

ANALISIS INTEGRASI SISTEM RADIO OVER FIBER (ROF) DENGAN NEXT GENERATION PASSIVE OPTICAL NETWORK STAGE 2

ANALYSIS INTEGRATION OF RADIO OVER FIBER SYSTEM AND NEXT GENERATION PASSIVE OPTICAL NETWORK STAGE 2

Naufal Karyadi¹, Akhmad Hambali², Kris Sujatmoko³

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

¹naufalkaryadi@student.telkomuniversity.ac.id, ²ahambali@telkomuniversity.ac.id,

³krissujatmoko@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Pengguna layanan seluler dalam beberapa tahun belakangan ini semakin meningkat sehingga kebutuhan akan *bandwidth* semakin tinggi. Oleh karena itu, dibutuhkan sarana telekomunikasi yang bisa menanggulangi permasalahan tersebut, salah satunya yaitu dengan menggunakan sistem *Radio Over Fiber* (RoF). Kemudian dengan mengimplementasikan RoF ke *Passive Optical Network* (PON) bisa menawarkan *user* yang lebih banyak dan *bandwidth* yang dihasilkan bisa lebih besar. Pada penelitian ini dilakukan simulasi integrasi RoF dengan NG-PON2 dengan menggunakan *bitrate* sebesar 40 Gbps sisi *downstream* dan menggunakan frekuensi radio sebesar 60 GHz. Kemudian simulasi ini dilakukan dengan 3 skenario yang dibedakan berdasarkan jumlah ONU. Dari simulasi yang dilakukan, didapatkan hasil performansi terbaik pada Skenario I dengan sistem yang menggunakan OA pada jarak 30 km. Untuk hasil performansi terbaik pada Skenario II dengan sistem yang menggunakan OA pada jarak 20 km dengan nilai. Untuk hasil performansi terbaik pada Skenario III dengan sistem yang menggunakan OA pada jarak 10 km dengan hasil performansi seperti LPB ≥ -28 dBm, Q-Factor ≥ 6 , dan BER $\leq 10^{-9}$.

Kata kunci : RoF, NG-PON2, ONU, Q-Factor, BER, Link Power Budget.

Abstract

Users of cellular services in recent years are increasing so that the need for bandwidth is getting higher. Therefore, telecommunication facilities are needed that can overcome these problems, one of which is by using the *Radio Over Fiber* (RoF) system. Then by implementing RoF to *Passive Optical Network* (PON), it is expected to be able to offer more users and greater bandwidth. In this study a simulation of RoF integration with NG-PON2 was carried out by using a 40 Gbps bitrate downstream and using radio frequency of 60 GHz. Then this simulation is carried out in 3 scenarios that are differentiated based on the number of ONUs. From the simulation, the best performance results obtained in Scenario I with system that uses OA at distance of 30 km. For the best performance results in Scenario II with system that uses OA at distance of 20 km with a value. For the best performance results in Scenario III with system that uses OA at distance of 10 km with performance results such as LPB ≥ -28 dBm, Q-Factor ≥ 6 , and BER $\leq 10^{-9}$.

Keywords: RoF, NG-PON2, ONU, Q-Factor, BER, Link Power Budget.

