

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

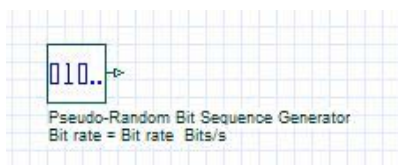
Pada bab IV ini akan dijelaskan hasil eksperimen dan analisis data dari penelitian yang dilakukan. Data yang disajikan merupakan hasil dari pengaruh *bit rate* terhadap jarak transmisi dan juga pengaruh *line coding* yang digunakan pada *optical modulator* terhadap performa sistem komunikasi serat optik dilihat dari parameter BER, *Q-Factor*, dan *loss*. Penulisan bab IV meliputi konfigurasi perangkat eksperimen, prosedur pengambilan data, data hasil eksperimen dan pembahasan.

#### 4.1 Konfigurasi Perangkat Eksperimen

Pada sub bab ini akan dibahas tentang komponen-komponen yang digunakan dalam penelitian. Blok diagram konfigurasi eksperimen telah ditunjukkan pada Gambar 3.3. Komponen eksperimen yang digunakan dalam konfigurasi penelitian terdiri atas *pseudo-random bit sequence generator*, *pulse generator*, *WDM Multiplexer*, *Erbium Doped Fiber Amplifier*, fiber optik, modulasi eksternal, *WDM Demultiplexer*, *photodetector APD*, *low pass chebyshev filter*, *BER analyzer*, dan *power meter visualizer*. Spesifikasi dan penjelasan dari masing-masing komponen eksperimen adalah sebagai berikut:

##### a. *Pseudo-Random Bit Sequence Generator*

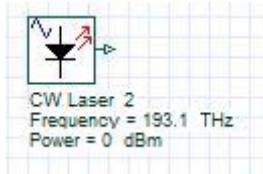
Komponen ini membangkitkan urutan biner *pseudo-random* sebagai salah satu sinyal uji dalam proses identifikasi dinamis. Urutan bit ini dirancang untuk pendekatan karakteristik dari data acak. Sebuah PRBS mirip dengan urutan bilangan acak secara nyata, tetapi juga disebut semu (*pseudo*) karena deterministic. Gambar komponen dapat dilihat pada gambar 4.1:



Gambar 4.1 Komponen *Pseudo-Random Bit Sequence Generator*  
Sumber: Optiwave (2008).

### b. CW Laser

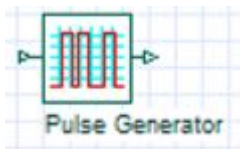
*Laser* memiliki berkas sinar yang lebih sempit dibandingkan LED sehingga sangat cocok digunakan untuk aplikasi sistem komunikasi jarak jauh. *Continuous Wave Laser* berfungsi untuk membangkitkan sinyal optik sebagai sinyal masukan dengan panjang gelombang 1550.12 nm dan 1558.98 nm dengan daya input 20 mW. Gambar komponen dapat dilihat pada gambar 4.2:



Gambar 4.2 Komponen CW Laser  
Sumber: Optiwave (2008).

### c. Pulse Generator

*Pulse Generator* merupakan komponen yang membangkitkan pulsa yang umumnya berbentuk kotak. Pada format RZ, tiap pulsa optik yang mewakili bit 1 lebih pendek daripada bit slot dan amplitudonya kembali ke nol sebelum durasi bit berakhir. Pada format NRZ, pulsa optik tetap di dalam bit slot dan amplitudonya tidak kembali ke nol diantara dua atau lebih bit 1 yang berurutan. Pada komunikasi *optik*, penggunaan format RZ membantu perancangan sistem gelombang cahaya berkapasitas tinggi. Sedangkan format NRZ memiliki keuntungan sebagai pengendali *bandwidth*. Gambar komponen dapat dilihat pada gambar 4.3:

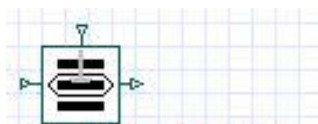


Gambar 4.3 Komponen *Pulse Generator*  
Sumber: Optiwave (2008).

### d. Modulator Eksternal

Melakukan proses modulasi dengan teknik modulasi yang menggunakan berkas cahaya berupa pulsa cahaya sebagai sinyal pembawa dengan perangkat eksternal. Sinyal masukan berupa sinyal optik berasal dari *CW laser* dan sinyal elektrik berasal dari *signal generator*. Pada *Mach Zehnder Modulator* sinyal pembawa (cahaya) yang memasuki *modulator* dibagi menjadi dua jalur, satu jalur tidak diubah (*unmodulated*) dan satu jalur lainnya dimodulasi. Medan elektrik dari elektroda pemodulasi digunakan untuk mempengaruhi karakteristik pandu gelombang. Perubahan karakteristik ini selanjutnya akan mengubah mode perambatan berkas

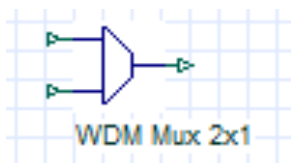
optik sehingga karakteristik berkas optik ikut berubah. Karena secara tidak langsung karakteristik berkas optik berubah sebagai akibat dari medan elektrik maka proses ini disebut efek elektro-optik. Sedangkan *Electroabsorption Modulator* bekerja menggunakan prinsip dasar efek *electroabsorption* yaitu perubahan koefisien absorpsi berdasarkan pada perubahan medan listrik. Pada EAM bulk semikonduktor, absorpsi disebabkan oleh bergeraknya elektron ke energi yang lebih rendah seiring dengan bertambahnya medan listrik yang disebabkan oleh kombinasi dari absorpsi *band-to-band* dan proses *tunneling* (*Franz-Keldysh effect*). Gambar komponen dapat dilihat pada gambar 4.4:



Gambar 4.4 Komponen Eksternal Modulator  
Sumber: Optiwave (2008).

#### e. Multiplexer

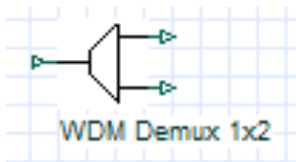
*Wavelength-Devision Multiplexing* (WDM) Mux 2x1 berfungsi sebagai pengubah dua sinyal menjadi satu sinyal keluaran. Gambar komponen dapat dilihat pada gambar 4.5:



Gambar 4.5 Komponen Multiplexer  
Sumber: Optiwave (2008).

