

ANALISIS SIMULASI *ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS* (OFDMA) PADA TEKNOLOGI 4G UNTUK RADIO OVER FIBER

ANALYSIS OF SIMULATION ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS (OFDMA) IN 4G TECHNOLOGY FOR RADIO OVER FIBER

Khanissa Dwi Suci Lestari¹, Ir. Akhmad Hambali, M.T.², Ir. Uke Kurniawan Usman, M.T.³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Telkom University

¹khanissalesta@gmail.com, ²ahambali@telkomuniversity.co.id, ³usman.uke@gmail.com

Abstrak

Semakin meningkatnya user mengakibatkan peningkatan kebutuhan data rate. Saat ini users bukan hanya membutuhkan layanan suara, tetapi menuntut layanan data dengan *data rate* yang tinggi. Salah satu teknik yang menjanjikan untuk mendukung kecepatan akses data yang tinggi yaitu teknik *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA). Selain itu, media transmisi juga merupakan faktor penting dalam mewujudkan kecepatan data yang tinggi. Pada Penelitian Tugas Akhir ini, mensimulasikan sistem jaringan *Radio over Fiber* (RoF). Pada teknologi RoF sinyal radio ditumpangkan ke serat optik. *Bit rate* yang digunakan pada penelitian ini yaitu sebesar 1 Gbps, kemudian bit-bit dari PRBS dimodulasi dengan menggunakan 16-QAM, kemudian sinyal tersebut dibawa oleh radio frekuensi sebesar 3.5 GHz dan sinyal radio tersebut dimodulasi dengan menggunakan *Mach-Zehnder Modulator* untuk ditransmisikan melalui sinyal optik. Pada Perancangan ini mencakup tiga bagian utama yaitu *transmitter*, *link optic* dan *receiver* dengan beberapa variasi jarak yaitu 8 Km, 20 Km, 35 Km dan 50 Km. Tugas akhir ini mensimulasikan dua skenario yaitu *external modulation* dan *direct modulation*. Pada Penelitian ini di dapatkan performansi RoF dengan skema *external modulation* lebih baik dibanding *direct modulation*. Pada *external modulation* sistem yang dirancang memenuhi hingga jarak 35 km dengan nilai BER terbaik pada jarak 8 km dengan nilai BER yaitu 6.14109×10^{-12} . Sedangkan pada model *direct modulation* sistem memenuhi hingga jarak 20 km dengan nilai BER terbaik pada jarak 8 km dengan nilai BER sebesar 7.19313×10^{-12} .

Kata Kunci: Kata Kunci : QAM, RoF, External Modulation, Direct Modulation

Abstract

An increase in users causes an increase in data speed. Users do not only need voice services, but they also demand data services with high data rates. One promising technique to support the high data access speeds is the *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) technique. In addition, the transmission media is also an important factor in realizing the high data rates. This Final Project research simulated a *Radio over Fiber* (RoF) network system. In the RoF technology, radio signals are superimposed on optical fibers. The bit rate used in this study was 1 Gbps, then the bits of PRBS were modulated using 16-QAM, then the signal was carried by a radio frequency of 3.5 GHz and the radio signal was modulated using the *Mach-Zehnder Modulator* to be transmitted through the optical signal. This design includes three main parts, namely the transmitter, optical link and receiver with several distance variations: 8 Km, 20 Km, 35 Km and 50 Km. This final project simulated two scenarios, namely the *external modulation* and *direct modulation*. In this study, it was found that RoF performance with an *external modulation* scheme is better than the *direct modulation*. In *external modulation*, the designed system met a distance up to 35 km with the best BER value at a distance of 8 km with a BER value of 6.14109×10^{-12} . Meanwhile, in the *direct modulation* model, the system met a distance up to 20 km with the highest BER value at a distance of 8 km with a BER value of 7.19313×10^{-12} .

Keywords: QAM, RoF, External Modulation, Direct Modulation

1. Pendahuluan

Saat ini kebutuhan akan teknologi informasi menjadi salah satu masalah yang harus dihadapi. Berdasarkan penelitian yang telah di lakukan oleh Huawei dan Ericsson, disebutkan bahwa pada tahun 2021 akan terjadi peningkatan user sebanyak 13 kali lebih besar dibandingkan tahun sebelumnya. Peningkatan *user* tersebut tentunya mengakibatkan peningkatan kebutuhan *data rate*. Sistem komunikasi dengan *data rate* yang tinggi akan menyebabkan kebutuhan *bandwidth* yang semakin tinggi pula. Salah satu teknik yang menjanjikan untuk mendukung kecepatan akses data yang tinggi yaitu teknik *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA). OFDMA adalah teknik *multiple access* yang digunakan pada teknologi *Fourth Generation* (4G). Pada OFDMA kecepatan data lebih tinggi karena informasi disusun secara *orthogonal* sehingga mengakibatkan penghematan *bandwidth*. Selain teknik OFDMA, media transmisi juga merupakan hal yang penting dalam

menentukan kecepatan akses data. Sistem transmisi data dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu sistem transmisi data dengan menggunakan kabel (*wireline*) dan sistem transmisi data dengan menggunakan gelombang radio (*nirkabel*). Selain itu, telah dikembangkan sebuah sistem yang menggabungkan kedua sistem transmisi tersebut yaitu disebut dengan istilah *Radio over Fiber* (RoF).

