

PERFORMANSI JARINGAN RADIO OVER FIBER UNTUK MOBILE COMMUNICATION 5G DENGAN PULSA SOLITON

RADIO OVER FIBER NETWORK PERFORMANCE FOR 5G MOBILE COMMUNICATION WITH SOLITON PULSE

Daffa Ardityo¹, Akhmad Hambali², M. Irfan Maulana³

^{1,2,3} Universitas Telkom, Bandung

dfardityo@student.telkomuniversity.ac.id¹, ahambali@telkomuniversity.ac.id²,
muhammadirfanm@telkomuniversity.ac.id³

Abstrak

Kebutuhan layanan pertukaran informasi yang terus meningkat harus diimbangi dengan peningkatan terhadap kualitas teknologi telekomunikasi. Pertukaran informasi dengan kualitas yang baik membutuhkan media transmisi yang cepat dan handal seperti *fiber optic*. Aplikasi penggunaan media transmisi *fiber optic* salah satunya adalah sistem *Radio over Fiber* (RoF). Sistem RoF pada perkembangannya dapat dikombinasikan dengan *mobile communication* 5G. Dari hasil penelitian ini diharapkan dapat mewujudkan suatu *mobile communication* 5G dengan kualitas yang lebih baik.

Untuk meningkatkan sistem transmisi pada *mobile communication* 5G, *optical carrier* pada sistem RoF yang umumnya menggunakan laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) akan diganti dengan pulsa Soliton sebagai pemodulasi sinyal *Radio Frequency* (RF). Penelitian akan menggunakan *software* untuk menjalankan simulasi sistem RoF. Pada proses simulasi menggunakan *software*, akan dilakukan perubahan dan perhitungan pada beberapa parameter uji yaitu *bit rate* yang digunakan serta jarak *Central Office* (CO) dan *Remote Access Unit* (RAU) yang diwakilkan dengan panjang *Single Mode Fiber* (SMF) untuk mendapatkan nilai target *Bit Error Rate* (BER) maksimal sebesar 10^{-9} , *Eye Pattern* yang terbuka lebar, dan nilai *Q factor* minimal sebesar 6. Pada hasil dari penelitian ini, diharapkan kualitas dari sistem RoF untuk *mobile communication* 5G dapat ditingkatkan dengan menggunakan pulsa Soliton sebagai *optical carrier* pada sistem RoF.

Simulasi Tugas Akhir ini dijalankan dengan 4 skenario. Hasil dari simulasi menunjukkan nilai terbaik terdapat pada skenario pertama dengan *bit rate* 1 Gbps, frekuensi sinyal *Radio Frequency* (RF) 2.5 GHz, frekuensi pulsa Soliton 228.8 Thz, *wavelength* pulsa Soliton dan *Single Mode Fiber* 1310 nm, yang menghasilkan nilai *Q factor* sebesar 19.9286 dan nilai *Bit Error Rate* (BER) sebesar 1.07441×10^{-88} , serta *eye pattern* yang terbuka lebar.

Kata kunci : *Radio over Fiber, mobile communication* 5G, pulsa Soliton.

Abstract

The need for information exchange services that continues to increase must be balanced with improvements in the quality of telecommunications technology. Exchange of information with good quality requires fast and reliable transmission media such as fiber optics. One of the applications using fiber optic transmission media is the Radio over Fiber (RoF) system. The RoF system in its development can be combined with 5G mobile communication. From the results of this study, it is expected to be able to realize a 5G mobile communication with better quality.

To improve the transmission system in 5G mobile communication, the optical carrier in the RoF system which generally uses laser (light amplification by stimulated emission of radiation) will be replaced with Soliton pulses as a Radio Frequency (RF) signal modulator. The research will use software to simulate the RoF system. In the software simulation process, changes and calculations will be made on several test parameters, namely the bit rate used and the distance between the Central Office (CO) and Remote Access Unit (RAU) which is represented by the length of Single Mode Fiber (SMF) to get the maximum Bit Error Rate (BER) value of 10^{-9} , wide-open Eye Pattern, and minimum Q factor value of 6. In the results of this study, it is expected that the quality of the RoF system for 5G mobile communication can be improved by using Soliton pulses as an optical carrier in the RoF system.

This final project simulation is run with 4 scenarios. The results of the simulation show that the best value is in the first scenario with a bit rate of 1 Gbps, a Radio Frequency (RF) signal frequency of 2.5 GHz, a Soliton pulse frequency of 228.8 Thz, a Soliton pulse and Single Mode Fiber wavelength 1310 nm, which produces a Q factor value of 19.9286 and the Bit Error Rate (BER) value is 1.07441×10^{-88} , and the eye pattern is wide open.

Keywords: *Radio over Fiber, mobile communication* 5G, Soliton pulse.

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Pertukaran informasi merupakan suatu hal yang sangat dibutuhkan manusia pada saat ini. Kebutuhan layanan pertukaran informasi yang meningkat harus diimbangi dengan kualitas teknologi telekomunikasi yang lebih baik. Perkembangan teknologi telekomunikasi yang signifikan dibutuhkan diberbagai aspek, diantaranya peningkatan kecepatan dan kehandalan pada proses pertukaran informasi.

Pertukaran informasi yang cepat dan handal membutuhkan media transmisi yang mampu mengatasi kebutuhan-kebutuhan tersebut. Kebutuhan tersebut dapat diatasi dengan menggunakan *fiber optic sebagai media transmisi*. Penggunaan *fiber optic sebagai media transmisi* terbukti memiliki banyak keunggulan jika dibandingkan dengan sistem komunikasi yang menggunakan media transmisi lainnya seperti kabel koaksial dan satelit.

Pada perkembangannya, media transmisi *fiber optic* dapat digunakan pada banyak perangkat telekomunikasi, salah satunya adalah teknologi *Radio over Fiber (RoF)*. *Radio over Fiber* adalah suatu teknologi yang memodulasi cahaya dengan sinyal *Radio Frequency (RF)* dan ditransmisikan melalui *fiber optic* [1]. Teknologi RoF memungkinkan pemusatan *signal processing* yang diperlukan pada satu lokasi saja, di *Central Office (CO)*, dan kemudian sinyal didistribusikan ke *Remote Access Unit (RAU)* [2]. Sinyal RF kemudian akan didemodulasi lalu ditransmisikan kepada pengguna. Hal ini dapat menghemat biaya dan mengurangi kompleksitas pada suatu jaringan.