#### f. Demultiplexer

*Wavelength-Devision Multiplexing* (WDM) Demux 2x1 berfungsi sebagai pengubah satu sinyal menjadi dua sinyal keluaran. Gambar komponen dapat dilihat pada gambar 4.6:



Gambar 4.6 Komponen demultiplexer  
Sumber: Optiwave (2008).

### g. Serat Optik

Serat optik jenis *single mode* memiliki karakteristik yang lebih baik dibandingkan jenis *multimode*. Oleh karena itu pada penelitian ini digunakan serat optik jenis *single mode* sepanjang 100 km yang diaplikasikan pada sistem komunikasi jarak jauh.

Perhitungan dispersi diperlukan untuk mendapatkan kinerja sistem komunikasi serat optik dalam jarak jangkauan transmisi maksimumnya. Perhitungan dispersi meliputi perhitungan dispersi material, dispersi pandu gelombang, dan dispersi intermodal. Spesifikasi komponen yang digunakan akan dijelaskan pada tabel 4.1.

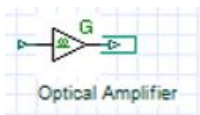
Tabel 4.1

Spesifikasi komponen yang digunakan

Parameter	Definisi	Nilai
$t_{dm}$	Koefisien dispersi bahan	0,8 ps/(nm.km)
$\Delta\lambda$	Lebar spectrum sumber optik	1 nm
$n_1$	Indeks bias inti	1,48
$n_2$	Nilai indeks bias selubung	1,46
C	Kecepatan cahaya di ruang hampa	$3 \times 10^8$ m/s
$\Lambda$	Panjang gelombang	1550.12 nm dan 1558.98 nm
A	Jari-jari inti serat optik	7 $\mu$ m

### h. Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)

Pada sistem komunikasi jarak jauh biasanya digunakan *repeater* yang berfungsi untuk menjaga tingkat daya informasi yang dikirim agar dapat dideteksi dengan baik di penerima. Pada penelitian ini *repeater* yang digunakan adalah *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA). EDFA merupakan serat optik yang terdoping oleh unsur *Erbium* ( $Er^{3+}$ ). EDFA dapat digunakan sebagai *booster amplifier* jika diletakkan setelah *laser*, sebagai *in-line amplifier* jika berada di antara terminal pengirim dan penerima, dan sebagai *pre-amplifier* jika ditempatkan sebelum *photodetector* (Rachman, 2008).

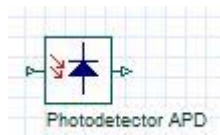


Gambar 4.7 Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)

Sumber: Optiwave (2008).

### i. **Photodetector APD**

Pada sisi penerima, sinyal informasi diterima oleh *photodetector* APD dimana terjadi proses konversi dari sinyal optik menjadi sinyal elektrik. Penelitian ini menggunakan *photodetector* APD karena rata-rata penerima APD memiliki sensitivitas 10 dB lebih besar daripada penerima PIN. Gambar komponen dapat dilihat pada gambar 4.8:

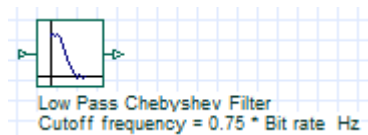


Gambar 4.8 Photodetector APD

Sumber: Optiwave (2008).

### j. **Low Pass Filter**

*Low pass filter* berfungsi menyaring sinyal keluaran untuk menghilangkan *noise* frekuensi tinggi. Gambar komponen dapat dilihat pada gambar 4.9:

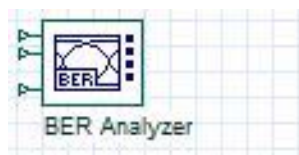


Gambar 4.9 Low Pass Filter

Sumber: Optiwave (2008).

### k. **BER Analyzer**

*BER analyzer* merupakan komponen untuk menghitung dan menampilkan nilai *bit error rate* dan *Q-factor* pada sistem secara otomatis. Gambar komponen dapat dilihat pada gambar 4.10:



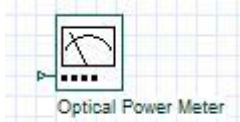
Gambar 4.10 BER Analyzer

Sumber: Optiwave (2008).

### l. **Power Meter Visualizer**

*Power meter visualizer* digunakan untuk menampilkan nilai daya pada sistem. Ada dua jenis *power meter* yang digunakan pada penelitian ini yaitu *optical power meter* dan *electrical power meter*. *Optical power meter* diletakkan pada keluaran *modulator* yang berupa sinyal optik

dan menampilkan nilai daya masukan. *Electrical power meter* diletakkan pada keluaran LPF dan menampilkan nilai daya output. Gambar komponen dapat dilihat pada gambar 4.11:



Gambar 4.11 Komponen Power Meter

Sumber: Optiwave (2008).

## 4.2 Prosedur Pengambilan Data

Dalam prosedur pengambilan data pada penelitian ini, diawali dengan persiapan perangkat simulasi, yaitu *software Optisystem 7.0*. Tahap selanjutnya adalah menyusun konfigurasi sistem komunikasi serat optik pada *Optisystem*. Selanjutnya merangkai sistem komunikasi serat optik sesuai dengan blok diagram yang ditunjukkan pada gambar 3.3. Rangkaian sistem dibuat sesuai dengan komponen yang dibutuhkan dan divariasikan sesuai dengan diagram alir rencana penelitian pada gambar 3.4 dan 3.5. pada penelitian ini, komponen pada sistem komunikasi serat optik menggunakan variasi *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps, *Line coding* NRZ dan RZ, serta *modulator* eksternal yang akan digunakan yaitu *Mach-Zehnder Modulator* dan *Electroabsorption Modulator*. Kombinasi desain simulasi sistem komunikasi serat optik dengan variasi tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2

