



Homepage Journal: <https://jurnal.unismuhpalu.ac.id/index.php/JKS>

## Analisis Kinerja EDFA dalam Sistem WDM untuk Aplikasi Komunikasi Optik dan LiDAR

*EDFA Performance Analysis in WDM Systems for Optikal Communication and LiDAR Applications*

Shafiyah Al-Hilalliyah<sup>1</sup>, Fira Maya Anastasya<sup>2</sup>, Bertina Anes Liovi Putri Tse<sup>3</sup>, Rohim Aminullah Firdaus\*<sup>4</sup>, Endah Rahmawati<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Program Studi S1 Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya, Jl. Ketintang, Ketintang, Kec. Gayungan, Kota Surabaya, Jawa Timur 60231

Corresponding Author: E-mail: rohimfirdaus@unesa.ac.id

### Artikel Penelitian

#### Article History:

Received: 08 May, 2025

Revised: 14 Jun, 2025

Accepted: 17 Jun, 2025

#### Kata Kunci:

Penguat EDFA, WDM 4 Kanal, Panjang Fiber Optik, Forward Pump Power

#### Keywords:

EDFA Amplifier, WDM 4 channel, optikal fiber length, forward pump power

DOI: 10.56338/jks.v8i6.7414

### ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan akan transmisi data berkecepatan tinggi mendorong pengembangan teknologi seperti Wave Division Multiplexing (WDM) dalam sistem komunikasi serat optik yang memungkinkan untuk meningkatkan kapasitas transmisi. Namun, sistem WDM menghadapi tantangan seperti redaman dan dispersi sinyal yang dapat menurunkan kualitas transmisi jarak jauh. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja penguat Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) dalam sistem WDM 4 kanal, yang penting untuk optimasi komunikasi optik dan aplikasi Light Detection and Ranging (LiDAR). Metode penelitian ini menggunakan pemodelan dan simulasi dengan software Optisystem 17.1, dengan variasi panjang serat optik dan nilai forward pump power EDFA. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan panjang serat optik menyebabkan penurunan nilai Optikal Power Meter (OPM), mengindikasikan peningkatan redaman. Namun, penggunaan EDFA secara signifikan mengurangi Bit Error Rate (BER), yang membuktikan efektivitasnya dalam menjaga kualitas transmisi. Kesimpulannya, EDFA memainkan peran krusial dalam meningkatkan kinerja sistem WDM, yang relevan untuk komunikasi optik dan pengembangan LiDAR.

### ABSTRACT

The increasing demand for high-speed data transmission has driven the development of technologies such as Wave Division Multiplexing (WDM) in optical fiber communication systems, which allows for increased transmission capacity. However, WDM systems face challenges like attenuation and signal dispersion that can degrade transmission quality over long distances. This research aims to analyze the performance of Erbium-Doped Fiber Amplifiers (EDFAs) in a 4-channel WDM system, crucial for optimizing optical communication and Light Detection and Ranging (LiDAR) applications. The research methodology employs modeling and simulation using Optisystem 17.1 software, with variations in optical fiber length and EDFA forward pump power. Simulation results indicate that increasing optical fiber length leads to a decrease in Optikal Power Meter (OPM) values, signifying increased attenuation. Nevertheless, the use of EDFAs significantly reduces the Bit Error Rate (BER), demonstrating their effectiveness in maintaining transmission quality. In conclusion, EDFAs play a critical role in enhancing the performance of WDM systems, relevant to both optical communication and LiDAR development.

## PENDAHULUAN

Kebutuhan akan transmisi data berkecepatan tinggi dan berkapasitas besar semakin meningkat seiring dengan berkembangnya teknologi informasi dan komunikasi. Dunia telekomunikasi saat ini mengalami perkembangan yang pesat, diiringi dengan meningkatnya permintaan dan kebutuhan akan informasi [1]. Hal ini mendorong pengembangan teknologi baru untuk memenuhi kebutuhan tersebut.

Salah satu teknologi yang menjanjikan adalah Next Generation Network (NGN) [2]. NGN membutuhkan jaringan transmisi dengan bit rate tinggi dan bandwidth lebar [3]. Sistem komunikasi serat optik, yang dikenal dengan kemampuannya dalam menyediakan kapasitas transmisi yang sangat besar, telah menjadi solusi utama untuk memenuhi kebutuhan ini, terutama melalui penggunaan teknologi Wave Division Multiplexing (WDM).

