

Analisa Performansi WDM-PON dan Koheren WDM-PON Menggunakan Kabel SMF dan DCF

1st Nur Yudha Kurnia Ramadhan

Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

nuryudha@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Akhmad Hambali

Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

ahambali@telkomuniversity.co.id

3rd Brian Pamukti

Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

brianp@telkomuniversity.ac.id

Abstrak— Komunikasi dengan deteksi koheren merupakan sistem bekerja menggabungkan sinyal yang dikirimkan oleh transmitter dan lokal osilator. Penggabungan ini diterapkan dalam sistem WDM yang dapat mengirimkan banyak informasi kedalam satu kabel fiber optik. Selain itu menggunakan teknik modulasi OFDM. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) merupakan teknik modulasi yang cara kerjanya mengirimkan data dibagi ke beberapa data dan dikirimkan secara bersamaan melalui subcarrier. Sehingga keduanya disebut *Coherent Wavelength Division Multiplexing* dengan teknik modulasi OFDM. Hasil penelitian dengan sistem koheren WDM-PON dan bitrate 14Gbit/s menggunakan kabel *dispersion compensation fiber* dan *single mode fiber* yang dipasang secara bersamaan memberikan performansi BER 1.39×10^{-4} yang menandakan lebih baik dibandingkan hanya menggunakan kabel *single mode fiber* yang menghasilkan nilai BER 5.58×10^{-4} atau hanya menggunakan kabel *dispersion compensation fiber* dengan BER 0.39. Tetapi dibandingkan dengan menggunakan WDM-PON memberikan performansi yang jauh lebih baik yaitu dengan nilai BER 10^{-9} baik hanya menggunakan kabel SMF atau dipasang DCF.

Kata kunci—: koheren WDM-PON, DCF, SMF, bit error rate

I. PENDAHULUAN

Seiring perkembangan teknologi kebutuhan komunikasi optik menjadi meningkat. Hal ini menyebabkan kecepatan internet yang dibutuhkan untuk berselancar diinternet juga meningkat. Dalam hal ini Full Service Access Network (FSAN) bersama International Telecommunication Union (ITU-T) bahkan menyarankan teknologi Passive Optical Network (PON) menjadi salah satu solusi yang diajukan(1). Teknologi PON berawal dari melihat semakin banyak user yang membutuhkan koneksi internet sehingga muncul 3 skema PON yaitu Time Division Multiplexing - Passive Optical Network (TDM-PON), Wavelength Division Multiplexing - Passive Optical Network (WDM-PON), Code Division Multiplexing - Passive Optical Network (CDM-PON). Setiap skema dapat digunakan secara terpisah maupun digabungkan. Salah satu skema yang dapat digabungkan (2) adalah TDM dan WDM menjadi Time Wavelength Division Multiplexing - Passive Optical Network (TWDM-PON). Skema TWDM tersebut mendasari dari Next Generation Passive Optical Network generasi ke 2 (NGPON2)(3).

Penelitian mengenai Coherent PON cukup banyak dilakukan. Salah satu penelitiannya dari Sakshi Sharma, Davinder Parkash, dan Sukhpreet Singh yang membahas mengenai analisa dan desain sistem WDM OFDM dengan deteksi koheren menggunakan perbedaan spasi kanal(4). Dari penelitian ini diperoleh kesimpulan dengan spasi kanal yang lebih kecil memberikan nilai performansi yang lebih baik dibandingkan dengan spasi kanal yang besar dengan perbedaan nilai BER 3.19×10^{-3} dan 4.85×10^{-1} . Perkembangan yang dimungkinkan untuk penelitian ini dmasa mendatang adalah penggunaan penggunaan spasi kanal yang kecil dengan perbedaan teknik modulasi.

Oleh karena itu pada penelitian ini teknologi Coherent WDM-PON menjadi solusi yang ditawarkan dengan memberikan Optical Line Terminal (OLT) untuk masing-masing Optical Network Unit (ONU) dan memberikan koheren detection pada sisi OLT dan ONU(5). Teknologi tersebut memberikan manfaat dapat menambah kapasitas tanpa menambah hardware dan bandwidth pada kabel optik mampu diubah menjadi lebih baik dan memberikan pengalaman berinternet menjadi lebih nyaman.