Teknologi RoF memiliki beberapa keunggulan yang dapat dimanfaatkan dan telah diusulkan untuk mendukung *mobile communication fifth generation (5G)* di antaranya infrastruktur yang efisien dan dapat diandalkan, *bandwidth* yang besar, dan *attenuation loss* yang rendah [3]. *Mobile communication 5G* merupakan teknologi internet generasi kelima (*fifth generation*) yang menjanjikan kecepatan *uplink* dan *downlink* yang lebih cepat, jangkauan yang lebih luas dan koneksi yang lebih stabil dibanding generasi pendahulunya yaitu *fourth generation (4G)*. Pada teknologi 5G data dikirimkan dalam gelombang radio yang akan terbagi menjadi beberapa frekuensi berbeda, di mana setiap frekuensi akan disiapkan untuk tipe komunikasi yang berbeda.

Teknologi RoF umumnya menggunakan laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) sebagai *optical carrier* yang memodulasi sinyal RF. Pada penelitian Tugas Akhir ini pulsa Soliton akan digunakan sebagai *optical carrier* menggantikan laser yang akan memodulasi sinyal RF. Pulsa Soliton diharapkan memiliki keunggulan dibanding laser sebagai *optical carrier* pada teknologi RoF untuk *mobile communication 5G*. Soliton adalah pulsa penguat mandiri yang dapat mempertahankan bentuknya ketika bergerak dengan kecepatan yang seragam [4]. Soliton memiliki kemampuan untuk melakukan perhitungan data multi-Gbps [4]. Pada penggunaan pulsa Soliton, amplitudo sinyal dapat diperbesar dengan pemilihan serat dispersi yang tepat untuk mengatasi *noise* pada *amplifier* [5]. Beberapa kemampuan dari pulsa Soliton tersebut diharapkan dapat bermanfaat dan diaplikasikan pada teknologi RoF untuk *mobile communication 5G*.

1.2 Rumusan Masalah

Beberapa kendala pada teknologi 5G antara lain kebutuhan *bandwidth* yang besar serta tingginya *propagation loss* dan *power consumption* pada *antenna* [3][6]. Dalam perkembangannya teknologi RoF diusulkan untuk mengatasi beberapa kendala yang ada pada teknologi 5G tersebut. Pada penelitian Tugas Akhir ini, pulsa Soliton yang memiliki tingkat kestabilan yang lebih baik dibanding laser diusulkan sebagai *optical carrier* pada teknologi RoF.

Penelitian Tugas Akhir ini akan menganalisa performansi dari teknologi RoF dengan menggunakan pulsa Soliton sebagai *optical carrier*. Terdapat 4 skenario simulasi pada penelitian Tugas Akhir ini. Variabel yang akan diubah adalah jarak CO dan RAU pada RoF, serta *bit rate* yang digunakan. Skenario pertama, kedua, dan ketiga menggunakan *bit rate* 1 Gbps, sedangkan skenario keempat menggunakan *bit rate* 5 Gbps. Jarak CO dan RAU pada RoF akan direpresentasikan dengan panjang *Single Mode Fiber* yaitu 30 km pada skenario pertama, 60 km pada skenario kedua, 90 km pada skenario ketiga, dan 30 km pada skenario keempat. Semua skenario akan menggunakan sinyal RF dengan frekuensi 2.5 GHz dan pulsa Soliton dengan frekuensi 288.8 THz. *Wavelength* pada semua skenario bernilai 1310 nm pada pulsa Soliton dan *Single Mode Fiber*. Hasil akhir yang didapat akan dianalisa menggunakan perhitungan *Bit Error Rate (BER)*, *Q Factor*, dan *Eye Pattern*.

1.3 Tujuan

Mensimulasikan dan menganalisa penggunaan pulsa Soliton sebagai *optical carrier* pada teknologi RoF untuk *mobile communication 5G* dengan mengubah variabel jarak CO dan RAU pada RoF serta *bit rate* yang digunakan agar mendapatkan nilai BER, *Q Factor*, dan *Eye Pattern* yang maksimal dengan menggunakan bantuan simulasi pada software.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini yaitu :

1. Melakukan simulasi menggunakan *software*.

2. Melakukan simulasi jaringan RoF dengan pulsa Soliton.
3. *Bit rate* yang digunakan sebesar 1 Gbps dan 5 Gbps.
4. Sinyal RF dengan frekuensi 2.5 GHz.
5. Pulsa Soliton dengan frekuensi 228.8 THz dan *wavelength* 1310 nm.
6. *Single Mode Fiber* (SMF) dengan *wavelength* 1310 nm.
7. Jarak CO dan RAU dari RoF sejauh 30 km, 60 km, dan 90 km.
8. Parameter yang ditinjau adalah nilai BER, *Q factor* dan *Eye Pattern*.

1.5 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penyelesaian penelitian ini adalah :

1. Studi Literatur, yaitu mencari referensi mengenai hal-hal yang berhubungan dengan penelitian ini. Literatur yang digunakan dapat berupa buku, media online, jurnal ilmiah, bahan diskusi, dan lain-lain.
2. Simulasi, yaitu sebuah proses di mana penulis melakukan simulasi dengan bantuan *software* dan mengubah parameter jarak CO dan RAU pada teknologi RoF serta *bit rate* yang digunakan pada sistem dengan tujuan mempelajari pengaruh dari perubahan parameter-parameter tersebut.
3. Pengumpulan data, yaitu mencatat data hasil pengukuran melalui simulasi yang telah dijalankan dengan parameter-parameter yang diuji.
4. Analisis, yaitu tahapan mengamati data hasil simulasi dan membandingkan dengan data yang berkaitan dengan penelitian.
5. Pengambilan kesimpulan, yaitu tahapan setelah analisis dilakukan untuk memberi keputusan mengenai hasil dan manfaat serta tujuan dari analisis.

2. Konsep Dasar

2.1 5G

5G atau *fifth generation* adalah sebuah teknologi terbaru pada komunikasi seluler sebagai penerus dari teknologi 4G/LTE. Teknologi 5G diperkirakan memiliki transfer data dari satu perangkat ke perangkat lainnya dengan kecepatan 1 mili detik dan memiliki kecepatan *downlink* lebih dari 1 Gbps. Pada teknologi 5G, data dikirim melalui gelombang radio yang terbagi menjadi frekuensi-frekuensi berbeda, di mana setiap frekuensi akan disiapkan untuk tipe komunikasi yang berbeda.

