

Analisis Parameter *Signal to Noise Ratio* dan *Bit Error Rate* dalam *Backbone* Komunikasi Fiber Optik Segmen Lamongan-Kebalen

Rima Fitria Adiati, Apriani Kusumawardhani, dan Heru Setijono

Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

email: apri@ep.its.ac.id

Abstrak—Fiber optik telah menjadi solusi atas meningkatnya kebutuhan transfer data dengan kapasitas tinggi. Dengan 4.3 juta pelanggan dan proyeksi pertumbuhan sebesar 18.3% pertahun, sektor *fixed broadband* PT Telkom Indonesia bergantung pada kualitas infrastruktur *backbone* fiber optik, yang direpresentasikan melalui parameter *Signal to Noise Ratio* (SNR) dan *Bit Error Rate* (BER). Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis terhadap parameter SNR dan BER pada segmen *backbone* fiber optik antara STO Lamongan 1 dan STO Kebalen, Surabaya. SNR merupakan perbandingan logaritmik antara daya sinyal dan *noise* yang diterima *receiver*, sedangkan BER adalah ukuran intensitas terjadinya *error* pembacaan bit data. Pengukuran di *receiver* STO Kebalen menghasilkan BER 10^{-23} . Analisa SNR dan BER secara keseluruhan dilakukan melalui simulasi software *Optisystem*. *Backbone* 100 Gbps, 84 km dengan sistem DWDM 10 *channel* ini disimulasikan pada frekuensi 193.1 - 194 THz dengan *spacing* 100 GHz antar *channel*. Hasil simulasi menunjukkan nilai SNR dan BER memenuhi standar dan dipengaruhi frekuensi atau panjang gelombang di setiap *channel*. SNR maksimum adalah 72.37 pada 193.6 THz dan nilai BER minimum yaitu 2.05×10^{-30} pada 193.5 THz. Untuk mendapatkan nilai BER optimum yaitu 10^{-12} , dilakukan pemasangan *dispersion compensating fiber* serta penambahan daya *transmitter* pada *channel* berfrekuensi 193.1, 193.2, 193.9, dan 194 THz.

Kata Kunci—BER, DWDM, *Optisystem*, SNR.

I. PENDAHULUAN

UNTUK mampu menyokong peningkatan kebutuhan akses internet masyarakat yang meningkat tajam baik pada sektor *mobile* dan *fixed*, diperlukan sistem komunikasi fiber optik yang didukung jaringan *backbone* dengan kapasitas tinggi. Hingga saat ini, *backbone* jaringan fiber optik telah mampu mengirimkan data dengan bandwidth total 4 terabit per sekon. Nilai tersebut diperoleh melalui 100 *channel* DWDM dengan bit rate 4 Gb/s pada setiap *channel*-nya.[1]

Mengingat pentingnya *backbone* jaringan sebagai infrastruktur komunikasi, maka perlu dilakukan desain dan monitoring dengan memperhatikan berbagai hal. *Signal to noise Ratio* (SNR), *Bit Error Rate* (BER), dan *Q-factor* merupakan parameter kunci yang menentukan performa suatu *channel* komunikasi [2]. Tujuan utama dari suatu transmisi sinyal optik adalah untuk mencapai nilai BER yang diinginkan diantara dua *node* atau titik dalam jaringan. Banyak hal dapat menyebabkan *loss* dalam sistem komunikasi fiber optik

diantaranya atenuasi (absorpsi, *scattering*, *bending loss* [3]) dan distorsi.

Untuk dapat mengetahui parameter yang mempengaruhi BER dan SNR, simulasi dilakukan menggunakan software *Optisystem*. Beberapa referensi telah menunjukkan kemudahan penggunaan software tersebut untuk mendesain dan menganalisa suatu jaringan optik [4][5][6]. Pada studi ini, dilakukan pengukuran dan simulasi parameter SNR dan BER pada segmen *backbone* fiber optik STO Lamongan 1 -STO Kebalen sehingga dapat diketahui performa jaringan tersebut.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Dasar Teori

1) *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM)

DWDM merupakan suatu teknik komunikasi *multichannel*, yaitu beberapa *channel* optik dengan panjang gelombang atau frekuensi berbeda berada dalam satu kabel fiber optik. Kerapatan frekuensi (*spacing*) merupakan hal yang membedakan DWDM terhadap jenis WDM yang lain. Berdasarkan standar ITU-T G.671 sistem WDM dibagi menjadi 3 [7] yaitu

- Coarse* WDM. Menggunakan *spacing* antar *channel* antara 1000 GHz (8 nm) dan 50 nm.
- Dense* WDM. Memiliki *spacing* kurang dari 1000 GHz
- Wide* WDM. Memiliki *spacing* sangat lebar yaitu lebih dari 50 nm.