II. KAJIAN TEORI

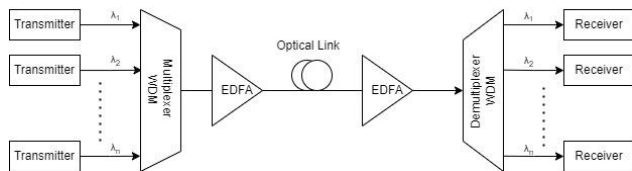
A. Fiber Optik (FO)

Fiber Optik (FO) merupakan media transmisi yang dapat merambatkan cahaya, yang terbuat dari kaca atau plastik. FO adalah media transmisi yang memiliki kelebihan dibandingkan dengan media transmisi lainnya seperti kabel tembaga dan udara. Kelebihannya antara lain bandwidth yang lebih besar, tahan terhadap gangguan elektromagnetik, noise transmisi yang lebih rendah, dan biayanya lebih murah[6].

Fiber optic single mode memiliki diameter core yang kecil, berkisar di $7\mu\text{m}$ - $10\mu\text{m}$. Oleh karena itu kabel fiber ini memiliki transmisi tunggal, membuat berkas cahaya yang merambat menjadi sedikit akhirnya bandwidth yang dihasilkan menjadi tinggi. DCF merupakan jenis kabel yang mampu menangan masalah dispersi agar sistem bekerja lebih baik. DCF merupakan jenis kabel yang memiliki karakteristik diantaranya lebih stabil, tidak mudah terpengaruh suhu, memiliki bandwidth yang lebih lebar, ini membuatnya sebagai kabel yang paling cocok untuk menjadi kompensator dispersi.

B. Wavelength Division Multiplexing (WDM)

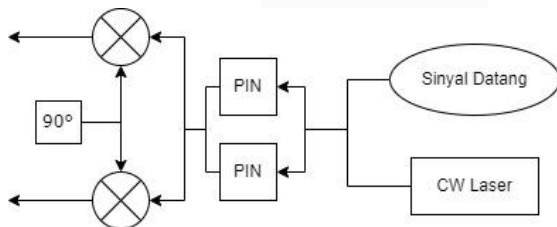
WDM adalah metode dalam sistem komunikasi serat optik yang memanfaatkan cahaya dari serat optik yang memiliki panjang gelombang yang berbeda-beda dan ditransmisikan dengan satu kabel fiber optik. Panjang gelombang yang dapat ditransmisikan terus berkembang (4, 8, 16, 32, dan seterusnya). Teknologi WDM bekerja dealam sinyal dan domain optik yang membuatnya memiliki fleksibilitas yang cukup tinggi untuk memenuhi kebutuhan transmisi yang besar dalam suatu jaringan. Kemampuan ini yang membuat terus berkembang dan ditandai dengan banyaknya jumlah panjang gelombang yang dirambatkan dalam satu fiber.



GAMBAR 1. Sistem WDM

Gambar 1 menunjukkan sistem WDM yang terdiri dari sejumlah N gelombang yang berbeda dan digabungkan oleh perangkat multiplexer dan akhirnya dikirimkan ke satu kabel fiber optik. Pada perjalanannya sinyal juga dikuatkan oleh amplifier dan di pecahkan kembali sinyal yang sudah di gabungkan ke dalam perangkat demultiplexer. Setelah dipecahkan menjadi masing-masing panjang gelombang kemudian diterima oleh photodetector(6)

C. Koheren



GAMBAR 2. Arsitektur Deteksi Koheren

Pada sisi penerima dari komunikasi optik memiliki sistem pendeteksian salah satunya adalah deteksi koheren. Gambar 2 merupakan arsitektur dari deteksi koheren heterodyne. Deteksi koheren heterodyne merupakan dektesi yang frekuensi sinyal datang sama dengan local oscilator. Sinyal dayang digabungkan dari keluaran laser local oscilator. Penggabungan dua buah gelombang ini terjadi ketika dua gelombang denggan frekuensi tertentu w1 dan w2 membuat gelombang lain dengan frekuensi sebanding dengan 2w1, 2w2 dan w1+w2(7).

Proses penggabungan dua buah gelombang ini dapat meningkatkan dari performansi deteksi koheren. Bentuk dari medan listrik dan sinyal yang dibangkitkan dengan bentuk persamaan:

$$E_s = A_s \cos[\omega_s t + \varphi_s(t)] \quad (1)$$

dengan As adalah Amplitudo sinyal, wst adalah frekuensi carrier optik, dan js(t) adalah Fasa dari sinyal optik. Dalam

mengirimkan informasi dilakukan dengan memodulasikan salah satu dari amplitudo, frekuensi, atau fasa dari sinyal pembawa optik. Modulasi yang dapat diterapkan diantaranya ASK , FSK, dan PSK.

D. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

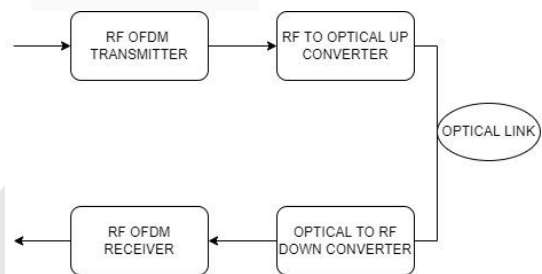
Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) merupakan sebuah teknik transmisi yang menggunakan beberapa frekuensi yang tegak lurus atau orthogonal. OFDM merupakan transmisi multicarrier (MCM), yang spektrum terbagi kedalam beberapa subcarrier dan dari masing-masing subcarrier dimodulasikan ke dalam steram data pada rate yang rendah(8).

Sifat orthogonal dari Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) memiliki hubungann antara frekuensi-frekuensi yang digunakan. Misalkan pada fungsi $\varphi_m(t)$ sebagai sinyal saat subcarrier ke m dan $\varphi_n(t)$ sebagai sinyal saat subcarrier ke n. Keduanya orthogonal pada interval $a < t < b$ jika kondisinya

$$\int_a^b S_m \cdot S_n(t) = 0 \quad (2)$$

E. Coherent Orthogonal Frequency Division Multiplexing (CO-OFDM)

OFDM merupakan teknik modulasi multicarrier yang sinyalnya saling orthogonal atau tegak lurus. Konsep orthogonal tersebut dipadukan dengan sistem koheren sehingga disebut Coherent Optical OFDM. Bagian dari CO-OFDM terdiri dari, RF OFDM transmitter, RF to Up Converter, optical link, RF to Down Converter, dan RF OFDM receiver (9).



GAMBAR 3. Arsitektur Sistem CO-OFDM

Gambar 3 adalah gambar arsitektur dari sistem CO-OFDM secara umum. Cara kerja dari CO-OFDM berawal dari blok RF-OFDM Transmitter. Data masuk kedalam sistem dengan kecepatan tinggi kemudian ditranslasikan ke dalam bentuk paralel, Sehingga bit rate yang bernilai R terbagi ke setiap jalur paralel R/N yang N adalah jumlah dari subcarrier(jumlah jalur parallel)(10). Data yang berbentuk parallel tersebut kemudian dimodulasikan dengan teknik Quadrature Amplitude Modulation (QAM) atau bisa juga menggunakan Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)(9). Data yang termodulasikan diduplikasi secara digital menggunakan Inverse Fast Fourier Transform(IFFT) agar alokasi dari tiap frekuensi saling orthogonal (10).Hal tersebut dimaksudkan untuk menghindari interferensi dan memenuhi sifat utama dari OFDM yaitu orthogonalitas.

Blok selanjutnya RTO up-converter terdiri dari laser yang bergelombang secara kontinu (CW Laser) dan modulator

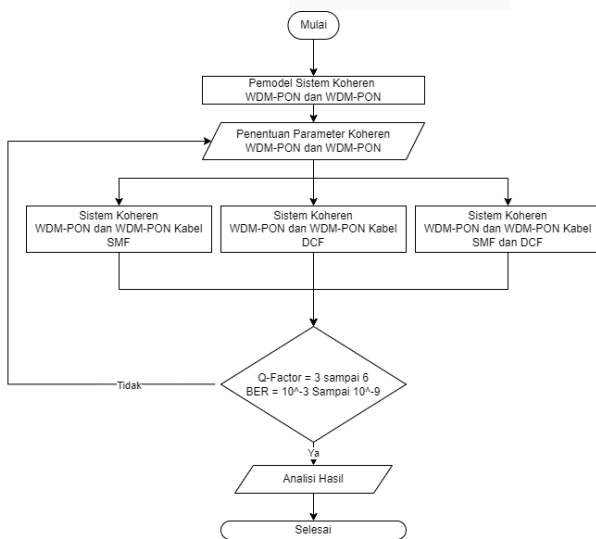
MZM yang membagi secara paralel digunakan untuk konversi dari data domain yang elektrik ke dalam domain optik, selanjutnya sinyal akan dikirimkan melalui serat optik. Sinyal yang di hantarkan dalam orthogonal mampu menghemat bandwidth hingga setengahnya dan juga tidak memiliki dampak interferensi karena sifat dari orthonal itu sendiri(10).