Pada *mobile communication* 5G, *high frequency band* seperti *mm-Wave band* akan digunakan untuk memanfaatkan *bandwidth* sinyal yang lebar, tetapi cakupannya akan mengecil karena *propagation loss* yang tinggi akibat frekuensi yang tinggi tersebut [3]. Akibatnya, pengurangan ukuran dan *power consumption antenna* akan menjadi salah satu perhatian utama untuk mewujudkan perkembangan pada *mobile communication* 5G. Konsep *photonic antenna* yang terdiri dari *photodiode* untuk *optical-electro* (O/E) *conversion* dan elemen *antenna* untuk memancarkan sinyal *wireless* diusulkan sebagai solusi untuk mengurangi ukuran serta *power consumption* peralatan *antenna* [3].

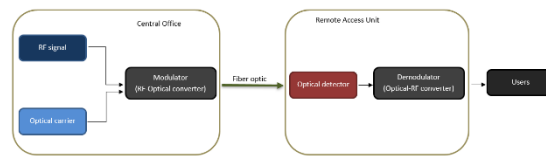
Kendala *bandwidth* pada *radio access network* merupakan masalah utama dalam implementasi *mobile communication* 5G. Beberapa kendala lainnya pada *mobile communication* 5G antara lain tingginya *propagation loss* dan *power consumption* pada *antenna* [3][6]. Untuk mengatasi kendala-kendala tersebut, teknologi *Radio over Fiber* (RoF) diusulkan sebagai *Mobile Fronthaul* (MFH) pada *mobile communication* 5G.

2.2 Radio over Fiber

Fiber optic atau serat optik adalah saluran transmisi yang terbuat dari kaca atau plastik dengan ukuran yang kecil dan dapat digunakan untuk mentransmisikan sinyal cahaya dari suatu tempat ke tempat lain. *Fiber optic* memiliki beberapa kelebihan dibanding jenis media transmisi lainnya sehingga baik digunakan sebagai saluran komunikasi.

Beberapa kelebihan *fiber optic* antara lain dapat bekerja pada kecepatan mencapai satuan *gigabits per second* (Gbps), data yang ditransmisikan oleh serat optik memiliki tingkat kemungkinan hilang dan kesalahan yang rendah, tidak terpengaruh oleh gangguan gelombang elektromagnetik dan gelombang radio di sekitarnya, aman digunakan pada lingkungan yang panas dan mudah terbakar, dapat menghemat penggunaan ruang karena serat optik memiliki ukuran yang kecil dan ringan.

Radio over Fiber (RoF) adalah suatu teknologi yang menggunakan cahaya untuk melakukan modulasi sinyal radio dan mengirimkannya melalui *fiber optic* untuk mendistribusikan sinyal radio dari *Central Office* (CO) ke *Remote Access Unit* (RAU) [1][2]. Konfigurasi sistem RoF dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Sistem *Radio over Fiber*.

Pada sistem RoF sebagian besar pemrosesan sinyal dilakukan di CO yang menjadikan perangkat jaringan lebih efisien dan hemat biaya. Pada CO dan RAU terjadi proses konversi sinyal *electro-optical* (E/O) dan *optical-electro* (O/E). Proses konversi E/O dapat dilakukan dengan menggunakan sumber laser termodulasi atau modulator E/O eksternal. Sedangkan proses konversi O/E dapat dilakukan melalui *photodetector* atau *photoreceiver* [2].

Terdapat banyak aplikasi dari teknologi RoF yaitu *mobile communication*, *broadband access radio*, *Multipoint Video Distribution Service* (MVDS), *Mobile Broadband System* (MBS), *vehicle communication and control*, dan *wireless LAN* pada jaringan optik.

2.2.1 Keunggulan Teknologi *Radio over Fiber*

Memiliki kemampuan untuk menghemat biaya dan merupakan perangkat dengan kemampuan frekuensi yang tinggi pada lokasi yang terpusat adalah keunggulan utama yang dimiliki teknologi RoF. Teknologi RoF memiliki beberapa keunggulan lainnya yang akan diuraikan pada penjelasan berikut.

a. *Attenuation Loss* yang Rendah dan *Bandwidth* yang Besar

Distribusi sinyal radio dengan frekuensi yang tinggi pada jarak yang jauh dapat menyebabkan *loss* yang tinggi dan memerlukan peralatan yang mahal. Teknologi RoF dapat digunakan untuk mengatasi kendala tersebut karena teknologi RoF menggunakan *fiber optic* yang memiliki *loss* yang sangat rendah. Terdapat 3 *transmission windows* yang dapat digunakan dan memiliki *attenuation loss* yang rendah yaitu pada *wavelength* 850 nm, 1310, nm dan 1550 nm.

Keunggulan lainnya adalah *fiber optic* yang digunakan pada teknologi RoF memiliki *bandwidth* yang besar. *Bandwidth* yang besar pada *fiber optic* memungkinkan *signal processing* dengan kecepatan tinggi.

b. Tahan terhadap Interferensi *Radio Frequency*

Teknologi RoF memiliki ketahanan terhadap interferensi sinyal RF karena sinyal ditransmisikan dalam bentuk optik melalui *fiber*. Keunggulan ini merupakan karakteristik penting dari komunikasi *fiber optic* karena memberikan privasi dan keamanan dalam berkomunikasi.

c. Instalasi dan Perawatan yang Mudah

Desain perangkat pada teknologi RoF mudah diinstalasi, lebih murah, dan membutuhkan perawatan yang mudah karena sebagian besar pemrosesan sinyal terjadi di CO. Pada bagian RAU dari teknologi RoF umumnya hanya terdiri dari *photodetector*, *amplifier*, dan *antenna*.

d. Mengurangi *Power Consumption*

Karena teknologi RoF memiliki jumlah perangkat yang lebih sedikit, maka *power consumption* yang pada sistem menjadi lebih rendah.