Kombinasi Desain Simulasi Sistem Komunikasi Serat Optik

A	B	C	D	E	F	G
1	MZM	10 Gbps	1550.12 nm	NRZ	CW LASER	Single mode fiber
2			1558.98 nm	NRZ	CW LASER	Single mode fiber
3			1550.12 nm	RZ	CW LASER	Single mode fiber
4			1558.98 nm	RZ	CW LASER	Single mode fiber
5		40 Gbps	1550.12 nm	NRZ	CW LASER	Single mode fiber
6			1558.98 nm	NRZ	CW LASER	Single mode fiber
7			1550.12 nm	RZ	CW LASER	Single mode fiber
8			1558.98 nm	RZ	CW LASER	Single mode fiber
9	EAM	10 Gbps	1550.12 nm	NRZ	CW LASER	Single mode fiber
10			1558.98 nm	NRZ	CW LASER	Single mode fiber
11			1550.12 nm	RZ	CW LASER	Single mode fiber

12			1558.98 nm	RZ	CW LASER	Single mode fiber
13		40 Gbps	1550.12 nm	NRZ	CW LASER	Single mode fiber
14			1558.98 nm	NRZ	CW LASER	Single mode fiber
15			1550.12 nm	RZ	CW LASER	Single mode fiber
16			1558.98 nm	RZ	CW LASER	Single mode fiber

Keterangan table 4.2:

A= urutan kombinasi desain simulasi SKSO

B= variasi modulasi eksternal

C= *bit rate* yang digunakan (Gbps)

D= panjang gelombang

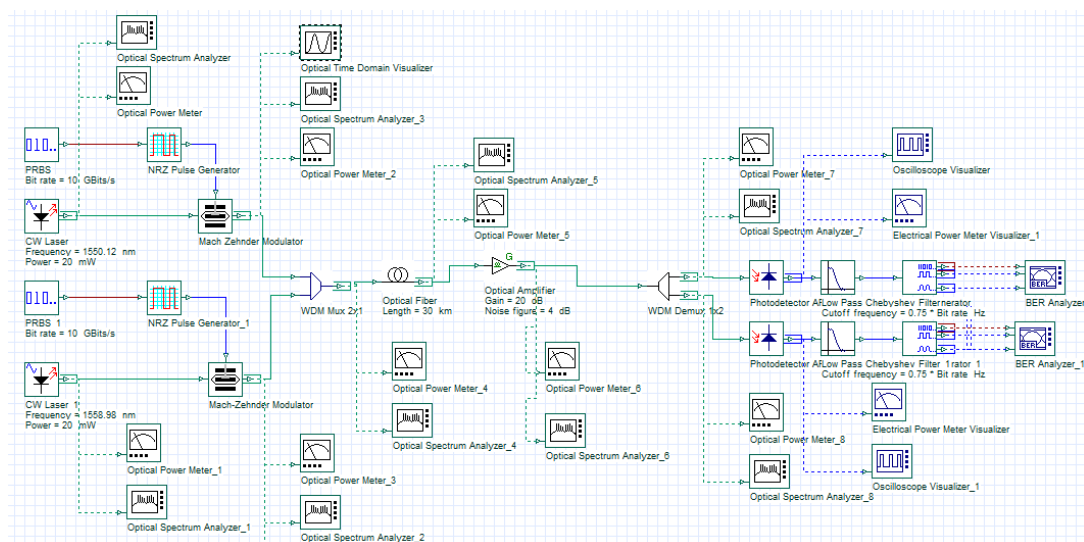
E= variasi *line coding*

F= sumber optik

G= media transmisi

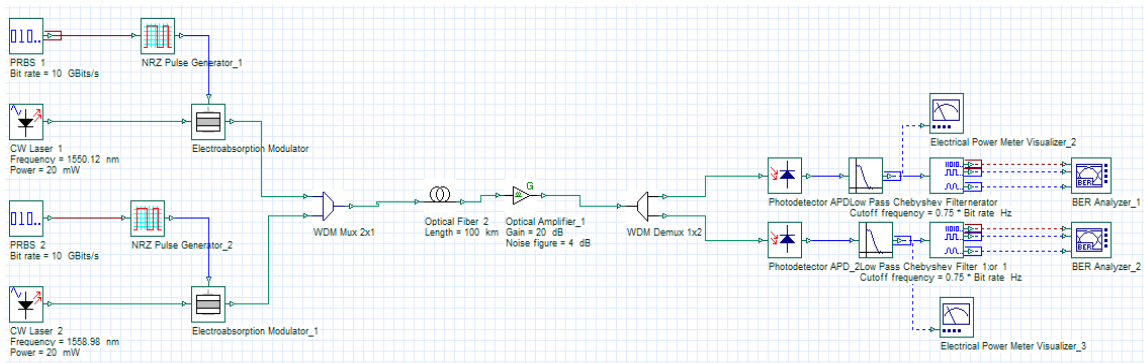
#### 4.2.1 Konfigurasi Rangkaian Sistem Komunikasi Serat Optik dengan menggunakan *Software Optisystem 7.0*

Pada sub sub bab ini akan menunjukkan bentuk desain simulasi pada *software Optisystem* yang telah dirancang dan di kombinasikan setiap komponen pada Tabel 4.2. Cara kerja sistem komunikasi serat optik juga dijelaskan pada bagian ini. Bentuk desain simulasi *software Optisystem 7.0* akan ditunjukkan pada gambar 4.12 dan gambar 4.13.



Gambar 4.12 Konfigurasi sistem komunikasi serat optik dengan menggunakan *Mach-Zehnder Modulator*

Sumber: *Optisystem 7.0*



**Gambar 4.13** Konfigurasi sistem komunikasi serat optik dengan *Electroabsorbtion Modulator*  
 Sumber: *Optisystem 7.0*

Pada konfigurasi yang tertera pada gambar 4.12 dan 4.13 menggunakan PRBS sebagai pembangkit sinyal informasi. Secara definisi, *pseudo-random* menunjukkan bahwa pola tidak benar-benar acak, tetapi hanya seolah-olah acak. Sinyal informasi yang dibangkitkan pola acak dengan panjang tertentu dan pola akan berulang dengan sendirinya setelah setiap panjang pola. Sinyal informasi merupakan sinyal analog berupa suara, data, dan video. Sinyal analog tersebut diubah menjadi data digital melalui proses PCM (*Pulse Code Modulation*) atau *Delta Modulation*.

