



# Simulasi *Radio Over Fiber* pada Frekuensi 2,4 GHz Berbasis *Wavelength Division Multiplexing* Menggunakan *Fiber Bragg Gratings*

Hadi Meiza Perdana\*, Ahmad Firdausi

*Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana  
Jl. Meruya Selatan No.1, Jakarta Barat 11650, Indonesia*

\*Email Penulis Koresponden: [hadimeizaperdana1697@gmail.com](mailto:hadimeizaperdana1697@gmail.com)

## **Abstrak:**

Teknologi *Radio over Fiber* (RoF) dapat diaplikasikan guna mendukung layanan *broadband*, dimana RoF merupakan sebuah teknologi untuk menggabungkan antara transmisi radio dan serat optik. Peningkatan kapasitas jaringan RoF dapat menggunakan teknik *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) yaitu teknologi yang menggabungkan beberapa panjang gelombang untuk dilewatkan pada suatu serat optik. WDM juga bertujuan agar memperoleh sistem dengan *bandwidth* dan kapasitas yang besar serta meningkatkan kapasitas jaringan RoF. Penambahan filter *Fiber Bragg Gratings* (FBG) dilakukan untuk meningkatkan performansi jaringan. Pada perancangan ini, FBG diletakkan pada sisi *receiver*. Simulasi perancangan teknologi RoF ini menggunakan perangkat lunak Optisystem yang bekerja pada frekuensi *unlicensed band* yaitu frekuensi 2,4 Ghz. Kinerja sistem dievaluasi dari segi *Q-factor*, BER dan *power link budget* menggunakan perangkat lunak Optisystem versi 15.

*This is an open access article under the [CC BY-NC](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) license*



## **Kata Kunci:**

*Radio over Fiber;*  
*WDM; Fiber Bragg Grating;*

## **Riwayat Artikel:**

Diserahkan 17 Februari 2021  
Direvisi 1 Mei 2021  
Diterima 6 Mei 2021  
Dipublikasi 21 Agustus 2021

## **DOI:**

10.22441/incomtech.v11i2.11156

## **1. PENDAHULUAN**

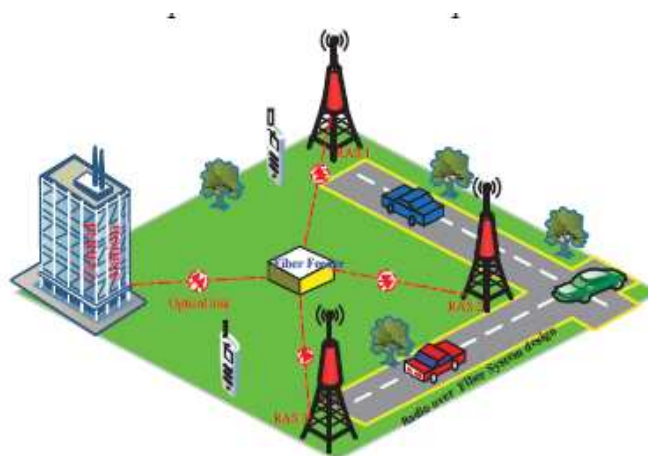
Kebutuhan akan komunikasi semakin meningkat dan layanan komunikasi sudah menjadi kebutuhan dasar bagi masyarakat di berbagai bidang kehidupan. Maka diperlukan jaringan yang andal yang dapat menyediakan jaringan dengan *bandwidth* dan kapasitas yang besar. *Radio over Fiber* (RoF) merupakan teknologi yang menggabungkan jaringan akses fiber dengan sistem *wireless* dimana ROF menggunakan kabel serat optik sebagai media perantara untuk

memperoleh kecepatan transmisi yang lebih besar dibandingkan ketika dilakukan transmisi secara langsung [1].

Simulasi perancangan RoF ini menggunakan perangkat lunak Optisystem yang bekerja pada frekuensi 2,4 Ghz. Frekuensi ini merupakan frekuensi *unlicensed band*. Untuk meningkatkan kapasitas jaringan RoF, digunakan teknik *Wavelength Division Multiplexing* (WDM). WDM adalah suatu teknologi transmisi dalam sistem komunikasi serat optik yang memanfaatkan cahaya dari serat optik dengan panjang gelombang yang berbeda-beda untuk ditransmisikan secara simultan melalui serat optik tunggal [2]. Keuntungan dari penggunaan teknologi WDM ini adalah kapasitas kanal bisa bertambah pada sistem komunikasi serat optik yang sudah ada tanpa perlu menginstalasi penggunaan serat yang baru sehingga secara signifikan akan menghemat biaya pada instalasi, tapi secara signifikan akan menambah kapasitas kanal [3]. Empat panjang gelombang yang berbeda yang diintrepresentasikan dengan warna yang berbeda, lalu digabung oleh perangkat *combining optical signals* atau dikenal sebagai *multiplexer* sehingga dalam satu serat akan dikirimkan beberapa panjang gelombang sekaligus dalam waktu yang bersamaan. Pada blok *separating optical signals* atau blok *demultiplexer* dipisahkan kembali panjang gelombang yang diinginkan, lalu selanjutnya akan dideteksi oleh *photodetector* [4].