2.2.2 *Radio over Fiber-based Mobile Fronthaul*

Berdasarkan keunggulan-keunggulan yang dimiliki, teknologi RoF diusulkan untuk mendukung *mobile communication* 5G. Teknologi RoF diusulkan pada *mobile communication* 5G sebagai Mobile Fronthaul (MFH) menggantikan peran *Common Public Radio Interface* (CPRI) pada MFH. Saat ini, *fronthaul interface* pada arsitektur *centralized radio access network* (C-RAN) yang dirancang untuk *Long Term Evolution-Advanced* (LTE-A) *mobile network* berdasarkan pada CPRI, namun hal ini memiliki kompleksitas perangkat yang tinggi pada *Baseband Unit* (BBU). Dengan teknologi RoF, hal ini dapat diatasi karena sebagian besar pemrosesan sinyal berpusat pada satu tempat.

Dengan teknologi RoF, implementasi MFH pada *mobile communication* 5G dapat digunakan berdampingan dengan infrastruktur *fiber optic* yang mendukung topologi *Passive Optical Network* (PON) pada *fixed wireline services* [7]. Selain itu, teknologi RoF diharapkan dapat mencegah sejumlah gangguan pada proses pembangkitan dan transmisi pada distribusi optik dari sinyal *Radio Frequency* (RF) yang kemudian dapat menimbulkan *noise* karena non-linearitas [7]. Jaringan MFH berbasis RoF memberikan skalabilitas *bandwidth* terbaik karena *bandwidth* yang digunakan persis sama dengan yang digunakan oleh pengguna [8].

Pada penelitian Tugas Akhir ini, teknologi RoF akan digunakan pada *mobile communication* 5G sebagai MFH dengan pulsa Soliton sebagai *optical carrier* yang akan memodulasi sinyal RF menggunakan modulator eksternal. Sinyal yang telah termodulasi kemudian akan ditransmisikan dari CO menuju RAU melalui *Single Mode Fiber* (SMF). Pada RAU sinyal akan diproses pada *amplifier* dan kemudian menuju *photodetector* untuk dikonversi. Setelah dikonversi sinyal akan didemodulasi dan kemudian performansi teknologi RoF akan dianalisis.

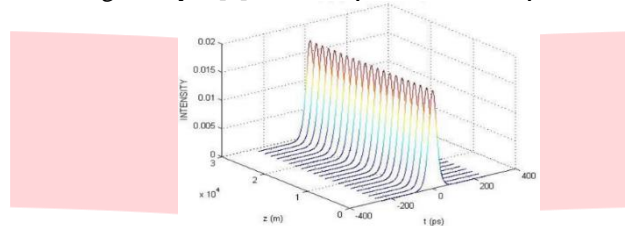
2.3 Soliton

Pulsa soliton adalah pulsa cahaya yang dapat bergerak dalam media non-linear tanpa berubah bentuk, seolah-olah pulsa bergerak dalam media non-linear dispersif [9]. Gelombang pada pulsa Soliton memiliki pergerakan yang terbatas karena memiliki sifat tidak tersebar [4]. Pada *fiber optic*, lebar pulsa Soliton yang merambat memiliki *loss* yang tetap.

Pulsa Soliton dapat dideskripsikan dengan empat parameter yaitu amplitudo (dan lebar pulsa), frekuensi (dan kecepatan pulsa), posisi waktu, dan fasa. Amplitudo pulsa Soliton harus memberikan non-linearitas yang cukup untuk mengatasi kelebihan dispersi pada serat optik [5].

Soliton dapat melakukan propagasi pada jarak beberapa kilometer tanpa adanya distorsi pada *Group Velocity Dispersion* (GVD) dan *Self-phase Modulation* (SPM) yang seimbang sehingga dapat meningkatkan performansi dari sistem komunikasi dengan dispersi terbatas [5].

Penggunaan pulsa Soliton pada komunikasi *fiber optic* dapat membantu beberapa kendala yang umum terjadi pada komunikasi *fiber optic* seperti dispersi cahaya, non-linearitas, dispersi mode pada polarisasi, *time jitter*, dan *noise* pada *amplifier*. Sinyal yang dibawa oleh pulsa Soliton dapat dipisahkan dari *noise* yang tercampur dalam komponen frekuensi yang sama dengan sinyal [5]. Ilustrasi pulsa Soliton dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Pulsa Soliton [4].

Pada komunikasi *fiber optic*, pulsa Soliton diusulkan sebagai informasi pembawa bit [4]. Komunikasi *fiber optic* dengan penggunaan pulsa Soliton sebagai *optical carrier* dapat mentransmisikan data dengan kapasitas yang besar dan tanpa menggunakan *repeater*. Pulsa Soliton digunakan pada komunikasi *long-haul* karena dapat mengatasi keterbatasan yang disebabkan oleh *internal losses* [10].

Pada penelitian Tugas Akhir ini, pulsa Soliton akan menjadi *optical carrier* pada teknologi RoF. Pulsa Soliton akan memodulasi sinyal RF menggunakan modulator eksternal untuk kemudian ditransmisikan menuju unit RAU melalui kabel SMF.

2.4 Signal to Noise Ratio

Signal to Noise Ratio (SNR) merupakan parameter yang berfungsi untuk menunjukkan kualitas sinyal dengan membandingkan daya sinyal terhadap daya *noise* pada satu titik yang sama. Perhitungan SNR pada komunikasi optik ditulis dengan [11]:

$$SNR_o = \frac{S_o}{N_o} = \frac{|\bar{E}|^2 \frac{1}{\eta}}{\sigma_o^2 \frac{1}{\eta}} = \frac{|\bar{E}|^2}{\sigma_o^2} \quad (1)$$

2.5 Bit Error Rate

Bit Error Rate (BER) merupakan perbandingan jumlah terjadinya *error* pada setiap bit data yang terkirim [12]. Semakin kecil nilai BER maka perbandingan kesalahan akan semakin kecil. Perhitungan BER ditulis dengan:

$$BER = \frac{1}{2} \text{error function} \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{SNR} \right) \quad (2)$$

2.6 Q factor

Q factor adalah perhitungan kualitas sistem secara keseluruhan yang menyederhanakan pengukuran pada SNR dan perhitungan pada BER [8]. *Q factor* mewakili SNR pada sistem komunikasi optik biner yang menyederhanakan analisis dari performansi pada suatu sistem [8].

2.7 Eye Pattern

Eye pattern adalah suatu tampilan pada osiloskop di mana sampel dari sinyal digital penerima diambil berulang-ulang dan diterapkan ke input vertikal, sedangkan *data rate* digunakan untuk memicu bagian horizontal. Disebut *eye pattern* karena pola yang dihasilkan terlihat seperti rangkaian dari bentuk mata.