Pada penelitian Tugas Akhir ini dilakukan perancangan teknologi RoF pada jaringan 4G dengan model *direct* dan *external modulation* yang bertujuan untuk membandingkan performansi yang berfokus pada kualitas jaringan optik. Parameter yang digunakan untuk analisis performansi sistem RoF yaitu berdasarkan nilai *Link Power Budget* (LPB), *Signal to Noise Ratio* (SNR), *Q-factor* dan *Bit Error Rate* (BER). Simulasi pada Tugas Akhir ini dilakukan dengan menggunakan simulator optik. Tugas Akhir ini menggunakan beberapa variasi jarak lintasan link optik yaitu 8 km, 20 km, 35 km dan 50 km dengan jenis serat optik *single mode fiber* (SMF). Selain itu dalam Tugas Akhir ini juga menggunakan *bit rate* sebesar 1 Gbps dengan frekuensi pembawa 3.5 GHz.

2. Dasar Teori

2.1 OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*)

Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) merupakan teknik multiple akses yang berbasis pada skema transmisi OFDM. OFDMA digunakan pada arah *downlink* OFDMA merupakan kombinasi antara *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) dan *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) yang melayani beberapa pengguna dengan mengalokasikannya pada *sub-carrier*. Sebenarnya, ide di balik OFDMA adalah dengan memisahkan satu pesat data yang tinggi ke dalam beberapa pesat data rendah dan mentransmisikannya secara parallel. OFDMA memungkinkan beberapa *User Equipment* (UE) untuk berbagi *bandwidth* yang sama. Hal tersebut dapat dilakukan dengan menentukan beberapa *sub-carrier* untuk diberikan kepada beberapa UE sehingga memungkinkan beberapa pesat aliran data yang rendah untuk UE yang berbeda pada saat yang sama.

2.2 *Radio over Fiber* (RoF)

Radio Over Fiber (RoF) merupakan suatu proses pengiriman sinyal radio melalui kabel serat optik. Saat ini kebutuhan industri menuntut *efisiensi* dengan menggunakan kabel serat optik sebagai medium perantara maka akan diperoleh kecepatan transmisi yang lebih besar dibandingkan ketika dilakukan transmisi secara langsung. Dengan menggunakan kabel serat optik maka kualitas sinyal suara yang ditransmisikan tetap bagus dimana gangguan yang terjadi selama proses transmisi kecil sehingga, sinyal yang dibawanya tetap bagus. Selain itu dengan menggunakan kabel serat optik dapat menghemat biaya serta menambah performansi untuk *high speed fiber* berdasarkan akses *nirkabel* RoF memberikan solusi untuk jaringan *broadband*, baik *indoor* maupun *outdoor* [6].

2.3 *Transport Aspek Modulator*

2.3.1 *Direct Modulation*

Direct modulation adalah skema modulasi optik untuk memperoleh sinyal optik yang diinginkan (sinyal RoF) dengan menerapkan modulasi sinyal elektrik ke sinyal penggerak berupa sumber cahaya. Jika perlu, arus bias atau tegangan dapat ditambahkan ke modulasi sinyal elektrik untuk operasi linier. Secara umum, *direct modulation* adalah cara termudah, paling hemat biaya untuk mendapatkan sinyal optik termodulasi karena perangkat optik yang diperlukan hanyalah sumber laser [3].

2.3.2 *External Modulation*

Modulasi eksternal menciptakan sinyal optik yang diinginkan (sinyal RoF) menggunakan modulator eksternal yang digabungkan dengan sumber cahaya CW [3]. Gambar 2 merupakan sistem model dari *external modulation*.

