

## Simulasi sistem *radio over fiber* menggunakan *quadrature amplitude modulation* dan *fiber bragg grating*

Muhammad Agung Setiawan<sup>1</sup>, Aminah Indahsari Marsuki<sup>2\*</sup>,  
Muhammad Wildhan Farriz Avero<sup>3</sup>, Muhamad Bintang Al Varizi

<sup>1,2,3,4</sup>Fakultas Teknik Elektro, Telkom University

<sup>2</sup>The Center of Excellence Telecom Infra Project, Telkom University

Jl. Telekomunikasi No. 1, Terusan Buahbatu, Kabupaten Bandung, Jawa Barat, 40257, Indonesia

<sup>1</sup>agungsetiawn@student.telkomuniversity.ac.id, <sup>2\*</sup>aminahindahsarim@telkomuniversity.ac.id,

<sup>3</sup>alonemask@student.telkomuniversity.ac.id, <sup>4</sup> bintangalvz@student.telkomuniversity.ac.id

### ABSTRAK

*Radio over Fiber (RoF)* merupakan teknologi transmisi yang menggabungkan keunggulan komunikasi radio dan serat optik untuk mendukung kebutuhan jaringan berkecepatan tinggi dan jangkauan luas. Namun, sistem RoF masih menghadapi permasalahan umum berupa dispersi kromatik yang menyebabkan peningkatan *Bit Error Rate (BER)* dan penurunan kualitas sinyal. Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan sistem RoF menggunakan modulasi *Quadrature Amplitude Modulation (QAM)* serta mengevaluasi efektivitas *Fiber Bragg Grating (FBG)* sebagai kompensator dispersi. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak OptiSystem, dengan analisis terhadap spektrum optik, spektrum RF, diagram konstelasi, dan parameter performa seperti BER dan *Q-factor*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan FBG secara signifikan meningkatkan kualitas transmisi, dimana nilai BER menurun dari  $2,94 \times 10^{-8}$  menjadi  $5,25 \times 10^{-10}$ , dan *Q-factor* meningkat dari 5,42 menjadi 6,09. Nilai *eye height* juga meningkat dari 0,0203 menjadi 0,0393. Hal ini membuktikan bahwa FBG sangat efektif dalam mengatasi efek dispersi pada sistem RoF dan meningkatkan performa sistem sebesar lebih dari 90% dalam aspek BER.

**Kata kunci:** RoF, FBG, QAM, BER, *dispersion*

### ABSTRACT

*Radio over Fiber (RoF)* is a transmission technology that integrates the advantages of radio communication and optical fiber to support high-speed and long-distance communication networks. However, RoF systems are susceptible to chromatic dispersion, which can increase the *Bit Error Rate (BER)* and degrade signal integrity. This study simulates a RoF system employing 4-QAM modulation (2 bits per symbol) at 60 GHz and evaluates the effectiveness of *Fiber Bragg Grating (FBG)* as a dispersion compensator. The simulation was conducted using OptiSystem software, and system performance was analyzed through optical spectrum, RF spectrum, constellation diagram, BER, *Q-factor*, and *eye height* measurements. The results show that the implementation of FBG significantly enhances transmission performance. The BER decreases from  $2.93713 \times 10^{-8}$  (without FBG) to  $5.24715 \times 10^{-10}$  (with FBG), corresponding to an improvement of nearly two orders of magnitude. The *Q-factor* increases from 5.42186 to 6.09427, while the *eye height* improves from 0.020351 to 0.0393347, indicating better signal clarity and reduced distortion. These results confirm that FBG effectively mitigates chromatic dispersion and improves the reliability and quality of the RoF transmission system.

**Keywords:** RoF, FBG, QAM, BER, *dispersion*

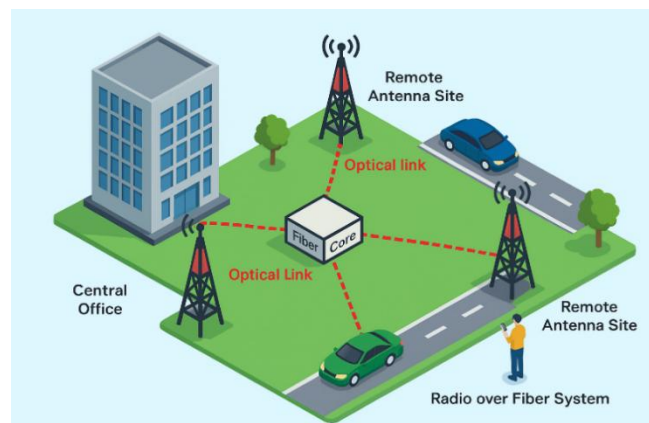
## 1. PENDAHULUAN

Teknologi komunikasi optik terus mengalami perkembangan pesat seiring meningkatnya kebutuhan akan sistem komunikasi berkecepatan tinggi, *bandwidth* besar, dan jangkauan transmisi yang luas. Salah satu solusi potensial adalah *Radio over Fiber (RoF)*, yaitu teknologi yang mentransmisikan sinyal radio (RF) melalui media serat optik. RoF menggabungkan keunggulan komunikasi nirkabel dan serat optik, seperti fleksibilitas, kapasitas transmisi yang besar, serta redaman yang rendah. Oleh karena itu, teknologi ini sangat sesuai untuk mendukung jaringan akses generasi berikutnya seperti 5G dan layanan *broadband* berkecepatan tinggi [1].

