

SIMULASI KINERJA MODULATOR OPTIK TIPE MACH-ZEHNDER BERDASARKAN RAGAM FORMAT MODULASI

Wildand Angesti^{*)}, Imam Santoso, and Ajub Ajulian Zahra

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)} Email: wildand_angesti@yahoo.com

Abstrak

Modulator optik berfungsi untuk menumpangkan sinyal-sinyal informasi berupa pulsa-pulsa cahaya ke dalam sinyal pembawa (carrier) agar dapat ditransmisikan ke tujuan. Modulator yang kini sering digunakan adalah modulator Mach-Zehnder. Pada penelitian ini dilakukan analisis terhadap kinerja dari modulator Mach-Zehnder dengan ragam format modulasi, khususnya Non Return to Zero (NRZ), Return to Zero (RZ), Carrier Suppressed Return to Zero (CSRZ), Return to Zero-Differential Phase Shift Keying (RZ-DPSK) dan Return to Zero-Differential Quadrature Phase Shift Keying (RZ-DQPSK). Analisis kinerja modulator optik berupa nilai BER, Q factor, toleransi dispersi, toleransi nonlinearitas dan sensitivitas penerima optik. Dengan bantuan perangkat lunak Optisystem 7.0 dilakukan simulasi kinerja modulator Mach-Zehnder sesuai ragam format modulasi tersebut. Dari hasil simulasi, RZ-DPSK merupakan jenis format modulasi dengan kinerja paling optimal untuk sistem komunikasi serat optik kanal tunggal 40Gb/s.

Kata kunci: Sistem komunikasi serat optik, modulator optik, format modulasi, single-mode fiber

Abstract

Optical modulator is used to interlay information signals in the form of light beam into carrier signal in order to be able to be transmitted to the destination. Modulator that is now frequently used is Mach-Zehnder modulator. In this research, analysis in the performance of Mach-Zehnder modulator with various modulation formats was conducted, especially Non Return to Zero (NRZ), Return to Zero (RZ), Carrier Suppressed Return to Zero (CSRZ), Return to Zero-Differential Phase Shift Keying (RZ-DPSK) and Return to Zero-Differential Quadrature Phase Shift Keying (RZ-DQPSK). The performance analysis was done in terms of BER value, Q factor, dispersion tolerance, nonlinearity tolerance and optical receiver sensitivity. By using Optisystem 7.0 software, simulation of Mach-Zehnder modulator performance with those of modulation formats was carried out. Based on simulation, RZ-DPSK had the most optimal performance for optical fiber communication system 40Gb/s single channel.

Keywords: Optical Fiber Communication System, optical modulator, modulation formats, single-mode fiber

1. Pendahuluan

Sistem komunikasi serat optik seperti halnya sistem komunikasi pada umumnya terdiri dari 3 bagian utama yaitu pemancar, medium dan penerima. Akan tetapi secara spesifik, pada serat optik terdapat *optical transmitter* (pemancar optik), *optical span* (media optik) dan *optical receiver* (penerima optik). Selain itu, sistem komunikasi serat optik memiliki beberapa komponen pendukung yang mendukung proses transmisi, salah satu komponen tersebut adalah modulator optik yang berfungsi untuk menumpangkan sinyal-sinyal informasi berupa pulsa-pulsa cahaya ke dalam sinyal pembawa (*carrier*) agar dapat ditransmisikan ke tujuan. Sehingga, pengamatan simulasi kinerja modulator optik ini dapat memberi

gambaran pendukung terhadap sistem komunikasi serat optik secara keseluruhan.

Pada penelitian sebelumnya telah dibahas mengenai perbandingan format modulasi RZ dan NRZ pada sistem serat TDM 40Gb/s [8]. Selain itu ada penelitian yang membahas tentang kinerja modulator fasa dan mach-zehnder dengan ragam format modulasi uji berupa modulasi fasa DPSK dan DQPSK [9]. Dalam penelitian lain, banyak juga yang menganalisis kinerja format modulasi yang optimal untuk sistem komunikasi serat optik dengan laju bit tinggi [6], [9]-[11].

