

**PENGARUH NON-LINIER TERHADAP PERFORMANSI SISTEM PADA
NEXT GENERATION OPTICAL NETWORK
NON-LINIER EFFECT ON SYSTEM PERFORMANCE OF
THE NEXT GENERATION OPTICAL NETWORK**

Muhamad Arief Permana¹, Ir. Akhmad Hambali, M.T.², Brian Pamukti, S.T., M.T.³

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

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

Abstrak

NG-PON2 pertama kali diperkenalkan oleh ITU-T pada tahun 2013 untuk standar G.989.1 dan dilanjutkan G.989.2. NG-PON2 memiliki *bitrate* sebesar 40 Gbit/s dan menjadi sistem yang menerapkan teknologi TWDM (*Time and Wavelength Division Multiplexing*). Namun dari banyaknya kelebihan NG-PON2 ternyata masih memiliki rugi-rugi yang menjadi pengaruh performansi jaringan dikatakan baik. Salah satu rugi-rugi NG-PON2 antara lain efek non-linier optik (*Kerr Effect*).

Jika diamati lebih dalam *Kerr Effect* dapat menimbulkan beberapa efek seperti, *Self Phase Modulation* (SPM), *Cross Phase Modulation* (XPM), dan *Four Wave Mixing* (FWM). Penelitian ini memiliki dua skenario untuk membuktikan pengaruh efek non-linier terhadap performansi NG-PON2. Pada skenario pertama menentukan sistem NG-PON2 yang akan diuji performansinya terhadap efek non-linier. Skenario kedua melakukan simulasi SPM dan XPM pada parameter *bidirectional optical fiber* dan simulasi n_2 (indeks bias non-linier) dengan mengubah nilai ordonya berdasarkan rumus indeks bias refraktif.

Penelitian ini menghasilkan parameter XPM dan SPM tidak signifikan mempengaruhi performansi NG-PON2. Penelitian ini juga mendapatkan penurunan performansi NG-PON2 secara signifikan terjadi pada nilai indeks bias non-linier dengan orde 10^{-18} , sehingga dengan nilai orde yang besar dapat mengakibatkan kerusakan pada setiap kanal. Selain itu, NG-PON2 memiliki performansi terbaik pada spasi kanal 100 GHz dengan jumlah kanal 4 dan 8 lambda yang sudah dipengaruhi oleh efek non-linier.

Kata kunci: NG-PON stage 2, serat optik, *Passive Optical Network*.

Abstract

NG-PON2 was first introduced by ITU-T in 2013 for the G.989.1 standard and continued G.989.2. NG-PON2 has a 40 Gbit / s of *bitrate* and becomes a system that implements TWDM (*Time and Wavelength Division Multiplexing*) technology. But from many advantages of NG-PON2 it still has losses that the influence of network performance is said to be good. One of the NG-PON2 losses is optical non-linear effect (*Kerr Effect*).

More deeply observed *Kerr Effect* can cause some effects such as, *Self Phase Modulation* (SPM), *Cross Phase Modulation* (XPM), and *Four Wave Mixing* (FWM). This research has two scenarios to prove the effect of non-linear on NG-PON2 performance. In the first scenario determine the NG-PON2 system to be tested for its performance against non-linear effects. The second scenario performs SPM and XPM simulations on *bidirectional optical fiber* parameters and simulation n_2 (non-linear refractive index) by changing the value of its order based on the refractive index refractive index.

This research resulted the parameters of XPM and SPM did not significantly affect the performance of NG-PON2. This study also found that NG-PON2 performance decrease significantly occurred in non-linear refractive index values of 10^{-18} by order, so with a large order values can cause damage to each channels. In addition, NG-PON2 has the best performance on 100 GHz channel spacing with 4 and 8 lambda channel numbers that have been affected by non-linear effects.

Keywords: NG-PON stage 2, fiber optic, *Passive Optical Network*.

1. Pendahuluan

Pada tahun 2015 telah dilakukan penelitian tentang simulasi dampak SRS (*Stimulated Raman Scattering*) pada jaringan NG-PON2[1]. Penelitian tersebut menghasilkan nilai redaman pada daya terima sebesar 3.9 dB dengan

jarak jangkauan jaringan hingga 40 km. Nilai redaman tersebut tentunya dapat mengurangi daya terima pada ONU walaupun tidak terlalu signifikan. Namun jika diterapkan pada *link budget* nilai pengurangan tersebut sangat berguna untuk akurasi perhitungan.

Berdasarkan penelitian lain yang dilakukan pada tahun yang sama 2015 performansi pada jaringan WDM termasuk CWDM sangat dipengaruhi oleh karakteristik non-linier didalam serat[2]. Penyataan itu dikuatkan oleh penelitian lain meneliti tentang efek non-linier pada jaringan DWDM dihasilkan nilai BER terbaik pada jarak jangkauan 10 km dengan bit rate 40 Gbit/s[3]. Pada NG-PON2 menerapkan TWDM dengan bitrate 40Gbit/s sebagai arsitektur utama, sehingga jaringan NG-PON2 sangat rawan dipengaruhi efek non-linier optik.

