

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada Bab IV ini akan menjelaskan hasil dan pembahasan dari penelitian. Data yang akan dibahas merupakan hasil dari pengaruh jarak transmisi terhadap *bit rate* sistem *Radio over Fiber* (RoF) dan pengaruh peletakan kompensator dispersi *Fiber Bragg Grating* (FBG) terhadap kinerja sistem RoF dilihat dari BER, *Q-factor* dan *loss*. Penulisan Bab IV meliputi konfigurasi perangkat penelitian, prosedur pengambilan data, data hasil penelitian dan pembahasan.

4.1 Konfigurasi Perangkat Penelitian

Pada sub bab 4.1 ini akan membahas komponen-komponen yang digunakan dalam penelitian. Adapun komponen-komponen yang digunakan dalam penelitian *Pseudorandom Bit Sequence Generator*, *Line Coding*, *Sine Generator*, *Electrical Adder*, *Continuous Wave* laser, *Mach-Zehnder Modulator*, Serat Optik, *Erbium Doped Fiber Amplifier*, *Fiber Bragg Grating*, *Photodetector APD*, *low pass bessel filter*, *Power Meter Visualizer*, BER analyzer, dan *Eye Diagram Analyzer*. Spesifikasi dan penjelasan dari masing-masing komponen penelitian adalah sebagai berikut:

4.1.1 Pseudorandom Bit Sequence Generator

Pseudo Random Bit Sequence Generator digunakan untuk membangkitkan urutan biner *pseudorandom* sebagai salah satu sinyal uji dalam suatu proses identifikasi dinamis, urutan bit ini dirancang untuk pendakatan karakteristik dari data acak, Sebuah PRBS mirip dengan urutan bilangan acak secara nyata, tetapi dapat juga disebut semu (*pseudo*) karena deterministik. *Bit rate* yang dibangkitkan yaitu 5 Gbps dan 10 Gbps.

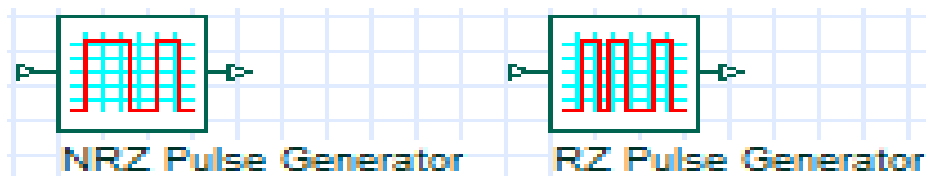


Gambar 4.1 Pseudo Random Bit Sequence Generator

(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.2 Line Coding

Line Coding adalah proses konversi data digital ke sinyal digital. data digital dalam bentuk teks, video, audio, angka, gambar dan grafik di simpan dalam urutan bit, urutan bit ini akan di konversi menjadi sinyal digital dan *line coding* yang digunakan adalah RZ dan NRZ.

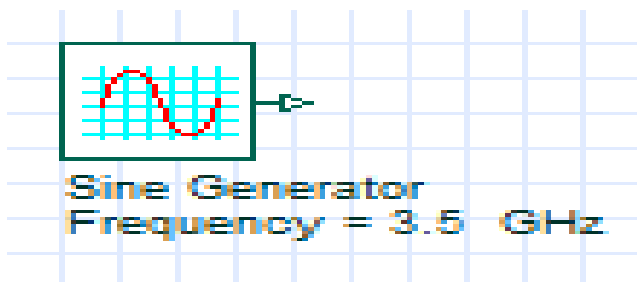


Gambar 4.2 Line Coding

(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.3 Sine Generator

Sine Generator berfungsi untuk membangkitkan sinyal radio frekuensi *mm-wave*. Sinyal radio frekuensi yang dibangkitkan ada 3.5 GHz.

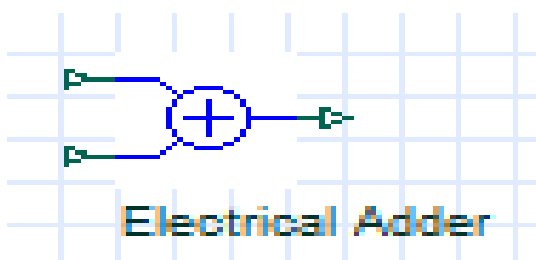


Gambar 4.3 Sine Generator

(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.4 Electrical Adder

Electrical Adder berfungsi untuk memodulasi secara elektrik antara radio frekuensi *Carrier* yang dihasilkan dari *Sine Generator* dan sinyal elektrik yang dihasilkan dari *NRZ Pulse Generator* atau *RZ Pulse Generator*, kemudian *output* dari komponen ini digunakan dimodulasikan di *Mach-Zehnder Modulator*



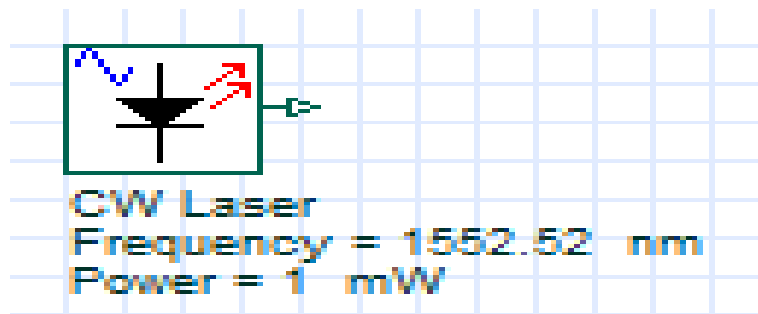
Gambar 4.4 Electrical Adder

(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.5 Continous Wave (CW) laser

Sumber optik yang digunakan adalah *Continous Wave (CW)* laser. Pemilihan CW laser dikarenakan berkas sinar yang lebih sempit dibandingkan LED dan dalam

pengoperasiannya, output dari laser relative konsisten terhadap waktu. CW laser yang digunakan dengan menggunakan panjang gelombang 1552.52 nm dengan daya 1 mW.