Sistem komunikasi optik Wave Division Multiplexing (WDM) telah menjadi tulang punggung infrastruktur telekomunikasi modern. WDM memungkinkan transmisi data berkapasitas tinggi melalui serat optik tunggal dengan mentransmisikan multipleks kanal informasi pada panjang gelombang yang berbeda. WDM memungkinkan beberapa sinyal optik dengan panjang gelombang berbeda ditransmisikan melalui satu serat, sehingga secara signifikan meningkatkan kapasitas dan efisiensi transmisi. Meskipun sistem WDM memiliki banyak keunggulan, sistem ini mempunyai tantangan teknis seperti redaman dan dispersi sinyal, yang dapat menurunkan kualitas transmisi jarak jauh. Untuk mengatasi masalah ini, penguat optik seperti penguat serat doped erbium (EDFA) digunakan [1]. EDFA dapat memperkuat sinyal optik dengan efisiensi tinggi dan tingkat kebisingan yang rendah, menjadikannya komponen penting dalam sistem WDM [3]. Pemilihan WDM 4 kanal merepresentasikan kompleksitas yang cukup dan tidak berlebihan dalam simulasi dan dianalisis tanpa mengurangi fokus pada karakteristik dasar interaksi antar kanal dan kinerja penguat EDFA [4].

Penelitian ini melibatkan variasi panjang serat optik dan nilai forward pump power pada penguat EDFA sebagai variabel independen. Variabel dependen yang diamati dan dianalisis adalah parameter kinerja system, meliputi Optikal Power Meter (OPM), Signal-to-Noise Ratio (SNR), dan Bit Error Rate (BER). Panjang serat optik secara langsung memengaruhi redaman dan dispersi sinyal, yang akan memengaruhi daya optik diterima dan kualitas sinyal (SNR dan BER) [5]. Forward pump power pada EDFA akan menentukan tingkat penguatan sinyal optik, yang diharapkan dapat mengkompensasi kerugian akibat propagasi melalui serat optik [6]. Dengan memvariasikan kedua variabel tersebut akan memberikan pemahaman secara komprehensif kinerja penguat EDFA dalam sistem WDM 4 kanal.

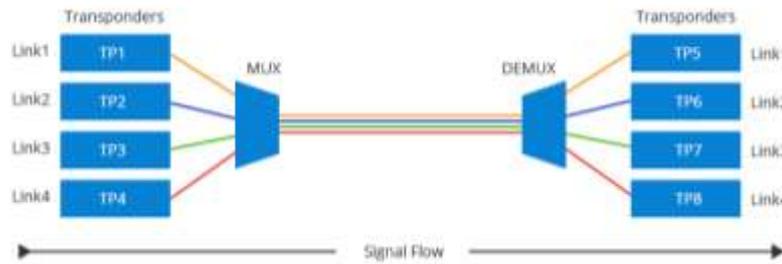
Penelitian mengenai kinerja penguat dalam sistem komunikasi optik WDM telah banyak dilakukan. Penelitian oleh Djamaluddin (2017) membandingkan penguat EDFA dan SOA pada sistem DWDM 40 kanal [1]. Namun, penelitian tersebut tidak menyelidiki lebih lanjut terkait perubahan panjang serat optik dan daya pompa penguat memengaruhi kinerja sistem WDM. Jumlah kanal yang tinggi juga meningkatkan kompleksitas sistem, sehingga memerlukan komponen yang lebih presisi dan berpotensi meningkatkan biaya implementasi. Selanjutnya penelitian oleh Rauzatul Ahya (2024) membandingkan penguat EDFA dan SOA pada sistem komunikasi optik WDM-PON dengan memvariasikan panjang fiber optik [7]. Fauza Khair (2021) juga merancang sistem DWDM 8 kanal dengan EDFA dan memvariasikan panjang fiber optik [3]. Namun, kedua penelitian tersebut belum mengeksplorasi pengaruh forward pump power EDFA, yang berpotensi signifikan terhadap kinerja sistem.

