

MODULATOR FULL DUPLEX PADA SISTEM RADIO OVER FIBER DENGAN METODE OFDM

FULL DUPLEX MODULATOR ON RADIO OVER FIBER SYSTEM WITH OFDM METHOD

Muhammad Fajar Nugraha¹, Ir. Akhmad Hambali, M.T.², Brian Pamukti, S.T, M.T³

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

¹fajarnugrahaaaa@gmail.com, ²bphambali@yahoo.com, ³brianp@telkomuniversity.ac.id

ABSTRAK

Radio over fiber (ROF) merupakan suatu proses pengiriman sinyal radio melalui kabel serat optik. Dengan menggunakan kabel serat optik, maka kualitas sinyal suara yang ditransmisikan tetap bagus atau dapat dikatakan gangguan yang timbul selama proses transmisi kecil, sehingga sinyal yang dibawanya tetap bagus. *Orthogonal Frequency Division (OFDM)* merupakan teknik modulasi multi-carrier di jaringan nirkabel, OFDM memiliki skema single-carrier untuk mengatasi kondisi saluran tanpa filter dengan pemerataan yang kompleks.

Pada tugas akhir ini dilakukan pengumpulan data, setelah melakukan pengumpulan data maka tentukan spesifikasi perangkat berupa modulator optik dan tetapkan parameter yang akan digunakan. Langkah selanjutnya lakukan Simulasi dengan beberapa skenario menyesuaikan berapa banyak perangkat modulator yang telah ditentukan, setelah dilakukan lakukan analisis pada simulasi yang telah dilakukan maka setiap skenario akan menghasilkan nilai parameter yang berbeda karena spesifikasi setiap perangkat berbeda, jika simulasi dan keluaran parameter tidak sesuai dengan parameter yang di tetapkan maka dilakukan pergantian perangkat hingga parameter dapat terpeuhi.

Perhitungan dan Simulasi yang telah dilakukan pada Sistem ROF dengan metode OFDM berbasis full duplex pada Modulator Optik mampu bekerja pada RF band 5 Ghz dan bit rate 1 Ghz pada modulator MZM, EAM, AM, dan PM. Dengan nilai *Q Factor* yang hanya memenuhi standar ITU-T yaitu MZM dengan nilai 8.97 pada perencanaan dan 6.891 pada simulasi serta nilai *BER* 2.38×10^{-12} dan 2.74×10^{-12} pada simulasi.

Kata kunci: OFDM, ROF, Q-Factor, Bandwidth, LPB, RTB

ABSTRACT

Radio over fiber (ROF) is a process of sending radio signals through fiber optic cables. Using a fiber optic cable, the quality of the transmitted voice signal remains good or can be said disturbance arising during the transmission process is small, so the signal is still good. *Orthogonal Frequency Division (OFDM)* is a multi-carrier modulation technique in wireless networks, OFDM has a single-carrier scheme to address unfiltered channel conditions with complex equalization.

In this final project conducted data collection, after collecting the data then specify the device specifications in the form of optical modulator and set parameters to be used. The next step is to do the simulation with some scenarios to adjust how many modulator devices have been determined, after done analysis on the simulation that has been done then each scenario will produce different parameter values because the specifications of each device is different, if the simulation and output parameters are not in accordance with the parameters in the set then made the turn of the device until the parameters can be fulfilled.

Calculations and Simulations have been performed on ROF system with full duplex-based OFDM method in Optical Modulator able to work on RF band 5 Ghz and 1 Ghz bit rate on modulator MZM, EAM, AM, and PM. With *Q Factor* value which only meets ITU-T standard that is MZM with value 8,97 in perencanaan and 6,891 at simulation and value *BER* 2.38×10^{-12} and 2.74×10^{-12} in simulation.

Keywords: Audio Watermarking, Fast Fourier Transform, Singular Decomposition Value

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang Masalah

Perkembangan teknologi pada jaringan komunikasi nirkabel dan data berkembang pesat, seiring dengan permintaan ketersediaan jaringan komunikasi dengan akses yang cepat dan jumlah user yang terus bertambah. Komunikasi optik adalah media komunikasi berupa sumber optik berupa laser dimana sinyal informasi ditumpangkan kepada sumber optik menuju *optical detector* atau bagian *receiver* pada optik. *Radio Over Fiber (ROF)* merupakan kombinasi dari *Frekuensi Radio (RF)* dan Komunikasi berbasis serat optik, ROF memiliki banyak kelebihan seperti menyediakan kecepatan data yang tinggi, mengurangi konsumsi daya, dan memberikan perlindungan terhadap gangguan elektromagnetik.