*Fiber Bragg Gratings* merupakan suatu komponen optik berupa serat optik yang memiliki variasi periodik indeks bias yang terdistribusi dalam bentuk kisi. FBG digunakan untuk berbagai keperluan karena kelebihanannya seperti filter jarak jauh, selektivitas panjang gelombang, ketahanan terhadap interferensi elektromagnetik, ukuran kecil, dan ketahanan lingkungan [5].

Arsitektur jaringan RoF pada Gambar 1 terdapat *central unit* yang masing-masing tersebut terhubung ke beberapa *Base Station* (BS) menggunakan media transmisi berupa kabel serat optik. Adapun komponen dari BS yaitu *Remote Access System* (RAS) sebagai tempat untuk mendistribusikan sinyal RF. Pada transmisi sinyal RF menggunakan kabel optik, sinyal yang datang dari jaringan akan diubah menjadi sinyal RF kemudian ditransmisikan melalui kabel optik menuju BS. Kemudian pada BS akan diubah kembali dari sinyal optik menjadi sinyal RF.



Gambar 1. Arsitektur RoF [6]

Prinsip kerja FBG mengilustrasikan bahwa hanya panjang gelombang yang memenuhi kondisi *Bragg* secara parsial direfleksikan pada tiap *interface* diantara daerah tersebut, sedangkan panjang gelombang yang lain diluar fase ditransmisikan. Dalam inti suatu serat optik dibuat kisi-kisi yang mempunyai jarak antar kisi tertentu. Kisi-kisi ini oleh cahaya dipandang sebagai reflektor yang membentuk resonator, dimana puncak transmisi dari resonator tersebut tergantung jarak antar kisi-kisinya. Ketika cahaya melalui daerah yang secara periodik berubah-ubah dari indeks refraktif tinggi dan rendah, maka sebagian cahaya akan direfleksikan untuk setiap panjang gelombang yang memenuhi kondisi *Bragg* sedangkan wilayah yang lainnya akan ditransmisikan [7]. Panjang gelombang yang ditransmisikan disebut panjang gelombang *Bragg*. Hukum *Bragg* dinyatakan sesuai persamaan (1) di bawah ini [8].

$$\Lambda = \frac{\lambda B}{2n_{eff}} \quad (1)$$

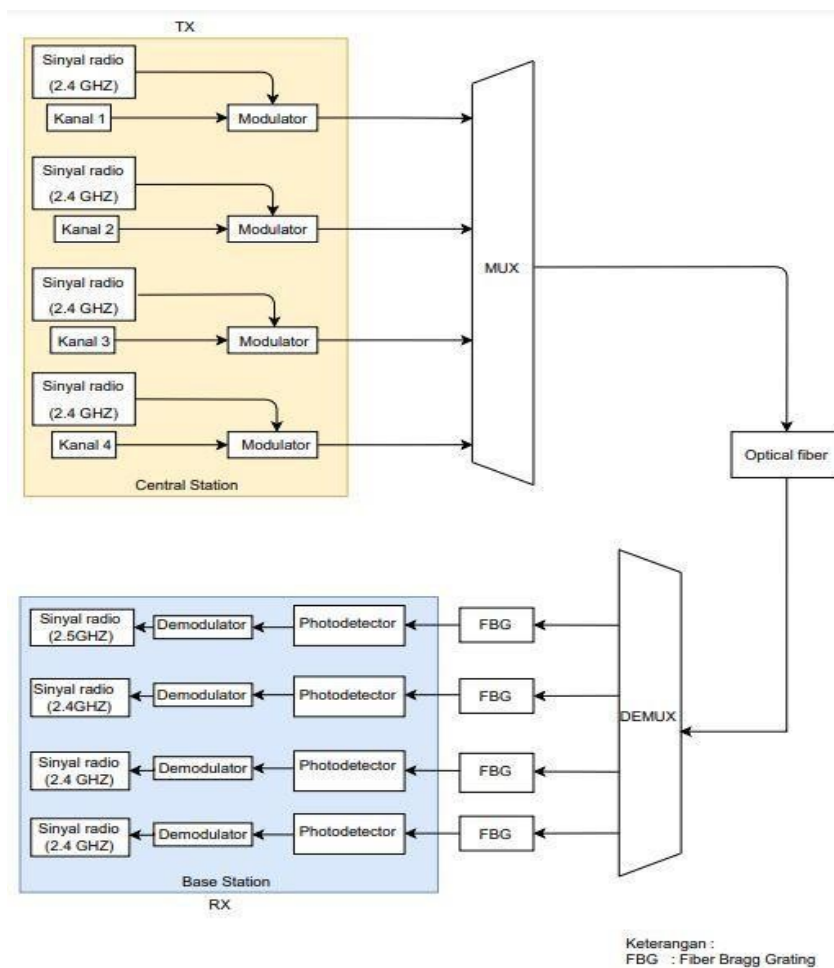
Besarnya  $n_{eff} = 1,46$ , yang merupakan indeks refraktif kelompok yang efektif inti serat,  $\lambda B$  adalah panjang gelombang yang dipantulkan dan  $\Lambda$  adalah *grating space* (periode kisi).