Selain dalam bidang komunikasi optik, teknologi serat optik dan penguat EDFA semakin banyak diaplikasikan dalam sistem Light Detection and Ranging (LiDAR) [8], [9]. Peningkatan kebutuhan akan teknologi LiDAR yang akurat dan presisi, khususnya dalam pengukuran geometris multi-dimensi untuk deteksi perakitan skala besar yang mengandalkan teknologi pencitraan 3D, menjadikan pemanfaatan Wavelength Division Multiplexing (WDM) krusial dalam pengembangan sistem LiDAR yang lebih canggih [10]. WDM memungkinkan peningkatan kapasitas dan efisiensi sistem LiDAR, yang mampu mendukung akurasi dan resolusi yang lebih tinggi dalam aplikasi-aplikasi tersebut.

Penelitian ini menawarkan kebaruan dalam menganalisis optimasi parameter penguat EDFA, khususnya dalam konteks aplikasinya pada sistem komunikasi optik WDM dan sistem LiDAR. Pendekatan ini memberikan perspektif baru dalam memahami potensi EDFA untuk meningkatkan akurasi dan presisi pengukuran geometris multi-dimensi dalam LiDAR, yang belum banyak dieksplorasi dalam penelitian sebelumnya. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk melakukan pemodelan dan simulasi kinerja penguat EDFA dalam sistem komunikasi optik WDM empat kanal.

Simulasi ini akan dilakukan menggunakan perangkat lunak Optisystem 17.1, dengan memvariasikan panjang serat optik dan nilai forward pump power EDFA. Parameter kinerja utama yang akan dievaluasi meliputi Optikal Power Meter (OPM), Signal-to-Noise Ratio (SNR), dan Bit Error Rate (BER). Hasil penelitian ini tidak hanya relevan untuk aplikasi komunikasi optik, tetapi juga memberikan gambaran penting mengenai potensi penggunaan EDFA dalam sistem LiDAR, khususnya dalam menjaga kualitas sinyal dan meningkatkan akurasi pengukuran pada jarak yang lebih jauh.

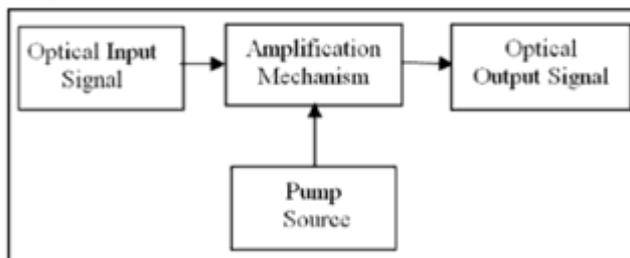
**TINJAUAN LITERATUR**  
**Teknologi WDM**



**Gambar 1.** Prinsip Kerja Teknologi WDM (Sumber: Larry, 2024)

Teknologi WDM dikembangkan oleh perusahaan telekomunikasi untuk komunikasi point-to-point [11], yang secara konseptual dapat dipandang sebagai superposisi dari banyak sistem kanal tunggal ke dalam satu serat optik. Gambar 1 menyajikan ilustrasi dasar teknologi Wavelength Division Multiplexing (WDM). Teknologi ini memanfaatkan bandwidth yang lebar untuk mengirimkan berbagai sinyal optik dengan panjang gelombang berbeda secara bersamaan [4]. Sinyal optik dengan panjang gelombang yang berbeda diterapkan untuk setiap kanal, sehingga memungkinkan beberapa aliran data independen untuk berjalan secara paralel [4]. Proses ini melibatkan penggunaan multiplexer di sisi pengirim untuk menggabungkan berbagai panjang gelombang menjadi sinyal komposit. Multiplexer dalam serat sinyal dapat diperkuat menggunakan amplifier seperti EDFA untuk mengganti redaman sinyal [12],[13]. Di sisi penerima, sebuah demultiplexer bertugas untuk memisahkan kembali panjang gelombang yang berbeda, mengarahkan setiap kanal ke tujuan yang sesuai.