Data digital yang dihasilkan dari proses tersebut berupa biner. Dalam tiap pola bit, kombinasi bit harus seacak mungkin untuk mensimulasikan grafik data digital secara actual. Pola bit yang semakin panjang maka akan menghasilkan jarak yang lebih sempit antar garis spectral, yang dapat menyebabkan jarak sampling semakin dekat pada domain frekuensi. Kemudian data digital tersebut diubah kedalam bentuk sinyal digital menggunakan *line coding*. *line coding* yang digunakan pada penelitian ini adalah NRZ dan RZ karena dikenal sebagai kandidat komponen dengan harga yang relatif murah untuk menghasilkan kinerja sistem yang optimum.

Sinyal optik dihasilkan oleh *CW Laser* dengan panjang gelombang 1550,12 nm dan 1558,98 nm yang sesuai dengan ITU *Channels for WDM*. Pada penelitian ini sinyal optik diberi daya 20 mW. Pada gambar 4.12, gambar 4.13 digunakan *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps. Sinyal optik yang dihasilkan oleh *CW Laser* berperan sebagai sinyal *carrier*. Sinyal elektrik dari keluaran *line coding* kemudian dimodulasi dengan sinyal optik dari *CW Laser* sebagai sinyal *carrier* pada *Mach Zehnder Modulator* dan *Electroabsorbtion Modulator*. MZM dan EAM merupakan *modulator* eksternal dimana sinyal informasi dan sinyal *carrier* berada di luar perangkat, kemudian proses pemodulasinya berada di sebuah perangkat yang terpisah.



Pada MZM memiliki 2 input dan 1 output, dimana input yang pertama adalah cahaya masuk ke *modulator* kemudian terpisah menjadi 2 jalur dimana pada salah satu jalur tidak terjadi modulasi. Jalur lainnya memiliki elektroda, karena LiNbO<sub>3</sub> adalah sebuah material elektro-optik, saat tegangan ditempatkan bersebrangan dengan pandu gelombang indeks biasanya akan berubah menyebabkan *delay* fasa yang proposional dengan *amplitude* tegangan. Ketika cahaya tersebut digabungkan kembali, dua gelombang tersebut saling mengganggu satu sama lain. Jika dua gelombang sefasa, maka akan terjadi gangguan konstruktif dan output ON (1). Jika tidak sefasa, maka akan terjadi gangguan destruktif dan gelombang akan saling membatalkan satu sama lain, sehingga outputnya OFF (0). Keluaran dari MZM ini ialah sinyal optik yang termodulasi.

Pada EAM bulk semikonduktor, absorpsi disebabkan oleh Bergeraknya elektron ke energi yang lebih rendah seiring dengan bertambahnya medan listrik yang disebabkan oleh kombinasi dari absorpsi *band-to-band* dan proses *tunneling* (*Franz-Keldysh effect*). Absorpsi terjadi pada material semikonduktor saat diaplikasikan medan listrik pada elektroda. Setelah diberikan tegangan pada elektroda, Energi band gap akan menurun sehingga material dapat menyerap gelombang cahaya tersebut. Keluaran dari EAM ini ialah sinyal optik yang termodulasi.

Sinyal tersebut kemudian masuk kedalam *multiplexer*. Dimana fungsi dari *multiplexer* yaitu menggabungkan 2 panjang gelombang yang berbeda sehingga dapat ditransmisikan dalam satu jalur transmisi secara bersamaan. Panjang gelombang yang digunakan yaitu 1550.12 nm dan 1558.98 nm. Setelah di *multiplexer* lalu ditransmisikan pada *single mode fiber*, kemudian sinyal tersebut diperkuat dengan menggunakan EDFA sebesar 20 dB agar sinyal *optic* termodulasi dapat sampai pada *receiver*. Pada penelitian ini menggunakan jenis pre-amplifier dimana, EDFA diletakkan setelah *single mode fiber* dan dekat dengan *receiver*.

Berdasarkan referensi, *bit rate* 10 Gbps bisa mencapai jarak yang lebih jauh dibandingkan dengan 40Gbps. Oleh karena itu, untuk *bit rate* 10 Gbps dilakukan penelitian menggunakan serat optik sepanjang 100 km dengan perubahan jarak spasi 10 km yaitu 10 km, 20 km, 30 km, 40 km, 50 km, 60 km, 70 km, 80 km, 90 km, 100 km. Sedangkan untuk *bit rate* 40 Gbps hanya menggunakan serat *optik* sepanjang 10 km dengan perubahan jarak spasi 1 km yaitu 1 km, 2 km, 3 km, 4 km, 5 km, 6 km, 7 km, 8 km, 9 km, 10 km. Tabel 4.2 menunjukkan variasi jarak yang digunakan dalam penelitian.

Tabel 4.3  
Variasi Jarak

<i>Bit rate</i>	Variasi Jarak (km)	<i>Bit rate</i>	Variasi Jarak (km)
10 Gbps	10	40 Gbps	1
	20		2
	30		3
	40		4
	50		5
	60		6
	70		7
	80		8
	90		9
	100		10

Sinyal kemudian diterima oleh *photodetector* APD. Pada *photodetector* terjadi proses konversi sinyal optik kembali menjadi sinyal elektrik. Semua detektor membutuhkan arus minimum tertentu untuk bisa beroperasi dengan benar. Detektor dengan responsivitas yang besar lebih banyak dimanfaatkan karena membutuhkan daya optik yang lebih kecil. Sinyal elektrik kemudian difilter oleh LPF untuk menghilangkan noise dengan frekuensi tinggi. Pada penelitian ini digunakan *Chebyshev* LPF karena mengalami *ripple* yang kecil, frekuensi cut off yang sangat curam dan juga akan menghasilkan sinyal yang sangat mirip dengan masukannya.