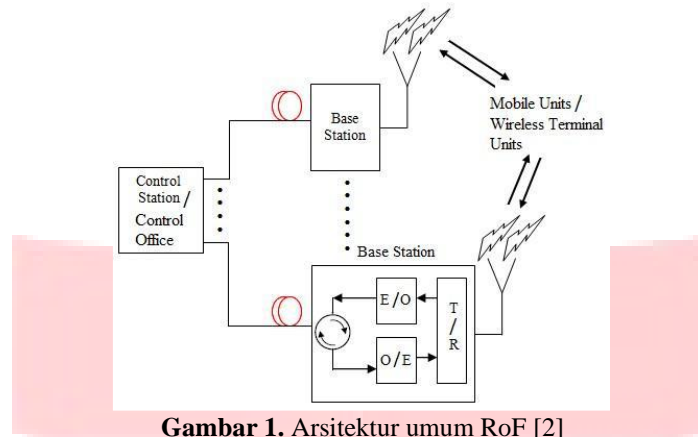
1. Pendahuluan

Beberapa tahun belakangan ini, jumlah pengguna komunikasi nirkabel semakin meningkat serta membutuhkan kecepatan data yang semakin tinggi. Transmisi sinyal radio untuk jarak jauh yang menggunakan udara sebagai media transmisi nya memiliki beberapa kekurangan seperti atenuasi sinyal yang tinggi dan biaya pembangunan infrastruktur yang cukup tinggi. salah satu solusinya yaitu dengan membuat infrastruktur yang mengintegrasikan jaringan nirkabel dengan jaringan kabel yaitu *Radio over Fiber* (RoF) [1]. RoF merupakan teknik pengiriman sinyal radio dengan menggunakan kabel fiber optik sebagai media transmisinya. Dalam pengembangan jaringan tersebut, dibutuhkan teknologi untuk meningkatkan pengembangan sistem, salah satunya yaitu dengan menggunakan *Passive Optical Network* (PON). PON memiliki kelebihan untuk jaringan akses seperti kapasitas user yang banyak dan tingkat keamanan yang tinggi. Oleh karena itu, RoF-PON merupakan salah satu sistem yang bisa menjadi solusi untuk pengiriman sinyal radio secara efisien. Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan diatas, pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis integrasi *Radio over Fiber* (RoF) dengan *Next Generation Passive Optical Network stage 2* (NG-PON2). Kemudian akan dilakukan analisis performansi jaringan dengan melihat parameter-parameter seperti *Link Power Budget*, *Rise Time Budget*, *Q-Factor*, dan BER.

2. Landasan Teori

A. Radio over Fiber

Radio over Fiber (RoF) merupakan teknik transmisi sinyal radio dengan menggunakan jaringan serat optik. Pada RoF, sinar laser dimodulasi oleh sinyal radio dan dikirimkan melalui media serat optik. Teknologi RoF menggunakan kabel optik sebagai media transmisi untuk mengirimkan sinyal radio dari *Central Station* (CS) ke *Base Station* (BS) dan sebaliknya [1].



Gambar 1. Arsitektur umum RoF [2]

B. Passive Optical Network

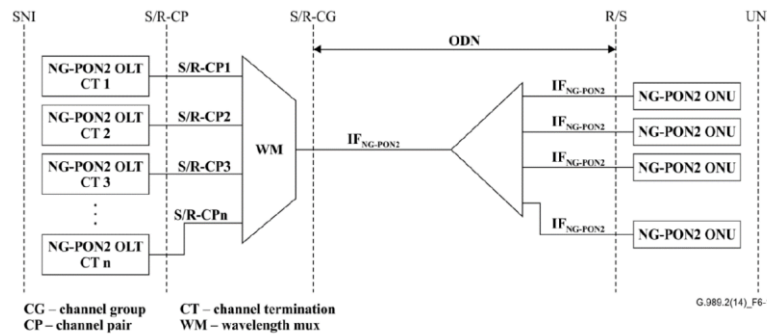
PON merupakan teknologi *point to multipoint* dalam jaringan fiber optik yang menggunakan perangkat pasif untuk mengirimkan data dari pengirim menuju ke penerima. Perangkat pasif yang terdapat dalam PON yaitu splitter, connector, dan kabel fiber optik. PON terdiri dari tiga segmen utama, yaitu *Optical Line Terminal* (OLT), *Optical Distribution Point* (ODP), dan *Optical Network Unit* (ONU) atau *Optical Network Termination* (ONT). Perbandingan teknologi dari setiap generasi PON dapat dilihat pada Tabel 1

Tabel 1 Perbandingan Teknologi PON [3]

Teknologi	A-PON	G-PON	XG-PON	NG-PON2
Standar	ITU-T G.983	ITU-T G.984	ITU-T G.987	ITU-T G.989
Bitrate maksimum downstream	622 Mbps	2.4 Gbps	10 Gbps	40 Gbps
Bitrate maksimum upstream	155 Mbps	1.2 Gbps	2.5 Gbps	10 Gbps
Panjang gelombang downstream	1490 nm dan 1550 nm	1550 nm	1577 nm	Individual Wavelength
Panjang gelombang upstream	1310 nm	1310 nm	1270 nm	Individual Wavelength
Jangkauan jarak maksimum	20 km	20 km	20 km	60 km
Splitter ratio maksimum	Hingga 32	Hingga 64	Hingga 64	Hingga 256

C. Next Generation Passive Optical Network stage 2 (NG-PON2)

Pada perkembangan teknologi *Passive Optical Network* (PON), ITU-T sudah menetapkan generasi kedua dari *Next Generation PON*, yaitu *Next Generation Passive Optical Network stage 2* (NG-PON2). NG-PON2 adalah sistem PON dengan kapasitas 40 Gbps sisi *downstream* dan 10 Gbps sisi *upstream* yang menggunakan domain waktu dan domain frekuensi dalam satu sistem. Arsitektur sistem NG-PON2 dengan banyak kanal panjang gelombang mengacu pada Gambar 2 Arsitektur ini memungkinkan untuk menggunakan konektivitas *point to multipoint* dengan menggunakan TWDM.