Berdasarkan hal tersebut maka dalam penelitian ini akan dilakukan pengujian terhadap macam-macam format modulasi optik pada Mach-Zehnder modulator sehingga

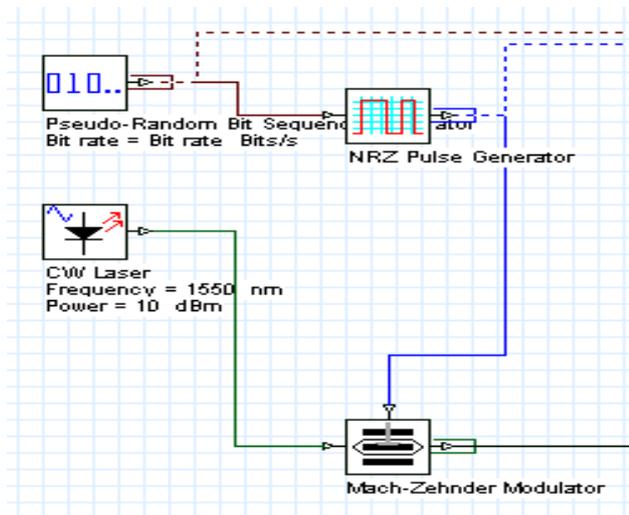
dapat merancang sistem komunikasi serat optik dengan kerja yang optimal. Format modulasi yang akan diuji adalah Non-Return-to-Zero (NRZ), Return-to-Zero (RZ), Carrier Supressed Return-to-Zero (CSRZ), Return-to-Zero Differential Phase Shift Keying (RZ-DPSK) dan Return-to-Zero Differential Quadrature Phase Shift Keying (RZ-DQPSK). Kinerja dari sistem akan dilihat dan diamati berdasarkan nilai *Bit Error Rate* (BER), *Q* Factor, toleransi nonlinearitas, toleransi dispersi dan sensitivitas penerima optik. Dengan menggunakan perangkat lunak *Optisystem 7.0* akan dilakukan simulasi sistem komunikasi serat optik sebagai acuan untuk menganalisa kinerja dari sistem yang dirancang.

2. Metode

2.1 Perancangan Simulasi

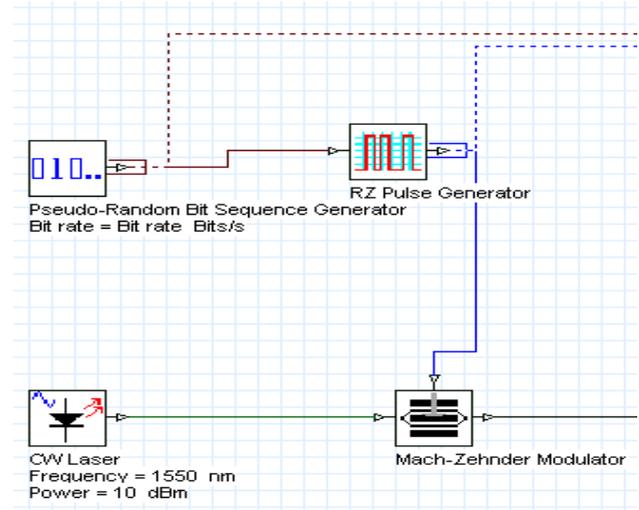
Pada penelitian ini, akan dirancang simulasi untuk 5 jenis format modulasi yang akan diuji yaitu NRZ, RZ, CSRZ, RZ-DPSK dan RZ-DQPSK.

- 1) Non Return to Zero: Gambar 9 merupakan rangkaian konfigurasi simulasi untuk format modulasi NRZ. Dalam konfigurasi tersebut, digunakan beberapa komponen optik seperti *NRZ pulse generator*, yang akan membangkitkan pulsa NRZ, modulator Mach-Zehnder dan jua sumber cahaya LASER.