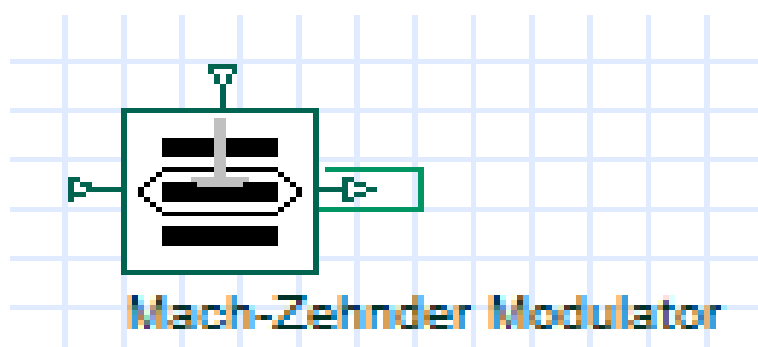


Gambar 4.5 Continuous Wave (CW) laser

(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.6 Mach-Zehnder Modulator

Mach-Zehnder Modulator merupakan sebuah interferometer yang bekerja menurut prinsip elektro-optik, dimana medan listrik yang diberikan dapat mempengaruhi karakteristik cahaya yang melewatinya. Modulator optik interferometer *Mach-Zehnder* adalah modulator yang dapat digunakan pada sistem komunikasi optik yang bekerja berdasarkan prinsip interferometer. *Mach-Zehnder* membagi dua sinyal yang masuk ke dalam dua lengan yang identik panjang dan bentuknya. Indeks bias efektif *waveguide* akan berubah, berbanding lurus dengan perubahan medan listrik yang dikenakan pada lengan *Mach - Zehnder*. Perubahan medan listrik juga berpengaruh secara linear terhadap perubahan fasa cahaya yang melewati interferometer *Mach-Zehnder* tersebut. Dengan demikian, fasa cahaya dapat diubah-ubah oleh medan listrik eksternal. Kedua sinar tersebut kemudian digabungkan kembali secara koheren pada bagian akhir *waveguide*.

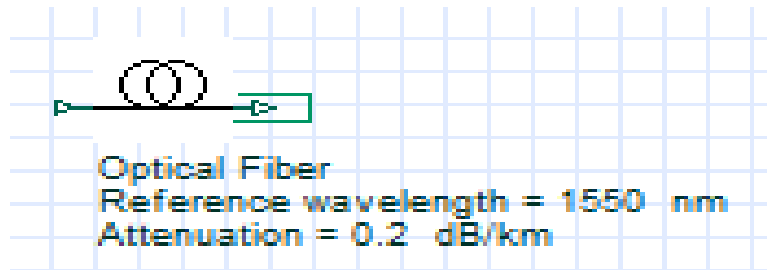


Gambar 4.6 Mach-Zehnder Modulator (MZM)

(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.7 Serat Optik

Serat optik berfungsi sebagai medium untuk mentransmisikan sinyal optik. Jenis serat optik yang digunakan pada sistem ini adalah serat optik *Single Mode Fiber* (SMF) dengan atenuasi bernilai 0,2 dB/km dan *reference wavelength* bernilai 1550 nm.



Gambar 4.7 Serat Optik

(Sumber: Optiwave, 2008)

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.

Tabel 4.1 Spesifikasi komponen yang digunakan

Parameter	Definisi	Nilai
t_{dm}	Koefisien dispersi bahan	0,8 ps/(nm.km)
$\Delta\lambda$	Lebar spektrum sumber optik	1 nm
n_1	Nilai indeks bias inti	1,48
n_2	Nilai indeks bias selubung	1,46
c	Kecepatan cahaya di ruang hampa	3×10^8 m/s
λ	Panjang gelombang	1550 nm
a	Jari-jari inti serat optik	7 μ m

Nilai dispersi material per satuan panjang serat optik sesuai persamaan (1):

$$t_{\text{material}} = t_{dm} \times \Delta\lambda$$

$$t_{\text{material}} = 0.8 \times 1 = 0.8 \text{ ps/km}$$

Dispersi pandu gelombang sesuai dengan persamaan (2):

$$t_{\text{waveguide}} = \frac{(n_1 - n_2) t_{wg} \Delta\lambda}{c \lambda}$$

t_{wg} = koefisien disperse tanpa dimensi

Berdasarkan persamaan (3):

$$t_{wg} = \frac{4(1-\ln v)}{v^2}$$

V = frekuensi ternormalisasi, sesuai dengan persamaan (4):

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$v = \frac{2\pi}{1550 \times 10^{-9}} 7 \times 10^{-6} \sqrt{1.48^2 - 1.46^2} = 6.88073$$

Maka koefisien dispersi tanpa dimensi:

$$t_{wg} = \frac{4(1-\ln 6.88073)}{6.88073^2} = 0.07846$$

Sehingga nilai dispersi pandu gelombang per satuan panjang:

$$t_{waveguide} = \frac{(1.48-1.46)0.07846.1 \times 10^{-9}}{3 \times 10^8.1550 \times 10^{-9}} = 0.00337 \text{ ps/km}$$

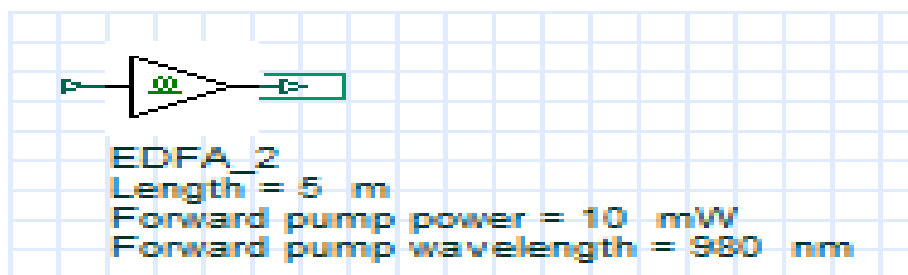
Karena pada penelitian ini digunakan serat optik jenis single mode, maka tidak terjadi disperse intermodal, $t_{intermodal} = 0 \text{ ps/km}$. Nilai disperse total per satuan panjang serat optik sesuai dengan persamaan (4):

$$t_{fiber} = \sqrt{t_{material}^2 + t_{waveguide}^2 + t_{intermodal}^2}$$

$$t_{fiber} = \sqrt{(0.8^2 \times 10^{-12})^2 + (0.00337 \times 10^{-12})^2 + 0} = 0.8 \text{ ps/km}$$

4.1.8 Erbium Doped Fiber Amplifier

Pada penelitian ini *repeater* yang digunakan adalah *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA) yang berfungsi untuk menjaga tingkat daya infrmasi yang dikirim agar dapat terdeteksi dengan baik. 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*. EDFA yang digunakan menggunakan laser *pump* daya 10 mW dan panjang gelombang 980 nm.