## 2. METODE

Dalam penelitian ini dilakukan perancangan sistem RoF yang dikombinasikan dengan FBG. Perancangan sistem ini menggunakan perangkat lunak Optisystem. Langkah selanjutnya adalah melakukan konfigurasi parameter-parameter yang digunakan dalam sistem ini, seperti frekuensi, jarak frekuensi, daya pancar, redaman fiber, *dispersion*, *dispersion slope*, panjang fiber, dan parameter lainnya. Setelah dilakukan rekayasa pada atribut kabel optik dan konfigurasi parameter, kemudian sistem disimulasikan dengan jarak mulai dari 20 km sampai ke 50 km. Kemudian data yang didapat dari hasil simulasi dianalisis sesuai dengan parameter performansi yang telah ditentukan. Parameter performansi yang menyatakan bahwa sistem yang disimulasikan berhasil adalah ketika pada arah *downstream* menghasilkan nilai BER tidak lebih besar dari  $10^{-9}$  atau nilai daya terima tidak lebih kecil dari -28 dBm, sesuai dengan rekomendasi sistem yang telah distandarkan [9].

### 2.1 Pemodelan Sistem

Pada [Gambar 2](#) merupakan perancangan sistem menggunakan suatu serat optik *single mode* dalam teknologi RoF berbasis WDM menggunakan FBG. Pada tahap awal akan dilakukan pemilihan laju data yang digunakan yang digunakan sebesar 1 Gbps. Sinyal frekuensi radio 2.4 GHz akan ditumpangkan pada setiap kanal dengan panjang gelombang yang berbeda. Pada perancangan ini digunakan empat kanal yang berupa representasi kanal WDM. Kemudian untuk menggabungkan keempat panjang gelombang tersebut digunakan WDM *Multiplexer*. Selanjutnya akan menuju WDM Demultiplexer untuk dipisahkan sesuai dengan panjang gelombang yang dikirimkan dan diterima oleh *photodetector*.