Namun, tantangan utama dalam implementasi sistem RoF adalah terjadinya *dispersion power fading*, yaitu penurunan kualitas sinyal akibat dispersi kromatik dan efek nonlinier dalam *fiber*. Dispersi ini menyebabkan penyebaran pulsa optik dan menimbulkan *inter-symbol interference* (ISI), yang dapat meningkatkan *Bit Error Rate* (BER). Peningkatan BER akan berdampak pada penurunan kinerja dan reliabilitas sistem secara keseluruhan. Salah satu solusi untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan menggunakan *Fiber Bragg Grating* (FBG) sebagai kompensator *disperse* [2].

FBG merupakan struktur periodik yang ditanamkan pada inti serat optik, berfungsi untuk memantulkan panjang gelombang tertentu dan melewatkan yang lain. Ketika sinyal optik melalui FBG, komponen dengan panjang gelombang tertentu akan dipantulkan kembali, sementara sinyal dengan panjang gelombang lainnya diteruskan. Dengan desain yang tepat, FBG mampu menyaring atau menyesuaikan waktu tempuh sinyal berdasarkan panjang gelombangnya, sehingga dapat mengurangi efek penyebaran pulsa akibat dispersi kromatik. Hal ini menjadikan FBG sangat efektif untuk meningkatkan kualitas transmisi optik pada sistem RoF [3].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji performa sistem RoF menggunakan berbagai skema modulasi dan teknik kompensasi dispersi, termasuk pemanfaatan FBG. Namun, sebagian besar studi tersebut berfokus pada sistem berbasis WDM atau tidak secara spesifik mengevaluasi integrasi modulasi 4-QAM pada pita milimeter 60 GHz dengan penempatan FBG sebagai kompensator dispersi dalam konfigurasi link yang terkontrol. Selain itu, analisis kuantitatif terhadap peningkatan performa berdasarkan parameter *Bit Error Rate* (BER), *Q-factor*, dan *eye height* secara simultan pada skenario tersebut masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan dan menganalisis sistem RoF berbasis 4-QAM (*2 bit per simbol*) pada frekuensi 60 GHz dengan penerapan FBG sebagai kompensator dispersi menggunakan OptiSystem, serta mengevaluasi secara komprehensif perbedaan performa sistem dengan dan tanpa FBG untuk mengukur efektivitas teknik kompensasi dispersi terhadap kualitas transmisi sinyal [4].



Gambar 1. Arsitektur RoF

Pada Gambar 1 memperlihatkan arsitektur dasar dari sistem RoF, di mana sinyal RF dari pusat pengendali (*central office*) ditransmisikan melalui *optical link* ke berbagai *Remote Antenna Station* (RAS) yang tersebar di beberapa lokasi. Serat optik menghubungkan pusat dengan unit distribusi (*fiber core*), yang kemudian meneruskan sinyal ke antena pemancar melalui jalur optik. Arsitektur ini memanfaatkan keunggulan *fiber* optik untuk mengirimkan sinyal radio jarak jauh dengan redaman rendah dan stabilitas tinggi, yang kemudian dikonversi menjadi sinyal nirkabel di titik-titik RAS untuk menjangkau pengguna akhir secara efisien. Sistem ini mendukung konsep jaringan masa depan seperti 5G dan *broadband* berkecepatan tinggi, sebagaimana dijelaskan dalam pendahuluan.

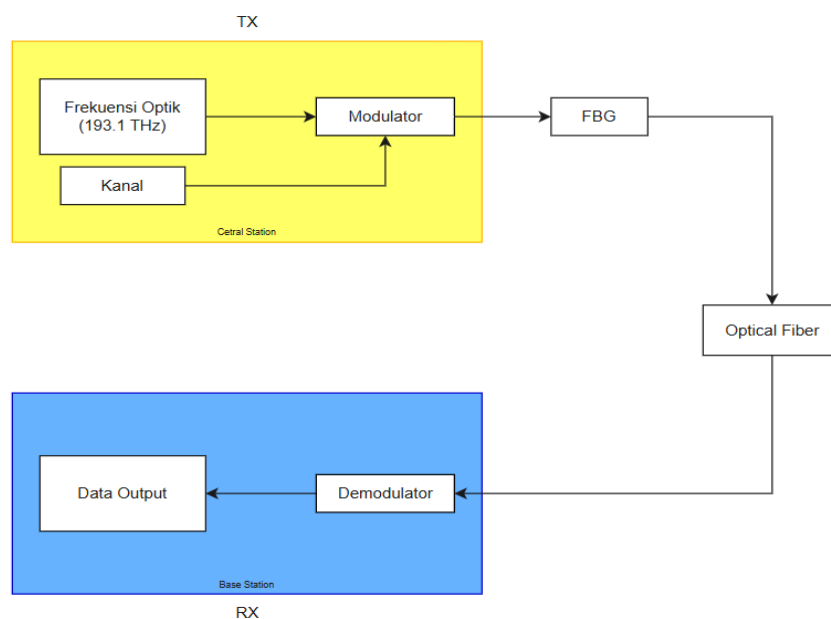
Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan dan menganalisis sistem RoF menggunakan modulasi QAM dengan *2 bit per simbol* serta teknik kompensasi dispersi menggunakan FBG. Simulasi dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak OptiSystem untuk mengamati performa sistem. Parameter yang dianalisis meliputi spektrum optik, spektrum RF, diagram konstelasi sinyal, dan hasil dari BER *analyzer*. Selain itu, dilakukan perbandingan antara sistem RoF dengan dan tanpa FBG untuk mengevaluasi kontribusi penggunaan kompensator dispersi terhadap kualitas sinyal yang diterima [5]-[11].