Lebar bukaan pada *eye pattern* menentukan interval waktu, di mana sinyal yang diterima dapat diambil sampelnya tanpa kesalahan. Waktu terbaik untuk mengambil sampel bentuk gelombang yang diterima adalah ketika ketinggian terbesar dari bukaan pada *eye pattern*.

2.8 Power Link Budget

Power Link Budget bertujuan untuk menghitung anggaran daya yang diperlukan *receiver* sehingga daya terima tidak kurang dari sensitivitas minimum.

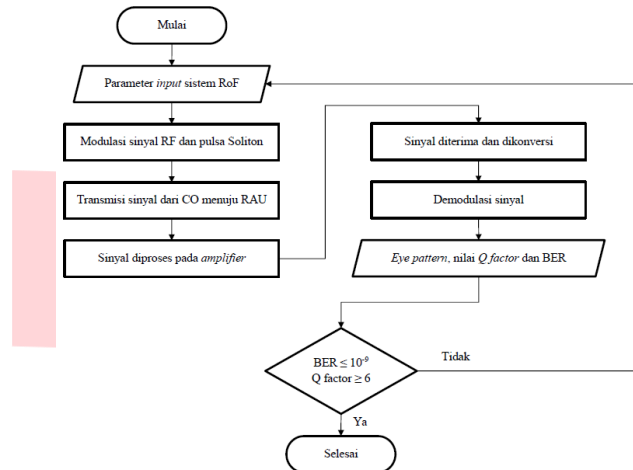
$$\alpha_{tot} = L \cdot \alpha_f + N_c \cdot \alpha_c + N_s \cdot \alpha_s + N_{sp} \cdot \alpha_{sp} \quad (2.3)$$

$$Prx = P_{tx} - \alpha_{tot} \quad (2.4)$$

3. Pembahasan

3.1 Diagram Alir dan Perencanaan Simulasi

Proses pengerjaan simulasi untuk pemodelan sistem *Radio over Fiber* (RoF) dipresentasikan pada diagram alir berikut.



Gambar 3.1 Diagram Alir.

Pada Gambar 3.1 menunjukkan langkah-langkah yang akan dilakukan dalam simulasi untuk pemodelan sistem RoF pada pengerjaan Tugas Akhir ini, yaitu: *input* parameter untuk sistem RoF, modulasi sinyal *Radio Frequency* (RF) dan pulsa Soliton, transmisi sinyal dari *Central Office* (CO) menuju *Remote Access Unit* (RAU), sinyal diproses pada *amplifier*, sinyal diterima dan dikonversi, demodulasi sinyal. Terdapat 4 skenario yang diujikan pada penelitian ini, yaitu:

a. Skenario Pertama, pada skenario pertama, simulasi sistem RoF menggunakan *bit rate* sebesar 1 Gbps. Sinyal RF dengan frekuensi 2.5 GHz akan dimodulasi melalui modulator eksternal dengan pulsa Soliton dengan frekuensi 228.8 THz dan *wavelength* 1310 nm. Sinyal termodulasi kemudian ditransmisikan melalui SMF jarak *Central Office* (CO) dan *Remote Access Unit* (RAU) sejauh 30 km dan *wavelength* 1310 nm. Kemudian sinyal dikuatkan dengan *amplifier* SOA sebelum diterima oleh *Photodetector* APD. Lalu sinyal didemodulasi dengan *Electrical Amplitude Demodulator*.

b. Skenario Kedua, pada skenario pertama, simulasi sistem RoF menggunakan *bit rate* sebesar 1 Gbps. Sinyal RF dengan frekuensi 2.5 GHz akan dimodulasi melalui modulator eksternal dengan pulsa Soliton dengan frekuensi 228.8 THz dan *wavelength* 1310 nm. Sinyal termodulasi kemudian ditransmisikan melalui SMF jarak *Central Office* (CO) dan *Remote Access Unit* (RAU) sejauh 60 km dan *wavelength* 1310 nm. Kemudian sinyal dikuatkan dengan *amplifier* SOA sebelum diterima oleh *Photodetector* APD. Lalu sinyal didemodulasi dengan *Electrical Amplitude Demodulator*.

c. Skenario Ketiga, pada skenario pertama, simulasi sistem RoF menggunakan *bit rate* sebesar 1 Gbps. Sinyal RF dengan frekuensi 2.5 GHz akan dimodulasi melalui modulator eksternal dengan pulsa Soliton dengan frekuensi 228.8 THz dan *wavelength* 1310 nm. Sinyal termodulasi kemudian ditransmisikan melalui SMF jarak *Central Office* (CO) dan *Remote Access Unit* (RAU) sejauh 90 km dan *wavelength* 1310 nm. Kemudian sinyal dikuatkan dengan *amplifier* SOA sebelum diterima oleh *Photodetector* APD. Lalu sinyal didemodulasi dengan *Electrical Amplitude Demodulator*.

d. Skenario Keempat, pada skenario pertama, simulasi sistem RoF menggunakan *bit rate* sebesar 5 Gbps. Sinyal RF dengan frekuensi 2.5 GHz akan dimodulasi melalui modulator eksternal dengan pulsa Soliton dengan frekuensi 228.8 THz dan *wavelength* 1310 nm. Sinyal termodulasi kemudian ditransmisikan melalui SMF jarak *Central Office* (CO) dan *Remote Access Unit* (RAU) sejauh 30 km dan *wavelength* 1310 nm. Kemudian sinyal dikuatkan dengan *amplifier* SOA sebelum diterima oleh *Photodetector* APD. Lalu sinyal didemodulasi dengan *Electrical Amplitude Demodulator*.

3.2 Perhitungan *Power Link Budget* dan *Signal to Noise Ratio*

1. Skenario Pertama

$$\alpha_{tot} = (30 \cdot 0.5) + (2 \cdot 0.75) + (2 \cdot 0.15) = 12.3 \text{ dB}$$

$$Prx = 0 - 12.3 = -12.3 \text{ dBm}$$

Dari perhitungan di atas, dapat diketahui sensitivitas minimum pada *receiver* skenario pertama adalah sebesar -12.3 dBm .