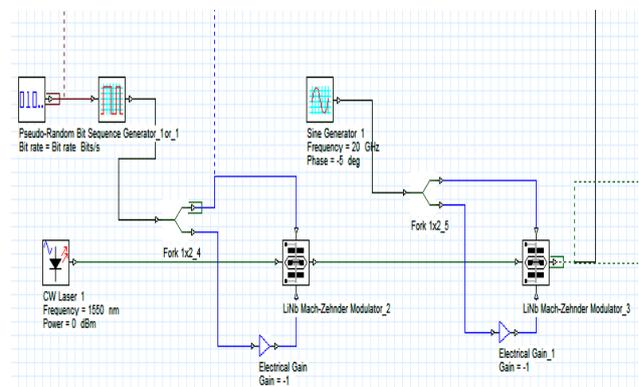
Gambar 1 Konfigurasi modulator NRZ

- 2) Return to Zero: Seperti yang terlihat pada gambar 10, konfigurasi format modulasi RZ membutuhkan komponen berupa *RZ pulse generator*, sumber cahaya LASER dan modulator Mach-Zehnder.



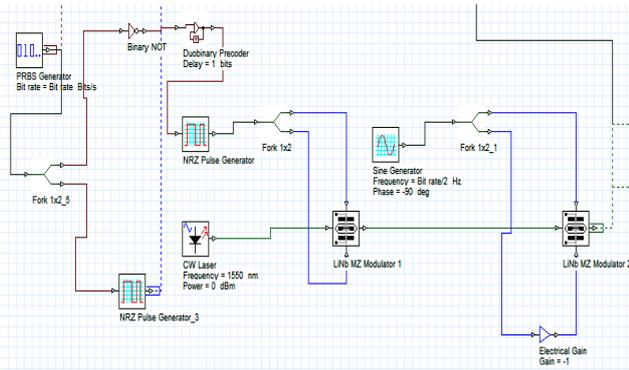
Gambar 2 Konfigurasi modulator RZ

- 3) Carrier Supressed Return to Zero: Dalam membangkitkan sinyal CSRZ dibutuhkan dua modulator optik. Pada gambar 11, modulator intensitas pertama berfungsi untuk membangkitkan sinyal RZ biasa dan modulator fasa yang kedua berfungsi untuk menghasilkan beda fasa optik sebesar π antara bit yang berdekatan.



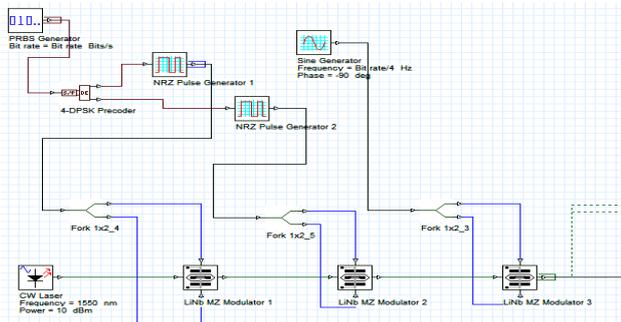
Gambar 3 Konfigurasi modulator CSRZ

- 4) Return to Zero-Differential Phase Shift Keying (RZ-DPSK): Gambar 4 menampilkan konfigurasi dari format modulasi RZ-DPSK. Sinyal optik NRZ-DPSK akan dihasilkan setelah keluar dari modulator pertama. Kemudian sinyal NRZ-DPSK ini akan *disampling* dengan runtutan pulsa periodik pada modulator kedua sehingga akan mendapatkan sinyal optik RZ-DPSK.



Gambar 4 Konfigurasi modulator RZ-DPSK

5) Return to Zero-Differential Quadrature Phase Shift Keying (RZ-DQPSK): Untuk membangkitkan sinyal optik RZ-DQPSK dipasang 3 modulator Mach-Zehnder seperti ditunjukkan pada gambar 13. Modulator pertama dan kedua berfungsi untuk membangkitkan dua sinyal terkodekan dan termodulasi dan menghasilkan sinyal DQPSK. Modulator ketiga kemudian akan membangkitkan sinyal RZ sehingga sinyal optik RZ-DQPSK akan terbentuk.