Sinyal tersebut melewati Optical link sebagai tempat propagasi. Sisi penerima deteksi koheren menggunakan local oscillator yang berupa CW laser dengan adanya pergeseran fasa sebesar 90o juga photodetector yang digunakan berjenis PIN. Deteksi koheren tersebut digunakan untuk memulihkan linearitas dari sinyal masukan yang disebabkan komponen I dan Q dan juga menekan noise yang terjadi(11). Proses konversi sinyal yang dikirimkan berupa serial ke dalam bentuk paralel PIN, pelepasan cyclic prefix, translasi data paralel dengan FFT, dan dimodulasi sehingga pada tahap terakhir data paralel dikonversikan kembali ke serial agar menjadi bit informasi.

III. METODE

A. Diagram Penelitian

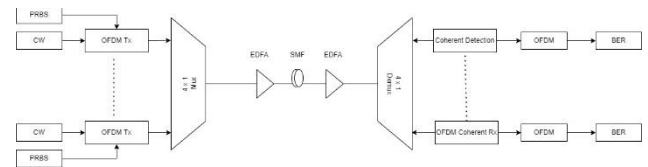
Analisa dan perancangan pada penelitian ini, ada beberapa yang harus diperhatikan diantaranya adalah terlebih dahulu menemukan paramter sesuai dengat data yang ada, seperti jenis serat optik, modulasi yang digunakan, jarak, photodetector. Diagram alir proses pengerjaan dari perancangan sistem hingga selesai dapat dilihat pada gambar 4.



GAMBAR 4. Diagram Alir

B. Persamaan

Pada tugas akhir ini dirancang menggunakan model koheren WDM-PON seperti pada desain di gambar 5.



GAMBAR 5. Diagram Blok Sistem Koheren WDM-PON

C. Parameter Simulasi

Perancangan simulasi sistem WDM-PON dan koheren WDM-PON menggunakan beberapa parameter input yang akan digunakan dalam perhitungan. Berikut tabel 1 parameter yang digunakan.

TABEL 1. Parameter Sistem

Parameter		Nilai	Satuan
Transmitter	Bit rate per channel	14	Gb/s
	Transmit power OLT	-10 - 0	dBm
Mux Demux	Number of output ports	4	Quantity
	Reference Frequency	1550	nm
	Bandwidth	23	GHz
Receiver	Atenuasi	0.265	dB/km
	Dispersi	-49	Ps/nm/km
	Dispersion slope	-0.155	Ps/nm ² /km
	Gain	10	dB

Penghubung dalam sistem komunikasi optik menggunakan 1:4 dengan menggunakan 2 jenis kabel yaitu SMF dan DCF. Spesifikasi kabel tersebut ditunjukkan pada tabel 2 dan 3

TABEL 2. Paramater SMF

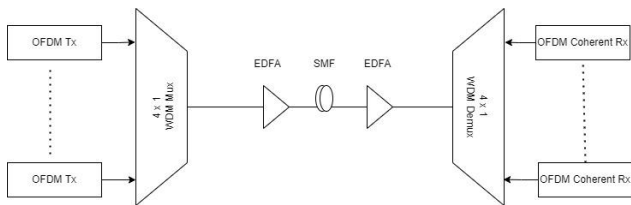
Parameter	Nilai	Satuan
Atenuasi	0.22	dB/km
Dispersi	15	Ps/nm/km
Dispersion slope	0.075	Ps/nm ² /km
Gain	10	dB

TABEL 3. Paramater DCF

Parameter	Nilai	Satuan
Atenuasi	0.265	dB/km
Dispersi	-49	Ps/nm/km
Dispersion slope	-0.155	Ps/nm ² /km
Gain	10	dB

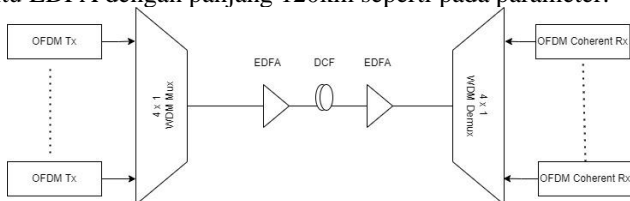
D. Simulasi Sistem

Pada sistem koheren WDM-PON menggunakan teknik modulasi OFDM yang terletak pada sisi transmitter atau pengirim dan pada sisi penerima terdapat OFDM dan coherent sebagai penerimanya.