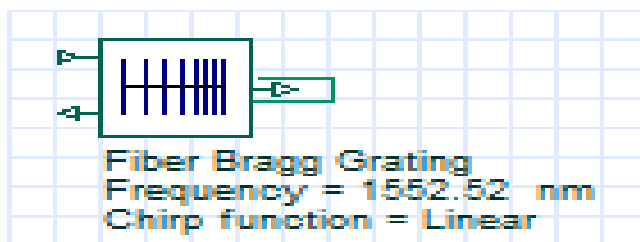
Gambar 4. 8 Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)

(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.9 Fiber Bragg Grating

Kompensator dispersi yang digunakan pada penelitian ini ialah *chirped Fiber Bragg Grating*. Pada *chirped* FBG, beberapa perubahan dibuat pada periode kisi yang mengakibatkan perubahan pada respon terhadap panjang gelombang berbeda. Sebagaimana periode kisi berubah di sepanjang sumbunya, panjang gelombang berbeda dipantulkan oleh bagian yang berbeda dari kisi sehingga mengalami *delay* dengan waktu yang berbeda. Konsekuensinya adalah kompresi pada pulsa yang mengalami pelebaran dan sesuai untuk mengkompensasi dispersi kromatik pada jaringan komunikasi.

untuk mengurangi terjadinya pelebaran pulsa akibat dispersi yang terjadi di sepanjang serat optik, pada penelitian ini menggunakan kompensator dispersi *Fiber Bragg Grating* (FBG), pada penelitian ini digunakan *Chirped* FBG dimana kisi-kisi dengan jumlah periode indeks bias tidak seragam sepanjang serat optik dengan panjang gelombang 1552,52 nm dan peletakan *Chirped* FBG ini akan divariasikan terhadap jarak transmisi.

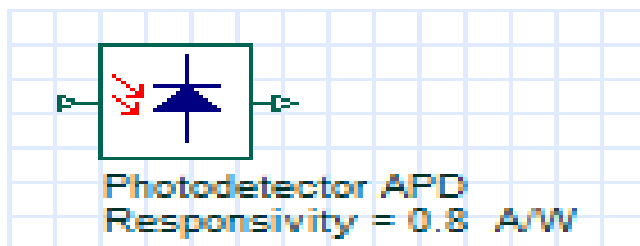


Gambar 4.9 Fiber Bragg Grating (FBG)

(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.10 Photodetector APD

Photodetector yang berfungsi untuk konversi sinyal optik menjadi sinyal elektrik. *Photodetector* yang digunakan adalah *Avalanche Photodiode* (APD) karena memiliki responsivitas yang jauh lebih besar dibandingkan *Positive Intrinsic Negative* (PIN) dan membutuhkan daya optik yang lebih kecil dibandingkan *Positive Intrinsic Negative* (PIN). APD yang digunakan adalah *Indium Gallium Arsenide* (InGaAs) karena rendah *error* dan bagus digunakan pada panjang gelombang 1550 nm.

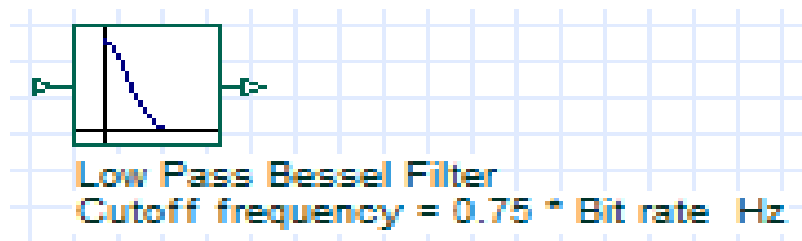


Gambar 4.10 Photodetector APD

(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.11 Low Pass Bessel Filter

Salah satu jenis LPF adalah *Bessel LPF*. Filter ini berfungsi untuk menghilangkan *noise* dengan frekuensi tinggi, dan alasan menggunakan *Bessel LPF* karena bentuk gelombang keluaran tidak akan mengalami *overshoot* dan akan sangat mirip dengan sinyal masukannya.

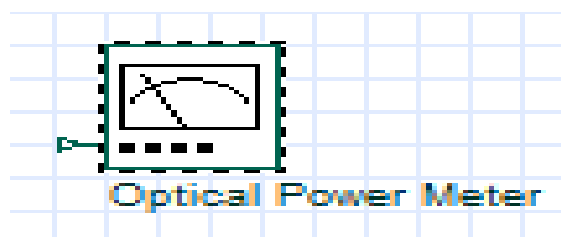


Gambar 4.11 Low Pass Bessel Filter (LPF)

(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.12 Optical Power Meter

Power meter digunakan untuk menampilkan nilai daya pada sistem. *Power meter* yang digunakan pada penelitian ini yaitu *optical power meter* (OPM), karena daya yang ingin diukur adalah daya ketika sinyal ditransmisikan pada medium serat optik. OPM diletakkan pada keluaran modulator untuk menampilkan daya *input* dan diletakkan pada keluaran serat optik (pada rumusan masalah pertama) / pada keluaran EDFA (untuk rumusan masalah kedua) yang bertujuan untuk menampilkan nilai daya *output*.



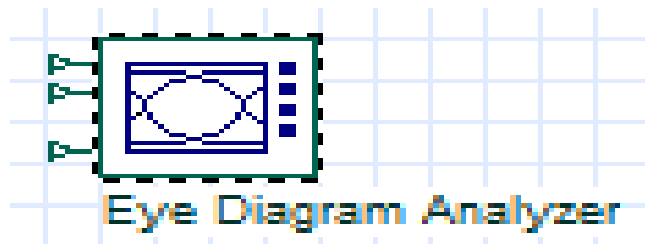
Gambar 4.12 Optical Power Meter Visualizer

(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.14 Eye Diagram Analyzer

Komponen ini berfungsi untuk menampilkan *eye diagram*. *Eye diagram* adalah parameter untuk mengetahui kualitas dari sinyal pada *domain* digital. Nama *eye diagram* diambil karena tampilannya yang mirip dengan mata manusia. Tampilan ini dihasilkan dari melapiskan *waveform* yang berturut – turut untuk membentuk gambar yang tergabung. *Eye*

diagram ini digunakan untuk melihat sinyal digital yang bertujuan untuk mengenali efek distorsi dan menemukan sumbernya.