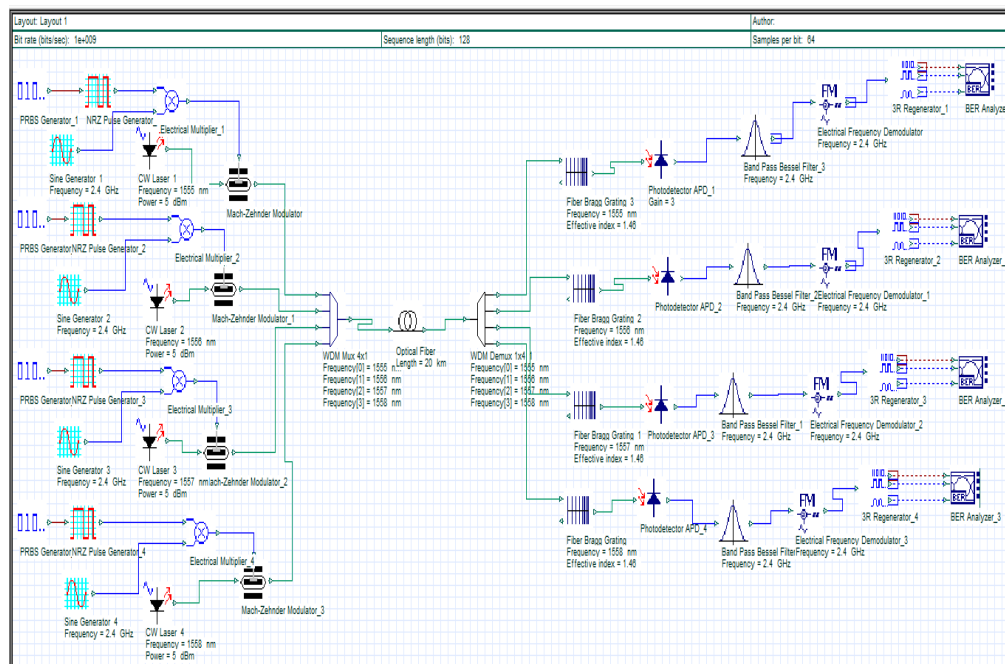


Gambar 2. Konfigurasi Sistem

## 2.2 Konfigurasi Sistem pada Simulasi

Langkah awal yang harus dilakukan untuk menganalisis simulasi ini yaitu memasukkan nilai *bit rate* sebesar 1 Gbps [10] menggunakan 20 km sampai 50 km menggunakan perangkat FBG untuk mengurangi efek dispersi. Selanjutnya dilakukan pengukuran pada blok penerima di masing-masing kanal. Kemudian pada langkah akhir, dilakukan analisis terhadap hasil yang didapatkan untuk mengetahui nilai BER ketika menggunakan perangkat FBG dan tidak menggunakan FBG. Hasil yang didapatkan dari simulasi sistem adalah *Link Power Budget* (LPB), *Q-factor*, dan *Bit Error Rate* (BER). Parameter performansi yang menyatakan bahwa sistem yang disimulasikan berhasil adalah ketika nilai BER tidak lebih besar dari  $10^{-9}$  atau nilai daya terima tidak lebih kecil dari -28 dBm, sesuai dengan rekomendasi sistem yang telah distandarkan [11]. Hasil simulasi pada setiap skenario penelitian kemudian dilakukan analisis untuk membuktikan bahwa skenario penelitian mempengaruhi kinerja sistem FBG dan selanjutnya dilakukan analisis parameter performansi dari skenario dan penelitian yang telah disimulasikan.

Pada Gambar 3 diperlihatkan konfigurasi sistem pada simulasi yang terdiri dari empat kanal yang berupa representasi kanal WDM. Kemudian untuk menggabungkan keempat panjang gelombang tersebut digunakan WDM Multiplexer. Selanjutnya, WDM Demultiplexer akan memisahkan sesuai dengan panjang gelombang yang dikirimkan dan diterima oleh photodetector. Empat buah laser dengan spasi panjang gelombang 1 nm digunakan sebagai sumber cahaya pada blok pengirim. Pseudo Random Bit Sequence (PRBS) digunakan sebagai pembangkit bit. Non Return Zero digunakan sebagai line coding. Electrical multiplier digunakan untuk menaikkan sinyal informasi kedalam frekuensi radio. Sine generator digunakan sebagai pembangkit bit sinyal pada frekuensi radio. Frekuensi radio yang digunakan 2.4 GHz. Modulator Mach-Zehnder berfungsi sebagai modulator eksternal yang melakukan proses modulasi sinyal elektrik ke dalam sinyal cahaya. WDM Multiplexer digunakan untuk menggabungkan keempat panjang gelombang yang dikirimkan. WDM Demultiplexer memisahkan panjang gelombang sesuai dengan yang dikirimkan. Serat optik single mode digunakan sebagai media transmisi dengan redaman 0.2 dB/km dan panjang gelombang kerja 1550 nm [12]. FBG memfilter panjang gelombang yang ditentukan untuk memenuhi kondisi Bragg dan melewatkan panjang gelombang yang lainnya. Photodetector menerima sinyal optik dengan nilai sensitivitas sebesar -28 dBm dan responsivitas 1 A/W. Demodulator FM digunakan untuk mengubah kembali sinyal frekuensi radio menjadi sinyal informasi. Jenis photodetector yang digunakan adalah APD, mengingat APD merupakan jenis detektor yang lebih cocok untuk pemancar LASER, karena memiliki sensitivitas yang lebih tinggi, dan juga bekerja pada panjang gelombang 900-1750 nm. Sine generator memiliki fungsi untuk membangkitkan sinyal sinus elektrik.



Gambar 3. Konfigurasi Sistem Pada Simulator

Penggunaan frekuensi 2.4 Ghz dengan standar IEEE 802.11ad, frekuensi dan *bit rate* menjadi pertimbangan sebelum informasi di konversi pada modulator. Selain itu jarak maksimum dapat mempengaruhi kinerja dari perangkat yang digunakan. Spesifikasi perangkat WLAN dengan standar IEEE 802.11ad dapat dilihat pada [Tabel 1](#) berikut ini.

Tabel 1. Spesifikasi Perangkat WLAN IEEE 802.11ad [13]

| Parameter                            | Spesifikasi               | Unit     |
|--------------------------------------|---------------------------|----------|
| <i>Maximum data rate</i>             | 7000                      | Mbps     |
| <i>RF band</i>                       | 2.4/ 5/ 60                | Ghz      |
| <i>Modulation</i>                    | Single Carrier (SC), OFDM | PSK, QAM |
| <i>Channel width</i>                 | 20/40                     | Mhz      |
| <i>Maximum Transmission Distance</i> | 10-100                    | m        |

[Tabel 2](#) memperlihatkan serat optik yang digunakan jenisnya *single mode* dimana memiliki jangkauan yang jauh dan *bandwidth* yang lebih lebar dibandingkan jenis multi mode. Jenis kabel yang digunakan adalah berjenis kabel G.652 sesuai standar ITU-T yang digunakan untuk teknologi WDM dan mempunyai redaman karakteristik serat sebesar 0.2 dB/km. panjang serat optik yang digunakan yaitu 20 km dan 50 km untuk jarak maksimum antara blok pengirim dan penerima. Pada serat optik, serat kisi *Bragg* juga mempunyai karakteristik perambatan, di antaranya dispersi material. Kisi *Bragg* merupakan suatu jenis kisi yang dapat difungsikan sebagai reflektor optik. Penambahan filter FBG juga dilakukan untuk meningkatkan performansi jaringan. Parameter FBG ditunjukkan pada [Tabel 3](#). Pada perancangan ini, FBG diletakkan pada pada sisi *receiver*.