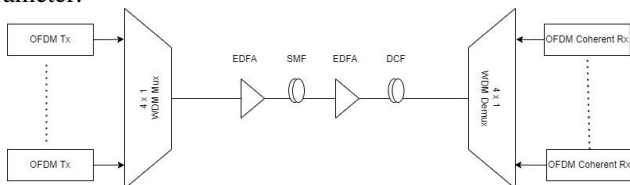
GAMBAR 6. Koheren WDM Kabel SMF

Skenario pada gambar 6 menunjukkan letak dari kabel single mode fiber berada di tengah diantara dua penguat optik yaitu EDFA dengan panjang 120km seperti pada parameter.



GAMBAR 7. Koheren WDM Kabel DCF

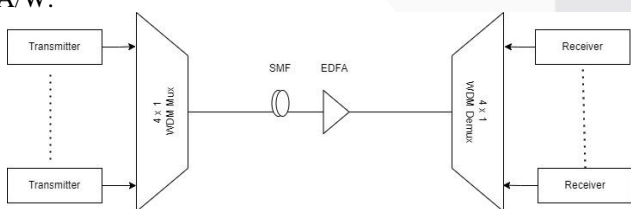
Skenario pada gambar 7 menunjukkan kabel dispersion compensation fiber sebagai pengganti dari kabel single mode fiber sehingga memiliki panjang 120 km sesuai dari parameter.



GAMBAR 8. Koheren WDM Kabel SMF dan DCF

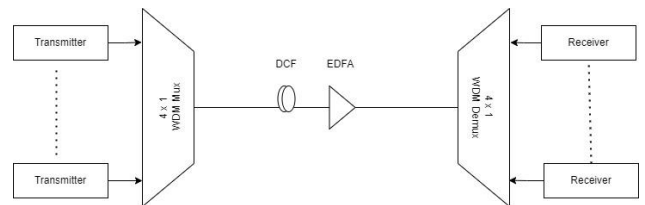
Pada skenario koheren WDM-PON di gambar 8 menunjukkan kabel single mode fiber terletak diantara dua amplifier dan ditambah dengan dispersion compensation fiber sebesar 35km.

Pada skenario WDM berbeda dengan koheren WDM-PON yang menggunakan teknik modulasi OFDM. Skenario WDM menggunakan modulasi NRZ dan sisi pengirim juga terdapat machzender modulator. Sedangkan pada sisi perima terdapat photodetector pin dengan responsivitas 1 A/W.



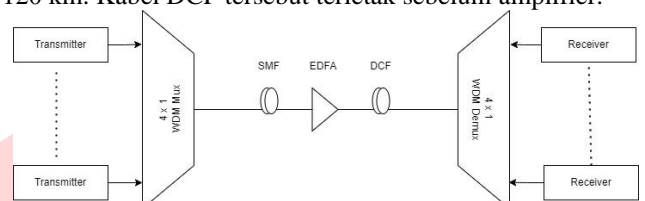
GAMBAR 9. WDM Kabel SMF

Skenario pada gambar 9 menunjukkan bahwa letak kabel SMF terletak sebelum amplifier optik. Kabel SMF yang digunakan sepanjang 120km.



GAMBAR 10. WDM Kabel DCF

Skenario pada gambar 10 menunjukkan letak kabel DCF yang menggantikan posisi dari SMF dan memiliki panjang 120 km. Kabel DCF tersebut terletak sebelum amplifier.