## 2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, dilakukan perancangan sistem RoF yang dikombinasikan dengan teknik modulasi QAM dan kompensasi dispersi menggunakan FBG. Simulasi sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak OptiSystem untuk menganalisis performansi sistem RoF berbasis modulasi QAM dan kompensasi dispersi. Tahapan awal dimulai dengan pemilihan parameter dasar sistem, yaitu frekuensi optik sebesar 193,1 THz dan frekuensi modulasi QAM sebesar 60 GHz. Sinyal digital pseudo-acak (PRBS) dimodulasi menggunakan 4-QAM (2 bit per simbol) dan kemudian ditumpangkan ke sumber cahaya *laser* kontinu (CW *laser*) melalui *Mach-Zehnder Modulator* (MZM) sebagai modulasi optik eksternal. Untuk mengurangi efek dispersi kromatik, komponen FBG ditempatkan di sisi *transmitter* sebagai *pre-dispersion compensator* sebelum sinyal optik memasuki serat utama. Sinyal optik selanjutnya ditransmisikan melalui serat optik *single-mode* sepanjang 1,4 km dengan redaman 0,2 dB/km dan diperkuat menggunakan *optical amplifier* dengan gain 20 dB serta *noise figure* 4 dB. Di sisi penerima, sinyal optik dikonversi menjadi sinyal listrik menggunakan *photodetector* PIN, kemudian diproses melalui *quadrature demodulator* pada frekuensi 60 GHz, *M-ary threshold detector*, dan *QAM sequence decoder*. Evaluasi performa sistem dilakukan menggunakan parameter *Bit Error Rate* (BER), *Q-factor*, dan daya terima, dengan kriteria keberhasilan apabila  $BER < 10^{-9}$  atau daya terima  $\geq -28$  dBm. Hasil simulasi digunakan untuk mengevaluasi efektivitas FBG dalam mengurangi dispersi dan meningkatkan kualitas transmisi pada sistem RoF.

### 2.1 Pemodelan Sistem

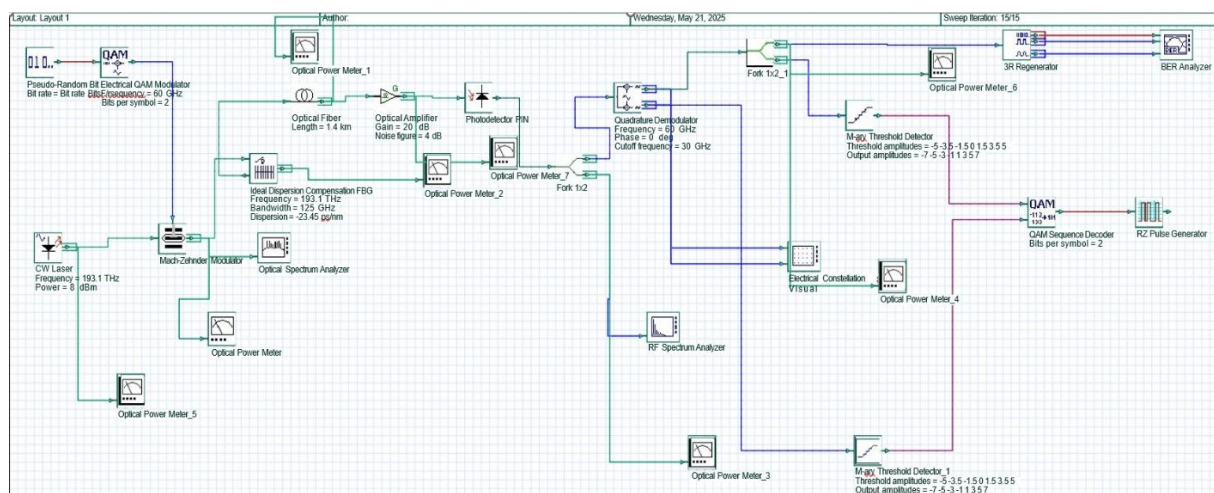
Gambar 2 memperlihatkan rancangan sistem RoF berbasis serat optik *single-mode* dengan modulasi 4-QAM (2 bit per simbol) yang mentransmisikan data digital dari *central station* (TX) ke *base station* (RX). Sinyal dari *Pseudo-Random Bit Sequence* (PRBS) dimodulasi secara elektrik menggunakan modulator QAM, kemudian ditumpangkan pada sumber cahaya *laser* kontinu (CW *laser*) berfrekuensi 193,1 THz melalui MZM sebagai modulasi optik eksternal. Untuk mengurangi efek dispersi kromatik, FBG ditempatkan di sisi *transmitter* setelah proses modulasi optik dan sebelum sinyal memasuki serat optik utama sepanjang 1,4 km (*pre-dispersion compensation*). Di sisi penerima, sinyal optik dikonversi menjadi sinyal listrik menggunakan fotodetektor PIN, kemudian didemodulasi secara kuadratur, diproses melalui *QAM sequence decoder* dan *M-ary threshold detector*, serta diregenerasi menggunakan 3R regenerator sebelum dievaluasi menggunakan *BER analyzer*. Pada sistem ini, 4-QAM berperan dalam meningkatkan efisiensi spektral, sedangkan FBG berfungsi menjaga integritas pulsa optik selama proses transmisi [12].