Sehingga pada penelitian ini, akan melakukan analisis dan simulasi tentang seberapa besar dampak dari efek non-linier terhadap NG-PON2. Pengamatan terhadap BER, Q faktor dan eye diagram dilakukan untuk mendapatkan data serta menentukan seberapa pengaruhnya efek non-linier terhadap jaringan. Sebelum melakukan simulasi efek non-linier terlebih dahulu dibuatkan arsitektur NG-PON2 sesuai dengan standar yang telah ditetapkan ITU-T antara lain NG-PON2 memiliki *bitrate* 40 Gbit/s, *split ratio* berkisar hingga 1:256 ONU, dan batas maksimum jarak transmisi 40 km dengan syarat penambahan amplifier pada arah *downstream*. Sehingga dapat diketahui proses dan akibat dari efek non-linier pada jaringan NG-PON2 menggunakan arsitektur TWDM.

2. Tinjauan Pustaka

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

Next-Generation Passive Optical Network 2 (NG-PON2)[4] merupakan sistem yang termasuk dalam *Passive Optical Network* (PON) dengan kapasitas hingga 40 Gbps untuk *Downstream* dan 10 Gbps untuk *Upstream*, dan menerapkan protokol yang ditentukan dalam standar ITU-T G.989. Sistem *requirement* standar NG-PON2 [4] sebagai berikut :

- *Multiple wavelength channel* dengan arsitektur TWDM.
- 4 - 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 :
 - ✓ 10 Gbit/s *downstream* dan 10 Gbit/s *upstream*.
 - ✓ 10 Gbit/s *downstream* dan 2.5 Gbit/s *upstream*.
 - ✓ 2.5 Gbit/s *downstream* dan 2.5 Gbit/s *upstream*.
- Jangkauan fiber minimum 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

2.2 Efek Non-Linier

Efek non-linear optik terjadi ketika indeks bias refraktif dalam medium serat optik berinteraksi dengan intensitas berkas cahaya. Interaksi tersebut berhubungan langsung dengan *Kerr-effect* dimana penyebab adanya *Kerr-effect* adalah indeks bias refraktif yang berubah-ubah akibat intensitas daya optik atau sebanding dengan nilai dari medan listrik, fenomena tersebut ditunjukkan dalam rumus dibawah ini[5] :

$$n = n_0 + n_2 * \frac{P}{A_{eff}} \quad (1)$$

Dimana n adalah indeks bias refraktif, n_0 adalah indeks bias core sebelum ada intensitas cahaya, n_2 adalah parameter indeks bias yang bergantung pada *non-linier susceptibility* dari material serat optik dalam satuan m^2/W , P adalah daya optik dalam satuan Watt, dan A_{eff} adalah efektif area dari core dalam satuan m^2 . Perubahan pada indeks bias refraktif yang berbanding lurus dengan intensitas daya menyebabkan adanya modulasi sinyal pada fasa. Peristiwa perubahan indeks bias refraktif disebut *third harmonic generation* (THG).

Dibawah ini merupakan persamaan modulasi fasa (ϕ) yang diakibatkan perubahan pada indeks bias refraktif dimana λ merupakan panjang gelombang propagasi cahaya dan L adalah panjang serat optik. Persamaan tersebut [5]:

$$(\phi) = \frac{2\pi nL}{\lambda}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2\pi(n_0+n_2)l}{\lambda} \\
 &= \frac{2\pi n_0 l}{\lambda} + \frac{2\pi n_2 l}{\lambda} \\
 &= \phi_0 + \phi_{NL}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Dimana fasa non-linier pada optik[5]:

$$\phi_{NL} = \frac{2\pi n_2 l I}{\lambda} \tag{3}$$

Perubahan fasa tersebut disebabkan oleh material inti serat optik yang memiliki nilai *non-linier susceptibility*. Jika nilai *non-linier susceptibility* semakin besar maka gangguan dari efek non-linier terhadap fasa pulsa optik juga akan besar terpolarisasikan.

Kerr-effect pada non linear memiliki tiga bentuk modulasi yaitu *Self-Phase Modulation (SPM)*, *Cross-Phase Modulation (XPM)* dan *Four-Wave Mixing (FWM)*.

2.3 Parameter Performansi

Terdapat beberapa parameter pengujian pada penelitian ini antara lain yaitu *Signal to Noise Ratio*, *Q factor*, BER, *Link Power Budget* dan *Rise Time Budget*. Berikut ini persamaan yang dapat mempresentasikan LPB pada jaringan serat optik.

$$atot = L.af + Nc.ac + Ns.as + Sp \tag{4}$$

Nilai SNR (*Signal to Noise Ratio*) dapat dinyatakan menggunakan persamaan (5).

$$SNR = \frac{(Pr.R.M)^2}{2.q.Pr.R.M^2.F(M).Be + \frac{4.K_B.T.Be}{R_L}} \tag{5}$$

Untuk menghitung nilai *Q factor* dapat dinyatakan pada persamaan (6).

$$Q = \frac{10 \frac{SNR}{20}}{2} \tag{6}$$

Nilai BER dapat dinyatakan pada persamaan (7) bila nilai *threshold* diatur ke nilai optimumnya[6].