Gambar 2. Arsitektur NG-PON2 [4]

D. Penguat Optik

Penguat Optik merupakan perangkat yang berfungsi untuk menguatkan cahaya di dalam kabel fiber optik. Untuk komunikasi serat optik jarak jauh, penguat optik dibutuhkan karena cahaya dalam fiber optik akan mengalami pelemahan yang disebabkan oleh atenuasi yang ada dalam kabel fiber optik. Jenis penguat optik ada beberapa macam, diantaranya *Semiconductor Optical Amplifier* (SOA), *Raman Optical Amplifier* (ROA), dan *Erbium-doped Fiber Amplifier* (EDFA).

E. Parameter Pengujian

Dalam penelitian ini akan digunakan beberapa parameter pengujian seperti *Link Power Budget*, *Signal to Noise Ratio*, *Q-Factor*, dan *Bit Error Rate*.

a. Link Power Budget

Link Power Budget merupakan perhitungan daya pada jaringan serat optik yang bertujuan untuk mengetahui batasan redaman total yang sesuai dengan daya pancar dan sensitifitas penerima [5]. Dalam sistem komunikasi optik, daya terima pada *receiver* harus bernilai ≥ -28 dBm.

b. Signal to Noise Ratio

Signal to Noise Ratio (SNR) merupakan perbandingan daya sinyal transmisi terhadap noise yang ada pada jaringan [5].

c. Q-Factor

Quality Factor atau *Q-Factor* merupakan faktor kualitas yang akan menentukan baik atau tidaknya suatu jaringan serat optik [5]. Dalam komunikasi serat optik, nilai *Q-Factor* yang baik yaitu ≥ 6 .

d. Bit Error Rate

Bit Error Rate merupakan perbandingan laju kesalahan bit dengan bit yang ditransmisikan keseluruhan [5]. Sebagai contoh, pada jaringan serat optik menghasilkan BER sebesar 10^{-12} , berarti dalam 10^{12} bit yang dikirim terdapat 1 bit yang *error*. Dalam komunikasi serat optik, nilai BER yang baik yaitu $\geq 10^{-9}$.