**Gambar 2. Konfigurasi sistem RoF**

## 2.2 Konfigurasi Sistem pada Simulasi

Konfigurasi sistem pada Gambar 3 menunjukkan rancangan komunikasi RoF yang memanfaatkan serat optik *single-mode* sepanjang 1,4 km dengan koefisien redaman sebesar 0,2 dB/km serta menggunakan modulasi QAM2 *bit/symbol* [13]. Sistem ini juga menggunakan kompensasi dispersi melalui komponen *Dual Dispersion Compensator* FBG yang memiliki frekuensi 193,1 THz, *bandwidth* 0,25 THz, dan dispersi sebesar -25,45 ps/nm. Pada blok *transmitter* (TX), cahaya dari CW *Laser* dengan frekuensi 193,1 THz dan daya 8 dBm dimodulasi oleh MZM menggunakan sinyal digital acak PRBS yang telah dimodulasi secara elektrik dengan QAM pada frekuensi 60 GHz dan laju 2 *bit/symbol* [14]. Sinyal optik yang telah dimodulasi dikirimkan melalui serat optik 1,4 km, dan diperkuat oleh *optical amplifier* dengan gain 20 dB dan *noise figure* 4 dB untuk mengatasi redaman sinyal. Di sisi *receiver* (RX), sinyal optik dikonversi oleh *photodetector* PIN menjadi sinyal listrik, kemudian diproses oleh *quadrature demodulator* pada frekuensi 60 GHz, dengan *cut-off frequency* 30 GHz dan fase 0°, untuk mengambil kembali informasi digital, yang selanjutnya dianalisis menggunakan QAM *decoder*, BER *analyzer*, serta RF dan *optical spectrum analyzer*. Adapun parameter yang digunakan untuk simulasi ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 3. Konfigurasi sistem pada simulator

Tabel 1. Parameter konfigurasi sistem *radio over fiber* pada simulasi

Parameter	Nilai	Keterangan
Frekuensi Optik (CW Laser)	193,1 THz	Sumber cahaya
Daya Laser	8 dBm	Input optical power
Modulasi	4-QAM	2 bit/symbol
Frekuensi RF	60 GHz	Carrier RF
Panjang Fiber	1,4 km	Single-mode fiber
Redaman Fiber	0,2 dB/km	Attenuation coefficient
Gain Optical Amplifier	20 dB	Penguat sinyal
Noise figure Amplifier	4 dB	Noise sistem
Bandwidth FBG	0,25 THz	Kompensator dispersi
Dispersi FBG	-25,45 ps/nm	Pre-compensation
Cut-off frequency RX	30 GHz	Quadrature demodulator
Kriteria BER	$< 10^{-9}$	Standar keberhasilan
Daya Terima Minimum	$\geq -28$ dBm	Link feasibility

Output demodulasi dianalisis menggunakan *Electrical Constellation Visualizer*, BER *Analyzer*, dan RF *Spectrum Analyzer*. Data hasil analisis kemudian diproses lebih lanjut menggunakan *M-ary Threshold detectors*. Selanjutnya, sinyal digital yang telah diproses dikirim ke QAM *Sequence decoder*. QAM *Sequence decoder* digunakan untuk memulihkan kembali data digital dari sinyal termodulasi. Evaluasi performa sistem dilakukan secara menyeluruh dengan parameter utama seperti BER, *Q-Factor*,

dan *Link Power Budget*. Pengukuran parameter dilakukan menggunakan perangkat *BER Analyzer*, *Optical Spectrum Analyzer*, dan tampilan konstelasi sinyal. Analisis konstelasi visual memberikan informasi tentang tingkat interferensi dan ketepatan simbol. Simulasi sistem dianggap berhasil apabila nilai BER lebih kecil dari  $10^{-9}$ . Kriteria keberhasilan lainnya adalah jika daya sinyal yang diterima lebih besar dari atau sama dengan  $-28$  dBm. Penggunaan *symmetric* FBG terbukti efektif dalam meningkatkan *Q-Factor*, mengurangi efek dispersi, dan menjaga integritas sinyal selama proses transmisi [15].