Setelah konfigurasi tersusun secara lengkap dan benar, dilakukan proses kalkulasi untuk mengetahui kinerja dari system. Nilai BER dan *Q-Factor* dapat dilihat pada komponen BER *analyzer*. Komponen BER *analyzer* terhubung pada 3R *generator* dimana guna dari komponen ini adalah untuk mengubah 1 input sinyal elektrik menjadi 3 output sinyal berbeda. Nilai daya masukan dapat dilihat pada komponen *electrical power meter visualizer* pada sisi keluaran LPF. Selanjutnya dilakukan perhitungan loss menggunakan persamaan (2-18) yaitu

$$Loss (dB) = P_{in} - P_{out} \dots\dots\dots (4-1)$$

### 4.3 Hasil Eksperimen dan Pembahasan

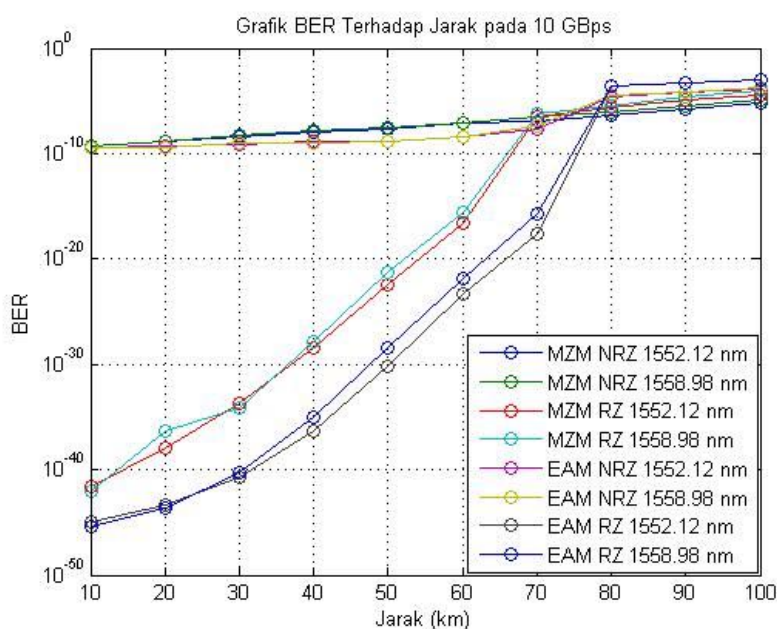
Hasil eksperimen optimasi *bit error rate*, *Q-Factor*, dan loss pada sistem komunikasi serat optik berdasarkan variasi *bit rate*, *line coding*, dan modulator eksternal beserta pembahasannya akan dijabarkan pada sub bab ini. Metode yang digunakan bersifat analisis dan menggunakan data primer dari hasil simulasi dengan *software Optisystem 7.0*. Kombinasi komponen pada

desain telah dijelaskan pada Tabel 4.1. Sedangkan parameter yang digunakan telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya. Analisis performansi sistem yang akan dilakukan meliputi BER,  $Q$ -Factor, dan  $loss$ . Hasil eksperimen ditunjukkan dalam bentuk grafik untuk tiap parameter yang dianalisis.

### 4.3.1 Analisis Performansi Sistem Komunikasi Serat Optik Menggunakan *Bit rate* 10 Gbps

#### 4.3.1.1 BER dengan *Bit rate* 10 Gbps

Dengan menggunakan eksternal modulator *Mach-Zehnder* dan *Electro-absorption modulator*, *line coding* NRZ dan RZ dengan kecepatan 10 Gbps maka didapatkan nilai ber yang dapat dilihat pda gambar 4.14.



Gambar 4.14 Grafik BER dengan *bit rate* 10 Gbps

Sumber: Perhitungan

Dari gambar 4.14, dapat disimpulkan bahwa semakin jauh jarak transmisi maka semakin besar nilai BER. Pada MZM dengan panjang gelombang 1550.12 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai BER terendah yaitu  $6,10 \times 10^{-10}$  dan tertinggi yaitu  $6,5 \times 10^{-10}$  kemudian dengan panjang gelombang 1558.98 nm didapatkan nilai BER terendah yaitu  $5,99 \times 10^{-10}$  dan tertinggi yaitu  $1,19 \times 10^{-5}$ . Pada EAM dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai BER terendah yaitu  $3,4 \times 10^{-10}$  dan tertinggi yaitu  $1,19 \times 10^{-4}$ , sedangkan pada EAM dengan panjang gelombang 1558,98 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai BER terendah yaitu  $3,2 \times 10^{-10}$  dan tertinggi yaitu  $1,66 \times 10^{-4}$ . Dari data hasil percobaan pada jarak

transmisi 10km pada panjang gelombang 1550,12 nm MZM didapatkan nilai  $6,10 \times 10^{-10}$  dan memiliki nilai  $Q$ -Factor sebesar 6,0266. Secara matematis, nilai BER yang dihasilkan dari nilai  $Q$ -Factor dapat dibuktikan melalui persamaan (2-15):

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \dots\dots\dots(4-2)$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{6,0266}{\sqrt{2}}\right) \dots\dots\dots(4-3)$$

$$= 8,3722 \times 10^{-10} \dots\dots\dots(4-4)$$

Persamaan tersebut membuktikan bahwa nilai yang didapatkan dari hasil simulasi mendekati nilai yang didapatkan dari hasil perhitungan.

Dari data hasil percobaan pada jarak transmisi 10km pada panjang gelombang 1550,12 nm EAM didapatkan nilai  $3,4 \times 10^{-10}$  dan memiliki nilai  $Q$ -Factor sebesar 6,1508. Secara matematis, nilai BER yang dihasilkan dari nilai  $Q$ -Factor dapat dibuktikan melalui persamaan (2-15):

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \dots\dots\dots(4-5)$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{6,1508}{\sqrt{2}}\right) \dots\dots\dots(4-6)$$

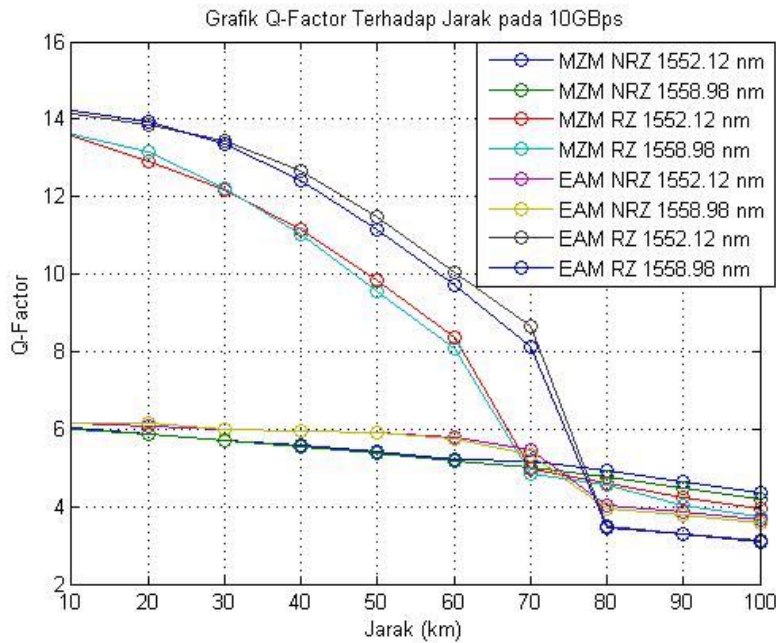
$$= 3,85465 \times 10^{-10} \dots\dots\dots(4-7)$$

Persamaan tersebut membuktikan bahwa nilai yang didapatkan dari hasil simulasi mendekati nilai yang didapatkan dari hasil perhitungan.