Gambar 5 Konfigurasi modulator RZ-DQPSK

Masing-masing dari 5 format modulasi diatas akan disimulasikan untuk mendapatkan hasil yang dituju, transmisi terjadi pada serat optik kanal tunggal dengan laju bit 40Gb/s. Berikut adalah konfigurasi dari masing-masing modulator optik agar menghasilkan format modulasi sesuai yang telah ditentukan.

Dari konfigurasi modulator optik tersebut, transmitter optik sudah terbentuk. Kemudian, tiap keluaran transmitter dihubungkan dengan media transmisi optik. Media transmisi optik terdiri dari *standard single-mode fiber* sepanjang 50 km, dua buah *Erbium Doped Fiber Amplifier* dan *dispersion compensating fiber* sepanjang 10 km.

Adapun parameter yang harus diatur adalah sebagai berikut

Tabel 1 Parameter *Standard Single-Mode Fiber*

No	Parameter	Nilai
1.	Panjang Gelombang Referensi	1550 nm
2.	Panjang Serat	50 km
3.	Attenuasi	0.2 dB/km
4.	Dispersi	17 ps/nm/km
5.	Slope Dispersi	0.075 ps/nm ² /km
6.	Differential Group Delay	0.2 ps/km
7.	Area Efektif	70 μm^2
8.	Lower Calculation Limit	1400 nm
9.	Upper Calculation Limit	1700 nm

Adanya *single-mode fiber* ini dapat menyebabkan attenuasi dan dispersi pada data transmisi fiber. Oleh karena itu, media transmisi juga memerlukan amplifier dan DCF (*Dispersion Compensating Fiber*). Dalam pengujian format modulasi ini, ditempatkan *amplifier* EDFA dengan penguat 10dB dan 6dB. Parameter DCF adalah sebagai berikut

Tabel 2 Parameter *Dispersion Compensating Fiber*

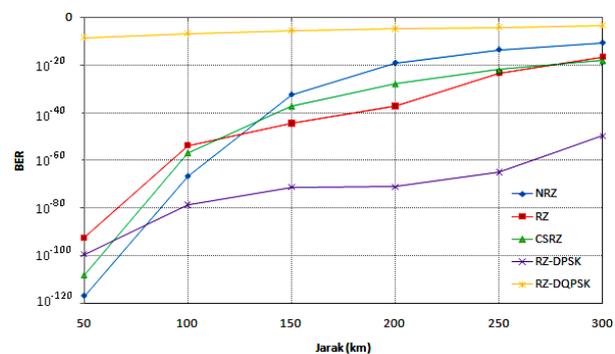
No.	Parameter	Nilai
1.	Panjang Serat	10 km
2.	Attenuasi	0.5 dB/km
3.	Dispersi	-85 ps/nm/km
4.	Slope Dispersi	-0.3 ps/nm ² /km
5.	Differential Group Delay	0.2 ps/km
6.	Area Efektif	22 μm^2
7.	Lower Calculation Limit	1400 nm
8.	Upper Calculation Limit	1700 nm

Keluaran dari media transmisi kemudian akan menjadi masukan bagi *receiver* optik.

3. Hasil Dan Analisa

3.1 Analisis Bit Error Rate (BER)

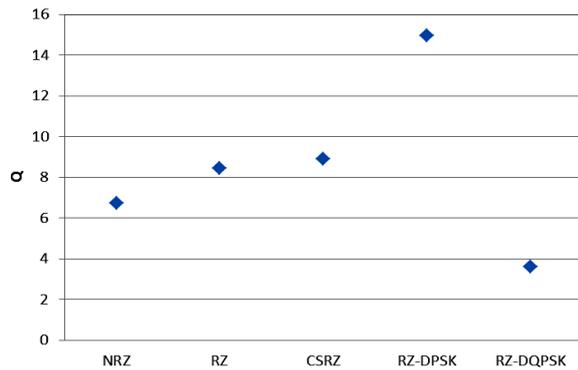
Gambar 6 adalah grafik hasil yang diperoleh dari simulasi sistem komunikasi serat optik kanal tunggal 40Gb/s dengan variasi jarak atau panjang serat optik antara 50 km – 300km. Masing-masing dari sistem dengan format modulasi berbeda menunjukkan kinerja yang berbeda dari tiap jaraknya ditinjau dari nilai BER yang dihasilkan.