2.4 Parameter Performansi

Parameter performansi yang akan digunakan dalam Tugas Akhir ini meliputi nilai *Power Link Budget* (PLB), *Signal to Noise Ratio* (SNR), *Q-factor* dan *Bit Error Rate* (BER). Parameter tersebut akan dijelaskan sebagai berikut :

2.4.1 *Power Link Budget* (PLB)

Link Power Budget (LPB) digunakan untuk menghitung nilai daya terima pada saat pengiriman dari *transmitter* menuju *receiver*. Persamaan untuk perhitungan LPB sebagai berikut :

$$atot = L.af + Nc.ac + Ns.as + \alpha split + MS \quad (1)$$

$$Prx = Ptx + atot \quad (2)$$

2.4.2 *Signal to Noise Ratio* (SNR)

SNR merupakan hasil perbandingan dari daya sinyal transmisi terhadap daya *noise* yang terdapat pada sistem. Nilai SNR dapat dihitung melalui persamaan berikut

$$SNR = \frac{(Pr.R.M)^2}{2.q.Pr.R.M^2 .NF.Be + \frac{4.K_B.T.Be}{R_L}} \tag{3}$$

2.4.3 Q-factor

Q-factor adalah faktor kualitas yang akan menentukan bagus atau tidaknya kualitas suatu link atau jaringan. Dalam sistem komunikasi serat optik, minimal ukuran Q-factor yang bagus adalah 6 atau 10⁻⁹. Untuk menghitung nilai Q-Factor dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut

$$Q = \frac{10^{\frac{SNR}{20}}}{2} \tag{4}$$

2.4.4 Bit Error Rate (BER)

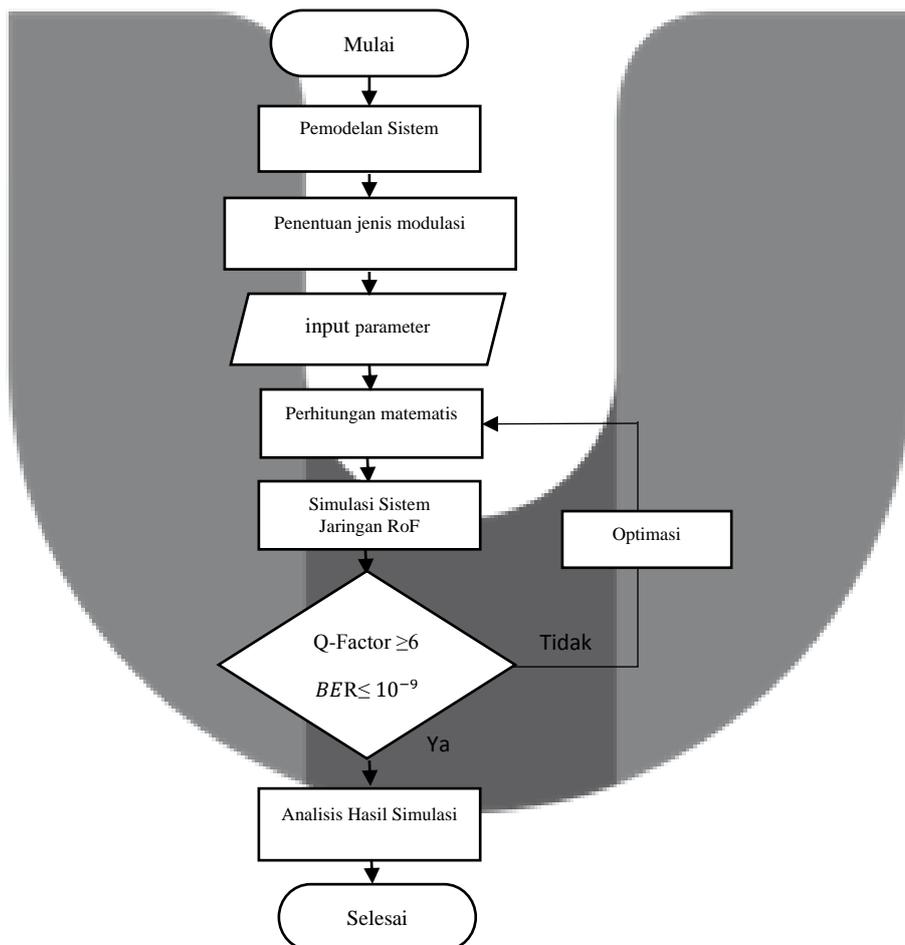
BER merupakan rasio perbandingan bit error dengan bit yang dikirimkan keseluruhan.. BER dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp\left(\frac{-Q^2}{2}\right)}{Q\sqrt{2\pi}} \tag{5}$$

3. Perancangan Model Sistem

3.1 Diagram Alir

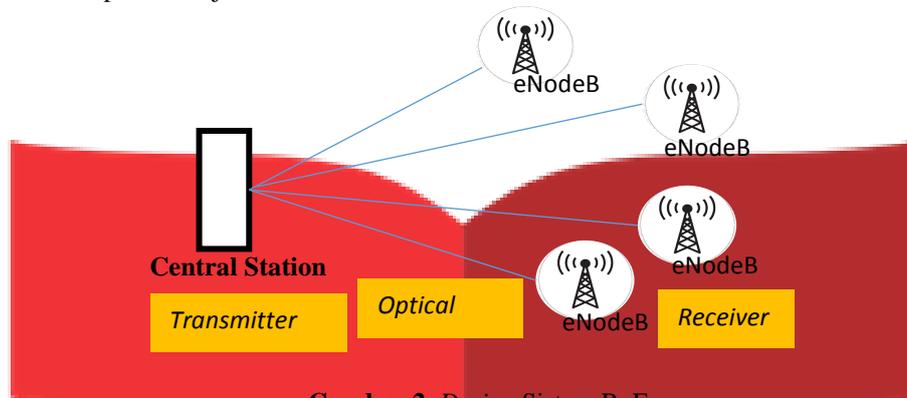
Pada Tugas Akhir ini dibuat sistem jaringan Radio over Fiber. Adapun proses dari pembuatan sistem dilakukan berdasarkan diagram alir. Berikut merupakan diagram alir dari penelitian Tugas Akhir ini.