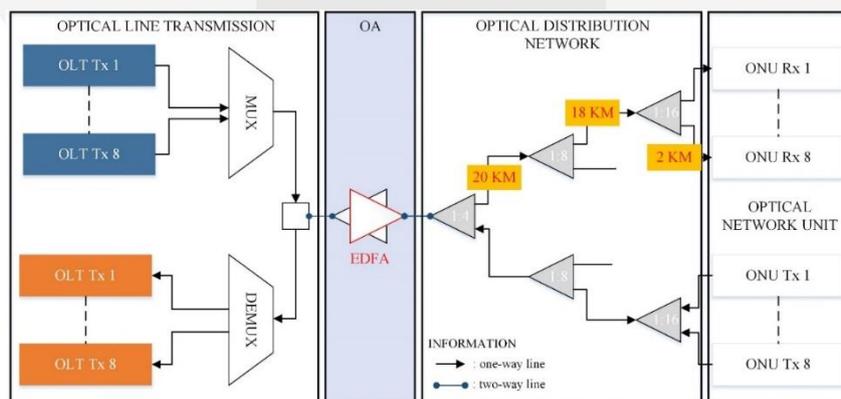
$$BER = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \cong \frac{exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right)}{Q\sqrt{2\pi}} \tag{7}$$

Untuk menghitung RTB (*Rise Time Budget*) dapat menggunakan persamaan (9).

$$Tsystem = \sqrt{Ttx^2 + Tmat^2 + Tmod^2 + Twg^2 + Trx^2} \tag{9}$$

3. Perencanaan Simulasi Sistem

3.1 Model Sistem 40 Gbps NG-PON2



Gambar 1 Blok Diagram NG-PON stage 2.

Perancangan model sistem pada mengacu pada sistem yang telah diterapkan oleh standar ITU-T. Pada blok diagram diatas menjelaskan bahwa topologi NG-PON2 memiliki 3 blok penyusun utama dan 1 blok khusus (tambahan). Blok penyusun utama terdiri atas blok OLT (*Optical Line Transmission*), blok ODN (*Optical Distribution Network*), dan blok ONU (*Optical Network Unit*). Sedangkan blok khusus hanya terdapat penguat atau OA (*Optical Amplifier*). Penambahan blok OA ini digunakan untuk kasus khusus dimana jaringan NG-PON2 memiliki jarak transmisi ≥ 40 Km.

3.2 Setup Simulasi Sistem NG-PON2

Pada saat melakukan perancangan model sistem dibutuhkan nilai-nilai parameter NG-PON2. Parameter jaringan tersebut diambil dari berbagai referensi penelitian maupun jurnal terkait yang mendeskripsikan parameter NG-PON2 seperti halnya optical link transmission, bit rate ratio, frequency plan, gain dan lain sebagainya. Berikut ini beberapa parameter yang sudah sesuai dengan ITU-T G.989.2 dan G.989.1.

Simulasi dilakukan pada *software* dengan melakukan perubahan pada parameter instrumen yang sudah ada. Masing-masing parameter simulasi diambil dari beberapa parameter NG-PON2 sesuai dengan standar dan penelitian terkait. Sedangkan perhitungan performasi pada simulasi dilakukan menggunakan instrumen pengukuran antara lain BER Analyzer untuk mengukur nilai BER dan Q factor, Optical Spektrum Analyzer untuk melihat perubahan spektrum frekuensi, WDM Analyzer untuk mengukur nilai OSNR, dan Optical Power Meter untuk mengukur nilai daya terima. Berikut parameter simulasi penelitian ini.

Tabel 1 Parameter OLT.

<i>Item</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>
<i>Transmitter</i>		
<i>Launch power</i>	dBm	3
<i>Bit rate</i>	Gbps	5 – 10
<i>Line code</i>	-	NRZ
<i>Wavelength band</i>	nm	1596.34 - 1609.19
<i>Number of channel</i>	-	16
<i>Channel spacing</i>	GHz	100
<i>Receiver</i>		
<i>Bandwidth Rx</i>	GHz	20
<i>Wavelength band</i>	nm	1532,68 - 1538,19
<i>Gain</i>	-	10
<i>Responsivity</i>	A/W	1
<i>Ionization ratio</i>	-	0,9

Tabel 2 Parameter ONU.