Orthogonal Frequency Division (OFDM) adalah metode modulasi digital dengan sinyal dibagi menjadi beberapa saluran *narrowband* pada frekuensi yang berbeda, OFDM telah di adopsi oleh teknologi seperti *Asymmetrical Digital Subscriber Line (ADSL)*, *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)* 802.11a/g, 802.16a *IEEE*, *Digital Audio Broadcast (DAB)* dan siaran televisi terestrial digital [1]. berbeda membuat ragam output yang dihasilkan dapat menghasilkan dengan nilai lebih baik atau sebaliknya.

Pada Tugas Akhir ini dilakukan perbandingan pada perangkat yang ada dalam sistem *ROF* seperti *Baseband Modulator*, *Modulator Optik* dan *Link Budget* serta memaksimalkan metode *OFDM* dengan perangkat yang telah ditentukan. Untuk merealisasikan hal tersebut maka ada beberapa faktor yang harus dicapai seperti memperhatikan karakteristik Sumber Optik, kapasitas *bandwidth*, *BER*, *Qadrature Amplitude Modulation (QAM)*. Dengan parameter nilai *psuedo-random* ≤ 10 Gbit/s, $BER \leq 1 \times 10^{-9}$ dan *Q-Faktor* ≥ 6 sesuai dengan standar dari *IEEE* [1].

2. Dasar Teori

2.1 Radio Over Fiber

Sistem *ROF* sekarang digunakan untuk meningkatkan cakupan seluler di dalam bangunan. Ini telah diperkenalkan sebagai pendekatan biaya yang efektif untuk mengurangi biaya sistem radio karena menyederhanakan situs antena jarak jauh dan meningkatkan pembagian peralatan radio mahal yang berada di stasiun pusat. Frekuensi sinyal radio yang didistribusikan oleh sistem *ROF* menjangkau rentang yang lebar dan bergantung pada sifat aplikasi. Komunikasi optik adalah bentuk komunikasi yang menggunakan cahaya sebagai medium transmisi. *ROF* [1] adalah sebuah link optik analog yang memancarkan sinyal RF termodulasi. Ini berfungsi untuk mengirimkan sinyal RF ke dan dari stasiun pusat ke stasiun pangkalan. Persyaratan utama arsitektur *ROF* link adalah operasi dupleks (yaitu, *downlink-uplink*) [1], memerlukan beberapa komponen gelombang milimeter hanya di *base station* dan juga hanya memerlukan beberapa komponen optik berkinerja tinggi. Frekuensi sinyal radio yang didistribusikan oleh sistem *ROF* menjangkau rentang yang lebar (biasanya di wilayah GHz) dan bergantung pada sifat aplikasi.

2.2 OFDM

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) adalah teknik transmisi multicarrier yang didasarkan pada pembagian frekuensi multiplexing (FDM). Dalam sinyal multi-frekuensi FDM konvensional ditransmisikan secara bersamaan secara paralel di mana data yang terkandung dalam setiap sinyal dimodulasi ke subcarrier dan oleh karena itu sinyal multiplexing subcarrier biasanya berisi berbagai frekuensi. Setiap subcarrier dipisahkan oleh guard band untuk menghindari sinyal tumpang tindih. Subcarrier kemudian didemodulasi pada penerima dengan menggunakan filter untuk memisahkan pita frekuensi. Sebaliknya OFDM. [10]

2.3 Modulator

Untuk modulasi intensitas cahaya pada jarak jauh, diperlukan sumber cahaya koheren yang berintensitas besar. Sumber cahaya laser memiliki karakteristik yang mampu menghasilkan modulasi intensitas. berdasarkan tempat terjadinya modulasi cahaya, ada dua macam modulator optik yaitu modulator dalam (*internal modulator*) atau modulator langsung (*direct modulator*) dan modulator luar (*external modulator*). Modulator dalam modulasi cahaya di dalam perangkat sedangkan modulator luar memodulasi cahaya di luar perangkat sumber cahaya.[10]