Gambar 1. Diagram Alir Perancangan Simulasi

3.2 Perancangan Sistem RoF

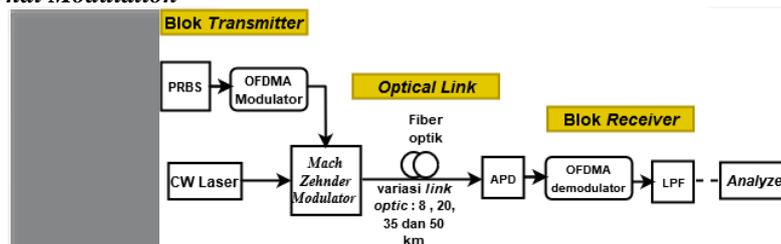
Pada Penelitian Tugas Akhir ini dirancang sebuah sistem jaringan *Radio over Fiber*. Pada perancangan sistem RoF ini menggunakan *software* simulator optik. Jenis fiber optik yang digunakan yaitu *single mode fiber* (SMF) dengan beberapa variasi jarak.



Gambar 2. Design Sistem RoF

Pada Gambar 2 merupakan gambaran sistem yang di transmisikan dengan menggunakan RoF. Dalam cakupan area nirkabel dapat dipasang *link radio over fiber* antara *Central* ke eNodeB dan kemudian sinyal informasi akan dipancarkan oleh antenna. Pada penelitian Tugas Akhir ini disimulasikan dua skenario RoF yaitu sistem dengan menggunakan *external modulation* dan *direct modulation* dengan beberapa variasi panjang lintasan yaitu 8 km, 20 km, 35 km dan 50 km. Berikut merupakan model dari kedua sistem yang dibuat :

3.2.1 External Modulation



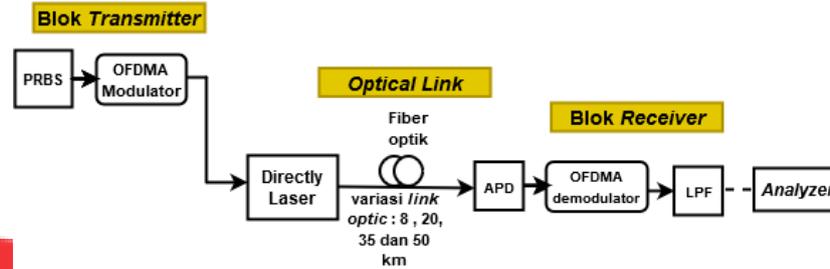
Gambar 3. Model RoF External Modulation

Pada Gambar 3 merupakan model sistem menggunakan skenario *external modulation*. pemodelan sistem ini terbagi menjadi tiga bagian yaitu blok *transmitter*, blok *optical link* dan blok *receiver*. Model sistem ini menggunakan frekuensi 3.5 GHz. Sinyal dari *Radio over Fiber* ditransmisikan dari *Central Station* menuju eNodeB dengan menggunakan kabel fiber optik.

Berdasarkan Gambar 3. pada bagian *transmitter* terdapat komponen *Pseudo Random Bit Sequence* (PRBS) Generator yang berfungsi untuk membangkitkan sinyal informasi berupa sinyal digital. Kemudian sinyal digital tersebut masuk ke dalam OFDMA modulator karena dalam penelitian ini hanya dilakukan pada sisi *downlink*. Dalam OFDMA suatu informasi dibawa oleh suatu simbol yang berisikan bit-bit informasi. *Symbol* tersebut didefinisikan menurut diagram konstelasi berdasarkan skema modulasi yang digunakannya, yaitu 16-QAM. Pada 16-QAM empat bit data diubah menjadi satu simbol, simbol-simbol tersebut mengalami proses *Invers Fast Fourier Transform* (IFFT) dan diubah menjadi simbol-simbol *orthogonal*. Kemudian setelah proses IFFT masuk kedalam *Quardature Modulator* untuk memasukan frekuensi pembawanya. Pada Tugas Akhir ini sumber cahaya yang digunakan yaitu *Continuous Wave* (CW) Laser. CW Laser merupakan sumber cahaya yang akan menjadi sinyal pembawa untuk pengiriman menggunakan media transmisi fiber optik dengan daya kirim sebesar 0 dBm. Pada model *external modulation*, komponen modulator eksternal yang digunakan yaitu *Mach-Zehnder Modulator* (MZM).