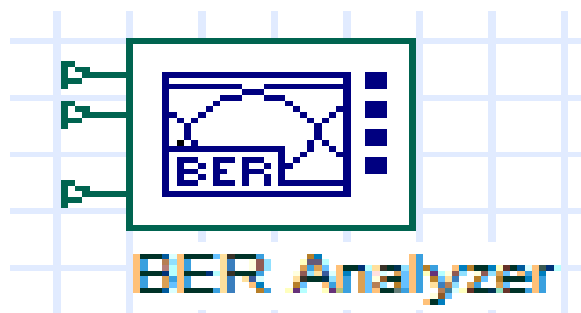


Gambar 4.13 Eye Diagram Analyzer

(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.15 Bit Error Rate Analyzer

BER *analyzer* adalah alat untuk mengukur nilai BER yang berbasis pada algoritma *gaussian* pada transmisi dari rentetan pendek dari *bit – bit*. Alat ini juga dapat mengukur nilai *Q-factor*.



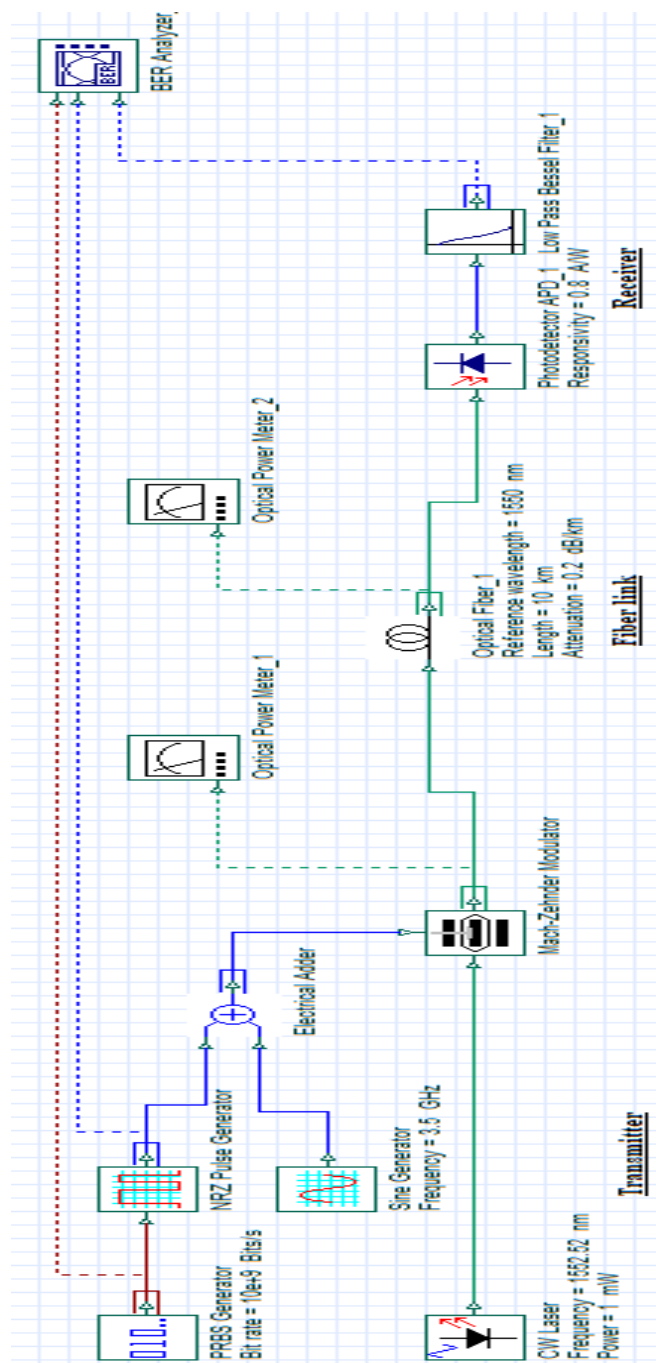
Gambar 4.14 Bit Error Rate (BER) Analyzer

(Sumber: Optiwave, 2008)

4.2 Prosedur Pengambilan Data

Pada prosedur pengambilan data, tahapan pertama yang dilakukan adalah mempersiapkan *software OptiSystem*, tahapan kedua adalah menyusun konfigurasi perangkat pada *software OptiSystem*, tahapan ketiga memasukkan nilai variabel spek sesuai *datasheet* dan nilai variasi, tahapan keempat melakukan simulasi dan tahapan yang terakhir didapatkan hasil BER, *Q – factor*, dan Loss.

4.2.1 Simulasi Analisis Pengaruh Jarak Transmisi Terhadap *Bit Rate*



Gambar 4.15 Konfigurasi Simulasi Pengaruh Bit Rate Terhadap Jarak Transmisi

Percobaan pertama adalah penelitian tentang analisis pengaruh jarak transmisi terhadap *bit rate*. Pada bagian *Transmitter* menggunakan pembangkit sinyal biner berupa PRBS Generator. Pada PRBS Generator ini di bangkitkan bit-bit yang berurutan secara acak. *Bit rate* yang digunakan adalah 5 Gbps dan 10 Gbps, selanjutnya *bit rate* yang telah dibangkitkan akan melalui proses konversi dari data digital ke sinyal digital. Data digital dalam bentuk teks, video, audio, angka, gambar dan grafik di simpan dalam urutan bit, urutan bit ini akan di konversi menjadi sinyal digital. Untuk membangkitkan sinyal RF digunakan *sine* generator, dan sinyal RF yang dibangkitkan sebesar 3,5 GHz. Kemudian output dari *sine* generator dan NRZ, RZ *Pulse* Generator ini dimodulasikan secara elektrik pada *electrical adder*. Selanjutnya sumber optik yang digunakan menggunakan *Continuous Wave* Laser (CW Laser) dengan daya input 1 mW dan panjang gelombang 1552,52 nm. Kemudian output dari CW laser dan *electrical adder* dimodulasikan dengan modulator eksternal *Mach-Zehnder Modulator* (MZM), MZM merupakan sebuah interferometer yang bekerja menurut prinsip elektro-optik, dimana medan listrik yang diberikan dapat mempengaruhi karakteristik cahaya yang melewatinya dan *output* yang dihasil MZM adalah sinyal optik yang termodulasi. Kemudian pada bagian medium transmisi sinyal optik ini ditransmisikan melalui serat optik, serat optik yang digunakan adalah Single Mode Fiber (SMF) dengan panjang gelombang 1550 nm, variasi jarak serat optik dari 10 sampai dengan 100 km.