2) *Signal to Noise Ratio* (SNR)

Pada semua jenis sistem transmisi data, *signal to noise ratio* (SNR) merupakan parameter yang harus diperhatikan. SNR digunakan untuk menunjukkan seberapa banyak *noise* mengganggu sinyal yang ditransmisikan. Dengan kata lain, SNR membandingkan daya sinyal yang diinginkan terhadap *background noise*.

Untuk mengukur SNR, diperlukan instrumen *Optical Spectrum Analyser* (OSA). Nilai OSNR tidak dipengaruhi oleh format data, bentuk pulsa, atau bandwidth sistem, melainkan hanya daya sinyal dan *noise* yang terbaca di OSA [8], yaitu:

$$\text{SNR} = 10 \log \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \quad (1)$$

SNR dapat pula dinyatakan dalam variabel *Q-factor*. *Q-factor* merepresentasikan optical SNR untuk komunikasi optik biner/digital dan memudahkan analisis performa sistem [8].

Persamaan dibawah digunakan untuk dapat memberikan hubungan antara OSNR, *Q-factor*, dan BER.

$$Q = \frac{2\sqrt{2} OSNR}{1+\sqrt{1+4OSNR}} \quad (2)$$

3) *Bit Error Rate (BER)*

Sinyal optik yang dikirimkan melalui jaringan FTTH berupa pulsa-pulsa cahaya yang masing-masing membawa satu bit data [8]. Tidak semua bit dapat terkirim sempurna. BER didefinisikan sebagai jumlah terjadinya *error* tiap jumlah bit data terkirim [9] pada suatu sistem digital. Apabila jumlah bit error adalah N_E dan jumlah bit total terkirim adalah N_T maka[10]

$$BER = \frac{N_E}{N_T} \quad (3)$$

Pada jaringan komunikasi optik secara umum, nilai BER yang harus dipenuhi adalah BER $10^{-6} - 10^{-12}$. Artinya, tiap 10^9 hingga 10^{12} bit data yang dikirim, *error* yang terjadi hanyalah pada 1 bit. BER juga disebut dengan *error probability* (P_e), atau probabilitas munculnya *error* dalam transmisi data. Dalam proses transmisi, bit tertentu memiliki amplitudo sinyal yang terlalu dekat dengan *threshold* sehingga tidak dapat dibedakan nilainya dengan benar.[11]. Nilai BER dapat pula dinyatakan dalam *Q-factor* melalui persamaan berikut [10].

$$BER = P_e(Q) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-Q^2/2}}{Q} \quad (4)$$

B. *Metodologi Penelitian*

Metodologi yang digunakan terdiri dari beberapa tahap hingga menghasilkan analisa data nilai BER dan SNR dari *backbone* fiber optik. Langkah utama dalam studi ini adalah pengambilan data spesifikasi jaringan *backbone* dan simulasi. Gambar 1 merupakan diagram alir dari penelitian ini.

Tabel 1 berikut adalah hasil dari pengambilan data berupa spesifikasi komponen jaringan yang akan digunakan dalam simulasi.

Tabel 1.

Spesifikasi backbone Lamongan-kebalen	
Komponen	Spesifikasi
<i>Optical Transport Network (OTN) Platform</i>	Huawei Optix OSN 8800 T32
<i>Bit Rate</i>	10 Gbps, 40 Gbps, atau 100 Gbps
<i>Wavelength range</i>	192.1 - 196.05 THz (Band-C, ITU-T G.694.1)
<i>Bit rate maksimum tiap channel</i>	100 G (OTU4)
<i>Fiber interface</i>	G.652, G.653, G.654, G.655
<i>Fiber optik</i>	Voksel G.655C
<i>Atenuasi maksimum</i>	0.3 dB/km (estimasi termasuk konektor dan <i>splice loss</i>)
<i>Dispersi kromatik</i>	18 Ps/(nm.km)
<i>Dispersion slope</i>	0.095 Ps/(nm ² .km)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