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} \left(\frac{S_o}{N_o} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{5.3208}{6.3246 \times 10^{-6}} \right) = 118.4988 \text{ dB}$$

2. Skenario Kedua

$$\alpha_{tot} = (60 \cdot 0.5) + (2 \cdot 0.75) + (2 \cdot 0.15) = 22.8 \text{ dB}$$

$$Prx = 0 - 22.8 = -22.8 \text{ dBm}$$

Dari perhitungan di atas, dapat diketahui sensitivitas minimum pada *receiver* skenario kedua adalah sebesar -22.8 dBm .

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} \left(\frac{S_o}{N_o} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{5.9321}{6.3246 \times 10^{-6}} \right) = 117.8399 \text{ dB}$$

3. Skenario Ketiga

$$\alpha_{tot} = (90 \cdot 0.5) + (2 \cdot 0.75) + (2 \cdot 0.15) = 33.3 \text{ dB}$$

$$Prx = 0 - 33.3 = -33.3 \text{ dBm}$$

Dari perhitungan di atas, dapat diketahui sensitivitas minimum pada *receiver* skenario ketiga adalah sebesar -33.3 dBm .

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} \left(\frac{S_o}{N_o} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{4.5007}{6.3246 \times 10^{-6}} \right) = 117.0499 \text{ dB}$$

4. Skenario Keempat

$$\alpha_{tot} = (30 \cdot 0.5) + (2 \cdot 0.75) + (2 \cdot 0.15) = 12.3 \text{ dB}$$

$$Prx = 0 - 12.3 = -12.3 \text{ dBm}$$

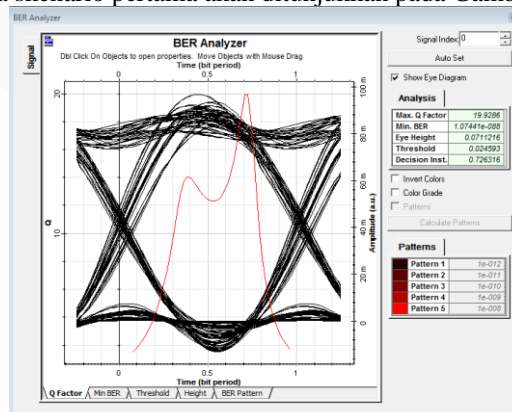
Dari perhitungan di atas, dapat diketahui sensitivitas minimum pada *receiver* skenario keempat adalah sebesar -12.3 dBm .

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} \left(\frac{S_o}{N_o} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{5.5645}{6.3246 \times 10^{-6}} \right) = 118.8878 \text{ dB}$$

3.3 Skenario dan Hasil Pengujian Sistem

1. Skenario Pertama

Hasil simulasi sistem RoF pada skenario pertama akan ditunjukkan pada Gambar 3.2 berikut.



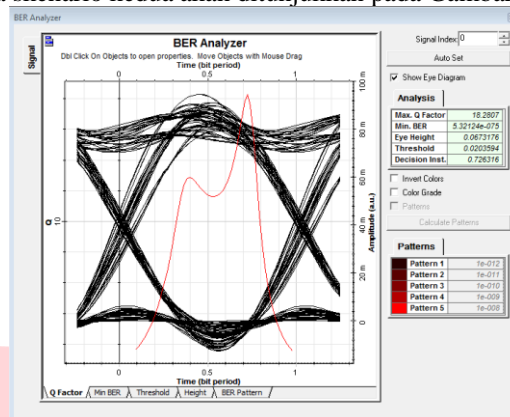
Gambar 3.2 Hasil Simulasi Skenario Pertama Sistem RoF.

Dari Gambar 3.2 dapat dilihat nilai Q factor sebesar 19.9286 dan nilai BER sebesar 1.07441×10^{-88} . Nilai Q factor yang didapat melebihi nilai minimum Q factor yang diharapkan, yaitu 6, di mana nilai yang didapat menunjukkan hasil yang baik. Nilai BER yang didapat kurang dari nilai maksimum BER yang diharapkan, yaitu 10^{-9} , di mana nilai yang didapat menunjukkan hasil yang baik. *Eye pattern* dari hasil simulasi skenario pertama dapat dilihat pada Gambar 3.2 menunjukkan hasil yang baik dengan pola mata yang terbuka lebar.

Berdasarkan hasil yang didapat dari simulasi skenario pertama, teknologi RoF dapat berjalan baik dengan *bit rate* 1 Gbps dan jarak 30 km. Hal ini juga dapat menyimpulkan bahwa parameter-parameter lainnya, diantaranya *wavelength* dari pulsa Soliton dan SMF sebesar 1310 nm dinilai baik untuk menjalankan sistem.

2. Skenario Kedua

Hasil simulasi sistem RoF pada skenario kedua akan ditunjukkan pada Gambar 3.3 berikut.



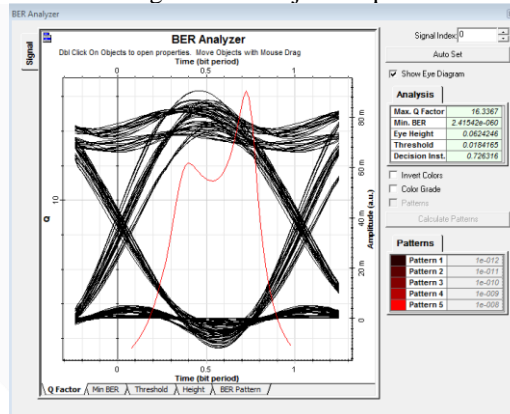
Gambar 3.3 Hasil Simulasi Skenario Kedua Sistem RoF.

Dari Gambar 3.3 dapat dilihat nilai *Q factor* sebesar 18.2807 dan nilai BER sebesar 5.32124×10^{-75} . Nilai *Q factor* yang didapat melebihi nilai minimum *Q factor* yang diharapkan, yaitu 6, di mana nilai yang didapat menunjukkan hasil yang baik. Nilai BER yang didapat kurang dari nilai maksimum BER yang diharapkan, yaitu 10^{-9} , di mana nilai yang didapat menunjukkan hasil yang baik. *Eye pattern* dari hasil simulasi skenario kedua dapat dilihat pada Gambar 3.3 menunjukkan hasil yang baik dengan pola mata yang terbuka lebar.

Berdasarkan hasil yang didapat dari simulasi skenario kedua, teknologi RoF dapat berjalan baik dengan *bit rate* 1 Gbps dan jarak 60 km. Penambahan jarak terbukti dapat mengurangi kualitas akhir dari sistem. Parameter-parameter lainnya, diantaranya *wavelength* dari pulsa Soliton dan SMF sebesar 1310 nm dinilai baik untuk menjalankan sistem.