2.3.1 Modulator Mach-Zehnder

Modulator Mach Zehnder merupakan salah satu jenis modulator yang memanfaatkan interaksi sinyal masukan elektrik dengan media interaksi. Interaksi elektro-optik itu sendiri merupakan perubahan indeks bias media interaksi optik akibat pengaruh medan elektrik yang diberikan kepada media interaksi tersebut. Karena secara tidak langsung karakteristik berkas optik berubah sebagai akibat dari medan elektrik maka proses ini disebut efek elektro-optik. Bahan yang mempunyai sifat demikian disebut bahan elektro-optik. Gambar 2.1 berikut ini merupakan suatu Modulator Mach-Zehnder yang di dalamnya terjadi proses modulasi fasa dan modulasi amplitudo. [10]

2.3.2 Electroabsorption Modulator

Electro-absorption modulators (EAMs), yaitu, p-i-n struktur pandu gelombang yang sangat mirip dengan *semiconductor optical amplifier (SOA)*, namun bias balik telah dikembangkan dengan tujuan utama memodulasi sinyal optik CW yang disuntikkan secara elektrik dengan kecepatan data tinggi dan dengan rugi-rugi rendah. Saat ini, EAM berkualitas tinggi tersedia pada *bitrate* hingga 40 Gb / s. Di sisi lain, sebagai alat penyerap, EA yang dikendalikan secara optik perlu dipompa oleh sinar optik yang kuat untuk menunjukkan kontras modulasi yang kuat. [10]

2.3.3 Amplitude Modulator

Amplitude modulation (AM) adalah metode modulasi paling awal yang digunakan untuk mentransmisikan suara melalui radio. Ini adalah teknik modulasi yang digunakan dalam komunikasi elektronik, paling umum untuk mentransmisikan informasi melalui gelombang pembawa radio. AM bekerja dengan memvariasikan kekuatan pembawa sebanding dengan bentuk gelombang yang dikirim. [10] AM menggunakan skema yang sama seperti radio AM. Teknik sederhana ini sering membutuhkan perangkat keras berbiaya rendah. Dua tipe dasar teknik AM meliputi baseband dan RF carrier.

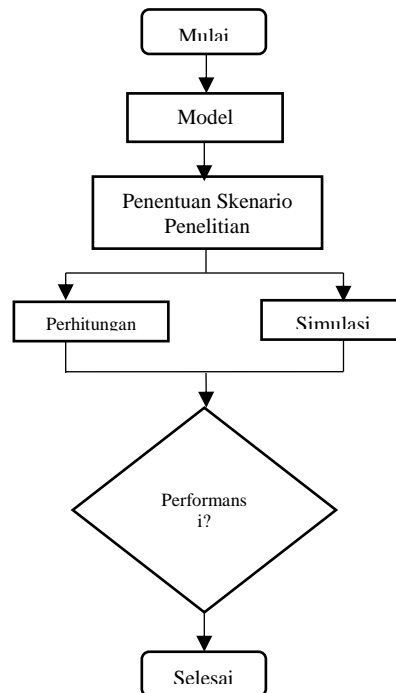
2.3.4 Phase Modulator

Jenis modulator elektro-optik yang paling sederhana adalah modulator fase yang hanya berisi Sel Pockels, di mana medan listrik mengubah penundaan fase sinar laser yang dikirim melalui kristal. Efek elektro-optik Pockels merupakan efek elektrooptik linier yang tergantung kepada struktur kristal dan simetris bahan kristal tersebut Pada efek elektro-optik Pockels, persamaan ini hanya dipengaruhi oleh koefisien elektro-optik Pockels [10].

3. Perancangan Sistem

Pada penelitian ini dilakukan simulasi dan analisis mengenai perbandingan kinerja modulator Mach Zehnder dan Phase Modulator berdasarkan parameter yang sudah ditentukan dan perangkat sesuai standar *IEEE*. Simulasi ini dilakukan pada simulator Optisystem dengan diagram blok seperti pada gambar 3.1. Diagram blok sistem memuat 3 bagian penting. Pertama pemodelan blok sistem OLT yang terdiri dari sumber optik berupa laser lalu di converter dari info menjadi sinyal diskrit setelah itu dimodulasikan dengan ragam format modulasi 5 perangkat modulator berbeda yaitu Mach Zehnder Modulator, Electroabsorption Modulator, Amplitude Modulator, Phase Modulator dan Frekuensi Modulator sampai kabel feeder. Selanjutnya blok ODC sampai kabel distribusi.