<i>Item</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>
<i>Transmitter</i>		
<i>Launch power</i>	dBm	5
<i>Bit rate</i>	Gbps	2.5
<i>Line code</i>	-	NRZ
<i>Wavelength band</i>	nm	1532.68 – 1544,53
<i>Number of channel</i>	-	16
<i>Channel spacing</i>	GHz	100

<i>Receiver</i>		
<i>Bandwidth Rx</i>	GHz	20
<i>Wavelength band</i>	nm	1596.25 – 1609.19
<i>Gain</i>	-	10
<i>Responsivity</i>	A/W	1
<i>Ionization ratio</i>	-	0,9

Tabel 3 Parameter AWG Mux/Demux.

<i>Item</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>
<i>AWG Mux/Demux</i>		
<i>Number of input Mux</i>	-	4 – 8
<i>Number of output Demux</i>	-	4 – 8
<i>Frequency Mux</i>	THz	187.8 – 187.5
<i>Frequency Demux</i>	THz	195.6 – 195.3
<i>Bandwidth</i>	GHz	10 – 40
<i>Frequency spacing</i>	GHz	100

Tabel 4 Parameter optical amplifier.

<i>Type</i>	EDFA
<i>Wavelength</i>	1528-1562 & 1570-1605 nm
<i>EDFA range</i>	5 m
<i>Pump Power</i>	100 mW
<i>Wavelength Pump</i>	1480 nm
<i>Gain</i>	13 – 28
<i>Noise figure</i>	< 6.5 dB
<i>Saturated output power</i>	14 – 23 dBm
<i>Operating temperature</i>	5 – 70 °C

Tabel 5 Parameter ODN.

<i>Item</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>
<i>Optical Fiber</i>		
<i>Reference wavelength</i>	nm	1550
<i>Fiber Type</i>	-	ITU-T G.652 C/D
<i>Length</i>	km	40
<i>Attenuation</i>	dB/km	0.3
<i>Splitter</i>		
<i>Splitter output ports</i>	-	4, 8, dan 16
<i>Insertion Loss</i>	dB	5,8 – 14,4

3.3 Skenario Penelitian

Skenario pertama atau skenario model sistem yaitu merubah model sistem simulasi menjadi 2 model sistem yang masing-masing model sistem memiliki parameter *bitrate* dan jumlah kanal berbeda. Skenario kedua atau skenario pembangkitan efek non-linier yaitu skenario yang merubah parameter non-linier pada saat simulasi, perubahan tersebut antara lain nilai n_2 dan penggunaan *self-phase modulation* serta *cross-phase modulation*. Berikut ini penjelasan dari masing-masing skenario.

A. Skenario Model Sistem

Skenario model sistem bertujuan untuk mengetahui dampak dari non-linier terhadap 2 jaringan NG-PON2 yang dibedakan oleh *bitrate* dan jumlah kanal. Pada tabel 6 menjelaskan masing-masing parameter dari ke-dua jaringan NG-PON2 sebagai berikut.

Tabel 6 Skenario Model Sistem NG-PON2

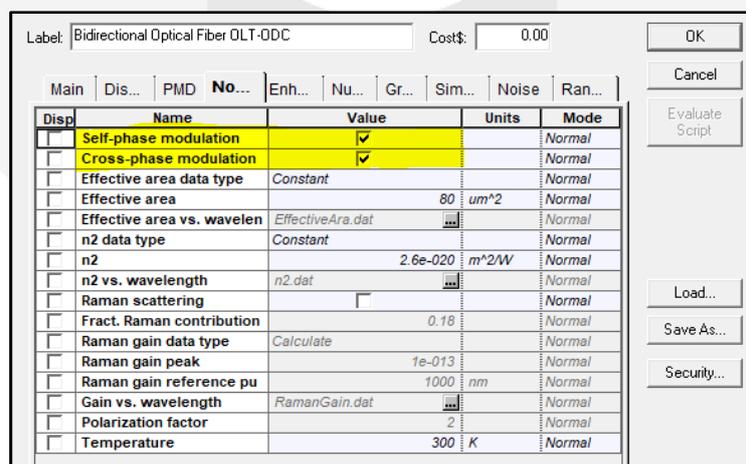
Model Sistem	Bitrate (Gbps)	Split ratio	Jumlah kanal
1	10	1:256	4
2	5	1:256	8

Berdasarkan pada standar ITU-T maksimal *split ratio* pada NG-PON2 adalah 1:256. Sedangkan untuk jumlah kanal yang digunakan yaitu 4 – 8 lamda dengan catatan bahwa kanal 5 – 8 merupakan kanal *opsional*. Maka pada penelitian ini masing-masing model sistem tersebut akan diuji pada simulasi efek non-linier.