3. Skenario Ketiga

Hasil simulasi sistem RoF pada skenario ketiga akan ditunjukkan pada Gambar 3.4 berikut.



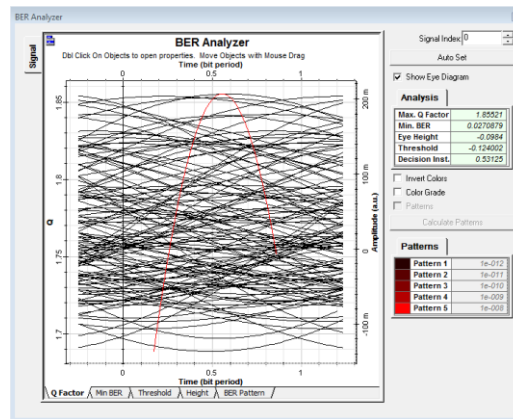
Gambar 3.4 Hasil Simulasi Skenario Ketiga Sistem RoF.

Dari Gambar 3.4 dapat dilihat nilai *Q factor* sebesar 16.3367 dan nilai BER sebesar 2.41542×10^{-60} . Nilai *Q factor* yang didapat melebihi nilai minimum *Q factor* yang diharapkan, yaitu 6, di mana nilai yang didapat menunjukkan hasil yang baik. Nilai BER yang didapat kurang dari nilai maksimum BER yang diharapkan, yaitu 10^{-9} , di mana nilai yang didapat menunjukkan hasil yang baik. *Eye pattern* dari hasil simulasi skenario ketiga dapat dilihat pada Gambar 3.4 menunjukkan hasil yang baik dengan pola mata yang terbuka lebar.

Berdasarkan hasil yang didapat dari simulasi skenario ketiga, teknologi RoF dapat berjalan baik dengan *bit rate* 1 Gbps dan jarak 90 km. Penambahan jarak terbukti dapat mengurangi kualitas akhir dari sistem. Parameter-parameter lainnya, diantaranya *wavelength* dari pulsa Soliton dan SMF sebesar 1310 nm dinilai baik untuk menjalankan sistem.

4. Skenario Keempat

Hasil simulasi sistem RoF pada skenario keempat akan ditunjukkan pada Gambar 3.5 berikut.



Gambar 3.5 Hasil Simulasi Skenario Keempat Sistem RoF.

Dari Gambar 3.5 dapat dilihat nilai Q factor sebesar 1.85521 dan nilai BER sebesar 0.0270879. Nilai Q factor yang didapat kurang dari nilai minimum Q factor yang diharapkan, yaitu 6, di mana nilai yang didapat menunjukkan hasil yang tidak baik. Nilai BER yang didapat lebih dari nilai maksimum BER yang diharapkan, yaitu 10^{-9} , di mana nilai yang didapat menunjukkan hasil yang tidak baik. *Eye pattern* dari hasil simulasi skenario keempat dapat dilihat pada Gambar 3.5 menunjukkan hasil yang tidak baik di mana pola mata yang tidak terlihat.

Berdasarkan hasil yang didapat dari simulasi skenario keempat, teknologi RoF tidak berjalan baik dengan *bit rate* 5 Gbps dan jarak 30 km. Penambahan *bit rate* dengan jarak yang sama terbukti dapat mengurangi kualitas akhir dari sistem.

3.4 Analisis Performa

Berdasarkan hasil yang didapat dari pengujian performansi sistem dengan simulasi, skenario pertama menunjukkan hasil yang optimal dari rangkaian sistem RoF dengan nilai Q factor dan BER yang didapat melebihi nilai minimum yang diharapkan serta *eye pattern* yang terbuka lebar. Pada skenario kedua, hasil yang didapat juga ternilai baik namun terjadi penurunan nilai yang drastis dari Q factor dan BER yang didapat dibandingkan skenario pertama. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan pada parameter jarak, sebesar 30 km (skenario pertama 30 km, skenario kedua 60 km), dari CO menuju RAU yang diwakilkan dengan panjang SMF berpengaruh pada penurunan performansi pada sistem. Hasil ini menunjukkan bahwa skenario pertama lebih baik dibanding skenario kedua. Nilai Q factor dan BER serta *eye pattern* yang didapat pada skenario ketiga juga menunjukkan hasil yang baik, namun terjadi sedikit penurunan dibanding nilai yang didapat pada skenario kedua. Hal ini menunjukkan bahwa parameter jarak berpengaruh terhadap performansi dari sistem.

Berdasarkan hasil yang didapat dari simulasi pada skenario pertama, skenario kedua, dan skenario ketiga, skenario pertama menunjukkan hasil yang optimal. Parameter jarak berpengaruh pada performansi sistem yang ditandai dengan menurunnya performansi sistem seiring bertambahnya jarak CO dan RAU yang diwakilkan dengan panjang SMF.

Pada skenario keempat, *eye pattern* dari simulasi tidak terbentuk serta nilai Q factor dan BER yang didapat kurang dari nilai yang diharapkan menunjukkan skenario keempat memiliki hasil yang tidak baik. Jika dibandingkan dengan skenario pertama yang memiliki perbedaan *bit rate* terhadap skenario keempat, *bit rate* berpengaruh terhadap performansi sistem yang ditandai dengan menurunnya performansi sistem dengan bertambahnya nilai *bit rate* yang digunakan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dari nilai yang didapat pada simulasi jaringan *Radio over Fiber* (RoF) untuk *mobile communication* 5G dengan pulsa Soliton, dapat disimpulkan:

1. Pulsa Soliton dapat digunakan sebagai *optical carrier* pada teknologi RoF menggantikan laser.
2. Penentuan parameter sangat berpengaruh terhadap performansi sistem. Penentuan parameter yang tepat dapat meningkatkan performansi sistem. Beberapa parameter yang dapat mempengaruhi performansi sistem di antaranya:
 - a. *Bit rate*. *Bit rate* yang optimal pada simulasi Tugas Akhir ini terdapat pada skenario pertama dengan *bit rate* sebesar 1 Gbps. Dengan parameter lainnya yang sama dengan skenario pertama, skenario keempat dengan *bit rate* 5 Gbps menunjukkan performansi yang berbeda dan memiliki hasil yang tidak baik.
 - b. Jarak. Parameter jarak berpengaruh terhadap performansi sistem ditandai dengan hasil simulasi yang didapat pada skenario pertama, skenario kedua, dan skenario ketiga. Dengan parameter lain yang tetap, peningkatan jarak antara *Central Office* (CO) dan *Remote Access Unit* (RAU) menyebabkan menurunnya performansi dari sistem. Semakin dekat jarak antara CO dan RAU, maka performansi jaringan RoF akan semakin baik.