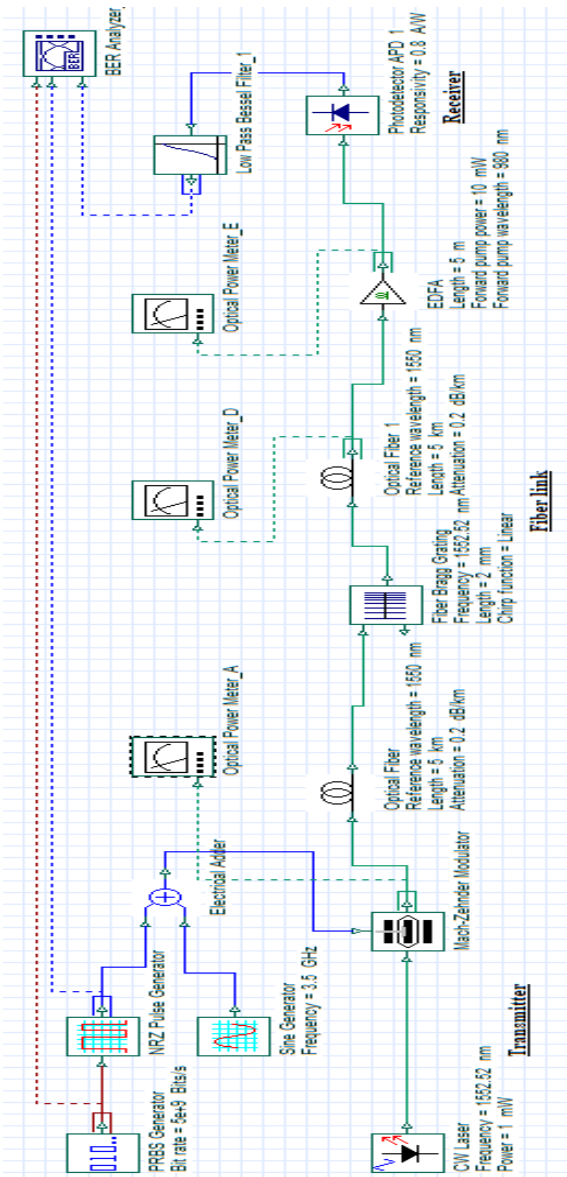
Selanjutnya pada bagian *receiver* digunakan komponen *photodetector* APD. *Photodetector* APD yang digunakan bertipe InGaAs dengan nilai responsivitas 0,8 A/W. Pada komponen ini terjadi koversi dari sinyal optik menjadi sinyal elektrik. Kemudian sinyal elektrik di-*filter* dengan menggunakan komponen *Low Pass Bessel Filter*. Kegunaan dari komponen ini adalah untuk menghilangkan *noise* pada frekuensi tinggi dan pemilihan *Bessel* LPF karena bentuk gelombang keluaran tidak akan mengalami *overshoot* dan akan sangat mirip dengan sinyal masukannya.

Setelah semua konfigurasi sistem telah tersusun, dilakukan proses kalkulasi untuk menganalisa kinerja dari sistem ini. Untuk mengetahui nilai BER dan *Q-factor* digunakan komponen *BER Analyzer* yang terhubung dengan output PRBS Generator, NRZ dan RZ *Pulse* Generator, dan *Bessel* LPF. Sedangkan untuk mengetahui nilai Loss digunakan komponen *Optical Power Meter* (OPM) yang terhubung dengan *output* MZM dan *output* serat optik.

Tabel 4.1 Kombinasi Bit Rate, Line Coding, dan Fiber Optic Link

No	Bit Rate	Line Coding	RF Carrier (GHz)	Fiber Optic Link (Km)
1	5 dan 10 Gbps	NRZ dan RZ	3,5	10
2				20
3				30
4				40
5				50
6				60
7				70
8				80
9				90
10				100

4.2.2 Simulasi Analisis Pengaruh Peletakan kompensator Dispersi FBG



Gambar 4.16 Konfigurasi Simulasi Pengaruh Peletakan Kompensator Dispersi FBG

Percobaan kedua adalah penelitian tentang analisis pengaruh peletakan kompensator dispersi FBG pada sistem transmisi RoF. Pada bagian transmitter PRBS yang dibangkitkan sebesar 5 dan 10 Gbps, lalu *line coding* yang digunakan NRZ dan RZ *Pulse Generator*, kemudian nilai RF yang dibangkitkan 3,5 GHz menggunakan *sine Generator*, lalu menggunakan *electrical adder* untuk modulasi elektrik yang dihubungkan dengan output NRZ, RZ *pulse Generator* dan output dari *sine Generator*, kemudian sumber optik yang digunakan adalah CW laser dengan daya sebesar 1 mW dan panjang gelombang 1552,52 nm, lalu output dari CW laser dan *electrical adder* dimodulasikan dengan modulator eksternal *Mach-Zehnder Modulator* (MZM) yang keluaranya berupa sinyal optik yang termodulasi.

Pada bagian medium transmisi sinyal optik ini ditransmisikan melalui serat optik tipe SMF dengan panjang gelombang 1550 nm dan variasi jarak yang digunakan 10 sampai 100 km dengan jarak pertambahan 10 km., lalu menggunakan kompensator dispersi FBG bertipe *Chirped FBG*. Pada *chirped FBG*, beberapa perubahan dibuat pada periode kisi yang mengakibatkan perubahan pada respon terhadap panjang gelombang berbeda. Sebagaimana periode kisi berubah di sepanjang sumbunya, panjang gelombang berbeda dipantulkan oleh bagian yang berbeda dari kisi sehingga mengalami *delay* dengan waktu yang berbeda. Konsekuensinya adalah kompresi pada pulsa yang mengalami pelebaran dan sesuai untuk mengkompensasi dispersi kromatik pada jaringan komunikasi. Lalu *Chirped FBG* di letakkan persis di tengah – tengah dari panjang total serat optik alasannya dikarenakan walaupun FBG itu lebih baik diletakkan lebih dekat ke arah transmitter, tetapi perlu di perhatikan panjang serat optik setelahnya, berhubungan dengan panjang serat optik yang digunakan cukup jauh maka diletakkan persis di tengah – tengah panjang total serat optik yang digunakan. Kemudian sinyal optik dikuatkan menggunakan *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA) dengan panjang gelombang sinyal *pump* 980 nm dan *pump power* 10 mW yang berfungsi sebagai *Amplifier* sinyal optik yang memperbaiki level daya sinyal, lalu EDFA diletakkan setelah serat optik yang kedua (serat optik setelah peletakan FBG).

Kemudian pada bagian *Receiver* digunakan komponen *photodetector* APD, *Photodetector* APD yang digunakan bertipe InGaAs dengan nilai responsivitas 0,8 A/W, lalu sinyal elektrik di-*filter* dengan menggunakan komponen *Low Pass Bessel Filter*. Untuk mengetahui nilai BER dan *Q-factor* digunakan komponen *BER Analyzer* yang terhubung dengan output PRBS Generator, NRZ dan RZ *Pulse Generator*, dan *Bessel LPF*.