Gambar 6 Grafik perbandingan tiap format modulasi berdasarkan BER terhadap jarak

Pada jarak akhir 300km, nilai BER hasil simulasi akhir akan didapatkan. Pada jarak transmisi ini, jika dibandingkan dengan format modulasi NRZ, RZ, CSRZ dan RZ-DQPSK, format modulasi RZ-DPSK memiliki nilai BER yang terbaik dengan nilai BER 10^{-49} . Hal ini dikarenakan, RZ-DPSK dapat mengkompensasi dispersi kromatik dan efek nonlinearitas lebih baik daripada format modulasi yang lain.

3.2 Analisis Q Factor



Gambar 7 Grafik perbandingan tiap format modulasi berdasarkan Q factor

Pada gambar 7 terlihat bahwa empat format modulasi telah memenuhi nilai Q factor yang ditentukan yaitu 6 dan layak untuk digunakan dalam sistem komunikasi serat optik kecuali format modulasi RZ-DQPSK dengan nilai Q factor sebesar 3,61 yang berarti format tersebut tidak layak untuk digunakan dalam sistem komunikasi serat optik. Hal ini menunjukkan bahwa format modulasi NRZ, RZ < CSRZ dan RZ-DPSK dapat digunakan dalam sistem komunikasi serat optik dengan nilai Q factor berturut-turut 6,73; 8,45; 8,88 dan 14,94. Pada parameter Q factor, RZ-DPSK memiliki nilai Q factor terbaik yaitu 14,94.

3.3 Analisis Toleransi Dispersi

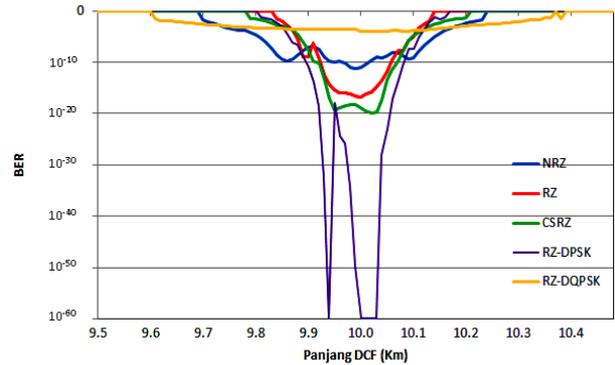
Gambar 8 merupakan grafik hasil simulasi untuk toleransi dispersi. Grafik tersebut menunjukkan hubungan antara nilai BER terhadap panjang DCF. Data tersebut dianalisa dengan melihat posisi tiap format modulasi dengan nilai BER terendah pada panjang DCF. Dengan bantuan tabel 5 maka kita akan lebih mudah untuk mengetahui letak tersebut.

Dari hasil pada gambar 8 kemudian akan kita hitung dengan menggunakan rumus residual dispersi. Residual dispersi adalah jumlah dispersi yang ada setelah transmisi optik yang dapat ditoleransi oleh sistem. Adapun rumusnya adalah seperti dibawah ini

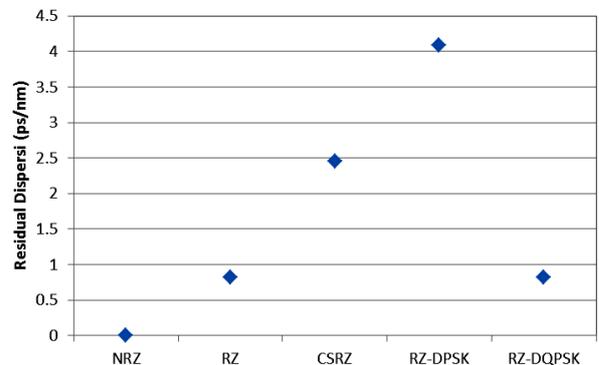
$$D = |(L-10) * (-80 \text{ ps/nm/km})| \quad (1)$$

dengan D = Residual Dispersi (ps/nm) dan L = Panjang DCF dengan nilai BER terendah (km)