Terakhir, adalah blok ODP sampai ONT yang meliputi photodetector, *low pas filter*, dan regenerator. Bentuk sinyal akan diamati dengan *Optical Time Domain Visualizer* dan *Oscilloscope*, perubahan karakteristik pada spektrum frekuensi akan dilihat melalui *Spektrum Analyzer*, sedangkan nilai *BER* akan divisualisasikan dengan *BER Analyzer*.



Gambar 1. Diagram Alir penelitian

3.1 Simulasi

Berdasarkan dari diagram blok sistem yang dijelaskan pada gambar 3.1, pada penelitian ini dibuat pemodelan sistem pada software Optisystem yang menyerupai blok sistem yang telah dijelaskan sebelumnya. Sesuai dengan diagram blok sistem, simulasi ini terdiri dari sumber optik, modulator yang digunakan dan media transmisi berupa fiber optik. Modulator yang digunakan diantaranya Mach-Zehnder Modulator, Electroabsorption Modulator, Amplitude Modulator, dan Phase Modulator. Tentunya berbeda karena setiap perangkat memiliki spesifikasi berbeda, hal ini membuat simulasi dilakukan dengan 3cenario berbeda menyesuaikan perangkat yang digunakan. Lalu hasil dari simulasi akan keluar berupa *BER*, Q-Faktor, LPB, RTB dan *SNR*, kemudian analisis hasil dari 3cenario yang dilakukan kemudian disesuaikan dengan parameter yang telah ditentukan, parameter tersebut diantaranya nilai *psudeo-random* ≤ 10 Gbit/s, min *BER* $\leq 1 \times 10^{-9}$, Q-Faktor ≥ 6 , LPB ≥ 5 dBm dan RTB ≤ -28 dBm. Sesuai dengan gambar 3.2 jika nilai dari simulasi tidak sesuai dengan parameter yang di tentukan maka akan dilakukan pergantian perangkat lalu disimulasikan dan di analisis kembali hingga nilai dari simulasi dapat memenuhi parameter yang telah di tentukan.

3.2 Spesifikasi Perangkat

Adapun setiap perangkat pada daftar tersebut memiliki spesifikasi masing-masing yang membedakan fungsi dan cara kerjanya. Berikut dijelaskan deskripsi dan parameter setiap perangkat tersebut.

3.2.1 WLAN IEEE 802.11n

Pemilihan ROF menyesuaikan dengan standar yaitu IEEE 802.11n, frekuensi dan bit rate menjadi pertimbangan sebelum informasi di konversi pada modulator. Selain itu jarak maksimum dapat mempengaruhi kinerja dari perangkat yang digunakan.

3.2.2 Optical Line Termination (OLT)

Pemilihan OLT harus disesuaikan dengan jarak dan banyaknya redaman yang dapat terjadi di sepanjang link. Power transmit (*P_{tx}*) harus mencukupi agar dapat memenuhi parameter Link Power Budget. Selain itu pemilihan OLT juga harus mempertimbangkan nilai lebar 3cenario, rise time dan fall time yang diharapkan bernilai 3cenario kecil agar tidak melewati batas 3cenario atau nilai rise time budge.

3.2.3 Fiber Optik

Fiber optik yang digunakan adalah yang sesuai dengan standar ITU-T G.652 dan drop fiber G.657. Fiber optik yang digunakan pada perancangan ini adalah perangkat dengan spesifikasi yang dapat dilihat di 3cena 3.2. Dari ODP sampai ke pelanggan menggunakan fiber optik ITU-T G.657.

3.2.4 Optical Network Termination (ONT)

Optical Network Termination (ONT) berada di sisi pelanggan dari sistem jaringan. ONT mempunyai tugas utama yaitu menjadi perangkat yang terhubung langsung dengan para pelanggan ONT menyediakan native service interfaces kepada pengguna.

4. Hasil Pengujian dan Analisis

4.1 Analisis Skenario 1 untuk MZM

Model Sistem Skenario 1 menggunakan 2 tahap *passive splitter* yaitu 1:4 dengan redaman 6 dB dan 1:8 dengan redaman 9 dB. Skenario 1 dengan panjang 25.5 km menggunakan daya pada power laser sebesar 5 dBm untuk arah downstream dan 0.5 dBm pada arah upstream. Perhitungan redaman total (atot) menghasilkan nilai PRx sebesar -23.664 dBm dan PRx penerima bernilai -9.413 dBm.