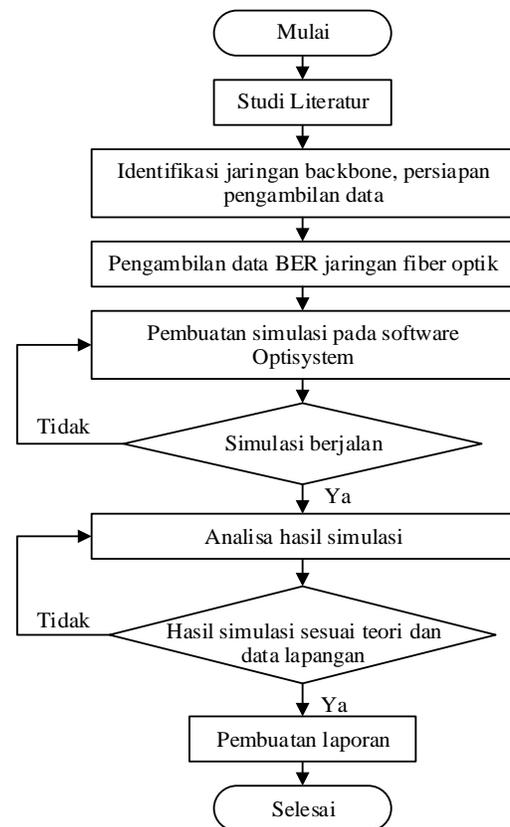
A. *Hasil Pengukuran Bit Error Rate (BER)*

Pengukuran BER menggunakan instrumen BER Tester dilakukan selama 24 jam untuk memenuhi persyaratan PT

Telkom Indonesia terkait uji terima *backbone* jaringan. Pengukuran dilakukan di *slot 20, node ID 25* dengan *board type T210*. Jenis pengukuran ini dikategorikan sebagai *traffic generation and monitoring*, artinya nilai BER dipantau secara *sampling* pada salah satu *channel* selama 24 jam untuk mengetahui apakah suatu *backbone* memenuhi nilai *pass*. Dalam persyaratan uji terima PT Telkom Indonesia, nilai BER yang memenuhi nilai *pass* adalah $BER10^{-23}$. Dengan kata lain, setiap 10^{23} bit data terkirim, terdapat 1 bit data yang *error* saat tiba di *receiver*.

B. *Simulasi Backbone Segmen Lamongan-Kebalen*

Simulasi dalam studi ini dilakukan menggunakan software *Optisystem*. Parameter-parameter yang digunakan dalam simulasi mengikuti spesifikasi komponen jaringan yang diukur sebelumnya. Secara global, parameter yang digunakan dalam simulasi diringkas dalam tabel 2 sedangkan rancangan visual dalam *software* ditunjukkan oleh gambar 2.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Backbone jaringan fiber optik STO Lamongan 1 - STO Kebalen merupakan suatu *link* dengan panjang 84 km. Parameter pada tabel 2 digunakan sebagai dasar pembuatan simulasi. Berdasarkan kondisi nyata, digunakan 10 *channel* DWDM dengan *bit rate* masing-masing *channel* sebesar 10 Gbps. Panjang gelombang tiap *channel* diatur melalui parameter frekuensi CW laser. Komponen CW laser menggunakan frekuensi 193.1 THz, atau setara panjang gelombang 1552.52 nm.

Berdasarkan standar ITU-T G.671[12], pada simulasi ini digunakan DWDM dengan *spacing* sebesar 100 GHz. Artinya,

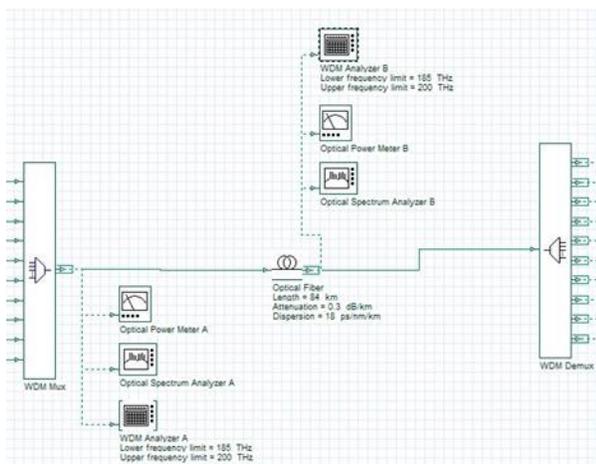
setiap *channel* pada sistem ini akan memiliki selisih frekuensi sebesar 100 GHz atau setara panjang gelombang 0.8 nm. Pengaturan ini dapat dilakukan melalui menu *parameter groups* pada *software* optisystem.