Pada MZM dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan RZ didapatkan nilai BER yang terendah adalah  $2,2 \times 10^{-42}$  dan tertinggi adalah  $4,1 \times 10^{-5}$  kemudian pada panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai BER yang terendah adalah  $9,2 \times 10^{-43}$  dan yang tertinggi adalah  $9,02 \times 10^{-5}$ . Pada EAM dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan RZ didapatkan nilai BER yang terendah adalah  $1,18 \times 10^{-45}$  dan tertinggi adalah  $8,9 \times 10^{-4}$  lalu pada panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai BER yang terendah adalah  $3,5 \times 10^{-46}$  dan yang tertinggi adalah  $1,01 \times 10^{-3}$ .

#### 4.3.1.2 $Q$ -Factor dengan Bit rate 10 Gbps

Dengan menggunakan eksternal modulator *Mach-Zehnder* dan *Electro-absorption modulator*, *Line coding* NRZ dan RZ dengan kecepatan 10 Gbps maka didapatkan nilai  $Q$ -Factor yang dapat dilihat pda gambar 4.15.



Gambar 4.15 Grafik Q-Factor dengan *bit rate* 10 Gbps

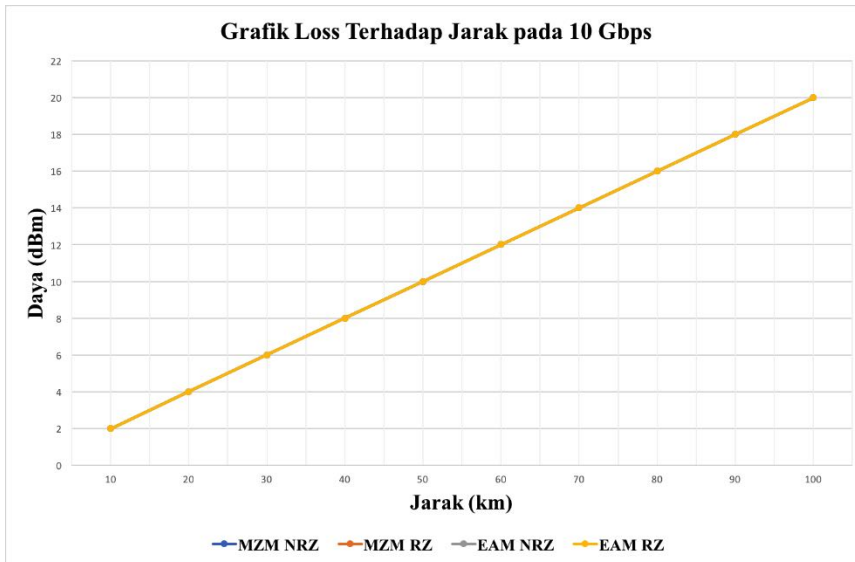
Sumber: Perhitungan

Dari gambar 4.15, dapat disimpulkan bahwa nilai *Q-Factor* berbanding terbalik dengan nilai BER dimana semakin jauh jarak transmisi maka nilai *Q-Factor* akan semakin kecil, karena semakin jauh jarak transmisi maka semakin besar pula *loss* yang terjadi sehingga nilai *Q-Factor* yang dihasilkan semakin kecil. Pada MZM dengan panjang gelombang 1550.12 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai *Q-Factor* terendah yaitu 4,3385 dan tertinggi yaitu 6,0266 kemudian dengan panjang gelombang 1558.98 nm didapatkan nilai *Q-Factor* terendah yaitu 4,2069 dan tertinggi yaitu 5,9925. Pada EAM dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai *Q-Factor* terendah yaitu 3,6692 dan tertinggi yaitu 6,1508, sedangkan pada panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai *Q-Factor* terendah yaitu 3,5818 dan tertinggi yaitu 6,1613.

Pada MZM dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan RZ didapatkan nilai *Q-Factor* yang terendah adalah 3,9294 dan tertinggi adalah 13,5648 kemudian pada panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai *Q-Factor* yang terendah adalah 3,73751 dan yang tertinggi adalah 13,6282. Pada EAM dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan RZ didapatkan nilai *Q-Factor* yang terendah adalah 3,1225 dan tertinggi adalah 14,1270 lalu pada panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai *Q-Factor* yang terendah adalah 3,0861 dan yang tertinggi adalah 14,2128.

### 4.3.1.3 Loss dengan Bit rate 10 Gbps

Dengan menggunakan eksternal modulator *Mach-Zehnder* dan *Electro-absorption modulator*, *line coding* NRZ dan RZ dengan kecepatan 10 Gbps maka didapatkan *loss* yang dapat dilihat pada gambar 4.16.



Gambar 4.16 Grafik *Loss* dengan *bit rate* 10 Gbps  
Sumber: Perhitungan (2018).