Tabel 2. Parameter serat optik standard ITU-T G.652 [14]

| Parameter                   | Nilai | Satuan                |
|-----------------------------|-------|-----------------------|
| <i>Attenuation</i>          | 0.2   | dB/Km                 |
| <i>Reference Wavelength</i> | 1550  | nm                    |
| <i>Dispersion</i>           | 17    | ps/nm/km              |
| <i>Effective Core Area</i>  | 80    | $\mu\text{m}^2$       |
| <i>Dispersion slope</i>     | 0.075 | ps/nm <sup>2</sup> /k |

Tabel 3. Parameter *Fiber Bragg Grating* [8]

| Channel             | Frekuensi | <i>Effective Index</i> |
|---------------------|-----------|------------------------|
| <i>Wavelength 1</i> | 1555 nm   | 1.46                   |
| <i>Wavelength 2</i> | 1556 nm   | 1.46                   |
| <i>Wavelength 3</i> | 1557 nm   | 1.46                   |
| <i>Wavelength 4</i> | 1558 nm   | 1.46                   |

[Tabel 4](#) menunjukkan parameter yang digunakan pada blok *receiver* sesuai dengan rekomendasi ITU-T (G.989.2, 2014). Jenis *photodetector* yang digunakan adalah APD (*Avalanche Photodiode*), mengingat APD merupakan jenis detektor yang lebih cocok untuk pemancar LASER, karena memiliki sensitivitas yang



lebih tinggi, dan juga bekerja pada panjang gelombang 900-1750 nm. APD yang digunakan adalah jenis InGaAs yang memiliki ionization ratio sebesar 0,9 dan penguatan sebesar 10 kali, dimana dengan penguatan yang tinggi APD dapat mempertahankan kualitas sinyal yang diterima oleh APD. APD yang digunakan juga memiliki hambatan dalam sebesar 50 Ohm, dan bekerja pada suhu 298 Kelvin sesuai dengan suhu normal ruangan.

Tabel 4. Parameter *Receiver* [15]

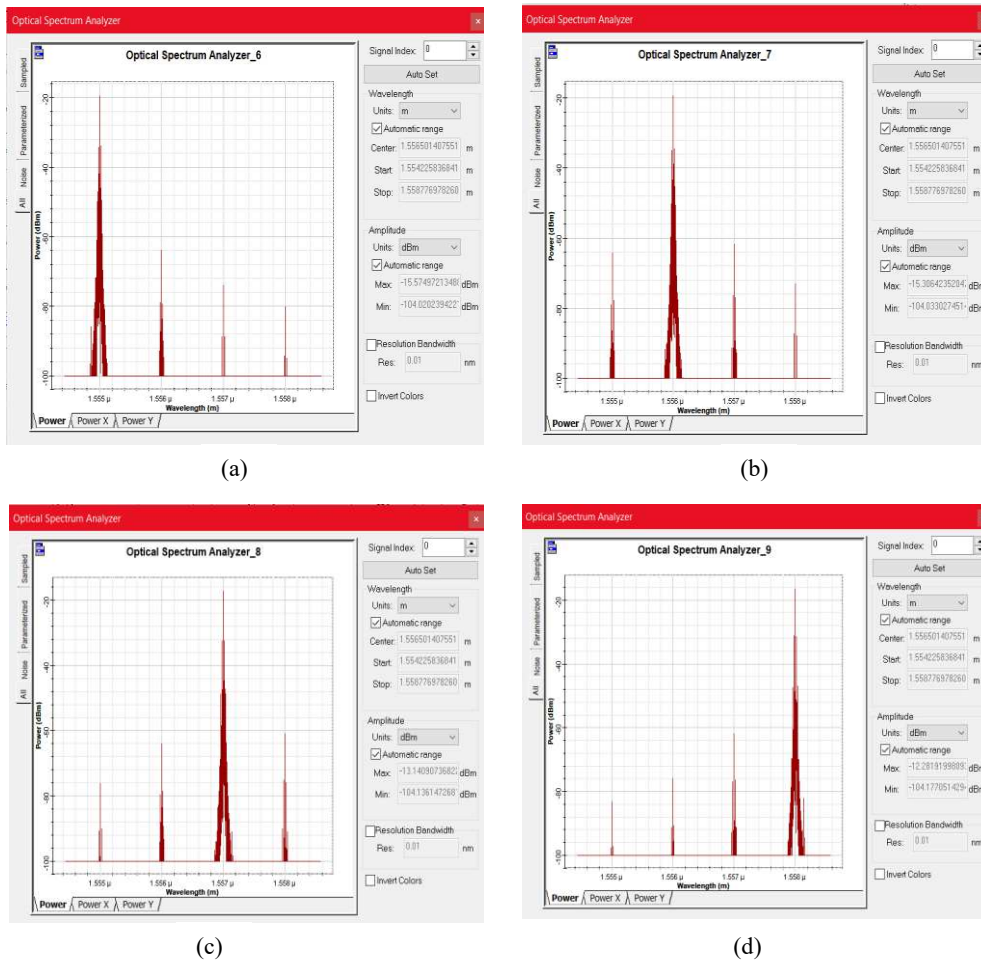
| No | Komponen                | Nilai      |
|----|-------------------------|------------|
| 1  | <i>Photodetector</i>    | APD        |
| 2  | <i>Sensitivity</i>      | -28 dBm    |
| 3  | <i>Filter type</i>      | Bessel     |
| 4  | <i>Temperature</i>      | 298 Kelvin |
| 5  | <i>Responsivity</i>     | 1 A/W      |
| 6  | <i>Avalanche Gain</i>   | 10         |
| 7  | <i>Resistance</i>       | 50 Ohm     |
| 8  | <i>Power</i>            | 2-7 dBm    |
| 9  | <i>Ionization Ratio</i> | 0.9        |