Transmitter terdiri atas 4 bagian yaitu *bit sequence generator*, *NRZ pulse generator*, *CW laser*, dan *MZ Modulator*. *Receiver* memiliki komponen utama berupa *photodetector*, *filter*, dan *regenerator*. Alat ukur diantaranya *WDM analyzer*, *optical spectrum analyzer (OSA)*, *optical power meter (OPM)*, dan *BER analyzer* dipasang pada sistem.

Tabel 2.

Parameter dalam simulasi

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Global parameter</i>		
Bit rate	10 ⁹	Bit/s
Sequence length	128	Bit
Sampel per bit	64	
Jumlah channel	10	
<i>Laser Source</i>		
Frequency	193.1 - 194	THz
Power	20	dBm
<i>Fiber Optik</i>		
Atenuasi maksimum	0.3	dB/km
Dispersi kromatik	18	ps/(nm.km)
Dispersion slope	0.090	ps/(nm ² .km)
PMD coefficient	0.2	ps/km
Effective Area	80	µm ²
<i>Receiver</i>		
Dark current	10	nA



Gambar 2. Simulasi link fiber optik dalam software

C. Analisis Hasil Simulasi Signal to Noise Ratio (SNR) dan Bit Error Rate (BER)

Dua alat ukur penting yang berkaitan dengan SNR adalah OSA dan *WDM analyzer*. OSA menunjukkan grafik spektrum cahaya sedangkan *WDM analyzer* menghasilkan data berupa tabel. Data tersebut diringkas pada gambar 3. Simulasi menunjukkan bahwa nilai SNR pada seluruh channel telah memenuhi rekomendasi untuk *link backbone* 10 Gbps yaitu minimal 25 dB. SNR juga cukup stabil diantara nilai 50 hingga 56, dengan kenaikan cukup tajam pada frekuensi 193.5 dan 193.6 THz. Nilai SNR tertinggi diperoleh pada *channel* 6 dengan SNR 72.3721.

Bit error rate adalah salah satu cara untuk mengetahui kualitas sinyal yang dikirimkan melalui sistem komunikasi

fiber optik. Melalui *BER analyzer* dalam *software* optisystem, dapat dihasilkan nilai BER, sekaligus grafik *Q-factor* dan *eye diagram*. Sama halnya pada SNR, BER dianalisa dalam tiga kondisi yaitu kondisi normal, saat penambahan DCF, dan saat penambahan daya transmitter. Hasil simulasi ditunjukkan di tabel 4 dan gambar 4.

Pada simulasi untuk menentukan *bit error rate* dihasilkan nilai BER yang bervariasi pada *channel* yang berbeda. Semua frekuensi telah memenuhi standar minimum BER untuk komunikasi fiber optik, walaupun hasilnya tidak sama rata. Grafik BER dengan jelas menunjukkan adanya pengaruh frekuensi atau panjang gelombang terhadap nilai BER. Hal ini berkaitan dengan karakteristik fiber optik dan *receiver* yang memiliki daerah kerja puncak pada 1550 nm. Semakin jauh panjang gelombang dari nilai tersebut, semakin besar *loss* yang terjadi sehingga secara tidak langsung akan menurunkan nilai BER. Namun, atenuasi bukanlah satu-satunya faktor yang mempengaruhi nilai BER.