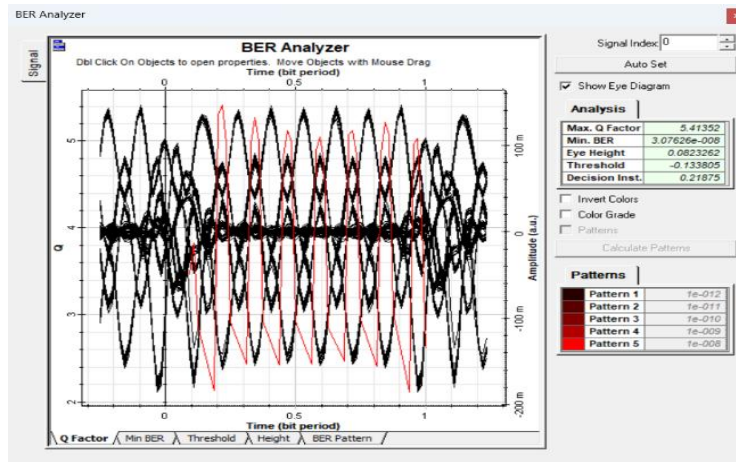
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada Gambar 4 sistem simulasi RoF yang menggunakan FBG sebagai kompensator dispersi menunjukkan hasil yang baik dari sisi kinerja transmisi. Berdasarkan pengukuran melalui *BER Analyzer*, diperoleh nilai BER minimum sebesar  $3,07626 \times 10^{-8}$  dan *Q-factor* sebesar 5,41352. Nilai tersebut menunjukkan tingkat kesalahan transmisi yang rendah dan kualitas sinyal yang cukup andal. Diagram mata yang dihasilkan memiliki *eye height* sebesar 0,0283262, yang menunjukkan rendahnya pengaruh *noise* dan *jitter* pada sinyal. Bukti mata yang lebar juga menjadi pertanda bahwa sinyal digital tetap terjaga dengan baik selama proses transmisi. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan FBG berperan penting dalam menjaga kestabilan dan integritas sistem RoF berbasis serat optik [16].

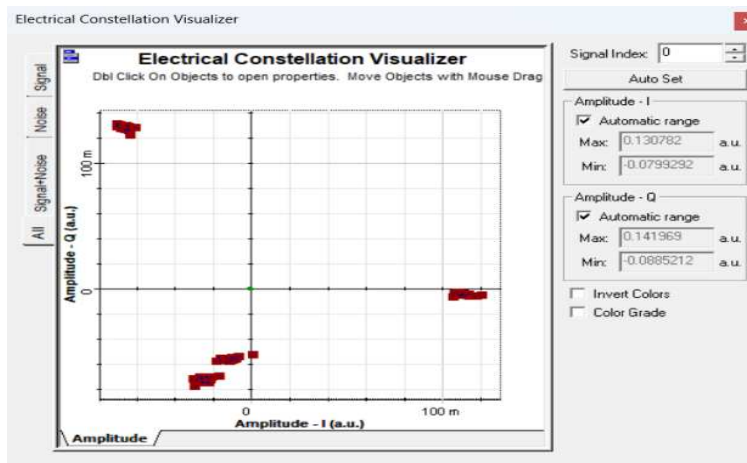
Pada Gambar 5 dari *Electrical Constellation Visualizer* terlihat distribusi simbol pada empat kuadran yang merepresentasikan modulasi 4-QAM ( $2$  bit/simbol). Secara geometris, konstelasi 4-QAM ekuivalen dengan QPSK karena keduanya memiliki empat titik simbol dengan jarak yang sama pada bidang *in-phase* (I) dan *quadrature* (Q). Pola konstelasi yang kompak menunjukkan bahwa simbol-simbol sinyal terdistribusi dengan baik, mencerminkan kualitas sinyal digital yang tinggi serta gangguan interferensi yang minimal. Konsistensi kerapatan simbol di setiap kuadran juga menandakan bahwa sistem berhasil mempertahankan kestabilan fase dan amplitudo sinyal setelah melewati media optik. Hasil ini selaras dengan temuan dalam studi [17], yang menunjukkan bahwa penerapan FBG pada sistem RoF berbasis WDM mampu meningkatkan kekonsistenan konstelasi dan mengurangi penyebaran simbol. Dengan demikian, visualisasi konstelasi ini memperkuat bahwa teknik modulasi yang digunakan efektif dalam menjaga keakuratan informasi selama proses transmisi. Secara keseluruhan, performa sistem modulasi 4-QAM pada skenario simulasi yang diberikan menunjukkan kinerja yang cukup andal dengan tingkat kesalahan yang rendah.

Pada Gambar 6 memperlihatkan hasil dari *RF Spectrum Analyzer* yang menunjukkan spektrum RF melebar secara simetris di sekitar frekuensi pusat sebesar 39,99 GHz. Nilai daya maksimum yang tercatat adalah 25,39 dBm, yang menandakan transmisi sinyal RF yang kuat dan stabil setelah proses konversi dari domain optik ke domain radio frekuensi. Spektrum yang bersih dan simetris menunjukkan tidak adanya distorsi yang signifikan serta efisiensi dalam konversi sinyal. Hal ini menegaskan bahwa sistem RoF yang diuji mampu mempertahankan integritas sinyal RF setelah melalui proses optik-elektrik. Kualitas spektrum ini menjadi bukti keberhasilan pengiriman kembali sinyal RF dari sistem RoF.