Setelah itu disisi *receiver* terdapat komponen photodetector berjenis *Avalanche Photodiode* (APD). Kemudian setelah melewati komponen APD masuk ke dalam *Quadratur demodulator* untuk memisahkan frekuensi yang kemudian akan masuk ke bagian FFT untuk mendapatkan data asli. Setelah itu digunakan komponen *filter* yang berfungsi untuk memfilter sinyal informasi yang diinginkan. Kemudian pada simulasi juga dipasang *BER analyzer* berfungsi untuk mengukur nilai performansi dari jaringan yang sudah dirancang.

3.2.2 Direct Modulation



Gambar 4. Model RoF Direct Modulation

Pada Gambar 4 merupakan model sistem menggunakan skenario *direct modulation*. Skema *direct modulation* hampir sama dengan model *external modulation*. Bedanya, pada *direct modulation* tidak menggunakan komponen modulator eksternal seperti MZM. Dalam skema ini, sumber cahaya dari *directly laser* langsung dan modulasi dilakukan secara internal.

3.3 Perhitungan Performansi Model Sistem

Perhitungan model sistem adalah salah satu tahapan yang harus dilakukan sebelum melaksanakan simulasi. Dalam penelitian Tugas Akhir ini perhitungan sistem dilakukan baik untuk model *direct modulation* maupun *external modulation*. Perhitungan kedua model tersebut memiliki hasil yang sama kecuali pada nilai RTB dikarenakan komponen laser yang digunakan untuk *direct* dan *external* memiliki spesifikasi yang berbeda. Berikut merupakan contoh perhitungan untuk model sistem *external modulation* dengan jarak 8 km.

3.3.1 Perhitungan Link Power Budget (PLB)

Pada perhitungan *Link Power Budget* (LPB) menggunakan jarak 8 Km. konektor yang digunakan berjumlah 2 Buah dengan nilai redaman 0.2 dB/buah dan jumlah sambungan 2 Km/sambungan dengan nilai redaman 0.5 dB/sambungan dan nilai margin system 6. Berikut merupakan perhitungan PLB untuk sistem RoF dengan menggunakan panjang *link* optik sejauh 8 km adalah sebagai berikut :

$$a_{total} = (3 \times 0.5) + (2 \times 0.2) + (8 \times 0.35) + 0 + 6$$

$$a_{total} = 10.7 \text{ dB}$$

Dengan nilai $a_{total} = 10.7 \text{ dBdB}$, daya transmitter (P_{Tx}) adalah 0 dBm, sehingga daya receiver (P_{Rx}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sehingga :

$$P_{Rx} = P_{Tx} - a_{total}$$

$$P_{Rx} = 0 - 10.7 \text{ dBm} = -10.7 \text{ dBm}$$

Hasil tersebut masih memenuhi standar anggaran daya karena nilai LPB $\geq -31 \text{ dBm}$.

3.3.2 Perhitungan Rise Time Budget

Berikut merupakan perhitungan RTB dengan jarak 8 km dan dengan nilai $d_{mat} = 16.75 \text{ ps/nm.km}$ dengan bitrate 1 Gbps

$$t_{mat} = \Delta\sigma \cdot L \cdot D_{mat}$$

$$t_{mat} = 0.2 \text{ nm} \times 8 \text{ km} \times 16.75 \frac{\text{ps}}{\text{nm}} \cdot \text{km} = 0.0268 \text{ ns}$$

T modus = 0 dikarenakan jenis serat optic yang digunakan *single mode fiber* (SMF)

$$t_{system} = \sqrt{(t_{Tx}^2 + t_{mat}^2 + t_{mod}^2 + t_{Rx}^2)}$$

$$t_{system} = \sqrt{(0.035^2 + 0.0268^2 + 0 + 0.19^2)} = 0.195046764 \text{ ns}$$

❖ Rise rise time NRZ

Sehingga nilai $t_{NRZ} = \frac{0.7}{\text{Bit rate}} = \frac{0.7}{1 \times 10^9} = 0.7 \text{ ns}$. Dari hasil perhitungan NRZ dengan jarak sejauh 8 km memenuhi, karena nilai $t_{sys} < t_{NRZ}$, maka dapat disimpulkan nilai RTB dengan bit rate 1 Gbps layak.

❖ Nilai Rise time RZ

Nilai $t_{RZ} = \frac{0.35}{\text{Bit rate}} = \frac{0.35}{1 \times 10^9} = 0.35 \text{ ns}$, Dari hasil perhitungan RZ dengan jarak sejauh 8 km memenuhi, karena besar nilai *rise time system* lebih kecil dari 35% data RZ, Maka dapat disimpulkan nilai RTB dengan bit rate 1 Gbps layak dengan menggunakan *line coding* RZ.