Tabel

4.1 Hasil perhitungan matematis dan simulasi MZM

Panjang (km)	hasil	MZM			
		QF	SNR (dB)	BER	LPB (dBm)
25.5 km	Matematis	8.97	12.541	2.38×10^{-12}	-24,9
	Simulasi	6.89	12.195	2.74×10^{-12}	

Tabel 4.1 menunjukan perhitungan matematis dan simulasi dimana hasil matematis memiliki perbedaan Q Factor 2.08, SNR 0.346 dan BER 0.766 hal ini menunjukan bahwa hasil skenario ini memiliki nilai yang diatas dari standar yang telah ditetapkan dan jarak perbedaan hasil tidak begitu jauh hal itu membuktikan Skenario 1 memiliki hasil yang baik.

4.2 Analisis Skenario 2 untuk EAM

Pada Sistem Skenario 2 menggunakan 2 tahap *passive splitter* yaitu 1:4 dengan redaman 6 dB dan 1:8 dengan redaman 9 dB. Skenario 2 dengan panjang 25.5 km menggunakan daya pada power laser sebesar 5 dBm untuk arah downstream dan 0.5 dBm pada arah upstream. Perhitungan redaman total (atot) menghasilkan nilai PRx sebesar -18.450 dBm dan PRx penerima bernilai -9.413 dBm.

Tabel 4.2 Hasil perhitungan matematis dan simulasi EAM

Panjang (km)	hasil	EAM			
		QF	SNR (dB)	BER	LPB (dBm)
25.5 km	Simulasi	4.37	17.985	3.181×10^{-06}	-24,9
	matematis	9	17.524	5.544×10^{-06}	

Tabel 4.2 menunjukan perhitungan matematis dan simulasi dimana hasil matematis memiliki perbedaan Q Factor 4.63 SNR 0.461 dan BER 2.363. hal ini menunjukan bahwa hasil skenario ini memiliki nilai yang diatas dari standar pada hasil matematis untuk Q Factor akan tetapi dibawah nilai standar dari hasil Simulasi dan pada nilai BER berada di bawah standar yang telah ditetapkan

Analisis Skenario 3 untuk AM

4.3 Analisis Skenario 3 untuk AM

Pada Sistem Skenario 3 menggunakan 2 tahap *passive splitter* yaitu 1:4 dengan redaman 6 dB dan 1:8 dengan redaman 9 dB. Skenario 2 dengan panjang 25.5 km menggunakan daya pada power laser sebesar 5 dBm untuk arah downstream dan 0.5 dBm pada arah upstream. Perhitungan redaman total (atot) menghasilkan nilai PRx sebesar -20.582 dBm dan PRx penerima bernilai -10.342 dBm.

Tabel 4.3 Hasil perhitungan matematis dan simulasi AM

Panjang	hasil	AM			
		QF	SNR (dB)	BER	LPB (dBm)
25.5 km	Simulasi	3.938	18.32	4.100×10^{-05}	-24,9
	Matematis	9.16	16.42	3.238×10^{-06}	

Tabel 4.3 menunjukan perhitungan matematis dan simulasi dimana hasil matematis memiliki perbedaan Q Factor 5.23 SNR 2.21 dan BER 0.94 hal ini menunjukan bahwa hasil skenario ini memiliki nilai yang diatas dari standar pada hasil matematis untuk Q Factor akan tetapi dibawah nilai standar dari hasil Simulasi dan pada nilai BER berada di bawah standar yang telah ditetapkan. Hal ini membuat hasilnya tidak maksimal karena beberapa nilai dibawah standar yang di tetapkan.

4.4 Analisis Skenario 4 untuk PM

Pada Sistem Skenario 4 menggunakan 2 tahap *passive splitter* yaitu 1:4 dengan redaman 6 dB dan 1:8 dengan redaman 9 dB. Skenario 2 dengan panjang 25.5 km menggunakan daya pada power laser sebesar 5 dBm untuk arah downstream dan 0.5 dBm pada arah upstream. Perhitungan redaman total (atot) menghasilkan nilai PRx sebesar -20.651 dB dan PRx penerima bernilai -6.400 dB.