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

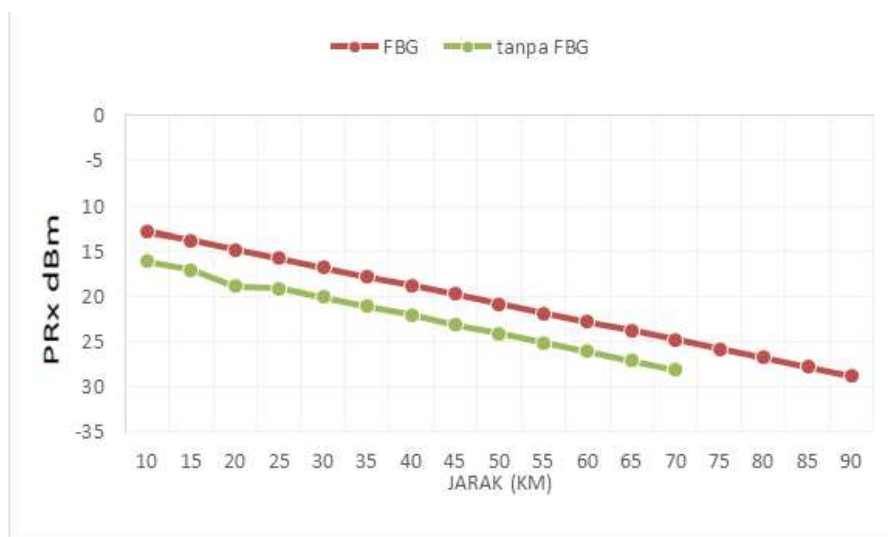
Pada [Gambar 4](#) terlihat sesaat setelah sinyal optik keluar dari WDM *Demultiplexer* ketika melewati kabel optik terjadi fenomena FWM. Sinyal optik mengalami fenomena FWM (*Four Wave Mixing*) selama ditransmisikan menuju blok penerima. Hal ini menyebabkan munculnya panjang gelombang baru di antara panjang gelombang yang membawa sinyal informasi yang asli. Namun hal ini tidak dapat ditunjukkan oleh alat ukur dan apabila ingin dapat terbaca pada alat ukur sebaiknya menggunakan spasi antar panjang gelombang yang lebih kecil dari 1 nm.

[Gambar 5](#) menunjukkan bahwa ROF yang menggunakan FBG dapat menghasilkan jarak lebih jauh dibandingkan tanpa FBG, nilai LPB menggunakan FBG pada jarak 20 km memiliki nilai LPB -14.771 dBm, dan jarak terjauh 90 km memiliki LPB sebesar -28.791 dBm. Sedangkan nilai LPB tanpa menggunakan FBG pada jarak 20 km hasil memiliki nilai LPB -18.081 dBm, dan jarak terjauh 70 km memiliki LPB sebesar -28.106 dBm.