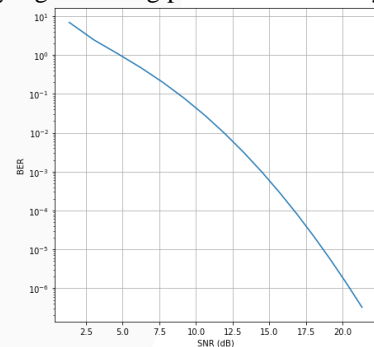


GAMBAR 11. WDM Kabel SMF dan DCF

Pada skenario gambar 11 menunjukkan kabel SMF yang memiliki panjang 120km dan juga terletak sebelum amplifier digabungkan dengan kabel dispersion compensation fiber dengan panjang 35km.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

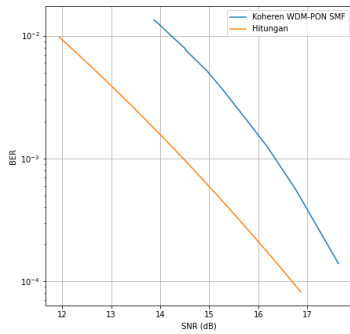
Pada bab ini menjelaskan mengenai hasil simulasi dari tiap skenario yang dirancang pada bab sebelumnya.



GAMBAR 12. Grafik BER terhadap SNR

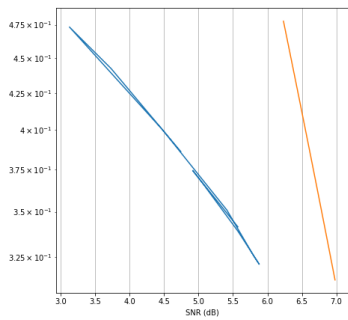
Pada grafik 12 merupakan hasil dari perhitungan yang dihitung berdasarkan rumus yang ada yaitu BER SNR dan LPB seperti pada bab sebelumnya dan kemudian di bentuk grafik berdasarkan variasi pada power yang di pancarkan oleh laser. Sehingga grafik ini bisa menjadi standar untuk sistem kabel dengan paramter yang sudah ditetapkan pada bab sebelumnya.

A. Hasil Analisis Koheren WDM-PON



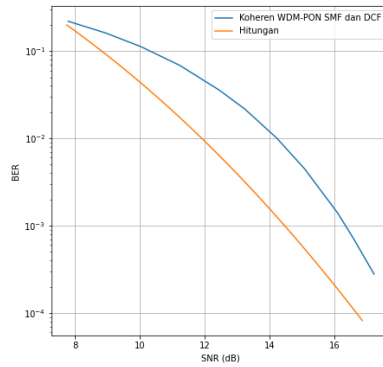
GAMBAR 13. Hasil Koheren WDM-PON SMF

Melihat dari hasil yang tertampil dari grafik seperti gambar 13 terlihat bahwa nilai dari BER yang disandingkan SNR memiliki nilai yang besar dan terhitung baik di 10^{-4} selain itu memiliki nilai terendah pada 10^{-1} dan dari hasil perhitungan yang di gambarkan dengan garis berwarna orange terlihat tidak jauh beda dan hasil pada simulasi di gambarkan lebih baik dari hasil perhitungan. Sehingga pada pengaplikasiannya sistem WDM-PON koheren dengan kabel SMF memiliki karakteristik yang baik dan memungkinkan untuk di terapkan.



GAMBAR 14. Hasil Koheren WDM-PON DCF

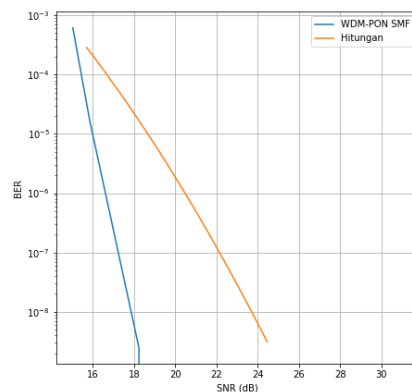
Pada sistem selanjutnya dengan menggunakan sistem yang sama seperti sebelumnya yaitu koheren WDM-PON tetapi kabel yang digunakan adalah DCF. Letak dari kabel DCF diantara dua buah amplifier EDFA yang memiliki gain yang sama besarnya. Untuk kabel DCF yang digunakan menggantikan dari kabel SMF yang pada sistem skenario sebelumnya digunakan. Seperti yang terlihat dari grafik 14 terlihat penggunaan kabel DCF belum maksimal untuk menggantikan SMF secara sepenuhnya yang menandakan penerapannya di lapangan belum dapat dilakukan. Pada grafik tersebut terlihat BER yang dihasilkan 3.25×10^{-1} yang terlihat yang sendah jika melihat dari skenario pertama. Selain itu sangat jauh dari hasil yang ingin dicapai pada penelitian ini.