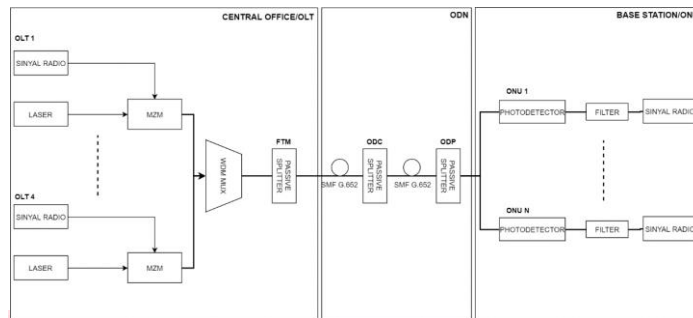
3. Perancangan Sistem

A. Alur Perancangan Sistem

Penelitian ini dimulai dari pemodelan sistem integrasi *Radio over Fiber* (ROF) dengan *Next Generation Passive Optical Network stage 2* (NG-PON2). Kemudian, dilanjutkan dengan penentuan parameter-parameter yang akan digunakan untuk simulasi. Parameter-parameter yang digunakan pada simulasi ini disesuaikan dengan standar ITU-T dan spesifikasi perangkat yang sudah ada di pasaran. Pada sistem ini terdiri dari 3 blok utama, yaitu blok pengirim, blok transmisi, dan blok penerima. Penelitian ini akan dilakukan dengan 3 skenario simulasi yang akan dibedakan dari jumlah *user* nya. Skenario pertama yaitu dengan jumlah *Optical Network Unit* (ONU) sebanyak 64, skenario kedua dengan jumlah ONU sebanyak 128, dan skenario ketiga yaitu dengan jumlah ONU sebanyak 256, dengan *link* optik sepanjang 10 km – 40 km. Kemudian konfigurasi sistem akan dirancang pada *software Optisystem 7*. Parameter performansi akan diujikan ke setiap skenario untuk mengetahui hasil performansi dari setiap skenario tersebut. Performansi jaringan yang dianalisis menggunakan nilai *Link Power Budget*, *Q Factor*, dan *Bit Error Rate* (BER). Setelah simulasi dan perhitungan parameter performansi dilakukan, selanjutnya yaitu melakukan uji kelayakan pada sistem yang sudah disimulasikan, apabila sistem belum memenuhi standar ITU-T seperti nilai daya terima pada sisi penerima ≥ -28 dBm, *Q-Factor* ≥ 6 , dan *BER* $\leq 10^{-9}$, maka akan dilakukan penambahan *Optical Amplifier*, jika sistem sudah memenuhi standar ITU-T, akan dilakukan analisa terhadap hasil performansi sistem tersebut. Selanjutnya, hasil perhitungan dan simulasi pada software akan dibandingkan untuk mengetahui performansi dari jaringan tersebut.

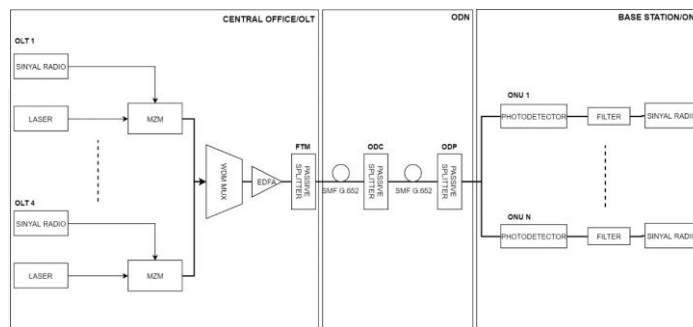
B. Pemodelan Sistem

Model sistem yang digunakan pada penelitian ini terdapat 2, yaitu sistem yang tanpa menggunakan *Optical Amplifier* (OA) dan sistem yang menggunakan OA.



Gambar 3. Diagram Sistem tanpa OA

Model perancangan integrasi RoF dengan NG-PON2 tanpa OA mengacu pada Gambar 3. Pada sistem ini terbagi menjadi tiga blok utama, yaitu blok pengirim atau *Optical Line Terminal* (OLT), blok transmisi atau *Optical Distribution Network* (ODN), dan blok penerima atau *Optical Network Unit* (ONU). Perancangan sistem ini menggunakan 4 kanal OLT pada sisi pengirim dengan bitrate 40 Gbps dan menggunakan frekuensi radio sebesar 60 GHz. Pada sisi ODN terdiri dari serat optik G.652 dan *passive splitter* dengan rasio yang disesuaikan berdasarkan skenario simulasi yang akan dilakukan. Kemudian pada sisi penerima terdapat ONU yang jumlahnya akan disesuaikan dengan skenario simulasi yang akan dilakukan.



Gambar 4. Diagram Sistem dengan OA

Gambar 4 merupakan model sistem yang menggunakan OA. Dengan menggunakan OA pada sistem, akan memperbaiki kualitas dari performansi jaringan. Penempatan OA berada pada booster amplifier yang bertujuan untuk menguatkan data yang akan dikirim ke user.

C. Penentuan Parameter

Setelah melakukan pemodelan sistem jaringan, selanjutnya akan dilakukan penentuan spesifikasi dan parameter untuk sistem tersebut. Parameter yang digunakan pada simulasi ini akan mengikuti rekomendasi ITU-T dan beberapa spesifikasi perangkat yang sudah ada di pasaran.

Tabel 2 Parameter Transmitter [6]

No.	Parameter	Nilai	Satuan
1	<i>Number of Output Ports</i>	4	<i>Quantity</i>
2	<i>Bitrate per channel</i>	10	Gbps
3	<i>Line Code</i>	NRZ	Type
4	<i>Laser Transmitter Power</i>	5	dBm
5	<i>RF Signal Frequency</i>	60	GHz

Parameter pada blok pengirim mengacu pada Tabel 2. Terdiri dari *bitrate* sebesar 40 Gbps arah *downstream*. Untuk frekuensi sinyal radio yang digunakan sebesar 60 GHz. Optical Source yang digunakan yaitu LASER dengan ketentuan daya yang dipancarkan yaitu 5-9 dBm [8]. Pada simulasi ini daya laser yang digunakan yaitu sebesar 5 dBm.

