Faktor sebesar 10.82 sedangkan untuk HNLF mendapatkan sebesar 19.25. Pada SNR pada jarak 21 km HNLF mendapatkan sebesar 23.37 dB untuk SNR sedangkan SMF mendapatkan 27.21, perbedaan yang cukup jauh yakni disebabkan oleh adanya efek *nonlinear* yang terjadi pada sistem yang disebabkan oleh nilai A_{eff} , *Dispersion*, *Dispersion slope*, Atenuasi, dan n_2 .

5. Kesimpulan

Pada Dari hasil simulasi dan analisis yang dilakukan pada perangkat lunak maka diambil beberapa kesimpulan diantaranya :

- a. Hasil sistem NG PON pada simulasi LPB = -27,087 dBm, SNR = 16,03 dB, Q -Factor = 7,60, BER = $1,26 \times 10^{-14}$, menggunakan media transmisi HNLF pada jarak 30 km menggunakan 32 ONU.
- b. Sedangkan pada G.652.C pada jarak 30 km sebesar LPB = -22,14 dBm, SNR = 24,09 dB, Q -Factor = 13,25, BER = $2,03 \times 10^{-40}$.
- c. Hasil sistem NG PON2 pada simulasi LPB = -27,982 dBm, SNR = 15,85 dB, Q -Factor = 6,08, BER = $5,32 \times 10^{-10}$, menggunakan media transmisi HNLF jarak 30 km 64 ONU.
- d. Sedangkan untuk G.652.C pada jarak 30 menggunakan 64 ONU mendapatkan hasil LPB = -22,42 dBm, SNR = 20,56 dB, Q -Factor = 12,28, BER = $5,17 \times 10^{-35}$.
- e. Hasil perhitungan P_{fwm} yakni didapatkan sebesar -83,6491 dBm untuk jumlah 32 ONU.
- f. Hasil perhitungan P_{fwm} yakni didapatkan sebesar -65,1704 dBm untuk jumlah 64 ONU.

Daftar Pustaka:

- [1] ITU-T G.989.2, "40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG PON2) : Physical media dependent (PMD) layer specification," 2014.
- [2] Toshiaki OKUNO, Masaaki HIRANO, Tetsuya NAKANISHI and Masashi ONISHI, "Highly-nonlinear Optical Fibers and Their Applications," 2006.
- [3] K. Asaka and J.-i. Kani, "Standardization Trends for Next-Generation Passive Optical Network Stage 2 (NG PON2)," vol. 13, p. 2, 2015.
- [4] 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)," Optical Switching and Networking, 2014.
- [5] Prianggono Satya "Analisis Performansi optical Distribution Network (ODN) NG PON2 Menggunakan Teknologi Time-And-Wavelength Division Multiplexing (TWDM)," 2017.
- [6] Mojtaba Dehghani Firouzabadi, Mahmoud Nikoufard, Mohammad Bagher Tavakoli , "Optical Kerr nonlinear effect in InP-based hybrid plasmonic waveguides, " 2017.
- [7] G. Keiser, "Optical Fiber Communications (Fourth Edition), McGraw-Hill, " 1991.
- [8] Georges Boulon , Four-Wave Mixing Studies Of Energy Transfer Processes.
- [9] Awang Noor Azura Binti, "STUDY OF FOUR WAVE MIXING IN A HIGHLY NONLINEAR MEDIA AND THEIR APPLICATIONS, " KUALA LUMPUR, 2012.
- [10] Yamamoto yoshinori , tamura yoshiaki , takemi hasegawa, "Silica-Based Highly Nonlinear Fibers and Their Applications, " 2016.
- [11] Agrawal Govind P, "Nonlinear Fiber Optics, " The Institute of Optics University of Rochester Rochester, New York, 2013.