GAMBAR 15. Hasil Koheren WDM-PON SMF dan DCF

Pada sistem selanjutnya yang kali ini menggunakan dua kabel secara bersamaan yaitu SMF dan DCF seperti pada arsitektur gambar 15. Kabel SMF dengan panjang 120 km diletakkan diantara 2 amplifier optik yaitu EDFA dan kabel DCF diletakkan setelah amplifier dengan panjang 35km, sehingga total jarak kabel yang digunakan adalah 155 km menuju ke receiver. Sistem ini dimaksudkan untuk melihat pengaruh DCF yang memiliki kelebihan untuk mengkompesasi dispersi ketika dipasang dengan kabel SMF yang sering digunakan. Setelah simulasi tersebut dijalankan seperti pada gambar 4.4 diperoleh hasil bahwa nilai bit error rate yang dihasilkan 10^{-4} . Dari hasil simulasi yang dijalankan dibandingkan juga dengan hasil dari perhitungan manual yang sudah digambarkan dalam bentuk grafik diperoleh hasil yang sesuai atau tidak jauh berbeda dan sudah memenuhi dari hasil yang ingin dicapai oleh penelitian ini.

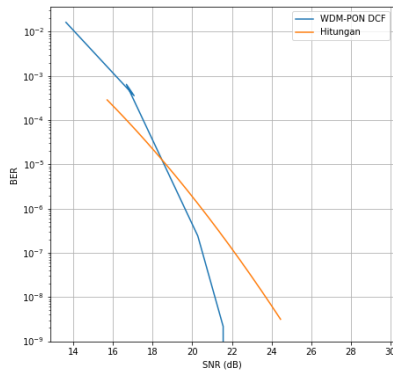
Pada ke tiga sistem yang telah disimulasikan tersebut yaitu dari hasil yang tertampil pada BER analyzer diperoleh kesimpulan bahwa kabel DCF pada sistem koheren WDM-PON tidak bisa menggantikan kabel SMF. Akan tetapi kabel DCF tersebut dapat digunakan dengan lebih maksimal jika pengguannya ditambahkan kabel SMF sehingga performa dari sistem menjadi lebih maksimal dan diperoleh hasil bit error rate yang lebih rendah.



GAMBAR 16. Hasil WDM-PON SMF

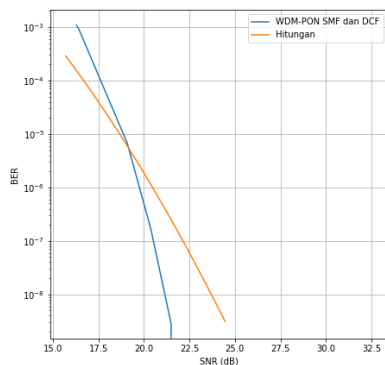
Melihat sistem pada gambar 16 dengan kabel single mode fiber sebagai penghubungnya dan disertai satu buah amplifier EDFA dengan jarak 120km dan bitrate 14Gbit/s. Didapatkan

hasil bit error rate menggunakan BER analyzer yang ditempatkan pada bagian receiver didapatkan hasil seperti pada gambar 16. Pada gambar tersebut terlihat hasil BER sebesar 10^{-9} yang mendakan hasil yang diperoleh itu baik menggunakan kabel SMF pada sistem WDM-PON. Setelah dibandingkan dengan perhitungan manual diperoleh hasil yang sesuai seperti yang terlihat bahwa nilai yang diperoleh tidak jauh berbeda dan bisa mendapatkan nilai yang lebih baik. Selain itu dari hasil BER yang tinggi menandakan sistem tersebut baik.



GAMBAR 17. Hasil WDM-PON DCF

Pada sistem selanjutnya menggunakan arsitektur WDM-PON akan tetapi kabel DCF menggantikan sepenuhnya kabel SMF yaitu 120km dengan bit rate 14Gbit/s. Didapatkan hasil bit error rate sebesar 10^{-9} yang menandakan penggunaan kabel DCF lebih baik dari penggunaan kabel SMF yang sebelumnya digunakan. Hasil dari simulasi kemudian dibandingkan dengan perhitungan manual dan diperoleh perbandingan antara perhitungan dan simulasi tidak terlampaui jauh dengan hasil simulasi. Selain itu BER yang dihasilkan sama dengan peneliti ingin capai yaitu dengan BER 10^{-9} .