3.3.3 Perhitungan Signal to Noise Ratio (SNR)

Berikut adalah hasil perhitungan SNR pada jarak 8 km yaitu:

$$= \frac{(8.511 \times 10^{-5} \times 0.8 \times 10)^2}{2 \times 1.69 \times 10^{-19} \times 8.511 \times 10^{-5} \times 0.8 \times 10^2 \times 5.01 \times 2.5 \times 10^9 + \frac{4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 298 \times 2.5 \times 10^9}{50}}$$

$$= 41.94$$

3.3.4 Perhitungan Q-Factor

Perhitungan Q-factor digunakan untuk mengetahui faktor kualitas dari lintasan optik . Berikut merupakan hasil perhitungan Q-factor

$$Q = \frac{\text{SNR}}{2} = \frac{41.94}{2} = 62.51$$

Berdasarkan hasil yang di dapatkan untuk nilai Q-factor di atas memenuhi standar Q-factor karena nilai yang dihasilkan ≥ 6 .

3.3.5 Perhitungan Bit Error Rate (BER)

Perhitungan *Bit Error Rate* digunakan untuk dapat mengetahui perbandingan bit yang dikirm dengan bit yang error. Berikut salah satu perhitungan BER dalam penelitian Tugas Akhir ini

$$\text{BER} = \frac{\exp\left(\frac{-62.51^2}{2}\right)}{62.51\sqrt{2\pi}} = 0.00E + 00$$

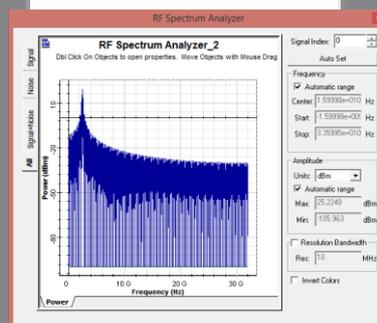
Berdasarkan hasil perhitungan BER diatas nilai yang dihasilkan memenuhi standar untuk nilai BER karena nilai $\text{BER} \leq 10^{-9}$.

4. Hasil dan Analisis

4.1 Verifikasi Hasil Simulasi

4.1.1. Spektrum Radio Frekuensi

Dalam penelitian Tugas Akhir ini, bit-bit informasi yang di kirimkan kemudian di modulasi dengan menggunakan frekuensi 3.5 GHz. Gambar berikut merupakan spektrum yang dihasilkan

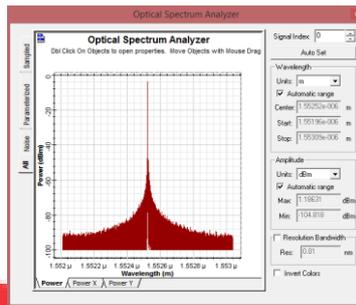


Gambar 5. Spektrum Radio Frekuensi

Pada Gambar 5 menunjukkan bahwa amplitudo sinyal pada frekuensi 3.5 GHz merupakan amplitudo yang paling tinggi. Tingginya nilai amplitudo tersebut disebabkan oleh perubahan rentang frekuensi dimana pada frekuensi 3.5 GHz sudah ditumpangi sinyal-sinyal informasi

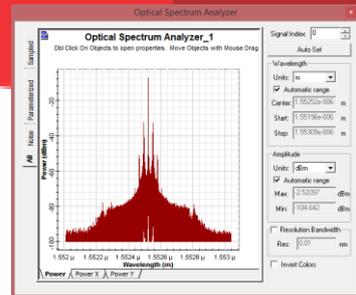
4.1.2 Spectrum Analyzer

Pada Tugas Akhir ini Panjang gelombang yang digunakan yaitu berada pada Panjang gelombang 1550 nm dan jaringan ini di simulasikan dengan menggunakan simulator *optisystem*.



Gambar 6. Spektrum frekuensi sebelum ditumpangi RoF

Pada Gambar 6 merupakan sinyal keluaran dari komponen CW laser sebelum ditumpangi ke dalam *Radio over Fiber*. Sinyal keluaran ini di ukur menggunakan *spectrum analyzer* dan bekerja diatas gelombang 1550 nm

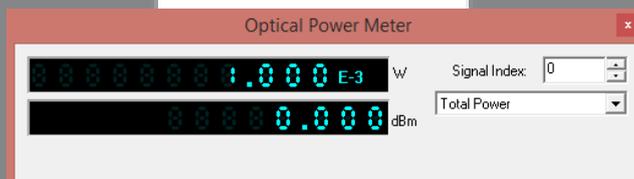


Gambar 7. Spektrum Frekuensi setelah ditumpangi RoF

Dari Gambar 7 dapat dilihat perbedaan struktur spektrum sebelum dan sesudah ditumpangi *Radio over Fiber*. Penggunaan komponen MZM mengubah struktur spektrum komponen laser, tetapi nilai sinyal pembawa utama tetap memiliki amplitudo tertinggi.