B. Skenario Pembangkitan Efek Non-Linier

Pembangkitan efek non-linier berupa FWM, SPM dan XPM dapat di presentasi pada rumus persamaan 1 Dimana n adalah indeks bias refraktif, $n_0 = 1,5$ (*linier refractive index*) dan $n_2 = 3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ (*non-linier refractive index*) dan I = Intensitas daya pada optik. Dari persamaan tersebut mengatakan bahwa ketika sebuah pulsa cahaya dengan intensitas tinggi masuk kedalam fiber mengakibatkan beberapa interaksi. Dari interaksi tersebut menyebabkan sinyal optik pada saat penjalaran di medium berbeda mengalami perubahan. Jika perubahan tersebut terjadi dikarenakan oleh n_2 yaitu pada index biar non-linier maka ini yang disebut sebagai efek non-linier. Selain itu, sesuai dengan hipotesa bahwa efek non-linier dapat dipengaruhi oleh spasi kanal maka simulasi diberikan nilai spasi kanal yang berbeda yaitu 200 GHz, 150 GHz, 100 GHz, dan 50 Ghz. Sehingga penelitian ini akan menggunakan 2 skenario pembangkitan efek non-linier, berikut skenarionya.

Skenario SPM dan XPM dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui perubahan spektrum frekuensi di jarak 40 km. Selain itu, pada jarak jarak tertentu akan dilakukan pengukuran daya sinyal informasi menggunakan optical power meter. Hal tersebut dilakukan dengan merubah parameter non-linier pada kabel bidirectional seperti pada gambar 2.



Gambar 2 Perancangan Simulasi Non-Linier SPM, XPM dan FWM.

Selanjutnya dikarenakan spasi kanal pada arsitektur TWDM memiliki range 50 – 200 Ghz, maka pada penelitian ini standar NG-PON2 menggunakan spasi kanal 100 GHz. Namun untuk keperluan penelitian hal tersebut dapat diubah agar dapat mengetahui dampak dari efek non-linier terhadap spasi kanal yang sempit.

Setelah melakukan perubahan parameter SPM dan XPM pada fiber optik maka simulasi non-linier dilanjutkan pada skenario 2. Tujuan skenario indeks bias non-linier yaitu untuk melihat berapa banyak lambda yang bertahan pada BER 10^{-3} setelah dilakukan pengolahan pada indeks bias core melalui persamaan dibawah ini[7].

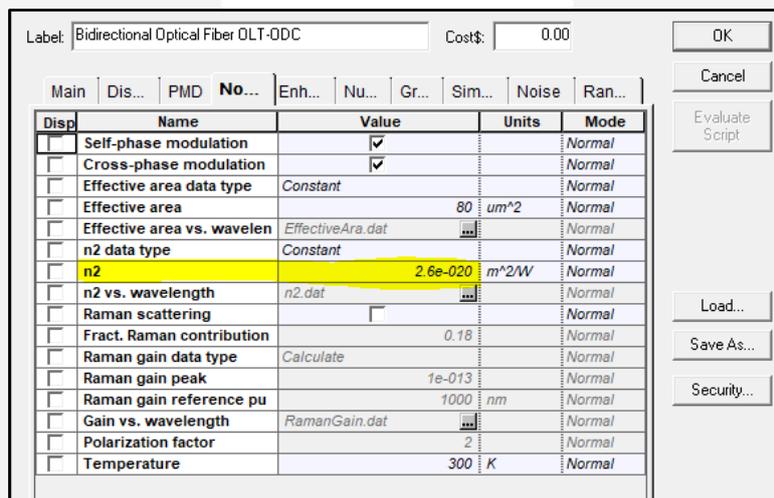
$$n_2 = \frac{48\pi^2}{cn^2} X_{1111} \quad (10)$$

Berdasarkan persamaan 3.5 n_2 didapatkan dari pengaruh indeks bias (n) = 1,4 dan *third-order nonlinear susceptibility* (X_{1111}) = $6 \times 10^{-15} \text{ m}^3 \cdot \text{s/W}$. Sedangkan pada tabel 7 besarnya indeks bias non-linier memiliki beberapa kriteria medium sesuai dengan orde pada n_2 (indeks bias core).

Tabel 7 Kriteria indeks bias non-linier[14].

Range Orde (m^2/W)	Medium
$10^{-20} - 10^{-18}$	Gelas
$10^{-18} - 10^{-11}$	Gelas yang dikotori
$10^{-14} - 10^{-12}$	Material Organik
$10^{-12} - 10^{-6}$	Semikonduktor

Pada gambar 3 menampilkan skenario 2 melakukan simulasi dengan merubah n_2 (indeks bias non-linier) seperti ditandai dengan warna kuning. Diharapkan pada penelitian ini analisis dari perubahan tersebut membuktikan bahwa efek non-linier terjadi dan mengakibatkan perubahan pada daya maupun spektrum frekuensi jaringan NG-PON2.



Gambar 3 Perancangan simulasi indeks bias non-linier.

4. Analisis Simulasi Pengaruh Non-Linier pada Sistem NG-PON2

Sistem NG-PON2 dengan efek non-linier merupakan sistem standar dari NG-PON2 yang sudah ditambahkan parameter non-linier pada serat optik. Parameter tersebut meliputi *self-phase modulation*, *cross-phase modulation* dan indeks bias non-linier (n_2). Berikut ini analisa dari skenario efek non-linier.