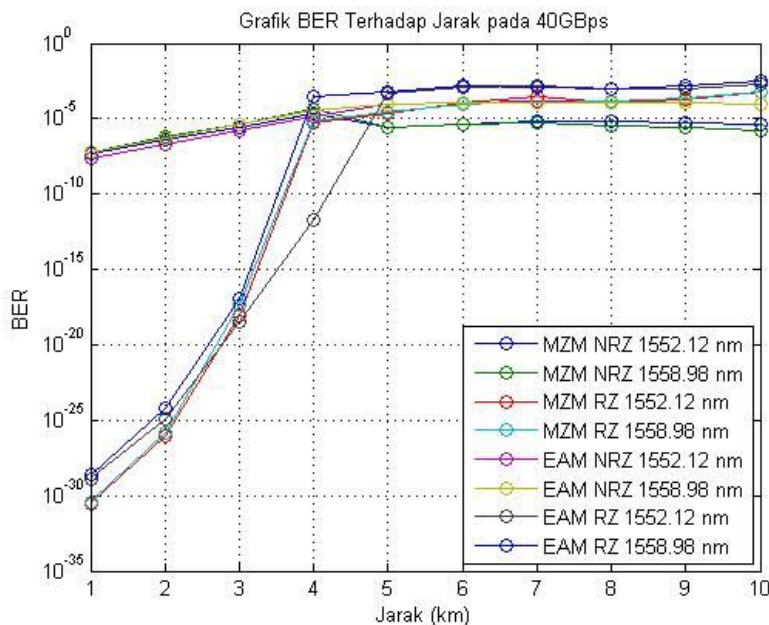
Dari gambar 4.16, dapat disimpulkan bahwa semakin jauh jarak transmisi maka *loss* yang terjadi semakin besar. Pada penelitian ini menggunakan redaman 0,2 dB/km dan akan di transmisikan pada jarak 10 km, maka *loss* yang terjadi adalah 2 dB. Pada MZM dengan panjang menggunakan NRZ didapatkan nilai *loss* terendah yaitu 2 dB pada jarak 10 km dan tertinggi pada jarak 100 km yaitu 19,999 dB. Pada EAM dengan menggunakan NRZ didapatkan nilai *loss* terendah yaitu 2 dB pada jarak 10 km dan tertinggi pada jarak 100 km yaitu 20 dB.

Pada MZM dengan menggunakan RZ didapatkan nilai *loss* yang terendah pada 1 km adalah 2 dB dan tertinggi pada jarak 10 km adalah 20 dB. Pada EAM menggunakan RZ didapatkan nilai *loss* yang terendah pada 1 km adalah 2 dB dan tertinggi pada jarak 100 km adalah 20 dB.

### 4.3.2 Analisis Performansi Sistem Komunikasi Serat Optik Menggunakan *Bit rate* 40 Gbps

#### 4.3.2.1 BER dengan *Bit rate* 40 Gbps

Dengan menggunakan eksternal modulator *Mach-Zehnder* dan *Electro-absorption modulator*, *line coding* NRZ dan RZ dengan kecepatan 40 Gbps maka didapatkan nilai BER yang dapat dilihat pada gambar 4.17.



Gambar 4.17 Grafik BER dengan *bit rate* 10 Gbps

Sumber: Perhitungan (2018).

Dari gambar 4.17, dapat disimpulkan bahwa semakin jauh jarak transmisi maka semakin besar nilai BER. Pada MZM dengan panjang gelombang 1550.12 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai BER terendah yaitu  $4,53 \times 10^{-8}$  dan tertinggi yaitu  $4,66 \times 10^{-6}$  kemudian dengan panjang gelombang 1558.98 nm didapatkan nilai BER terendah yaitu  $5,73 \times 10^{-8}$  dan tertinggi yaitu  $1,55 \times 10^{-6}$ . Pada EAM dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai BER terendah yaitu  $2,48 \times 10^{-8}$  dan tertinggi yaitu  $9,03 \times 10^{-5}$ , sedangkan pada EAM dengan panjang gelombang 1558,98 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai BER terendah yaitu  $6,49 \times 10^{-8}$  dan tertinggi yaitu  $9,64 \times 10^{-5}$ . Dari data hasil percobaan pada jarak transmisi 10km pada panjang gelombang 1550,12 nm MZM didapatkan nilai  $4,53 \times 10^{-8}$  dan memiliki nilai *Q-Factor* sebesar 5,3125. Secara matematis, nilai BER yang dihasilkan dari nilai *Q-Factor* dapat dibuktikan melalui persamaan (2-15):

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \dots\dots\dots(4-8)$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{5,3125}{\sqrt{2}}\right) \dots\dots\dots(4-9)$$

$$= 5,418 \times 10^{-8} \dots\dots\dots(4-10)$$

Persamaan tersebut membuktikan bahwa nilai yang didapatkan dari hasil simulasi mendekati nilai yang didapatkan dari hasil perhitungan.

Dari data hasil percobaan pada jarak transmisi 10km pada panjang gelombang 1550,12 nm EAM didapatkan nilai  $2,4 \times 10^{-8}$  dan memiliki nilai *Q-Factor* sebesar 5,4385. Secara matematis, nilai BER yang dihasilkan dari nilai *Q-Factor* dapat dibuktikan melalui persamaan (2-15):

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \dots\dots\dots(4-11)$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{5,4385}{\sqrt{2}}\right) \dots\dots\dots(4-12)$$

$$= 2,687 \times 10^{-8} \dots\dots\dots(4-13)$$

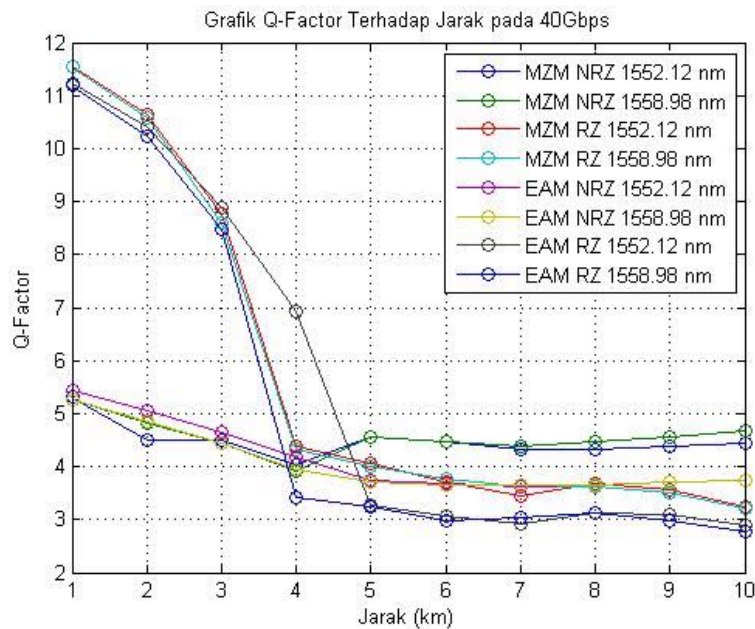
Persamaan tersebut membuktikan bahwa nilai yang didapatkan dari hasil simulasi mendekati nilai yang didapatkan dari hasil perhitungan.