D. Pengaruh Penambahan Dispersion Compensating Fiber (DCF) dan Daya Transmitter terhadap BER

Berdasarkan hasil simulasi BER pada tabel 3, semua channel telah memenuhi standar komunikasi fiber optik dan dapat beroperasi. Namun demikian, dapat dilakukan upaya untuk menurunkan nilai BER sehingga performa sistem menjadi optimal. Selain simulasi dengan mengikuti kondisi *backbone* yang sebenarnya, simulasi untuk menemukan upaya peningkatan performa *backbone* STO Lamongan 1 - STO Kebalen juga dilakukan. Nilai BER optimum yang direkomendasikan PT Telkom Indonesia untuk *backbone* 100 Gbps adalah 10⁻¹² sehingga terdapat 4 channel yang perlu diperhatikan. Cara pertama yang dilakukan adalah menghilangkan efek dispersi melalui *Dispersion Compensating Fiber (DCF)*, dengan harapan meningkatkan nilai *signal to noise ratio* dan menurunkan nilai *bit error rate* dari sistem secara keseluruhan. Cara kedua adalah dengan menambahkan daya transmitter pada channel yang memiliki nilai BER diatas 10⁻¹².

Dalam simulasi yang dilakukan sebelumnya, parameter dispersi dirancang sesuai dengan *datasheet* fiber optik yaitu sebesar 18 ps/km. DCF harus dapat mengurangi nilai tersebut hingga menjadi nol. Jika dinyatakan dalam suatu persamaan matematis maka [13]:

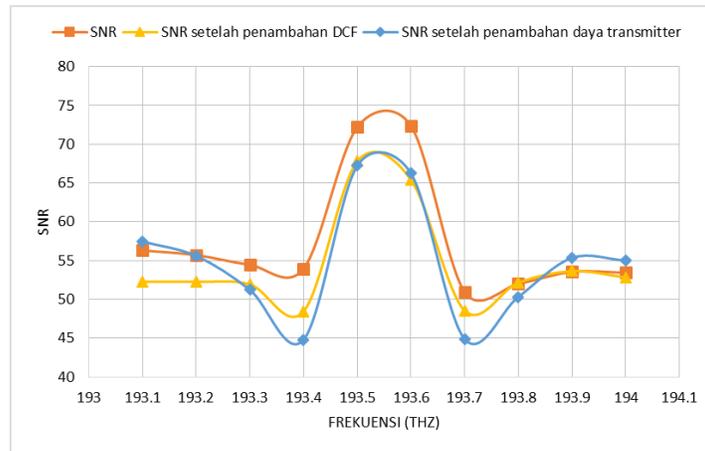
$$(D_{SMF})(L_{SMF}) = -(D_{DCF})(L_{DCF})$$

$$(18 \text{ ps/km})(84 \text{ km}) = -(147 \text{ ps/km})(L_{DCF})$$

Melalui persamaan diatas dihasilkan panjang DCF adalah 10.3 km untuk dispersi -147 ps/km. Berikut adalah data-data karakteristik DCF yang digunakan.

Tabel 3. Perbandingan parameter SMF dan DCF

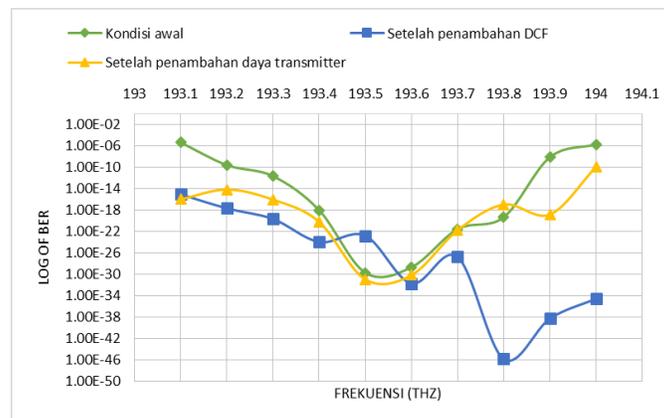
Parameter	SMF	DCF
Panjang fiber (km)	84	10.3
Atenuasi maksimum (dB/km)	0.3	0.24
Dispersi kromatik (ps/(nm.km))	18	-147
Dispersion slope (ps/(nm ² .km))	0.090	0.075