**Prinsip Penguat EDFA**



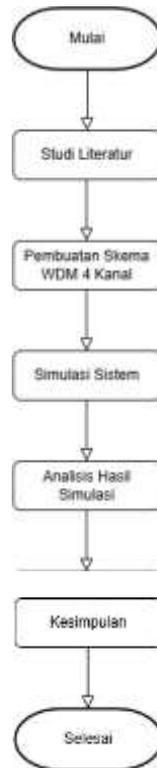
**Gambar 2.** Diagram Blok EDFA (Sumber: Gujral, 2013)

Erbium-Doped Fiber Amplifiers (EDFA) merupakan penguat yang menggunakan serat silika konvensional yang diisi dengan ion Erbium untuk digunakan dalam jaringan komunikasi optik [13]. Ketika ion Erbium terstimulasi dengan energi cahaya pada panjang gelombang yang sesuai (980 nm atau 1480 nm) [4], [13], [14], mereka tereksitasi ke keadaan metastabil. Setelah beberapa waktu, ion-ion ini meluruh kembali ke keadaan ground state dengan memancarkan foton dalam rentang 1525 –

1565 nm. Foton tersebut dapat menstimulasi proses peluruhan (yang disebut emisi terstimulasi) dan menghasilkan foton tambahan dengan panjang gelombang dan karakteristik yang sama dengan foton sinyal. Jadi, jika panjang gelombang pump dan panjang gelombang sinyal merambat secara bersamaan melalui EDF, transfer energi akan terjadi melalui ion Erbium dari panjang gelombang pump ke panjang gelombang sinyal, menghasilkan amplifikasi sinyal [14].

## METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental dengan menggunakan metode simulasi menggunakan Software Optisystem 17.1. Optisystem dipilih sebagai pilihan efektif untuk melakukan pengujian dan analisis terhadap kinerja sistem optik WDM 4 kanal dengan penguat EDFA tanpa harus membangun sistem secara fisik dan tidak memakan waktu yang lama. Adapun tahapan awal yang dilakukan untuk menyelesaikan penelitian ini adalah melakukan studi literatur bertujuan untuk memahami teori dan metode yang berkaitan dengan penelitian ini. Tahap kedua yaitu perancangan skema sistem optik WDM dengan penguat EDFA yang dibuat menggunakan software Optisystem 17.1. Selanjutnya, perancangan tersebut dijalankan menggunakan beberapa variasi panjang fiber optik dan variasi nilai forward pump power pada penguat EDFA. Tahap terakhir yaitu analisis hasil simulasi dengan membandingkan performansi berupa SNR, OSNR, BER dan OPM sebelum diberi penguat dan setelah diberi penguat. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada gambar 1 dibawah ini.



**Gambar 3.** Diagram Alir Penelitian

## Parameter Simulasi

Dalam menjalankan simulasi diperlukan beberapa parameter supaya pemodelan dapat berjalan dengan baik sesuai dengan karakteristik masing-masing komponen. DFB laser merupakan jenis transmitter (pengirim sinyal) yang efektif digunakan pada sistem optik WDM. DFB laser memiliki stabilitas panjang gelombang yang tinggi sehingga menjaga mampu meminimalkan dispersi, kebisingan fase, dan interferensi antar kanal WDM [15]. Tabel 1 berikut adalah parameter DFB laser yang

digunakan dalam simulasi.

**Tabel 1.** Parameter DFB Laser

Parameter	Nilai	Satuan
Frekuensi / Panjang Gelombang	1550; 1551.6; 1553.2; 1554.8	Nm
Grating indeks different	0.005	
Power	0	dBm

Komponen selanjutnya adalah kabel serat optik (fiber optik). Serat optik berbentuk silinder dan berfungsi sebagai media transmisi dengan menerapkan prinsip pemantulan sinyal optik berupa cahaya yang memiliki panjang gelombang tertentu [1]. Adapun parameter kabel serat optik yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan dalam tabel 2.

**Tabel 2.** Parameter Kabel Serat Optik

Parameter	Nilai	Satuan
Frekuensi / Panjang Gelombang	1550	Nm
Atenuasi	0.2	dB/km
Panjang Serat Optik	40, 50, 60, 70	km
Dispersi	16.75	Ps/nm/km
Dispersion slope	0.075	Ps/nm <sup>2</sup> /k

Proses pengiriman informasi pada serat optik tak sepenuhnya sempurna. Selama perambatannya, memungkinkan gelombang cahaya mengalami redaman di sepanjang serat dan pada titik persambungan serat optik. Oleh karena itu, penguat (amplifier) dibutuhkan untuk memperkuat gelombang cahaya yang mengalami redaman pada transmisi jarak jauh [16]. Adapun jenis penguat yang digunakan dalam penelitian ini adalah EDFA dengan parameter sebagai berikut.