Sebelum melakukan perancangan telah ditentukan parameter yang akan digunakan dengan frekuensi 2,4 GHz dan *bit rate* sebesar 1 Gbps, telah dilakukan perhitungan manual untuk menentukan daya kirim minimum yang sesuai dengan model sistem yang dirancang, bertujuan agar seluruh skenario masih memenuhi kebutuhan BER dan *Q-factor* sesuai dengan standarisasi yaitu BER kurang dari  $10^{-9}$  dan *Q-factor* lebih dari 6. Pengamatan hasil dengan menggunakan BER *analyzer* pada perangkat lunak Optisystem, pada [Gambar 6](#), merupakan tampilan pengukuran BER dan *Q-factor* dengan panjang *link* 20 km.

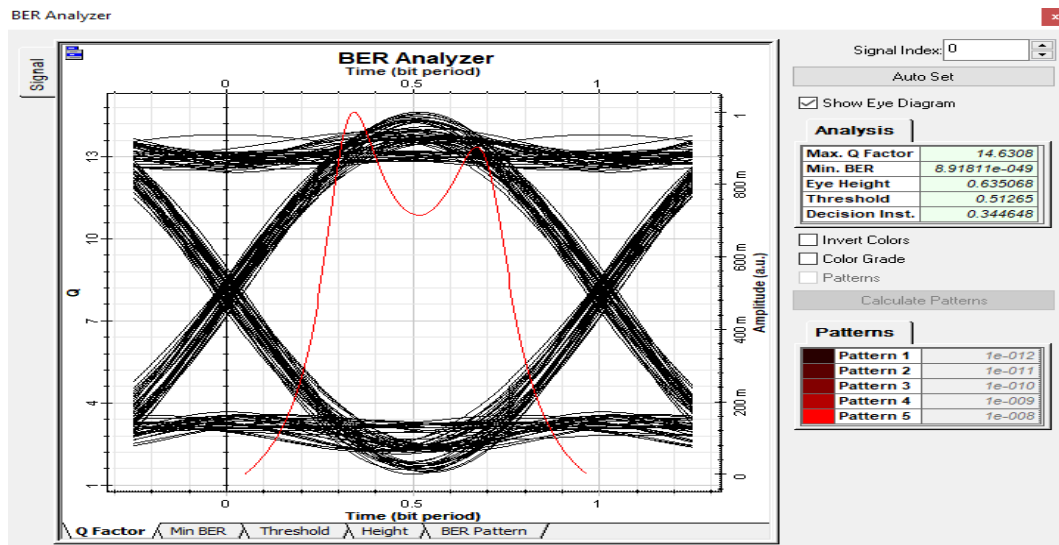


Gambar 4. Sinyal Optik Pada Blok Penerima (a) Kanal 1 (b) Kanal 2 (c) Kanal 3 (d) Kanal 4



Gambar 5. Perbandingan nilai LPB menggunakan FBG dan tanpa FBG





Gambar 6. Pengukuran menggunakan BER analyzer

Pada Gambar 6 pengukuran dilakukan pada penerima yang menggunakan FBG dideteksi oleh *photodetector* APD dengan jarak 20 km, digunakan *tools* BER analyzer untuk menampilkan hasil pengukuran yang berupa nilai *Q-factor*, BER, dan Eye diagram, dari hasil yang didapatkan keempat nilai BER yang didapat setelah sinyal melewati serat optik sepanjang 20 km – 50 km, diketahui panjang gelombang 1555 nm dan 1556 pada jarak 50 km mendapatkan nilai BER terendah. Hal ini disebabkan karena pengaruh dari jarak yang jauh dan penggunaan lebih dari satu panjang gelombang hasil simulasi nilai *Q-factor* dan BER dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil simulasi *Q-factor* dan BER ROF dengan FBG

| Jarak | <i>Q-factor</i> | BER                       |
|-------|-----------------|---------------------------|
| 20 km | 14.6308         | $8.91811 \times 10^{-49}$ |
| 25 km | 14.2851         | $1.35348 \times 10^{-46}$ |
| 30 km | 13.0702         | $2.43685 \times 10^{-39}$ |
| 35 km | 12.3453         | $2.57678 \times 10^{-35}$ |
| 40 km | 10.4348         | $8.59356 \times 10^{-26}$ |
| 45 km | 6.86475         | $3.33007 \times 10^{-12}$ |
| 50 km | 3.01817         | 0.00126975                |