Sedangkan untuk mengetahui nilai Loss digunakan komponen *Optical Power Meter* (OPM) yang terhubung dengan *output* MZM dan *output* serat optik.

Tabel 4.2 Kombinasi Bit Rate, Line Coding, FO Link, dan Jarak Peletakan FBG

No	Bit Rate	Line Coding	RF Carrier (GHz)	Fiber Optic Link (Km)
1	5 dan 10 Gbps	NRZ dan RZ	3,5	10
2				20
3				30
4				40
5				50
6				60
7				70
8				80
9				90
10				100

4.3 Hasil penelitian dan pembahasan

Hasil simulasi pengaruh jarak transmisi terhadap *bit rate* dan pengaruh peletakan kompensator dispersi FBG pada sistem komunikasi RoF beserta pembahasannya akan dijelaskan pada sub bab ini. Data yang didapatkan adalah hasil dari simulasi dan hasil analisis sesuai dengan persamaan yang telah dijelaskan pada Bab II. Kinerja dari sistem ini dianalisis dengan parameter-parameter yang telah dijelaskan yaitu BER, *Q-Factor*, dan Loss. Hasil dari simulasi ditunjukkan dalam bentuk grafik untuk tiap parameter yang dianalisis.

4.3.1 Analisis pengaruh jarak transmisi terhadap *Bit Rate* 5 Gbps

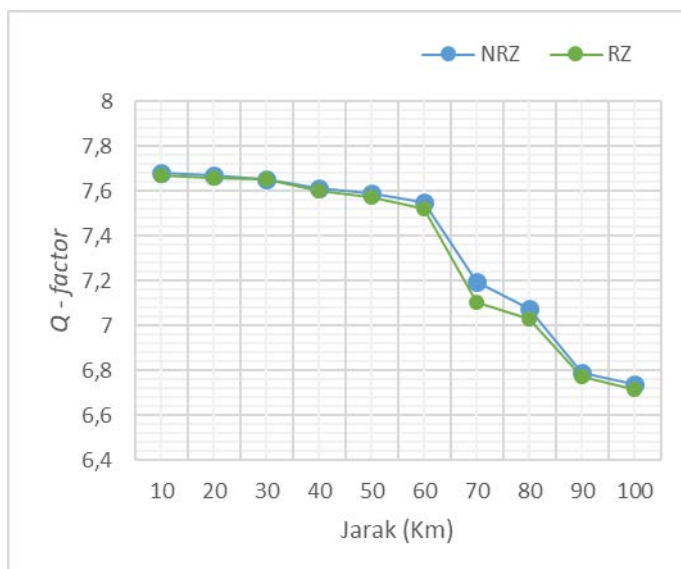
Berikut adalah data hasil simulasi dari pengaruh jarak transmisi terhadap *bit rate* 5 Gbps dilihat dari parameter BER, *Q-Factor*, dan Loss:

Tabel 4.3 Hasil simulasi jarak transmisi terhadap bit rate 5 Gbps line coding NRZ

No	RF Carrier	Line Coding	fiber optic	Max. Q-Factor	Min. BER	P_{in} (dBm)	P_{out} (dBm)	Loss (dBm)
1	3,5 GHz	NRZ	10 km	7,67775	$8,09056 \times 10^{-15}$	-3,231	-5,231	2
2			20 km	7,67081	$8,5447 \times 10^{-15}$		-7,118	4
3			30 km	7,65362	$9,7147 \times 10^{-15}$		-9,579	6
4			40 km	7,61087	$1,3533 \times 10^{-15}$		-11,234	8
5			50 km	7,59038	$1,5307 \times 10^{-14}$		-13,586	10
6			60 km	7,54711	$2,1786 \times 10^{-14}$		-15,717	12
7			70 km	7,19209	$3,1215 \times 10^{-13}$		-17,35	14
8			80 km	7,07457	$7,3997 \times 10^{-13}$		-19,236	16
9			90 km	6,78678	$5,577 \times 10^{-12}$		-21,48	18
10			100 km	6,73654	$7,6185 \times 10^{-12}$		-23,626	20

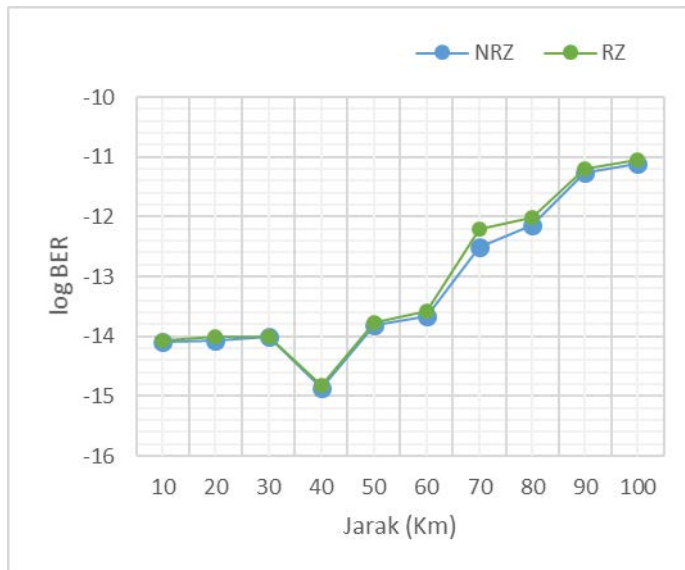
No	RF Carrier	Line Coding	fiber optic	Max. Q-Factor	Min. BER	P_{in} (dBm)	P_{out} (dBm)	Loss (dBm)
1	3,5 GHz	RZ	10 km	7,66844	$8,6717 \times 10^{-15}$	-5,297	-7,297	2
2			20 km	7,65563	$9,6127 \times 10^{-15}$		-9,269	4
3			30 km	7,65157	$9,9218 \times 10^{-15}$		-11,272	6
4			40 km	7,59864	$1,4962 \times 10^{-15}$		-12,947	8
5			50 km	7,57345	$1,7010 \times 10^{-14}$		-15,851	10
6			60 km	7,5186	$2,6916 \times 10^{-14}$		-17,292	12
7			70 km	7,10056	$6,1077 \times 10^{-13}$		-19,212	14
8			80 km	7,03091	$9,5458 \times 10^{-13}$		-21,997	16
9			90 km	6,77063	$6,3044 \times 10^{-12}$		-23,996	18
10			100 km	6,71584	$8,8772 \times 10^{-12}$		-24,907	20