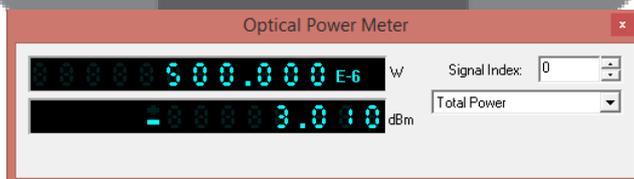
4.1.3 Nilai Performansi Power Link Budget

Hasil dari nilai *Power Link Budget* dapat diukur dengan menggunakan salah satu pengukuran yang ada di *software optisystem* yaitu *Optical Power Meter*. Perancangan berdasarkan nilai PLB dikatakan layak apabila nilai dari *power receiver* lebih besar dari sensitivitas. Berikut merupakan pengukuran daya dari daya kirim (*transmitted power*) hingga daya terima (*receiver power*).



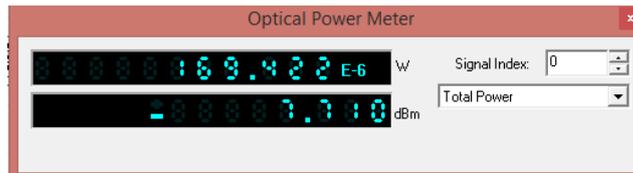
Gambar 8. Daya Input CW Laser

Berdasarkan Gambar 8 dapat dilihat bahwa daya keluaran CW laser sebesar 0 dBm. Daya ini merupakan *transmitted power* yang kemudian akan dikopelkan ke serat optik. Setelah itu daya tersebut akan mengalami pelemahan dari komponen MZM sehingga di dapatkan nilai seperti gambar di bawah ini



Gambar 9. Daya keluaran komponen MZM

Dari Gambar 9 dapat dilihat bahwa nilai daya menjadi -3.010 dBm. Daya ini merupakan keluaran dari komponen MZM dan telah mengalami pelemahan.

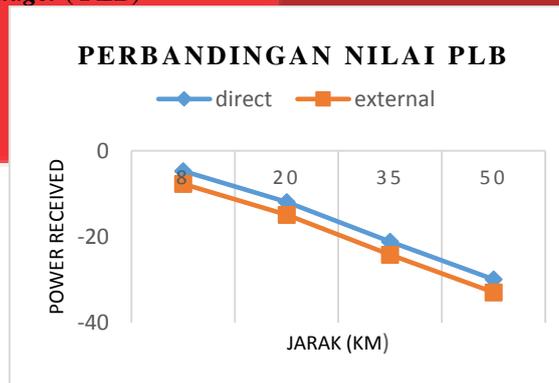


Gambar 10. Daya keluaran Optical Powe Meter

Setelah melewati komponen MZM, kemudian mengalami pelemahan daya lagi akibat dari pengaruh *attenuator* dan *connector*, sehingga di dapatkan nilai daya sebesar -7.710 dBm.

4.2 Hasil Perbandingan Simulasi untuk *External* dan *Direct Modulation*

4.2.1 Analisis *Power Link Budget* (PLB)



Gambar 11. Grafik Perbandingan Power Received

Gambar 11 merupakan grafik perbandingan nilai *power received* untuk model *external* dan *direct modulation*. Berdasarkan grafik tersebut di dapatkan bahwa nilai *power received* untuk model *external* lebih rendah di bandingkan model *direct modulation*. Hal tersebut dikarenakan pada model *direct modulation* tidak melewati perangkat MZM sehingga tidak mengalami pelemahan yang diakibatkan komponen MZM. Pada model *direct modulation* sistem layak hingga jarak 50 km, sedangkan pada model *external modulation* nilai *power received* hanya memenuhi hingga jarak 35 km dengan nilai Prx sebesar -27.15, sedangkan pada jarak 50 km sudah tidak memenuhi karena nilai yang di dapat yaitu -35.9 dBm, dimana nilai tersebut lebih kecil dari nilai sensitivitas APD sebesar -31 dBm, sehingga tidak memenuhi.