Gambar 3. Hasil simulasi SNR terhadap frekuensi

Tabel 4. Hasil simulasi BER

Channel	Frekuensi (THz)	Panjang gelombang (nm)	Kondisi normal		Penambahan DCF		Penambahan daya transmitter	
			Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER
1	193.1	1552.52	4.35	4.99E-06	7.93	9.76E-16	8.17	1.10E-16
2	193.2	1551.72	6.17	2.89E-10	8.66	2.31E-18	7.68	7.59E-15
3	193.3	1550.92	6.87	2.48E-12	9.16	2.38E-20	8.21	9.97E-17
4	193.4	1550.12	8.75	1.04E-18	10.18	1.17E-24	9.29	6.96E-21
5	193.5	1549.32	11.40	2.05E-30	9.89	1.75E-23	11.65	1.14E-31
6	193.6	1548.51	11.19	2.15E-29	11.79	2.04E-32	11.48	7.21E-31
7	193.7	1547.72	9.61	3.03E-22	10.77	1.88E-27	9.65	1.88E-22
8	193.8	1546.92	9.07	5.16E-20	14.28	1.39E-46	8.45	1.2E-17
9	193.9	1546.12	5.57	8.66E-09	13.00	5.22E-39	8.94	1.64E-19
10	194	1545.32	4.50	2.24E-06	12.33	2.90E-35	6.58	1.43E-10



Gambar 4. Hasil simulasi BER terhadap frekuensi

Penambahan *dispersion compensating fiber* terbukti telah menurunkan *bit error rate* hampir di semua frekuensi, kecuali pada frekuensi 193.5 THz BER naik menjadi 1.75×10^{-23} . Hal ini sesuai dengan teori bahwa DCF berhasil mengurangi efek dispersi namun fiber ini bekerja dalam range spektrum yang luas sehingga efek penurunan dispersi ini tidak merata di semua *channel*. Tampak di gambar 4 nilai BER mengalami penurunan namun tidak seimbang untuk tiap-tiap frekuensi. Namun demikian, tujuan untuk menurunkan nilai BER telah tercapai melalui teknik *symmetrical compensation*.

Salah satu cara lain yang dilakukan untuk menyeimbangkan nilai BER pada semua *channel* adalah dengan memberikan daya tambahan pada *channel* tertentu, dalam hal ini pada

channel 1, 2, 9, dan 10 yang masih memiliki nilai BER diatas 10^{-12} . Hasil dari simulasi menunjukkan grafik yang semakin landai, yaitu nilai BER yang menuju seimbang. Namun dengan simulasi ini masih belum dapat dicapai nilai BER 10^{-12} untuk *channel* 10 walaupun telah dilakukan penambahan power hingga 23 dB. Dengan demikian solusi untuk meningkatkan nilai BER dengan lebih cepat adalah dengan penambahan DCF, walaupun akan memerlukan penambahan komponen tertentu. Solusi berupa peningkatan daya *transmitter* dapat digunakan sebagai solusi mudah dan praktis dalam kasus tertentu.

E. Pengaruh Penambahan Dispersion Compensating Fiber (DCF) dan Daya Transmitter terhadap SNR

Selain dampak langsung pada BER, efek dari penambahan komponen *dispersion compensating fiber* (DCF) dan penambahan daya *transmitter* juga diamati pada SNR. Dengan penambahan 10.3 km DCF dengan konstanta dispersi -147 (ps/nm.km), nilai SNR masih memenuhi standar komunikasi untuk backbone 10 Gbps per channel, yaitu 25 dB. Namun, terjadi penurunan nilai SNR pada hampir semua *channel*. Puncak SNR terdapat pada frekuensi 193.5 THz dengan SNR 67.7853. Hal ini disebabkan DCF memberikan atenuasi tambahan sebesar 0.24 dB/km sehingga daya sinyal yang diterima menurun. Namun sebaliknya, dispersi sinyal yang terjadi pada sebuah sistem transmisi optik tidak mempengaruhi nilai SNR secara langsung karena mempengaruhi transmisi dari segi bit data, bukan daya sinyal.

Lain halnya dengan penambahan DCF, optimasi berupa penambahan power menunjukkan hasil berupa SNR yang lebih tinggi atau sama dengan kondisi awal, namun hanya pada *channel* yang ditambah daya *transmitter*-nya. Justru pada *channel* lain, terjadi penurunan SNR. Penurunan yang paling besar terjadi pada *channel* 4 yaitu dari 53.95 menjadi 44.78. Secara umum SNR tidak banyak dipengaruhi oleh kedua bentuk optimasi, baik penambahan DCF atau daya transmitter sehingga upaya tersebut dapat menjadi solusi untuk memaksimalkan kinerja sistem sesuai kebutuhan nilai BER.