Tabel 4.4 Hasil Simulasi jarak terhadap transmisi bit rate 5 Gbps line coding RZ



Gambar 4.17 Grafik pengaruh jarak terhadap Q-factor

Nilai *Q-factor* (*quality factor*) merupakan gambaran kuantitatif dari kualitas sinyal optik dan berhubungan dengan BER. *Q-factor* dapat digunakan untuk mengevaluasi pelemahan propagasi yang disebabkan oleh dispersi. Berdasarkan gambar 4.17 pada *bit rate* 5 Gbps dengan *line coding* NRZ dan RZ terlihat bahwa semakin jauh jarak transmisi, nilai *Q-factor* semakin kecil. Nilai *Q-factor* tertinggi yang didapatkan *line coding* NRZ dan RZ yaitu pada jarak 10 km sebesar 7,67775 dan 7,66844.

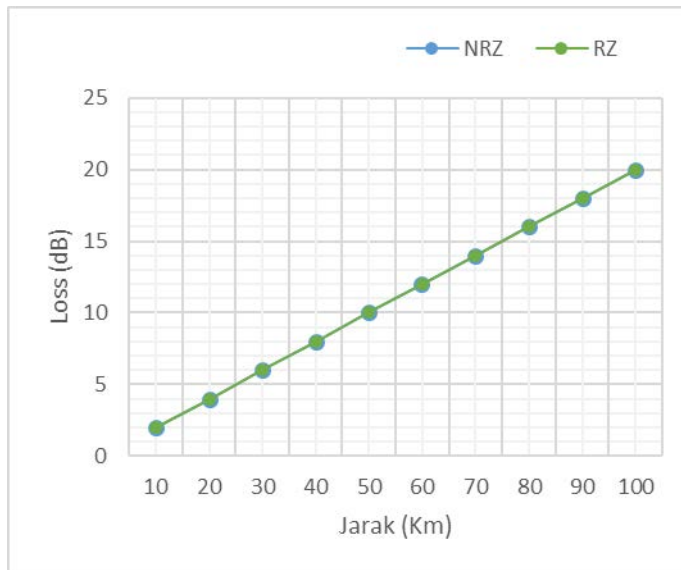


Gambar 4.18 Grafik pengaruh jarak terhadap BER

Nilai BER adalah nilai perbandingan dari nilai bit yang salah saat proses transmisi berlangsung. Dihitung dari sisi penerima, agar diperoleh kualitas sinyal yang baik maka nilai BER harus kecil. Kosekuensi dari nilai BER yang tinggi adalah data yang diterima menjadi tidak sama dengan data yang dikirimkan. Berdasarkan gambar 4.18 semakin jauh jarak maka nilai BER semakin besar. Nilai BER yang tinggi disebabkan dari penambahan jarak yang mengakibatkan pelebaran pulsa sehingga terjadi *Intersymbol Interference (ISI)* yang mengakibatkan bertambahnya *error bit*. Nilai BER yang didapatkan *line coding* NRZ dan RZ pada jarak 10 km yaitu $8,0906 \times 10^{-15}$, dan $8,6717 \times 10^{-15}$.

Dari data hasil percobaan dengan menggunakan format *line coding* NRZ pada panjang serat optik 10 km, didapatkan nilai BER $8,0906 \times 10^{-15}$ dengan nilai *Q-factor* sebesar 7,67775. Secara sistematis, nilai BER yang dihasilkan *Q-factor* dapat dibuktikan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 BER &= \frac{1}{\sqrt{2\pi Q}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi(7,67775)}} e^{-\frac{(7,67775)^2}{2}} \\
 &= 2,28 \times 10^{-14}
 \end{aligned}$$



Gambar 4.19 Grafik pengaruh jarak terhadap Loss

Nilai Loss (dBm) adalah perbedaan daya yang *input* dengan daya *ouput*. Loss terjadi dikarenakan adanya penyerapan sistem dan dispersi pada serat optik. Besarnya loss tergantung dari jarak yang ditempuh dan karakteristik bahan serat optik. Penambahan panjang serat optik yang digunakan berbanding lurus dengan kenaikan loss. Semakin jauh jarak, maka nilai loss semakin besar. Nilai loss terendah yang didapatkan *line coding* NRZ dan RZ pada jarak 10 km yaitu 2 dBm.

Dari data hasil percobaan dengan menggunakan format *line coding* NRZ pada panjang serat optik 10 km, didapatkan nilai loss sebesar 2 dBm. Secara sistematis, nilai loss yang dihasilkan dapat dibuktikan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 \text{Loss (dBm)} &= P_{\text{in}} \text{ (dBm)} - P_{\text{out}} \text{ (dBm)} \\
 &= -3,231 - (-5,231) \\
 &= 2 \text{ dBm}
 \end{aligned}$$

4.3.2 Analisis pengaruh jarak transmisi terhadap Bit Rate 10 Gbps

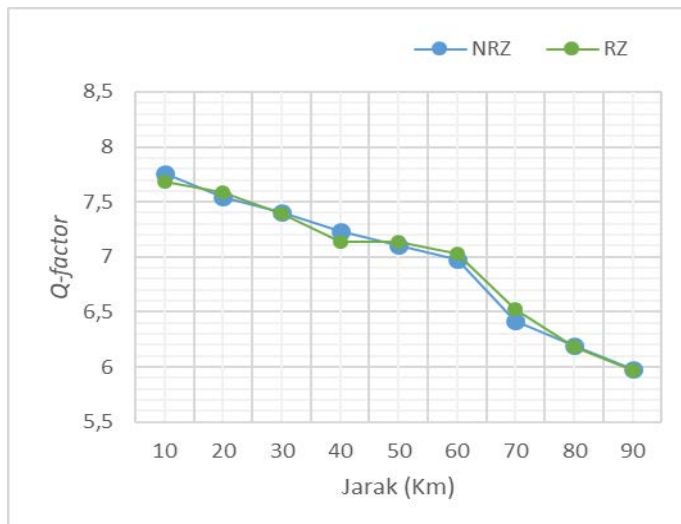
Berikut adalah data hasil simulasi dari pengaruh jarak transmisi terhadap *bit rate* 10 Gbps dilihat dari parameter BER, *Q-Factor*, dan Loss:

Tabel 4.5 Hasil simulasi jarak transmisi terhadap bit rate 10 Gbps line coding NRZ