4.2.2. Analisis *Q-Factor*



Gambar 12. Grafik Perbandingan *Q-Factor* terhadap Jarak

Berdasarkan Gambar 12 dapat dilihat bahwa nilai *Q-factor* untuk model *direct modulation* memenuhi hingga jarak 20 km dengan nilai 6.64854, sedangkan pada jarak 35 km dan 50 km sudah tidak memenuhi standar dengan nilai masing-masing jarak sebesar 5.50975 dan 3.66039. Dan pada model *External modulation* nilai *Q-factor* memenuhi hingga jarak 35 km dengan nilai *Q-factor* sebesar 6.6898, sedangkan pada jarak 50 km sudah tidak memenuhi standar yaitu nilai *Q-factor* sebesar 5.6343. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa model *external modulation* dengan adanya penambahan komponen MZM dan perbedaan jenis laser yang digunakan dapat meningkatkan performansi nilai *Q-factor*. Hal tersebut dikarenakan pada komponen MZM terdapat proses pengendalian daya, fase atau polarisasi sinar laser dengan sinyal kontrol listrik, serta mengontrol amplitudo gelombang optik yang masuk sehingga *effect chirping* dan ketidaklinearan serat optik yang terjadi pada *direct modulation* dapat teratasi. Akibat hal tersebut, memberikan pengaruh terhadap peningkatan nilai SNR.

Peningkatan nilai SNR tersebut juga dapat mempengaruhi nilai Q -Factor, sehingga apabila nilai SNR meningkat maka nilai Q -factor juga meningkat. Oleh karena itu dapat dilihat pada gambar 12 bahwa model *external modulation* memberikan performansi nilai Q -factor yang lebih baik di banding *direct modulation*.

4.2.3 Analisa Bit Error Rate (BER)



Gambar 13. Grafik Perbandingan BER Terhadap Jarak

Berdasarkan hasil simulasi dan digambarkan pada gambar 13 model *external modulation* memiliki nilai BER yang lebih kecil jika dibandingkan *direct modulation*. Nilai BER berbanding terbalik dengan nilai Q -factor. Jika nilai Q -factor besar maka sebaliknya nilai BER semakin kecil. Nilai BER pada *external modulation* memenuhi hingga jarak 50 km, sedangkan pada model *direct modulation* nilai BER hanya memenuhi hingga jarak 20 km.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis performansi sistem *Radio Over Fiber (RoF)* untuk model *external modulation* dan *direct modulation* dengan mengimplementasikan OFDMA dan menggunakan beberapa variasi jarak dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada jarak link optik 8 Km memberikan hasil performansi BER paling baik, Pada model *external modulation* di dapat nilai BER 6.14109×10^{-12} sedangkan pada *direct modulation* di dapatkan nilai BER terbaik sebesar 7.19313×10^{-12} .
2. Pada model *external modulation*, sistem memenuhi hingga jarak 35 km dengan nilai BER 1.09977×10^{-11} dan nilai Q -factor sebesar 6.6898.
3. Pada model *direct modulation*, nilai BER memenuhi hingga jarak 20 km dengan nilai BER 1.46063×10^{-11} dan dengan nilai Q -Factor 6.64854.
4. Berdasarkan hasil simulasi nilai *power link Budget* model *direct* dan *external modulation* memiliki selisih sebesar -3 dBm, hal tersebut disebabkan karena pada model *direct modulation* tidak mengalami pelemahan akibat komponen MZM sehingga *power received* yang dihasilkan lebih besar.

Daftar Pustaka

- [1] Aditya, Anata, Imam Santoso dan Ajud Ajulian. (2010). Simulasi Perbandingan Kinerja Modulasi M-PSK dan M-QAM Terhadap Laju Kesalahan Data Pada Sistem Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). Semarang: Universitas Diponegoro.
- [2] Christine, Michelle, Akhmad Hambali, K. Sujatmoko. (2019). Analisis Performansi Sistem Jaringan Radio over Fiber untuk Pengaplikasian Telekomunikasi dalam Ruang. Bandung: Universitas Telkom.
- [3] ITU-T. "Series G: Transmission Systems and Media, Digital System and Network". 2017.
- [4] Keiser, G. (1991). Optical Fiber Communication (Second Edition). New York: McGraw Hill.
- [5] Kurniawan, R, Erna Sri S dan Sholekan. (2010). Simulasi Modulasi BPSK-OFDM Berdasarkan Standar IEEE 802.11g. Bandung: Universitas Telkom.
- [6] Massimo T, Georgios E dan Gee-kung. (2017). Fiber Wireless Convergen in Next Generation Communication Network. Switzerland, Springer.
- [7] Pooja, Saroj, Manisha. (2015). Advantages and Limitation of Radio over Fiber System. International Journal of Computer Science and Mobile Computing.
- [8] Shieh William dan Djordjevic Ivan. (2010). OFDM for Optical Communication. Academic Press.
- [9] Uke Kurniawan Usman, dkk. (2012). *Fundamental Teknologi Seluler LTE*. Bandung: Rekayasa Sains.
- [10] Yusuf, R. (n.d.). Lapisan Fisik Pada Teknologi Long Term Evolution (LTE) di PT. Telkom R&D Center Bandung. Semarang: Universitas Diponegoro.