Pada MZM dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan RZ didapatkan nilai BER yang terendah adalah  $3,00 \times 10^{-31}$  dan tertinggi adalah  $5,7 \times 10^{-4}$  kemudian pada panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai BER yang terendah adalah  $3,99 \times 10^{-31}$  dan yang tertinggi adalah  $5,83 \times 10^{-4}$ . Pada EAM dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan RZ didapatkan nilai BER yang terendah adalah  $1,28 \times 10^{-29}$  dan tertinggi adalah  $1,87 \times 10^{-3}$  lalu pada panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai BER yang terendah adalah  $2,45 \times 10^{-29}$  dan yang tertinggi adalah  $2,81 \times 10^{-3}$ .

#### 4.3.2.2 *Q – Factor* dengan *Bit rate* 40 Gbps

Dengan menggunakan eksternal modulator *Mach-Zehnder* dan *Electro-absorption modulator*, *Line coding* NRZ dan RZ dengan kecepatan 40 Gbps maka didapatkan nilai *Q-Factor* yang dapat dilihat pda gambar 4.18.





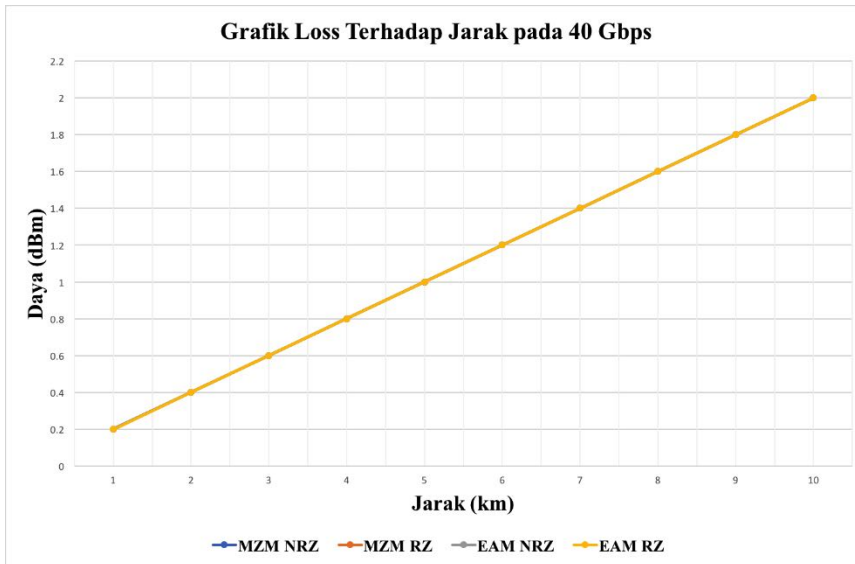
Gambar 4.18 Grafik Q-Factor dengan *bit rate* 40 Gbps  
Sumber: perhitungan (2018).

Dari gambar 4.18, dapat disimpulkan bahwa nilai *Q-Factor* berbanding terbalik dengan nilai BER dimana semakin jauh jarak transmisi maka nilai *Q-Factor* akan semakin kecil, karena semakin jauh jarak transmisi maka semakin besar pula *loss* yang terjadi sehingga nilai *Q-Factor* yang dihasilkan semakin kecil. Pada MZM dengan panjang gelombang 1550.12 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai *Q-Factor* terendah yaitu 4,4323 dan tertinggi yaitu 5,3125 kemudian dengan panjang gelombang 1558.98 nm didapatkan nilai *Q-Factor* terendah yaitu 4,6638 dan tertinggi yaitu 5,2681. Pada EAM dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai *Q-Factor* terendah yaitu 3,7430 dan tertinggi yaitu 5,4385, sedangkan pada panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai *Q-Factor* terendah yaitu 3,7272 dan tertinggi yaitu 5,26529.

Pada MZM dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan RZ didapatkan nilai *Q-Factor* yang terendah adalah 3,2389 dan tertinggi adalah 11,5607 kemudian pada panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai *Q-Factor* yang terendah adalah 3,2274 dan yang tertinggi adalah 11,5365. Pada EAM dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan RZ didapatkan nilai *Q-Factor* yang terendah adalah 2,8991 dan tertinggi adalah 11,2391 lalu pada panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai *Q-Factor* yang terendah adalah 2,7678 dan yang tertinggi adalah 11,1817.

### 4.3.2.3 Loss dengan Bit rate 40 Gbps

Dengan menggunakan eksternal modulator *Mach-Zehnder* dan *Electro-absorption modulator*, line coding NRZ dan RZ dengan kecepatan 40 Gbps maka didapatkan *loss* yang dapat dilihat pada gambar 4.19.



Gambar 4.19 Grafik Q-Factor dengan bit rate 10 Gbps  
Sumber: perhitungan (2018).

Dari gambar 4.19, dapat disimpulkan bahwa semakin jauh jarak transmisi maka *loss* yang terjadi semakin besar. Pada penelitian ini menggunakan redaman 0,2 dB/km dan akan di transmisikan pada jarak 1 km, maka *loss* yang terjadi adalah 0,2 dB. Pada MZM dengan panjang menggunakan NRZ didapatkan nilai *loss* terendah yaitu 0,201 dB pada jarak 1 km dan tertinggi pada jarak 10 km yaitu 2 dB. Pada EAM dengan menggunakan NRZ didapatkan nilai *loss* terendah yaitu 0,201 dB pada jarak 1 km dan tertinggi pada jarak 10 km yaitu 2 dB.

Pada MZM dengan menggunakan RZ didapatkan nilai *loss* yang terendah pada 1 km adalah 0,2 dB dan tertinggi pada jarak 10 km adalah 2 dB. Pada EAM menggunakan RZ didapatkan nilai *loss* yang terendah pada 1 km adalah 0,2 dB dan tertinggi pada jarak 10 km adalah 2 dB.