Dengan menggunakan rumus 1, maka data hasil simulasi dari tiap format modulasi dihitung agar selanjutnya dapat dianalisa mengenai toleransi dispersi dari masing-masing sistem dengan variasi format modulasi. Gambar 17 menunjukkan hasil perhitungan untuk data hasil simulasi untuk tiap format modulasi.



Gambar 8 Grafik perbandingan tiap format modulasi berdasarkan BER terhadap panjang DCF

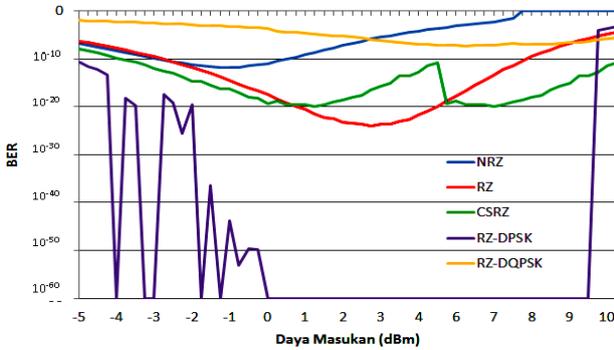


Gambar 9 Grafik perbandingan tiap format modulasi berdasarkan hasil perhitungan toleransi dispersi

Sistem dengan format modulasi yang memiliki nilai residual dispersi yang paling besar berarti memiliki toleransi dispersi yang paling baik. RZ-DPSK memiliki toleransi dispersi yang terbaik yaitu 4.08 ps/nm, diikuti oleh CSRZ dengan nilai toleransi dispersi 2.45 ps/nm, RZ dan RZ DQPSK dengan nilai toleransi dispersi 0.81ps/nm dan NRZ dengan nilai toleransi dispersi 0 ps/nm. Dengan pertimbangan nilai BER terbaik yang dapat dicapai oleh RZ-DQPSK hanya sebesar 10^{-3} atau kurang dari nilai BER minimal yang disyaratkan sebesar 10^{-9} maka RZ-DQPSK tetap tidak dapat digunakan dalam sistem komunikasi serat optik. Jadi, berdasarkan hasil simulasi dan perhitungan, RZ-DPSK adalah format modulasi yang

memiliki kemampuan mentoleransi dispersi yang terbaik dibandingkan dengan format modulasi lainnya.

3.4 Analisis Toleransi Nonlinearitas



Gambar 10 Grafik perbandingan tiap modulasi format berdasarkan BER terhadap daya masukan

Pada gambar 10 dapat dilihat data hasil simulasi dalam bentuk grafik perbandingan daya masukan sistem dengan nilai BER dari masing-masing format modulasi. Data tersebut dianalisa dengan melihat nilai daya masukan yang dibutuhkan oleh suatu sistem dengan masing-masing format modulasinya untuk mendapatkan nilai BER yang terendah.

Berikut tabel 3 yang memuat data tentang daya masukan yang dibutuhkan tiap sistem dengan variasi format modulasi untuk mencapai nilai BER terendah.

Tabel 3 Hasil simulasi toleransi nonlinearitas

Format Modulasi	Nilai BER Terendah	Daya masukan (dBm)
NRZ	10 ⁻¹¹	-0,7
RZ	10 ⁻²⁴	3,15
CSRZ	10 ⁻¹⁹	6,58
RZ-DPSK	10 ⁻⁶⁰	9,21
RZ-DQPSK	10 ⁻⁷	5,78