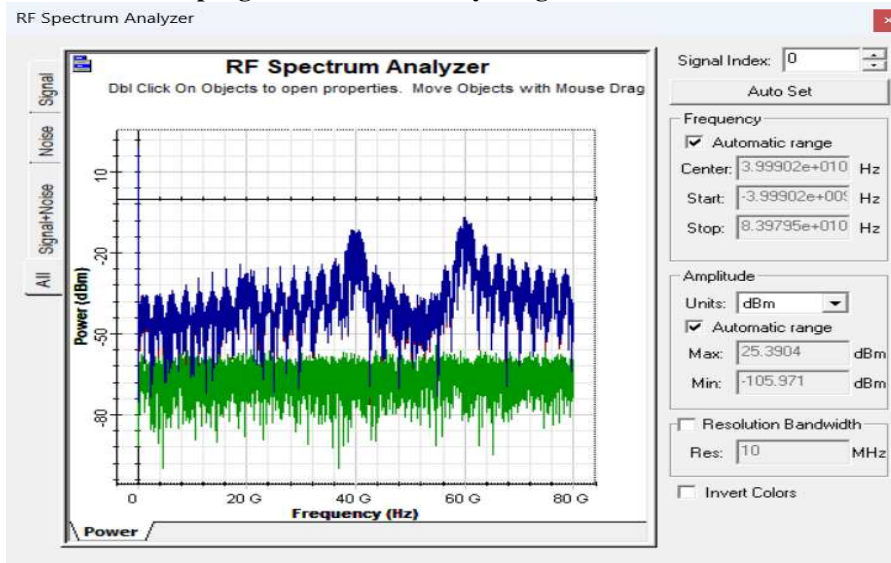
Gambar 7 dari *Optical Spectrum Analyzer* menampilkan spektrum optik dengan beberapa puncak intensitas dominan di sekitar panjang gelombang  $1,5525\mu\text{m}$ , yang menunjukkan efek transmisi dari FBG. Puncak tersebut menggambarkan bahwa FBG berfungsi sebagai reflektor panjang gelombang tertentu, selaras dengan desain kompensator dispersi dalam sistem. Filter spektral ini efektif dalam mengurangi interferensi saluran lain serta meningkatkan kecerahan sinyal optik. Integrasi FBG dalam konfigurasi RoF terbukti secara visual menstabilkan spektrum, dengan puncak yang tajam dan laten menghilang di luar pita seleksi optik. Temuan ini mendukung temuan [18], yang menunjukkan peningkatan kualitas spektrum dan kinerja sistem komunikasi optik jarak jauh berkat penggunaan FBG. Dengan demikian, penggunaan FBG dalam sistem RoF optik memberikan kontribusi signifikan terhadap pemfilteran spektrum dan kestabilan keseluruhan jaringan.



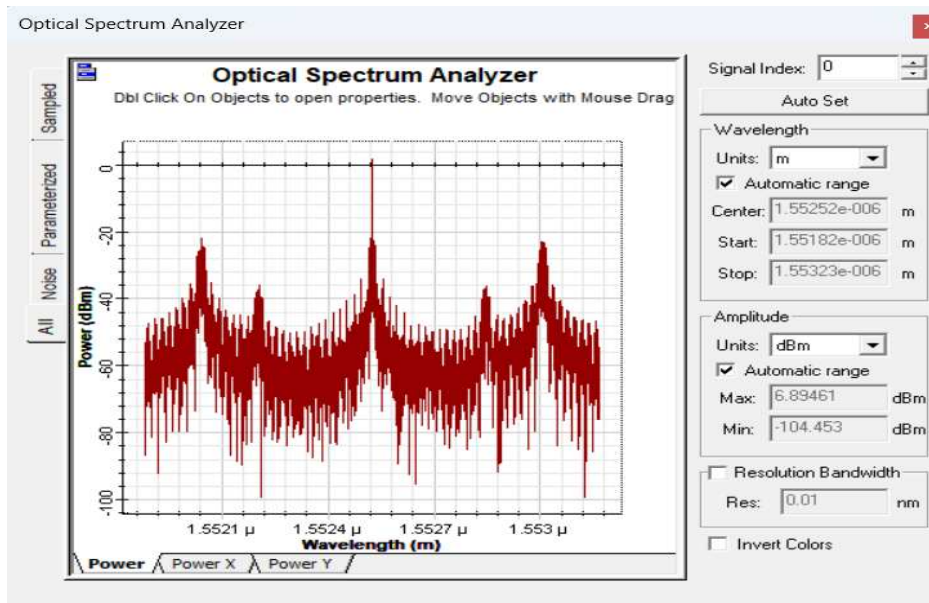
Gambar 4. Pengukuran menggunakan BER analyzer