IV. KESIMPULAN

Hal yang dapat disimpulkan dari pelaksanaan studi ini diantaranya :

1. Telah dapat dilakukan analisis terhadap parameter *Signal to Noise Ratio* (SNR) dan *Bit Error Rate* (BER) dalam *backbone* komunikasi fiber optik segmen STO Lamongan 1 - STO Kebalen milik PT Telkom Indonesia melalui simulasi *software* Optisystem
2. Berdasarkan hasil simulasi, nilai SNR maksimum adalah 72.37 yang terdapat pada frekuensi 193.6 THz. Semua *channel* DWDM telah memenuhi standar nilai BER untuk komunikasi yaitu 10^{-6} . Nilai BER minimum diperoleh pada frekuensi 193.5 THz yaitu 2.05×10^{-30}
3. Untuk meningkatkan performa sistem menuju BER maksimum 10^{-12} dilakukan dua macam optimasi yaitu penambahan *dispersion compensating fiber* (DCF) dan penambahan daya *transmitter*. Sesuai hasil BER, penambahan sebesar 3 dB dilakukan pada *channel* 1 dan 10, serta sebesar 1 dB pada *channel* 2 dan 9.

- Penambahan DCF berhasil menurunkan BER maksimum ke 9.76×10^{-16} dan memperlebar rentang kerja sistem dari 10 menjadi 16 *channel*
- Penambahan daya *transmitter* berhasil meningkatkan performa sistem dengan menurunkan nilai BER maksimum pada frekuensi tinggi dan rendah ke orde 10^{-10} dari nilai awal 10^{-6}
- SNR tidak banyak dipengaruhi oleh kedua bentuk optimasi dan masih memenuhi nilai yang direkomendasikan yaitu minimal 25 dB, walaupun terjadi penurunan di *channel* tertentu

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Telkom Indonesia Divisi Regional 5 Jawa-Bali-Nusra, khususnya kantor Surabaya Ketintang dan STO Kebalen yang telah memberikan bantuan dalam proses pengumpulan data.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. U. I. and H. O. F. Idachaba, "Future Trends in Fiber Optics Communication," in *World Congress on Engineering*, 2014.
- [2] S. V. Kartalopoulos, "Per-port Statistical Estimation of Bit Error Rate and Optical Signal to Noise Ratio in DWDM Telecommunications," *Noise Commun. Proc. SPIE*, vol. 5473, 2004.
- [3] A. M. and A. Kusumawardhani, "Pengukuran Pengaruh Kelengkungan Serat Optik terhadap Rugi Daya Menggunakan Optical Time Domain Reflectometer (OTDR)," *J. POMITS ITS*, pp. 1-5, 2009.
- [4] X. Y. and Y. Hechao, "The Application of OptiSystem in Optical Fiber Communication Experiments," in *Third International Symposium on Computer Science and Computational Technology*, Jiaozuo, 2010.
- [5] B. F. D. and X. F. A. A. Khadir, "Achieving Optical Fiber Communication Experiments by OptiSystem," *Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput.*, vol. 3, no. 6, pp. 42-53, 2014.
- [6] D. W. and C. X. G. Yan, Z. Ruixia, "Point-to-Point DWDM System Design and Simulation," in *International Symposium on Information Processing, Huangshan*, 2009.
- [7] I. C. Union, *ITU-T Handbook : Optical Fibre, Cables and Systems*. Geneva: International Communication Union, 2009.
- [8] G. H. and Z. M. J. Alam, R. Alam, "Improvement of Bit Error Rate in Fiber Optic Communication," *Int. J. Futur. Comput. Communication*, vol. 4, no. 3, pp. 281-286, 2014.
- [9] H. Z. and C. Zanger, *Fiber Optics : Communication and Other Applications*. Singapore: Maxwell Macmillan, 1991.
- [10] G. Keiser, *Optical Fiber Communications, 4th edition*. Singapore: McGraw-Hill International Edition, 2010.
- [11] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication System, 3rd edition*. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [12] I. T. Union, "ITU-T Recommendation G.671 : Transmission Characteristics of Optical Components and Subsystems," 2012.