**Tabel 3.** Parameter Gain EDFA

Parameter	Nilai	Satuan
Gain	40, 60, 80, 100	dB
Power	10	dB
Noise figure	4	dB

## HASIL DAN DISKUSI

Simulasi yang dilakukan dalam penelitian ini terdiri dari 3 variasi variabel, yaitu panjang serat optik, nilai gain EDFA, dan membandingkan nilai OPM ketika sebelum diberi penguat dan setelah diberi penguat.

## Pengaruh panjang serat optik terhadap OPM

**Tabel 4.** Variasi Panjang Serat Optik

Panjang Fiber Optik (km)	Forward Pumping Power EDFA	Power sebelum ada penguat (dBm)	Power sesudah ada penguat (dBm)
40	100 mW	- 4.381	17.343
50		- 6.409	17.227
60		- 8.382	17.075
70		- 10.390	16.864

Pada simulasi pertama dilakukan variasi panjang serat optik untuk menganalisis pengaruhnya terhadap nilai Optikal Power Meter (OPM) pada sistem WDM. Nilai OPM juga dapat mempresentasikan redaman sinyal. Berdasarkan tabel 4, dapat diketahui bahwa semakin panjang serat optik yang digunakan maka semakin rendah nilai OPM yang terbaca, baik dengan ataupun tanpa EDFA. Dengan kata lain, semakin panjang media untuk transmisi maka redaman yang terjadi juga semakin besar. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian oleh Jemi (2021)[5], bahwa serat optik cenderung mengalami loss atau pelemahan daya yang dibawa oleh daya akibat kurangnya kejernihan bahan serat optik. Oleh karena itu, semakin panjang kabel serat optik yang digunakan maka semakin besar nilai redaman yang terjadi per satuan kilometer.

## Pengaruh Nilai Forward Pumping Power EDFA

**Tabel 5.** Variasi Forward Pumping Power terhadap SNR

Forward Pumping Power (dB)	Frekuensi (Nm)	SNR (dB)
40	1550	42.152
	1551.6	42.085
	1553.2	42.050
	1554.8	42.033
60	1550	42.214
	1551.6	42.193
	1553.2	42.080
	1554.8	42.037
80	1550	42.243
	1551.6	42.152
	1553.2	42.083
	1554.8	42.080
100	1550	42.132

	1551.6	42.240
	1553.2	42.145
	1554.8	42.272

Istilah forward pump power mengacu pada daya cahaya pompa yang masuk ke dalam serat optik searah dengan propagasi sinyal yang akan diperkuat. Dengan memberikan energi melalui forward pump power, atom-atom dalam medium gain dipacu ke tingkat energi yang lebih tinggi sehingga ketika sinyal laser melewati medium, mereka dapat mengalami penguatan dan menghasilkan output yang kuat dan stabil [6]. Berdasarkan tabel 5 diketahui bahwa daya pompa forward yang lebih tinggi kan menghasilkan nilai Signal-to-Noise Ratio (SNR) yang lebih tinggi pula. SNR mengacu pada seberapa kuat sinyal informasi yang diinginkan. Semakin tinggi nilainya maka menunjukkan bahwa sinyal informasi yang dibawa lebih kuat dan lebih mudah dideteksi.

**Perbandingan dengan dan tanpa EDFA**

Pada tabel 6 disajikan data perbandingan nilai Q-factor dan Min. Bit Error Rate ketika sistem WDM diberi EDFA dan tanpa EDFA pada tiap variasi panjang serat optiknya. Nilai BER sangat penting untuk menunjukkan kualitas sistem optik yang disimulasikan. Berikut merupakan hasil grafik perbandingan nilai BER rata-rata yang ditunjukkan pada tabel 6.