Gambar 5. Hasil pengukuran kualitas sinyal digital melalui konstelasi modulasi



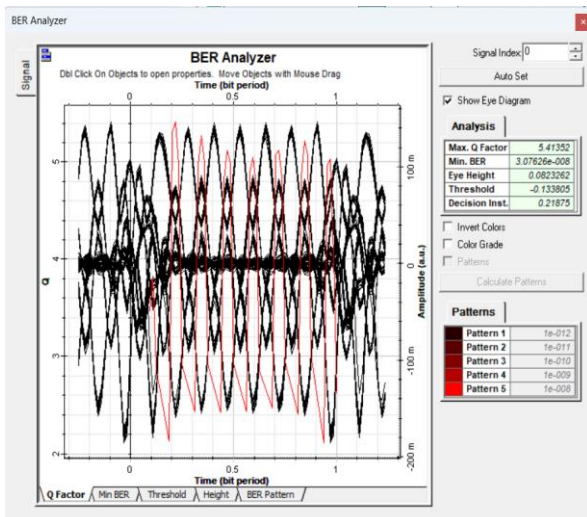
Gambar 6. Hasil pengukuran spektrum frekuensi sinyal RF



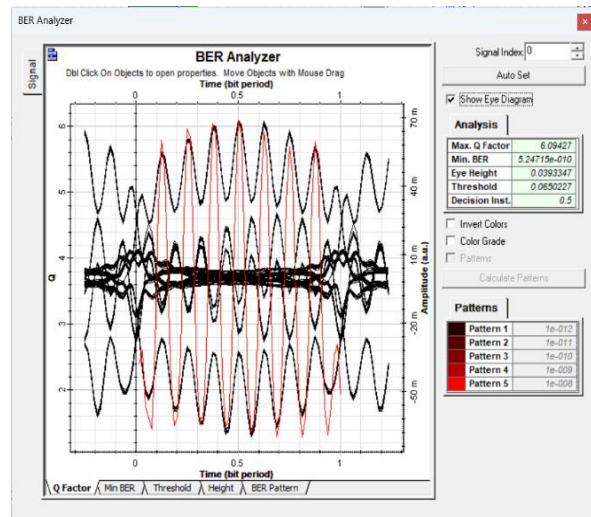
Gambar 7. hasil pengukuran spektrum sinyal optik

### 3.1 Analisis Hasil Tanpa FBG

Perbandingan nilai BER *analyzer* tanpa dan dengan FBG ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9. Terdapat perbedaan kinerja yang signifikan pada sistem RoF dengan dan tanpa penggunaan FBG, berdasarkan hasil analisis BER. Pada sistem tanpa FBG, nilai *Q-factor* tercatat sebesar 5,42186 dan BER minimum sebesar  $2,93713 \times 10^{-8}$ , dengan *eye height* hanya sebesar 0,020351, yang menunjukkan bahwa sinyal mengalami distorsi akibat pengaruh *noise* dan *jitter*. Distorsi ini dapat menyebabkan kesalahan deteksi pada sisi *receiver*, sehingga menurunkan akurasi sistem. Setelah FBG digunakan sebagai kompensator dispersi, terjadi peningkatan performa yang terlihat dari kenaikan nilai *Q-factor* menjadi 6,09427 dan penurunan BER menjadi  $5,24715 \times 10^{-10}$ . Ketinggian mata pun meningkat menjadi 0,0393347, menandakan diagram mata yang lebih bersih dan stabil. Peningkatan ini mencerminkan integritas sinyal digital yang lebih baik serta menunjukkan efektivitas FBG dalam penyaringan panjang gelombang dan pengurangan efek dispersi pada transmisi optik. Secara keseluruhan, penggunaan FBG terbukti mampu meningkatkan kualitas sinyal, mengurangi kesalahan transmisi, dan mendukung kestabilan sistem RoF dalam pengiriman data berkecepatan tinggi [19].



Gambar 8. Nilai BER *analyzer* tanpa FBG



Gambar 9. Nilai BER *analyzer* dengan FBG

#### 4. KESIMPULAN

Terdapat variasi yang nyata dalam kinerja sistem RoF dengan dan tanpa penggunaan FBG, berdasarkan hasil simulasi studi BER. Ketika FBG tidak digunakan, nilai faktor-Q tercatat sebesar 5,42186 dan nilai BER minimum adalah  $2,93713 \times 10^{-8}$ . Dengan *eye height* sebesar 0,020351, diagram mata yang dihasilkan menunjukkan bahwa sinyal mengalami distorsi dan terpengaruh oleh *noise*. Sebaliknya, ketika FBG dimasukkan ke dalam sistem, nilai faktor-Q meningkat menjadi 6,09427, dan BER turun drastis menjadi  $5,24715 \times 10^{-10}$ . Selain itu, *eye height* juga meningkat secara signifikan menjadi 0,0393347, yang menunjukkan bentuk sinyal digital yang lebih jelas sehingga lebih mudah ditafsirkan oleh penerima. Temuan ini menunjukkan bahwa penerapan FBG sangat penting dalam menyaring panjang gelombang tertentu serta menurunkan gangguan selama transmisi dan distorsi sinyal. Oleh karena itu, FBG telah menunjukkan kemampuannya dalam meningkatkan kualitas sistem RoF, khususnya dalam hal akurasi dan keandalan transmisi data.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat terlaksana berkat dukungan penuh rekan kelompok dan dosen. Kami mengucapkan terima kasih kepada Telkom University atas sumber daya yang telah disediakan.