4.1 Analisa SPM dan XPM

Berdasarkan simulasi yang sudah dilakukan masing-masing menunjukkan rata-rata nilai Q factor mengalami perubahan yang diakibatkan adanya perubahan spasi kanal. Perubahan tersebut tidak terlalu signifikan mempengaruhi performansi NG-PON2 karena nilai Q factor terendah yaitu 5.15734. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sesuai dengan ketentuan ITU-T nilai spasi kanal terbaik untuk NG-PON2 berada pada 100 GHz dengan pengaruh non-linier lebih sedikit dari spasi kanal lainnya.

Tabel 8 Perbandingan rata-rata *Q factor* skenario SPM dan XPM dengan simulasi tanpa efek non-linier.

Model Sistem	Hasil Skenario SPM & XPM				Hasil Simulasi tanpa Non-linier			
	Downstream		Upstream		Downstream		Upstream	
	Average	Min	Average	Min	Average	Min	Average	Min
1	6.4882	5.1573	9.6457	6.8213	6.4170	5.0865	9.6554	6.8313
2	6.8278	5.7638	8.8198	7.5303	6.8009	5.7727	8.8096	7.5561

Tabel 8 memperlihatkan nilai rata-rata *Q factor* tidak terlalu signifikan berubah. Perbedaan nilai *Q factor* jika dirata-ratakan hanya mencapai < 0.07. Kembali lagi pada dasar teori bahwa SPM disebabkan oleh indeks bias non-linier pada orde ketiga. Sedangkan XPM akan sangat merusak pada lamda dengan jumlah besar, namun pada NG-PON2 jumlah lambda terbanyak yaitu 8 lamda dengan spasi lamda 100 GHz.

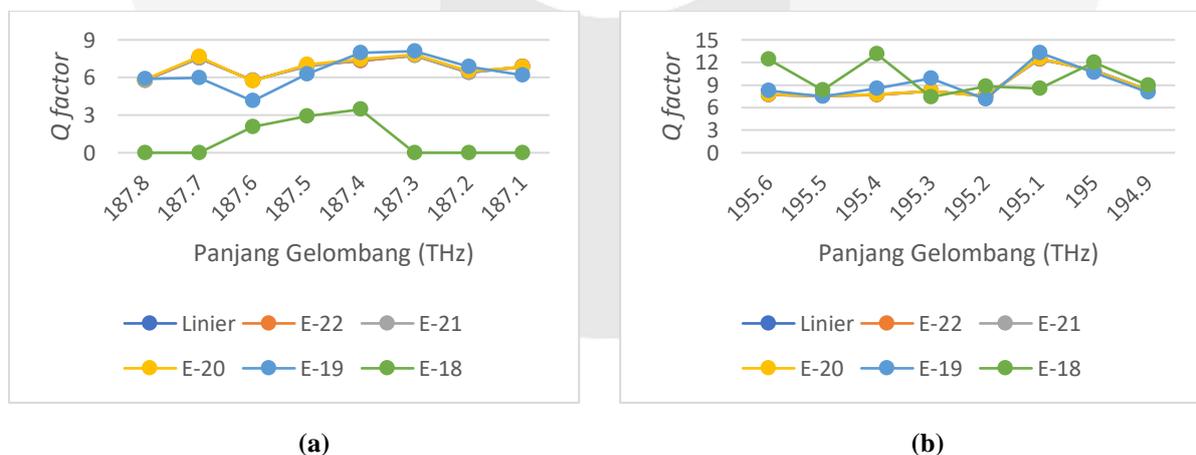
4.2 Analisa Indeks Bias Non-Linier (n_2)

Berdasarkan persamaan 10 diperoleh nilai $n_2 = 4.8341 \times 10^{-21}$, maka penelitian ini melakukan perubahan n_2 dengan orde 10^{-22} , 10^{-21} , 10^{-20} , 10^{-19} , dan 10^{-18} . Berikut grafik hasil perbandingan pada kanal spasi 100 GHz model sistem 1.



Gambar 4 (a) Perbandingan nilai *Q factor* (downstream) terhadap perubahan n_2 (b) Perbandingan nilai *Q factor* (upstream) terhadap perubahan n_2 .

Pada gambar 4 dapat dilihat penurunan kualitas jaringan terjadi pada orde n_2 sebesar 10^{-18} . Selain itu, penurunan performansi jaringan terjadi paling banyak pada arah downstream. Berdasarkan data hasil simulasi kanal NG-PON2 yang paling sering mengalami penurunan daya terdapat pada frekuensi 187.8 dan 187.7. Kanal tersebut terbukti pada setiap spasi kanal memiliki *Q factor* sebesar 0 pada orde n_2 sebesar 10^{-18} .