GAMBAR 18. Hasil WDM-PON SMF dan DCF

Pada simulasi dengan skenario terakhir yaitu menambahkan kabel DCF pada skenario dengan kabel SMF, dengan peletakan kabel DCF setelah amplifier EDFA. Untuk melihat performansi dari skenario tersebut maka diletakkan BER analyzer pada receiver. Dari hasil tersebut diperoleh bit error rate yang dihasilkan adalah 10^{-9} . Hasil yang diperoleh dari simulasi kemudian dibandingkan dengan perhitungan manual dan perbandingan tersebut memeberikan hasil sesuai dan menunjukan hasil yang baik.

Dari hasil simulasi yang dilakukan dengan menggunakan tiga skenario WDM-PON menunjukkan performa dari kabel DCF yang baik dan ketika menggantikan SMF kabel memberikan hasil yang sama namun melihat dari grafik yang ditampilkan bahwa nilainya lebih baik menggunakan kabel SMF, selain itu ketika kabel SMF dan DCF di letakkan secara bersama-sama memberikan hasil yang sesuai harapan dan memberikan jarak yang lebih jauh juga performa yang dihasilkan lebih baik dari penggunaan DCF.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis dapat ditarik kesimpulan. Skenario koheren WDM-PON yang sudah dilakukan terlihat bahwa pengaruh kabel DCF membuat sistem menjadi lebih baik melihat dari uji performansi yang dihasilkan yaitu BER 1.39×10^{-4} dibandingkan hanya menggunakan kabel SMF tanpa penambahan DCF. Akan tetapi kabel DCF belum dapat menggantikan sepenuhnya dari kabel SMF, tidak seperti WDM normal yang kabel DCF memberikan pengaruh yang baik saat menggantikan kabel SMF. Sehingga untuk pengaplikasian terbaik pada sistem koheren adalah menggunakan tambahan kabel DCF. Berbeda dengan menggunakan skenario WDM-PON didapatkan hasil yang hampir serupa ketika menggunakan kabel SMF dan DCF akan tetapi tetap performa lebih baik jika hanya menggunakan kabel SMF yang memiliki nilai BER maksimal 10^{-9} .

REFERENSI

1. Zhang D, Liu D, Wu X, Nettet D. Progress of ITU-T higher speed passive optical network (50G-PON) standardization. *J Opt Commun Netw.* 2020;12(10):D99.
2. Kumari M, Sharma R, Sheetal A. Comparative Analysis of High Speed 20 / 20 Gbps for Long-Reach NG-PON2. *J Opt Commun.* 2019;0(0):1–14.
3. Becker FG, Cleary M, Team RM, Holtermann H, The D, Agenda N, et al. No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析Title. *Syria Stud [Internet].* 2015;7(1):37–72. Available from: https://www.researchgate.net/publication/269107473_What_is_governance/link/548173090cf22525dcb61443/download%0Ahttp://www.econ.upf.edu/~reynal/Civilwars_12December2010.pdf%0Ahttps://think-asia.org/handle/11540/8282%0Ahttps://www.jstor.org/stable/41857625
4. Sharma S, Parkash D, Singh S. Analysis and design of WDM optical OFDM system with coherent detection using different channel spacing. *Lect Notes Electr Eng.* 2020;597(February 2020):365–76.
5. Shbair WW, El-Nahal FI. Coherent passive optical network for 5G and beyond transport. *Optoelectron Lett.* 2021;17(9):546–51.
6. Pamukti B, Perdana D, Kirom MR. Thermal effect analysis of arrayed waveguide grating in NG-PON2 network. *Eng Lett.* 2018;26(2):216–23.
7. Ip E, Lau AP, Barros DJ, Kahn JM. Coherent detection in optical fiber systems: erratum. *Opt Express.* 2008;16(26):21943.
8. Keiser G. *Optical Fiber Communications (Fourth*

- Edition). Vol. 53, Journal of Chemical Information and Modeling. 2013. 1689–1699 p.
9. LIU Y. Simulation and Study for. IEEE Photonics J. 2013;2–6.
 10. Abdillah K. Analisa Kinerja Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Berbasis Perangkat Lunak. Pens-Its. 2013;1–7.
 11. Armstrong J. OFDM for Optical Communications(Invited Tutorial). J Light Technol. 2009;27(3):189–204.