Tabel 4.4 Hasil perhitungan matematis dan simulasi PM

Panjang (km)	hasil	PM			LPB (dBm)
		QF	SNR (dB)	BER	
25.5 km	Simulasi	4.66	20.39	1.25×10^{-07}	-24,9
	matematis	10.19	18.23	3.60×10^{-07}	

Tabel 4.4 menunjukan perhitungan matematis dan simulasi dimana hasil matematis memiliki perbedaan Q Factor 4.82 SNR 2.461 dan BER 2.363. hal ini menunjukan bahwa hasil skenario ini memiliki nilai yang diatas dari standar pada hasil matematis untuk Q Factor akan tetapi dibawah nilai standar dari hasil Simulasi dan pada nilai BER berada di bawah standar yang telah ditetapkan. Hal ini membuat hasilnya tidak maksimal karena beberapa nilai dibawah standar yang di tetapkan.

5. Kesimpulan

5.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan uji coba simulasi Modulator Full Duplex pada sistem Radio Over Fiber dengan Metode OFDM dapat di ambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Jaringan Modulator Full Duplex pada sistem Radio Over Fiber dengan Metode OFDM dapat digunakan pada teknologi WLAN IEEE 802.11n dengan RF band 2.5 – 5 GHz, OLT Alcatel Lucent 7432 ISAM FTTH dengan daya 5 dBm dan bit rate 1 Gbps pada modulator MZM,EAM,AM,PM
2. Hasil perencanaan dan simulasi pada modulator MZM, panjang link 25.5 km menghasilkan *Q Factor* sebesar 8.97 untuk perencanaan dan 6.89 pada simulasi dengan *BER* perencanaan 2.38×10^{-12} dan 2.74×10^{-12} pada simulasi.
3. Hasil perencanaan dan simulasi pada modulator EAM, panjang link 25.5 km menghasilkan *Q Factor* sebesar 9 untuk perencanaan dan 4.37 pada simulasi dengan *BER* perencanaan 3.18×10^{-06} dan 5.54×10^{-06} pada simulasi.
4. Hasil perencanaan dan simulasi pada modulator AM, panjang link 25.5 km menghasilkan *Q Factor* sebesar 9.16 untuk perencanaan dan 3.93 pada simulasi dengan *BER* perencanaan 3.23×10^{-06} dan 4.10×10^{-05} pada simulasi.
5. Hasil perencanaan dan simulasi pada modulator PM, panjang link 25.5 km menghasilkan *Q Factor* sebesar 10.19 untuk perencanaan dan 4.61 pada simulasi dengan *BER* perencanaan 3.60×10^{-07} dan 1.25×10^{-06} pada simulasi.
6. Nilai *Q Factor* pada MZM mencapai nilai maksimal sebesar 8.97 untuk perencanaan dan 6.89 sangat mendekati di bandingkan dengan modulator lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Khair F, Fakhriy HP, Mustika IW, Setiyanto B, Idrus SM. Modeling and simulation of OFDM scheme for radio over fiber (RoF). InInformation Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), 2015 2nd International Conference on (pp. 376-381). IEEE.oct 2015
- [2] E. S. Sugesti, P. S. Priambodo, K. Ramli, dan B. Budiarto, "Delay Bound Analysis for Hybrid Networks : IEEE 802.11g ERP-OFDM WLAN over Fiber," dalam *ATNAC*, 2010.
- [3] Khair F, Fakhriy HP, Mustika IW, Setiyanto B, Idrus SM. Modeling and simulation of OFDM scheme for radio over fiber (RoF). InInformation Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), 2015 2nd International Conference on (pp. 376-381). IEEE.oct 2015
- [4] Namdeo S, Rani R. Designing and Performance Evaluation of 64 QAM OFDM System. IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE) e-ISSN. :2278-834.2013
- [5] Keiser Gerd, 2000, Optical Fiber Communication, Edisi Ketiga, McGraw-Hill Companies, USA, hal 319 – 322
- [5] Agrawal. P Govind, 2002, Fiber Optic Communication System, Edisi Ketiga, A John Wiley & Sons, Inc Publications, New York, USA, hal 245 – 250.
- [6] Boston Micromachines Corporation "Optical Modulator".2015
- [7] ITU-T Recommendation G.984.1. "Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General Characteristics", 2003
- [8] ITU. (2005). *ITU-T Recommendation G.983.2*. ITU-T Study Group 15.
- [9] Jhon M. Senior, 2009, Optical Fiber Communication Principle And Practice, Edisi Ketiga, M.Yousif Jamro , England, hal 768 – 769.
- [10] Jhon M. Senior, 2009, Optical Fiber Communication Principle And Practice, Edisi Ketiga, M.Yousif Jamro , England, hal 623