Tabel 3. Frekuensi dan Panjang Gelombang [6]

Kanal	Downstream	
	Frekuensi (THz)	Wavelength (nm)
1	187.8	1596.34
2	187.7	1597.19
3	187.6	1598.04
4	187.5	1598.89

Panjang gelombang yang digunakan mengacu pada Tabel 3.2. Pada simulasi ini menggunakan 4 panjang gelombang yang dimulai dari 1596,34 nm dengan spasi kanal sebesar 100 GHz atau setara dengan 0,85 nm.

Tabel 4. Parameter blok Transmisi [7]

No.	Parameter	Nilai	Satuan
1	Reference Wavelength	1550	nm
2	Fiber Length	10 ; 20 ; 30 ; 40	km
3	Sambungan	0.05	db/unit
4	Connector SC UPC	0.15	db/unit
5	Connector SC APC	0.3	db/unit
6	Fiber Attenuation	0.3	db/km
7	Dispersion	17	ps/nm.km
8	Optical Amplifier Gain	9	dB
9	Loss Passive Splitter 1:2, 1:4, 1:8, 1:16	3.8 ; 7.1 ; 10.5 ; 13.5	dB

Untuk parameter pada blok transmisi atau ODN mengacu pada Tabel 4, terdiri dari serat optik dengan jenis single mode, passive splitter, connector, sambungan kabel fiber optik, dan penguat optik.

Tabel 5. Parameter Blok Penerima

No.	Parameter	Nilai	Satuan
1	Sensitivity	-28	dBm
2	Photodetector	APD	Type
3	Optical Filter Type	Bessel	Type
4	Avalanche Gain	3	-
5	Ionization Ratio	0.45	-
6	Responsivity	0.85	A/W
7	Resistance	50	Ohm
8	Dark Current	10	nA
9	Bandwidth	2.5	GHz
10	Temperature	298	Kelvin

Untuk blok receiver mengacu pada Tabel 5 yang terdiri dari photodetector dengan jenis APD, Low Pass Bessel Filter yang berfungsi untuk mendapatkan sinyal elektrik dari APD yang dimana sinyal tersebut adalah sinyal informasi, 3R (Reamplification, Reshaping dan Retiming) yang berfungsi untuk Untuk meregenerasi sinyal informasi. Kemudian untuk menampilkan hasil dari performansi sistem dibutuhkan perangkat BER Analyzer untuk mengetahui nilai Q Factor dan BER, Optical Power Meter untuk mengetahui daya terima pada receiver.

4. Analisis

Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi dengan 3 skenario yang dibedakan berdasarkan jumlah ONU nya, skenario I menggunakan ONU sebanyak 64, skenario II menggunakan ONU sebanyak 128, dan skenario III menggunakan ONU sebanyak 256. Simulasi dilakukan pada software Optisystem dengan menggunakan parameter yang sudah ditentukan

A. Analisis Skenario I

Pada skenario I dilakukan simulasi integrasi radio over fiber dengan NG-PON2.. Skenario ini menggunakan jarak yang bervariasi mulai dari 10 km sampai 40 km dengan spasi 10 km. Bitrate yang digunakan

yaitu 40 Gbps arah *downstream*. Hasil dari simulasi skenario I pada sistem yang tanpa menggunakan OA dan sistem yang menggunakan dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Simulasi Skenario I

Jarak (km)	LPB		SNR		Q-Factor		BER	
	Tanpa OA	Dengan OA	Tanpa OA	Dengan OA	Tanpa OA	Dengan OA	Tanpa OA	Dengan OA
10	-22.9472 dBm	-13.9333 dBm	14.9185 dB	30.1472 dB	6.6886	15.4049	8.2014×10^{-10}	5.114×10^{-46}
20	-26.2522 dBm	-17.2092 dBm	9.5914 dB	23.6696 dB	3.9396	11.212	6.9895×10^{-5}	6.824×10^{-26}
30	-29.4583 dBm	-20.441 dBm	3.0819 dB	18.404 dB	1.8807	8.0609	2.5454×10^{-1}	9.3452×10^{-16}
40	-32.7083 dBm	-23.691 dBm	0.2077 dB	12.7573 dB	0	5.3439	1	3.9158×10^{-7}

Dari hasil simulasi, skenario I tanpa menggunakan OA dapat menempuh jarak 10 km dan dengan menggunakan OA dapat menempuh jarak 30 km dengan hasil performansi LPB ≥ -28 dBm, Q-Factor ≥ 6 , dan BER $\leq 10^{-9}$.