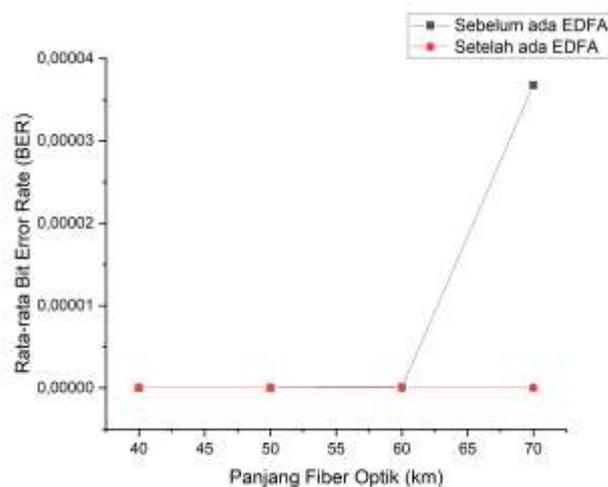
**Tabel 6. Perbandingan Nilai BER sebelum dan sesudah diberi EDFA**

Panjang Fiber Optik (km)	Frekuensi (Nm)	Q factor sebelum	Q factor sesudah	Min BER sebelum	Min. BER sesudah
40	1550	7.2321	7.30606	2.35349e-13	1.35862e-12
	1551.6	7.11173	7.07122	5.66133e-13	7.60157e-13
	1553.2	7.22616	7.24539	2.43023e-13	2.11397e-13
	1554.8	7.2659	7.17749	1,82592e-13	3.50607e-13
50	1550	7.21615	7.2968	2.62809e-13	1.44454e-13
	1551.6	7.11079	7.03006	5.741e-13	1.02769e-12
	1553.2	7.11255	7.21755	5.58291e-13	2.58898e-13
	1554.8	7.09849	7.22199	6.21034e-13	2.51516e-13
60	1550	7.07679	7.19224	7.37488e-13	3.17903e-13
	1551.6	6.9035	7.23542	2.48659e-12	2.27221e-13
	1553.2	7.17324	7.19517	3.58674e-13	3.06483e-13
	1554.8	7.01542	7.25307	1.12791e-12	1.9962e-13
70	1550	6.73541	7.27646	8.14262e-12	1.69816e-13

	1551.6	6.57681	7.41993	2.38105e-11	5.79135e-14
	1553.2	6.72233	7.20426	8.79165e-12	2.86086e-13
	1554.8	6.55967	7.1151	2.68408e-11	5.58455e-13

Berdasarkan gambar 4 dapat diketahui bahwa rata-rata BER sebelum adanya EDFA semakin besar seiring dengan bertambahnya panjang serat optik. Sebaliknya, nilai BER akan semakin kecil apabila sistem WDM diberi EDFA. Hal ini menunjukkan bahwa EDFA mampu menurunkan nilai BER secara signifikan di setiap frekuensi, sehingga kualitas transmisi tetap terjaga meskipun panjang serat optik semakin meningkat [17]. Dengan kata lain, EDFA memiliki peran penting dalam mengurangi efek yang dapat menyebabkan peningkatan BER dan mengurangi redaman sehingga kinerja sistem semakin meningkat.

Selain itu, dalam pengembangan sistem LiDAR berbasis serat optik, penggunaan penguat seperti EDFA juga sangat penting untuk memastikan sinyal optik yang dipantulkan dari target tetap cukup kuat untuk dideteksi oleh receiver, terutama pada aplikasi jarak jauh atau lingkungan dengan tingkat redaman tinggi [18]. Dengan demikian, penggunaan EDFA pada sistem WDM 4 kanal tidak hanya meningkatkan performa komunikasi optik, tetapi juga sangat relevan untuk mendukung aplikasi LiDAR yang membutuhkan akurasi dan presisi tinggi dalam pengukuran jarak dan pemetaan tiga dimensi



**Gambar 4.** Grafik Rata-rata Nilai BER.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi, penguat EDFA memiliki fungsi yang sangat penting untuk meningkatkan efisiensi kinerja sistem WDM. Dari hasil simulasi tersebut didapatkan beberapa kesimpulan. Semakin panjang serat optik yang digunakan maka semakin besar pula redaman yang terjadi di sepanjang jalur transmisi. Semakin besar nilai forward pump power semakin besar energi yang dipacu dalam gain untuk memperkuat sinyal informasi pembawa. EDFA memungkinkan transmisi data yang lebih akurat dibuktikan dengan nilai BER yang semakin kecil