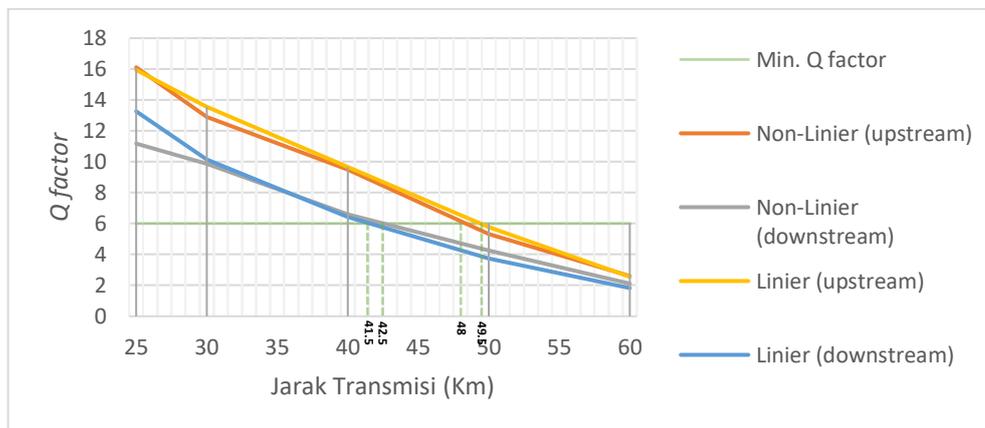
Gambar 5 (a) Perbandingan nilai *Q factor* (downstream) terhadap perubahan n_2 (b) Perbandingan nilai *Q factor* (upstream) terhadap perubahan n_2 .

Pada gambar 5 simulasi terhadap model sistem 2 menghasilkan penurunan performansi terjadi pada orde 10^{-18} . Hal tersebut disebabkan daya terima pada masing-masing kanal arah *downstream* sebesar > 29 dBm. Sedangkan orde 10^{-19} mengalami penurunan performansi pada kanal tertentu dengan nilai Q factor > 4 . Pada orde 10^{-22} sampai dengan 10^{-20} performansi jaringan model sistem 2 masih dikatakan sesuai dengan standar ITU-T. Pada simulasi model 2 dapat diketahui rata-rata penurunan performansi terjadi pada kanal 187.8, 187.7, 187.2 dan 187.1 pada orde 10^{-18} di setiap kanal spasi.

Setelah melakukan simulasi hasil yang didapatkan pada setiap spasi kanal berbeda menghasilkan batas performansi sistem berbeda-beda. Namun, penurunan performansi NG-PON2 terjadi pada orde $n_2 = 4.8341 \times 10^{-18}$ di model sistem 1 maupun model sistem 2. Performansi terbaik untuk NG-PON2 terdapat pada spasi kanal 100 GHz. Rata-rata tertinggi Q factor pada model sistem 2 sebesar 9.95844. Selain itu nilai BER tertinggi berada pada kanal 195.4 sebesar 1.03406×10^{-50} terjadi pada orde $n_2 = 4.8341 \times 10^{-22}$.

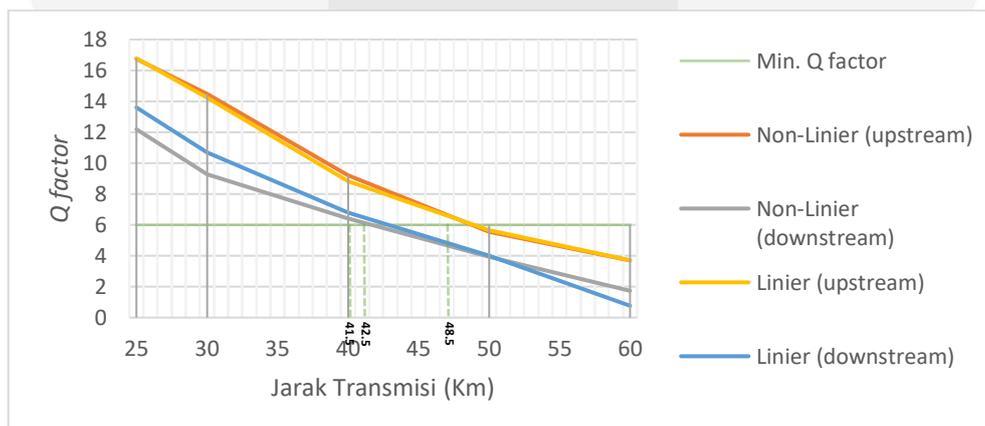
4.3 Perbandingan sistem NG-PON2 berdasarkan jarak transmisi

Pada tahap ini, akan ditampilkan perbandingan hasil simulasi sistem NG-PON2 berdasarkan jarak transmisi dari 25 km sampai dengan 60 km. Perbandingan sistem tersebut untuk mengetahui jarak maksimum performansi antara sistem NG-PON2 dengan efek non-linier dengan tanpa efek non-linier. Simulasi menggunakan spasi kanal 100 GHz dan nilai n_2 (dengan efek non-linier) = 4.8341×10^{-19} . Berikut grafik hasil perbandingan tersebut.