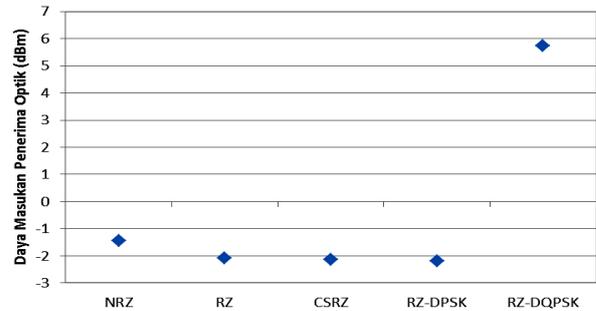
Ketika daya masukan kecil, sistem akan mencapai nilai BER yang tinggi. Apabila daya masukan diperbesar atau dinaikkan, maka nilai BER akan semakin rendah dan akhirnya mencapai pada titik terendah dimana pada titik terendah tersebut sistem memiliki konerja yang optimal. Titik terendah inilah yang menjadi acuan untuk menentukan nilai daya masukan terbaik. Mengingat bahwa sistem komunikasi serat optik dengan kecepatan tinggi dan jarak transmisi yang jauh membutuhkan daya masukan yang besar, jika suatu sistem mampu diberi daya yang semakin besar dengan kualitas transmisi yang baik, maka sistem tersebut dikatakan sistem yang baik.

Berdasarkan teori diatas, RZ-DPSK memiliki toleransi nonlinearitas yang paling baik dengan daya masukan terbesar senilai 9.21 dBm. CSRZ menjadi terbaik kedua

dengan daya masukan sebesar 6.58 dBm diikuti RZ-DQPSK dengan daya masukan sebesar 5.78 dBm, RZ dengan daya masukan sebesar 3.15 dBm dan NRZ dengan daya masukan sebesar -0.7 dBm. Akan tetapi, untuk format modulasi RZ-DQPSK dengan nilai daya masukan sebesar 5.78 dBm sistem tersebut hanya mampu menghasilkan nilai BER 10⁻⁷ atau dibawah 10⁻⁹ yang berarti format modulasi tersebut tidak layak digunakan dalam sistem komunikasi serat optik.

3.5 Analisis Sensitivitas Penerima Optik

Gambar 19 menunjukkan perbandingan nilai daya masukan penerima optik yang dibutuhkan suatu sistem untuk untuk mencapai nilai BER 10⁻⁹ atau *Q factor* 6 sebagai syarat utama kelayakan dari suatu sistem komunikasi serat optik. Untuk lebih mempermudah pembacaan, data tersebut disajikan dalam tabel 8.



Gambar 11 Grafik perbandingan tiap modulasi format berdasarkan daya masukan penerima optik

Berdasarkan gambar 11, format modulasi RZ-DPSK memiliki sensitivitas penerima optik yang paling baik dengan nilai daya yang dibutuhkan paling kecil yaitu sebesar -2,186 dBm. CSRZ dengan nilai daya masukan -2,133, RZ dengan nilai daya masukan -2.086, NRZ dengan nilai daya masukan -1,448 dBm dan RZ-DQPSK 5.729 dBm. Akan tetapi pada RZ-DQPSK sistem hanya mampu mencapai nilai *Q factor* sebesar 5.3 sehingga format ini tidak dapat digunakan dalam transmisi optik.

3.6 Perbandingan Kinerja Format Modulasi

Berdasarkan tabel 4, untuk nilai BER, *Q factor*, toleransi dispersi dan toleransi nonlinearitas, RZ-DPSK menempati format modulasi dengan kinerja yang paling baik untuk sistem komunikasi serat optik kanal tunggal 40Gb/s. Format modulasi RZ-DPSK ini memiliki kehandalan dalam mentoleransi dispersi dan efek nonlinearitas yang terjadi selama proses transmisi makadari itu sistem dengan format modulasi RZ-DPSK dapat mencapai nilai BER terendah dan *Q factor* yang terbaik.