## SARAN

Dalam implementasi praktis sistem WDM, sangat penting untuk mempertimbangkan kinerja

sistem di seluruh rentang panjang gelombang operasional. Penelitian ini memberikan analisis mendalam tentang kinerja sistem dalam rentang 1550-1555 nm. Oleh karena itu, kami menyarankan agar para perancang sistem melakukan studi tambahan untuk memvalidasi dan mengoptimalkan desain untuk rentang panjang gelombang yang lebih luas untuk memastikan kinerja sistem yang kuat dan andal.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Djamaluddin, A. Achmad, F. Hidayat, and D. Bramatyo, "Analisis Penguat EDFA dan SOA pada Sistem Transmisi DWDM dengan Optisystem 14," *Pros. Semin. Nas. Tek. Elektro (FORTEI 2017)*, pp. 59–64, 2018.
- [2] S. Danaryani, S. El Yumin, and I. Krisnadi, "Studi Perancangan Jaringan Komunikasi Serat Optik Dwdm L Band dengan Penguat Optik Edfa," *Setrum Sist. Kendali-Tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer*, vol. 4, no. 2, p. 60, 2016, doi: 10.36055/setrum.v4i2.453.
- [3] F. Khair, "Perancangan Sistem Optik DWDM 8 Kanal dengan Penguat EDFA," *J. Telecommun. Electron. Control Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 24–40, 2021, doi: 10.20895/jtece.v3i1.228.
- [4] J. Gujral and M. Singh, "Performance Analysis of 4-Channel WDM System with and without EDFA," vol. 7109, pp. 70–74, 2013.
- [5] J. Ristiawan, F. Imansyah, and D. Suryadi, "Identifikasi Pengaruh Loss Daya Saluran Serat Optik Terhadap Kualitas Layanan Internet," *Jteuntan*, vol. 2, no. 1, 2021.
- [6] Z. Wang et al., "Dual-wavelength bidirectional pumped high-power Raman fiber laser," *High Power Laser Sci. Eng.*, vol. 7, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1017/hpl.2018.67.
- [7] R. Ahya et al., "ANALISIS SIMULASI PENGGUNAAN PENGUAT SOA DAN EDFA PADA SISTEM KOMUNIKASI OPTIK WDM-PON," vol. 8, no. 2, 2024.
- [8] H. Uang and F. A. N. I. L. In, "TDM / WDM hybrid real-time multi-channel pulsed chaos lidar system," vol. 33, no. 7, pp. 14885–14898, 2025.
- [9] S. Kim et al., "Time division multiplexing based multi-spectral semantic camera for LiDAR applications," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–11, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-62342-2.
- [10] J. Liu, G. Chen, M. Liu, W. Gu, and T. Qian, "High-precision multichannel time-domain wavelength division multiplexing FMCW LiDAR ranging and 3D imaging," vol. 23, no. 2, pp. 1–8, 2025, doi: 10.3788/COL202523.021203.
- [11] B. Mukherjee, "WDM optikal communication networks: progress and challenges," *IEEE*, vol. 18, no. 10, pp. 1810–1824, 2000, doi: <https://doi.org/10.1109/49.887904>.
- [12] K. Grobe, "Wavelength division multiplexing," *Encycl. Mod. Opt.*, vol. 1–5, no. November, pp. 255–290, 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09471-6.
- [13] S. Chaugule and A. More, "WDM and optikal amplifier (Wavelength Division Multiplexing)," *ICMEE 2010 - 2010 2nd Int. Conf. Mech. Electron. Eng. Proc.*, vol. 2, no. Icmee, pp. 232–236, 2010, doi: 10.1109/ICMEE.2010.5558438.
- [14] E. D. F. Ed and B. Bas, "Introduction to EDFA Technology," pp. 1–6, 2009.
- [15] M. Funabashi et al., "Recent advances in DFB lasers for ultradense WDM applications," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 10, no. 2, pp. 312–320, 2004, doi: 10.1109/JSTQE.2004.826576.
- [16] H. Ad, I. Santoso, and A. A. Zahra, "Tipe Serat Optik Menggunakan Cisco Transport Planner".
- [17] D. G. A. Mahesa Yoga, S. Graceline, R. Imanuel S, P. K. Sudiarta, and I. G. A. K. Diafari Djuni Harta, "Performansi Wavelength Division Multiplexing Pada Jaringan Optik," *J. SPEKTRUM*, vol. 10, no. 3, p. 46, 2023, doi: 10.24843/spektrum.2023.v10.i03.p6.
- [18] S. Pagliariccio, "Development of an optikal amplifier in phosphate glass for LIDAR applications," 2019.