Gambar 6 Perbandingan Q faktor terhadap jarak maksimum sistem 1 NG-PON2.

Pada gambar 6 menunjukkan nilai maksimum performansi sistem 1 NG-PON2 dengan efek non-linier berada pada jarak maksimum 48 km (*upstream*) dan 42.5 km (*downstream*), sedangkan performansi sistem 1 NG-PON2 tanpa efek non-linier memiliki jarak maksimum 49.5 km (*upstream*) dan 41.5 km (*downstream*). Berdasarkan data tersebut, efek non-linier cukup memberikan pengaruh besar terhadap NG-PON2 sistem 4 lambda pada arah *upstream*. Selanjutnya, berikut ini grafik perbandingan nilai performansi model sistem 2.



Gambar 7 Perbandingan Q faktor terhadap jarak maksimum sistem 2 NG-PON2.

Berdasarkan pada gambar 7 sistem 2 NG-PON2 dengan efek non-linier memiliki nilai maksimum performansi pada jarak transmisi sebesar 41.5 km (*downstream*), sedangkan NG-PON2 tanpa efek non-linier memiliki jarak maksimum sebesar 42.5 km (*downstream*). Sistem 2 dengan efek non-linier dan tanpa efek non-linier pada arah *upstream* menunjukkan jarak maksimum sebesar 48.5 km. Selain itu, pada gambar 4.10 dapat dilihat bahwa pada jarak 25 km sampai dengan 40 km memiliki pengaruh non-linier cukup besar terhadap performansi NG-PON 2 dengan 8 kanal *downstream*.

Selain itu, pada gambar 6 dan 7 kedua model sistem yang telah mengalami efek non-linier dapat dilihat bahwa penurunan rata-rata Q faktor berbanding lurus dengan jarak transmisi. Sehingga, jika NG-PON2 memiliki jarak transmisi lebih dari 40 km maka dampak dari efek non-linier terhadap performansi sistem tidak terlalu signifikan.

5. Hasil Penelitian

Berdasarkan pada simulasi penelitian yang sudah dilakukan terhadap NG-PON2, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Simulasi NG-PON2 tanpa efek non-linier menunjukkan nilai BER terendah pada model sistem 1 di kanal 185.7 THz sebesar 1.8889310^{-07} dengan nilai Q factor sebesar 5.08656.
2. Pada skenario XPM dan SPM nilai rata-rata Q factor tidak menunjukkan perubahan signifikan, perbedaan nilai Q factor hanya mencapai < 0.07 . Sehingga efek non-linier dari XPM dan SPM tidak mengakibatkan kerusakan pada setiap kanal NG-PON2.
3. Pada skenario indeks bias non-linier (n_2) performansi jaringan NG-PON2 menurun signifikan pada orde 10-18, sehingga dapat disimpulkan bahwa indeks bias non-linier dengan orde besar dapat mengakibatkan kerusakan pada setiap kanal.
4. Berdasarkan hasil simulasi pembangkitan efek non-linier spasi kanal terbaik untuk mengatasi Kerr Effect sebesar 100 GHz, sehingga spasi kanal tersebut menjadi parameter performansi terbaik NG-PON2 dari pengaruh non-linier serat optik.
5. Berdasarkan jarak maksimum, sistem NG-PON2 dengan efek non-linier hanya dapat bertahan pada jarak kurang dari 48.5 km (*upstream*) dan 42.5 km (*downstream*). Sehingga semakin jauh jarak transmisi NG-PON2 efek non-linier dapat menurunkan performansi sistem namun tidak terlalu signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Simon, Gaël (2015). *Stimulated Raman Scattering Impairments Induced by NGPON2 Introduction in Co-existing PONs*. Perancis : Telecom ParisTech
- [2] Aldila, Paundra (2015). Analisis Efek Non Linier di Sistem CWDM Pada Sistem Komunikasi Serat Optik. Bandung : Universitas Telkom
- [3] Luthfi, Muhammad (2015). Simulasi dan Analisis Efek *Cross-Phase Modulation* Pada Performansi *Link DWDM* dengan *Chromatic Dispersion Compensation*. Bandung : Universitas Telkom
- [4] ITU-T. (2008). *Gigabit-capable passive optical networks(GPON): General characteristics*. ITU-T G.984.1.
- [5] Wiley, John. (1995). *High Capacity Optical Transmission Explained*. United Kingdom : University of Essex.
- [6] R. M. Arpan, “*EDFA EFFECT ON 160 G TWDM-PON SYSTEM BASED ON NG-PON2*”, Bandung, Indonesia: Telkom University, 2017.
- [7] B. Pamukti, “*Simulation and Analysis Nonlinear effects on DWDM Link with Multi Spacing and Multi Lamda using Soliton Pulse Transmission*”, Bandung, Indonesia: Telkom University, 2014.