3. Performansi optimal pada sistem didapat dari hasil simulasi skenario pertama dengan nilai Q factor sebesar 19.9286 dan nilai *Bit Error Rate* (BER) sebesar 1.07441×10^{-88} , serta *eye pattern* yang terbuka lebar.

REFERENSI

- [1] J. Johny and S. Shashidharan, "Design and simulation of a Radio over Fiber system and its performance analysis," *Int. Congr. Ultra Mod. Telecommun. Control Syst. Work.*, pp. 636–639, 2012, doi: 10.1109/ICUMT.2012.6459744.
- [2] R. Llorente and M. Beltr, "Radio-over-Fibre Techniques and Performance," *Front. Guid. Wave Opt. Optoelectron.*, no. February, 2010, doi: 10.5772/39559.
- [3] K. Nishimura, S. Ishimura, K. Tanaka, A. Bekkali, S. Nanba, and M. Suzuki, "Radio-over-Fiber Transmission Technology for Future Mobile Access Network toward Beyond-5G Era," *23rd Opto-Electronics Commun. Conf. OECC 2018*, vol. 2, no. Oecc, pp. 1–2, 2018, doi: 10.1109/OECC.2018.8730101.
- [4] M. Bhuvaneshwari, S. Hasan, and A. Razak, "Study on soliton pulse and its characteristics for fiber optic communication," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 2845–2847, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i4.17860.
- [5] A. Hasegawa, "Soliton-based optical communications: An overview," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, no. 6, pp. 1161–1172, 2000, doi: 10.1109/2944.902164.
- [6] M. Emmaeinna, S. Faci, A. L. Billabert, A. Kabalan, C. Algani, and M. L. Diakite, "Performance Analysis of Radio-over-Fiber Based on Phase-Modulation and Direct-Detection for the Future 5G Network," *Int. Conf. Transparent Opt. Networks*, vol. 2018-July, pp. 2–5, 2018, doi: 10.1109/ICTON.2018.8473761.
- [7] D. Apostolopoulos, G. Giannoulis, N. Argyris, N. Iliadis, K. Kanta, and H. Avramopoulos, "Analog radio-over-fiber solutions in support of 5G," *22nd Conf. Opt. Netw. Des. Model. ONDM 2018 - Proc.*, pp. 266–271, 2018, doi: 10.23919/ONDM.2018.8396143.
- [8] D. Perez-Galacho, D. Sartiano, and S. Sales, "Analog radio over fiber links for future 5g radio access networks," *Int. Conf. Transparent Opt. Networks*, vol. 2019-July, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/ICTON.2019.8840516.
- [9] B. Pamukti and D. Perdana, "Non-linear effects of high rate soliton transmission on DWDM optical fiber communication system," *Proc. - 2016 1st Int. Conf. Inf. Technol. Inf. Syst. Electr. Eng. ICITISEE 2016*, no. 1, pp. 26–30, 2016, doi: 10.1109/ICITISEE.2016.7803042.
- [10] P. Udomariyasap, "A soliton-based Radio-over-Fiber WDM-PON by micro-optics-electro system," pp. 81–84.
- [11] F. Diagrams, "Optical Signal-to-Noise Ratio and the Q-Factor in Fiber-Optic Communication Systems Optical Signal-to-Noise Ratio and the Q-Factor in Fiber-Optic Communication Systems," pp. 1–7.
- [12] N. Prabowo and A. D. P. Akhmad Hambali, "Perancangan Desain Fiber To The Tower untuk Komunikasi Broadcast sebagai Backhaul di Paris Van Java TV Bandung," vol. 4, no. 1, pp. 154–164, 2017.
- [13] Q. Factor, "PERBANDINGAN PERFORMANSI ANTARA PHOTODETECTOR PIN DAN APD PADA SISTEM JARINGAN TWDM-PON Performance Comparisons Between PIN and APD Photodetector in TWDM-PON Network System," vol. 5, no. 1, pp. 775–781, 2018.
- [14] S. Prodi, T. Telekomunikasi, F. T. Elektro, and U. Telkom, "3 1,2,3," vol. 7, no. 1, pp. 479–486, 2020.
- [15] S. R. Prasad and A. V Patil, "Radio Over Fiber Technology Using Electro-Absorption Modulation," vol. 2, no. 10, pp. 5663–5671, 2010.
- [16] V. A. Burdin, M. V. Dashkov, K. A. Volkov, and K. A. Volkova, "Application of dispersion managed soliton regime in radio-over-fiber systems," *Opt. Technol. Telecommun. 2012*, vol. 8787, p. 878703, 2013, doi: 10.1117/12.2018567.
- [17] R. Ganapathy, M. Easwaran, G. Joshva Raj, S. Venkatesh, and K. Porsezian, "Modeling and evaluation of radio over fiber communication systems on employing nanophotonic devices," *Proc. Int. Conf. Nanosci. Eng. Technol. ICONSET 2011*, pp. 181–186, 2011, doi: 10.1109/ICONSET.2011.6167949.
- [18] S. R. Prasad and A. V Patil, "Radio Over Fiber Technology Using Electro-Absorption Modulation," vol. 2, no. 10, pp. 5663–5671, 2010.
- [19] A. Kurniawan and E. S. Sugesti, "Perancangan Radio Over Fiber Pada Jaringan Komunikasi Air Traffic Control," no. February, 2018.
- [20] A. Seal, S. Bhutani, and A. Sangeetha, "Performance analysis of radio over fiber (RoF) system for indoor applications," *Proc. - 2017 Int. Conf. Tech. Adv. Comput. Commun. ICTACC 2017*, vol. 2017-October, pp. 73–76, 2017, doi: 10.1109/ICTACC.2017.28.
- [21] L. E. Ynoquio Herrera, R. G. Leibel, G. C. Amaral, J. P. von der Weid, and P. J. Urban, "Linearization techniques for electro-optical modulation in analog radio over fiber," no. August, pp. 1–4, 2017, doi: 10.1109/imoc.2017.8121049.