B. Analisis Skenario II

Pada skenario II dilakukan simulasi integrasi *radio over fiber* dengan NG-PON2. Skenario ini menggunakan jarak yang bervariasi mulai dari 10 km sampai 40 km dengan spasi 10 km. *Bitrate* yang digunakan yaitu 40 Gbps arah *downstream*. Hasil dari simulasi skenario II pada sistem yang tanpa menggunakan OA dan sistem yang menggunakan dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Simulasi Skenario II

Jarak (km)	LPB		SNR		Q-Factor		BER	
	Tanpa OA	Dengan OA	Tanpa OA	Dengan OA	Tanpa OA	Dengan OA	Tanpa OA	Dengan OA
10	-26.066 dBm	-17.014 dBm	11.1032 dB	25.5538 dB	4.1585	11.8621	3.7764×10^{-5}	1.3377×10^{-28}
20	-29.3156 dBm	-20.2639 dBm	4.49711 dB	22.0761 dB	1.8509	8.458	2.5507×10^{-1}	5.4516×10^{-17}
30	-32.5656 dBm	-23.514 dBm	1.2842 dB	15.6509 dB	0	5.7689	1	1.2902×10^{-8}
40	-35.8156 dBm	-26.764 dBm	0 dB	9.464 dB	0	3.3237	1	5.1471×10^{-4}

Dari hasil simulasi, skenario II tanpa menggunakan OA tidak dapat menempuh jarak yang ada dan dengan menggunakan OA dapat menempuh jarak 20 km dengan hasil performansi LPB ≥ -28 dBm, Q-Factor ≥ 6 , dan BER $\leq 10^{-9}$.

C. Analisis Skenario III

Pada skenario III dilakukan simulasi integrasi *radio over fiber* dengan NG-PON2. Skenario ini menggunakan jarak yang bervariasi mulai dari 10 km sampai 40 km dengan spasi 10 km. *Bitrate* yang digunakan yaitu 40 Gbps arah *downstream*. Hasil dari simulasi skenario III pada sistem yang tanpa menggunakan OA dan sistem yang menggunakan dapat dilihat pada Tabel 8.

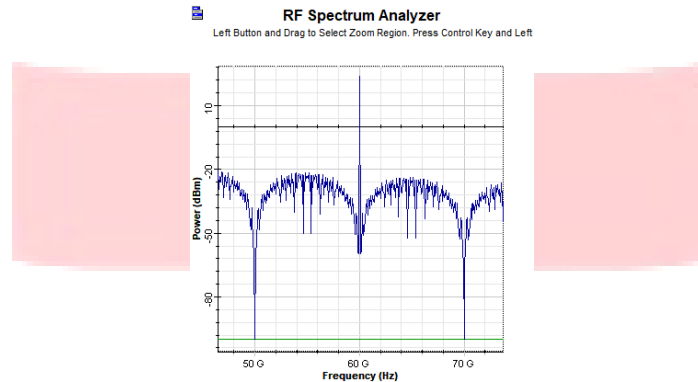
Tabel 8. Hasil Simulasi Skenario III

Jarak (km)	LPB		SNR		Q-Factor		BER	
	Tanpa OA	Dengan OA	Tanpa OA	Dengan OA	Tanpa OA	Dengan OA	Tanpa OA	Dengan OA
10	-29.1839 dBm	-20.1843 dBm	7.8833 dB	20.5646 dB	1.9545	9.3172	2.5342×10^{-1}	2.5528×10^{-20}
20	-32.4339 dBm	-23.4343 dBm	1.3821 dB	15.5691 dB	0	5.9768	1	2.1294×10^{-9}
30	-35.6839 dBm	-26.6842 dBm	0 dB	9.5263 dB	0	3.7723	1	1.0065×10^{-4}
40	-38.9236 dBm	-29.9342 dBm	0 dB	3.6741 dB	0	1.108	1	1.5185×10^{-2}

Dari hasil simulasi, skenario III tanpa menggunakan OA tidak dapat menempuh jarak yang ada dan dengan menggunakan OA dapat menempuh jarak 10 km dengan hasil performansi LPB ≥ -28 dBm, Q -Factor ≥ 6 , dan BER $\leq 10^{-9}$.