Tabel 4 Perbandingan kinerja format modulasi

Format Modulasi	Parameter Kinerja				
	BER	Q factor	Toleransi Dispersi (ps/nm)	Toleransi Nonlinearitas (dBm)	Sensitivitas Penerima Optik (dBm)
NRZ	10 ⁻¹¹	6,73271	0	-0.7	-1.448
RZ	10 ⁻¹⁶	8,45904	0.81	3.15	-2.086
CSRZ	10 ⁻¹⁸	8,88199	2.45	6.58	-2.133
RZ-DPSK	10 ⁻⁴⁹	14,9414	4.08	9.21	-2.183
RZ-DQPSK	10 ⁻³	3,61667	0.81	5.78	5.729

4. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan pada bab sebelumnya maka dapat diambil kesimpulan bahwa jenis format modulasi yang paling baik untuk sistem komunikasi serat optik kanal tunggal 40Gb/s adalah RZ-DPSK. Dari hasil pengujian, RZ-DPSK merupakan jenis format modulasi dengan kinerja paling optimal untuk sistem komunikasi serat optik kanal tunggal 40Gb/s karena memiliki nilai akhir BER yang paling rendah yaitu 10⁻⁴⁹, memiliki toleransi dispersi sebesar 4,08 ps/nm dan toleransi efek nonlinearitas sebesar 9,21 dBm yang paling baik dibandingkan dengan format modulasi lainnya yaitu NRZ, RZ, CSRZ dan RZ-DQPSK. RZ-DPSK juga memiliki nilai sensitivitas penerima optik yang paling baik yaitu -2,183 dBm. Sedangkan RZ-DQPSK menunjukkan kinerja yang paling buruk karena memiliki nilai BER tertinggi sebesar 10⁻⁸ dan tidak memenuhi syarat nilai BER transmisi optik yaitu 10⁻⁹ sehingga format modulasi RZ-DQPSK tidak bisa digunakan dalam sistem komunikasi serat optik kanal tunggal 40Gb/s berdasarkan hasil pengujian.

Referensi

- [1]. Winzer, Peter J. dan Rene-Jean Essiambre. *Advanced Optical Modulation Formats*. IEEE. 2006.
- [2]. Singh, Simranjit dan R.S. Kaler. *Investigation of Hybrid Optical Amplifiers with Different Modulation Formats for DWDM Optical Communication System*. Elsevier Inc. 2012.
- [3]. Oncel, F. Feza Buyuksahin. *Modulation Formats for WDM Systems*. A Thesis of Graduate School, Middle East Technical University. 2009.
- [4]. Kaminow, P. Ivan, Tingye Li dan Alan E. Willner. *Optical Fiber Telecommunications VB*. Elsevier Inc. 2008.
- [5]. Gruner-Nielsen, Lars. et al. *Dispersion Compensating Fibers*. Ideal. 1999.
- [6]. Zhang, Sen. *Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System*. A Thesis of Master of Science, University of Kansas. 2004.
- [7]. Linlin, Bing, Lei Jianming, Lu Li dan Zou Xuecheng. *Comprehensive Assessment of New Modulation Techniques in 40Gb/s Optical Communication Systems*. IOPScience. 2010.
- [8]. D. Breur dan K. Petermann. *Comparison of NRZ and RZ-Modulation Format for 40Gbit/s TDM Standard-Fiber System*. IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 9. 1997.
- [9]. Haris, Muhammad. *Advanced Modulation Formats for High-Bit-Rate Optical Networks*. A Dissertation of Doctor of Philosophy, Georgia Institute of Technology. 2008.
- [10]. Thylen, Lars, Urban Westergren, Petter Holmstrom, Richard Schatz dan Peter Jane. *Recent Development in High-Speed Optical Modulators*. Royal Institute of Technology, Sweden. 2008.
- [11]. Garcia-Perez, A. et al. *Efficient Modulation Formats for High-Bit-Rate Fiber Transmission*. Universidad de Guanajuato, Mexico. 2006.
- [12]. Peucheret, Christophe. *Direct and External Modulation of Light*. Technical University of Denmark. 2009.
- [13]. Gerd Keiser, *Optical Fiber Communications*, Third edition, 2000.
- [14]. Klaus Petermann, *Optical Communication Theory and Techniques*, 2005.
- [15]. Pallock C. R, *Fundamentals of Optoelectronics*, 1995.