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis hasil simulasi maka dapat disimpulkan bahwa level daya terima terendah -14.771 dBm dengan laju data 1 Gbps yang di deteksi oleh *photodetector* APD pada jarak terjauh 85 km masih berada diatas sensitivitas penerima -28 dBm. Pada sistem ROF menggunakan FBG mampu menjangkau jarak sejauh 40 km dengan nilai *Q-factor* sebesar 10.4348 dan BER  $8.59356 \times 10^{-26}$  sedangkan untuk jarak 45 km BER nya adalah  $3.33007 \times 10^{-12}$  dan *Q-factor* 6.86475 dan pada jarak 50 km BER nya adalah 3.01817 dan *Q-factor* adalah 0.00126975 yang berarti nilai tersebut tidak memenuhi standar maksimal BER ideal yaitu  $10^{-9}$  dan minimal *Q-factor* ideal yaitu diatas 6. Berdasarkan hasil simulasi lebih baik menggunakan FBG dibandingkan tidak menggunakan FBG dikarenakan ROF menggunakan FBG mampu menjangkau jarak sejauh 45 km dengan nilai *Q-factor* sebesar 10.4348 dan BER  $3.33007 \times 10^{-12}$  sedangkan ROF tidak menggunakan FBG hanya mampu menjangkau jarak sejauh 35 km dengan nilai *Q-factor* sebesar 10.7981 dan BER  $1.7574 \times 10^{-27}$ . Nilai *Q-factor* dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya penurunan daya transmisi serat optik akibat atenuasi pada serat optik, dispersi, efek nonlinieritas perangkat optik.

#### REFERENSI

- [1] Ajay Kumay Vyas, Dr Navneet Agrawal, "Radio over Fiber: Future Technology of Communication," *International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS)*, vol. I, no. 2, pp. 233-237, 2012.
- [2] Abd El-Naser A. Mohammed, Ahmed Nabih Zaki Rashed, and Mahmoud M. Eid., "Important Role of Optical Add Drop Multiplexers (OADMs) With Different Multiplexing Techniques in Optical Communication Networks," *International Journal of Computing*, vol. 9, no. 2, pp. 152-164, 2010.
- [3] Abd El-Naser A. Mohammed, Gaber E. S. M. El-Abyad, Abd El-Fattah A. Saad, and Ahmed, "High Transmission Bit Rate of A thermal Arrayed Waveguide Grating (AWG) Module in Passive Optical Networks," *IJCSIS International Journal of Computer Science and Information Security*, vol. 1 No.1, pp. 13-22, 2009.
- [4] T. Ivaniga, L. Ovseník and J. Turán, "The four-channel WDM system using Semiconductor Optical Amplifier," *International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, IEEE, 2016, pp. 354-357, doi: 10.1109/RADIOELEK.2016.7477350.
- [5] H. D. Lee, G. H. Kim, T. J. Eom, M. Y. Jeong and C. Kim, "Linearized Wavelength Interrogation System of Fiber Bragg Grating Strain Sensor Based on Wavelength-Swept Active Mode Locking Fiber Laser," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 12, pp. 2617-2622, 2015, doi: 10.1109/JLT.2014.2368148
- [6] F. Mfuamba Kabonzo and Peng Yufeng, "Performance analysis of OFDM signals in WDM Radio over Fiber system using Fiber Bragg Grating as a compensator of dispersion," 2015 *International Conference on Information and Communications Technologies (ICT 2015)*, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1049/cp.2015.0205.
- [7] Imada Takasima G.S, *Analisis Karakteristik Filter Optik Fiber Bragg Grating (FBG) Pada Serat SingleMode*, Universitas Telkom, 2012
- [8] R. Seenaa, R. Pradeep and N. Vijayakumar, "A full duplex radio over fiber system using fiber Bragg grating filter," 2014 First International Conference on Computational Systems and Communications (ICCSC), 2014, pp. 139-143, doi: 10.1109/COMPSC.2014.7032636.
- [9] ITU-T G.989.2, "40-Gigabit-Passive Optical Network 2 (NG-PON2): Physical Media

- Dependent (PMD) Layer Specification”, ITU-T, 2014.
- [10] Hadi Meiza Perdana, Tri Nopiani Damayanti, Aris Hartman, *Simulasi radio over fiber berbasis WDM menggunakan FBG*, Universitas Telkom, 2018.
- [11] Prianggono, S, *Analisis Performansi Optical Distribution Network (ODN) NG-PON2 menggunakan Teknologi Time and Wavelength Division Multiplexing (TWDM)*, Universitas Telkom, 2016.
- [12] Gede Teguh Laksana, Akhmad Hambali, Afief Dias Pambudi, *Analisis Sistem Komunikasi RoF (Radio Over Fiber) Berbasis WDM (Wavelength Division Multiplexing) Dengan OADM (Optical Add Drop Multiplexing) Untuk Jarak Jauh*, Universitas Telkom, 2016.
- [13] Admaja, Awangga Febian Surya, and Sri Ariyanti. "Wireless Gigabit untuk komunikasi pitalebar [Broadband communication in Wireless Gigabit]." *Buletin Pos dan Telekomunikasi*, vol. 14, no. 2, pp: 65-78, 2016. doi: 10.17933/bpostel.2016.140201.
- [14] ITU-T, Telecommunication Standardization Sector of ITU G.652, 2009.
- [15] Akbar, A., Hambali, I., & Hafidudin. *Sistem Radio Over Fiber Dengan Teknologi Next Generation-Passive Optical Network 2 (Ng-Pon2)*, Universitas Telkom, 2018.