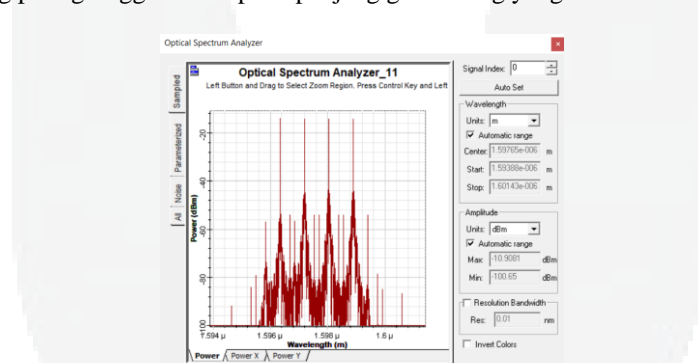
D. Analisis Radio Frequency Spectrum

Sinyal informasi yang akan dikirimkan dimodulasi terlebih dahulu dengan frekuensi tinggi yang bernilai 60 GHz, kemudian sinyal akan dikirimkan dengan menggunakan bantuan kabel fiber optik. Dapat dilihat pada Gambar 5 bahwa pada frekuensi 60 GHz memiliki amplitudo yang paling tinggi dibandingkan dengan nilai frekuensi yang lain, hal ini berarti sinyal informasi sudah ditumpangkan pada sinyal radio dengan frekuensi 60 GHz.



Gambar 5. Spektrum Radio Frequency yang akan dikirimkan

Gambar 6 menunjukkan bahwa sinyal radio telah berhasil dikirimkan melalui kabel fiber optik dengan melihat amplitudo yang paling tinggi berada pada panjang gelombang yang sudah ditetapkan.



Gambar 6. Spektrum Sinyal Optik pada sisi receiver

5. Kesimpulan

Dari penelitian yang sudah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa *Radio over Fiber* telah berhasil diintegrasikan dengan NG-PON2 dengan bitrate 40 Gbps, menggunakan 4 kanal panjang gelombang, frekuensi radio sebesar 60 GHz, dan menggunakan penguat optik jenis EDFA dengan posisi booster amplifier. Pada Skenario I didapatkan hasil performansi terbaik dengan sistem yang menggunakan OA pada jarak 30 km dengan nilai LPB sebesar -20.441 dBm, SNR sebesar 11.1032 dB, Q -Factor sebesar 8.0609, dan BER sebesar 9.3452×10^{-16} . Pada Skenario II didapatkan hasil performansi terbaik dengan sistem yang menggunakan OA pada jarak 20 km dengan nilai LPB sebesar -20.2639 dBm, SNR sebesar 22.0761 dB, Q -Factor sebesar 8.458, dan BER sebesar 5.4516×10^{-17} . Pada Skenario III didapatkan hasil performansi terbaik dengan sistem yang menggunakan OA pada jarak 10 km dengan nilai LPB sebesar -20.1843 dBm, SNR sebesar 20.5646 dB, Q -Factor sebesar 9.3172, dan BER sebesar 2.5528×10^{-20} .

Daftar Pustaka:

- [1] Rajbir Singh, Manoj Ahlawat, Deepak Sharma, "A Review on Radio over Fiber communication System", International Journal of Enhanced Research in Management & Computer Applications, Vol. 6 Issue 4, April-2017.
- [2] Neelam Kumari, Parvin Kumar Kaushik, "REVIEW ON RADIO OVER FIBER TECHNOLOGY", IJARSE, Vol. No.3, Issue No.2, February 2014.
- [3] Huda Saleh Abbas, Mark A Gregory. "The Next Generation of Passive Optical Networks: A Review". Journal of Network and Computer Applications. March 2016
- [4] International Telecommunication Union, "40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements", Recommendation ITU-T G.989.1, 03/2013.
- [5] Gerd Keiser, Optical Fiber Communication 4th Edition, Boston: McGraw-Hill, 2015.
- [6] International Telecommunication Union, "40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification", Recommendation ITU-T G.989.2, 12/2014.
- [7] International Telecommunication Union, "Characteristics of a single-mode optical fibre and cable", Recommendation ITU-T G.652, 03/2003.