#### REFERENSI

- [1] H. M. Perdana and A. Firdausi, "Simulasi dan analisis performa sistem Radio over Fiber (RoF) dengan topologi WDM menggunakan software OptiSystem," *Jurnal Teknologi Elektro dan Komputer (JTEK)*, vol. 10, no. 2, pp. 95–101, 2021.
- [2] A. Ujang and M. Yakin, "Simulasi pengaruh panjang fiber terhadap performa sistem RoF dengan modulasi QAM pada 60 GHz," *Jurnal ELKOMIKA*, vol. 12, no. 1, pp. 45–53, 2024.
- [3] C. Apriono, Y. Nugroho, and Y. Natali, "Performance evaluation of WDM-RoF 5G fronthaul using EDFA and Fiber Bragg Grating (FBG)," *Jurnal Teknik Elektro dan Teknologi Informasi (JTETI)*, vol. 12, no. 3, pp. 118–125, 2023.
- [4] H. P. Shabira, Y. Natali, and C. Apriono, "Analisis penempatan Fiber Bragg Grating pada sistem RoF untuk layanan 5G fronthaul," *Jurnal Teknik Elektro Universitas Indonesia*, vol. 11, no. 2, pp. 75–82, 2022.
- [5] D. Kusumadewi and H. Subekti, "Perancangan dan simulasi sistem komunikasi optik menggunakan modulasi QAM dan kompensasi dispersi FBG," in *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Komunikasi (SENTIKA)*, vol. 12, pp. 204–209, 2020.
- [6] M. W. Cahya, S. Alam, and I. Surjati, "Analisis kelayakan performansi optical distribution point (ODP) pada optical network terminal (ONT) berdasarkan splitter 1:8," *Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga (JITEL)*, vol. 4, no. 3, pp. 209–220, 2024.
- [7] F. Ujang and A. Yakin, "Analisis perbandingan kinerja sistem Radio over Fiber modulasi optik langsung dan eksternal," *Jurnal ELKOMIKA*, vol. 11, no. 2, 2023.
- [8] R. A. Aprillian, E. Wahyuni, and M. Kholidiyah, "Analisis parameter bit error rate 10 Gbps OFDM-RoF dengan sistem mapping 4-QAM," *Jurnal Litek*, vol. 19, no. 2, 2021.
- [9] M. M. Kareem, "Analyzing the BER and optical fiber length performances in OFDM RoF links," *Indonesian Journal of Electrical Engineering & Computer Science*, vol. 23, no. 3, pp. 1501–1509, 2021.

- 
- [10] R. Ripai, K. Sujatmoko, and A. Hambali, "Performansi sistem Radio over Fiber untuk 4G dan 5G," in *e-Proceeding of Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 4704–4711, Aug. 2019.
- [11] H. M. Perdana and A. Firdausi, "Simulasi Radio over Fiber pada frekuensi 2.4 GHz berbasis wavelength division multiplexing menggunakan Fiber Bragg Gratings," 2023.
- [12] C. Apriono, S. S. P. Nugroho, and Y. Natali, "Quality improvement on RoF 5G fronthaul system design at millimeter-wave with EDFA and FBG techniques," *Journal of Engineering and Information Technology*, vol. 11, no. 3, 2024.
- [13] F. Ujang and A. Yakin, "Analisis perbandingan kinerja sistem Radio over Fiber modulasi optik langsung dan eksternal," *ELKOMIKA*, vol. 8, no. 2, pp. 245–252, 2020.
- [14] S. N. Thool, D. Chack, and A. Kumar, "Coherent detection-based optical OFDM, 60 GHz radio-over-fiber link using frequency quadrupling, and channel and carrier phase estimation," *Frontiers in Physics*, vol. 9, 2021.
- [15] F. M. Amalia, R. R. Isnanto, and A. S. Wibowo, "Analisis pengaruh peletakan kompensator dispersi FBG pada bit rate 10 Gbps dan 40 Gbps," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer (J-PTIIK)*, vol. 1, no. 10, pp. 1327–1334, 2016.
- [16] A. S. Permana, "Analysis of the effect using Fiber Bragg Grating as dispersion compensator on Radio over Fiber network system," *Undergraduate thesis*, Dept. Electrical Engineering, Universitas Brawijaya, Malang, 2018.
- [17] H. M. Perdana, "Simulasi perancangan Radio over Fiber berbasis WDM menggunakan Fiber Bragg Grating," Proyek Akhir, Universitas Telkom, 2019. [Online]. Available: <https://openlibrary.telkomuniversity.ac.id>
- [18] M. R. Darmawansyah, A. Hambali, and M. I. Maulana, "Pengaruh penggunaan kompensator dispersi Fiber Bragg Grating (FBG) pada sistem komunikasi optik long haul," *eProceedings of Engineering*, vol. 5, no. 3, 2018.
- [19] F. M. Kabonzo and Y. F. Peng, "Adaptive performance improvement of Fiber Bragg Grating in Radio over Fiber system," *Journal of Computer and Communications*, vol. 4, no. 3, pp. 1–6, Mar. 2016.
- [20] F. M. Amalia, S. H. Pramono, and G. Asmungi, "Analisis pengaruh peletakan kompensator dispersi Fiber Bragg Grating pada bit rate 10 Gbps dan 40 Gbps," *Jurnal TEUB*, vol. 4, no. 2, 2016.