No	RF Carrier	Line Coding	fiber optic	Max. Q-Factor	Min. BER	P_{in} (dBm)	P_{out} (dBm)	Loss (dBm)
1	3,5 GHz	NRZ	10 km	7,76022	$4,2345 \times 10^{-15}$	-3,12	-5,12	2
2			20 km	7,54062	$2,3007 \times 10^{-14}$		-7,178	4
3			30 km	7,40695	$6,4404 \times 10^{-14}$		-9,117	6
4			40 km	7,23167	$2,3487 \times 10^{-13}$		-11,175	8
5			50 km	7,1011	$6,1871 \times 10^{-13}$		-13,119	10
6			60 km	6,97559	$1,5224 \times 10^{-12}$		-15,184	12
7			70 km	6,42124	$6,7568 \times 10^{-11}$		-17,128	14
8			80 km	6,19544	$2,9057 \times 10^{-10}$		-19,132	16
9			90 km	5,97609	$1,1428 \times 10^{-9}$		-12,683	18

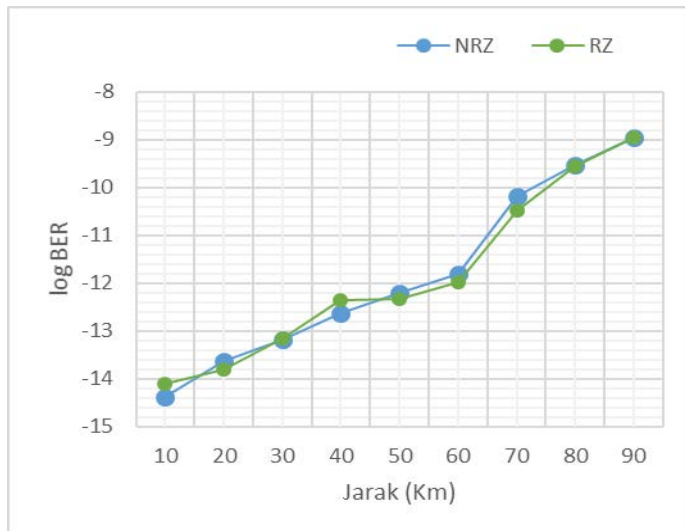
No	RF Carrier	Line Coding	fiber optic	Max. Q-Factor	Min. BER	P_{in} (dBm)	P_{out} (dBm)	Loss (dBm)
1	3,5 GHz	RZ	10 km	7,68567	$7,6079 \times 10^{-15}$	-5,454	-7,453	2
2			20 km	7,59077	$1,5819 \times 10^{-14}$		-9,58	4
3			30 km	7,39801	$6,8109 \times 10^{-14}$		-11,634	6
4			40 km	7,14111	$4,4913 \times 10^{-13}$		-13,603	8
5			50 km	7,13757	$4,5846 \times 10^{-13}$		-15,714	10
6			60 km	7,02624	$1,0407 \times 10^{-12}$		-7,786	12
7			70 km	6,52168	$3,2811 \times 10^{-11}$		-4,267	14
8			80 km	6,18106	$2,7407 \times 10^{-10}$		-4,934	16
9			90 km	5,96629	$1,0958 \times 10^{-9}$		-5,116	18

Tabel 4.6 Hasil simulasi jarak transmisi terhadap bit rate 10 Gbps line coding RZ



Gambar 4.20 Grafik pengaruh jarak terhadap Q-factor

Berdasarkan gambar 4.20 pada bit rate 10 Gbps, nilai Q-factor tertinggi dengan line coding NRZ pada jarak 10 km yaitu 7,76022, sedangkan nilai Q-factor tertinggi dengan line coding RZ pada jarak 10 km yaitu 7,68567.

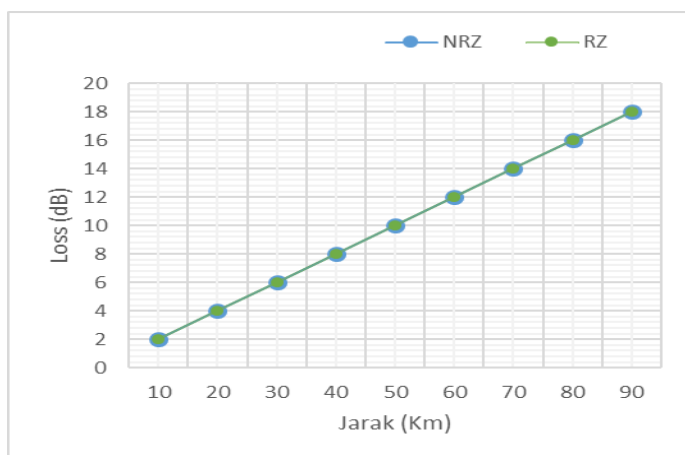


Gambar 4.21 Grafik pengaruh jarak terhadap BER

Berdasarkan gambar 4.21 pada *bit rate* 10 Gbps, nilai BER terendah yang didapatkan *line coding* NRZ pada jarak 10 km yaitu $4,2345 \times 10^{-15}$, BER terendah yang didapatkan *line coding* NRZ pada jarak 10 km yaitu $7,6079 \times 10^{-15}$.

Dari data hasil percobaan dengan menggunakan format *line coding* NRZ pada panjang serat optik 10 km, didapatkan nilai BER $4,2345 \times 10^{-15}$ dengan nilai *Q-factor* sebesar 7,76022. Secara sistematis, nilai BER yang dihasilkan *Q-factor* dapat dibuktikan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 BER &= \frac{1}{\sqrt{2\pi Q}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi(7,76022)}} e^{-\frac{(7,76022)^2}{2}} \\
 &= 1,199 \times 10^{-14}
 \end{aligned}$$



Gambar 4.22 Grafik pengaruh jarak terhadap loss

Berdasarkan gambar 4.22 pada *bit rate* 10 Gbps, nilai *loss* terendah yang didapatkan *line coding* NRZ dan RZ pada jarak 10 km yaitu 2 dBm. Dan semakin jauh jarak yang ditransmisikan maka *loss* yang dihasilkan semakin besar.

Dari data hasil percobaan dengan menggunakan format *line coding* NRZ pada panjang serat optik 10 km, didapatkan nilai *loss* sebesar 2 dBm. Secara sistematis, nilai *loss* yang dihasilkan dapat dibuktikan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}\text{Loss (dBm)} &= P_{\text{in}} \text{ (dBm)} - P_{\text{out}} \text{ (dBm)} \\ &= -3,12 - (-5,12) \\ &= 2 \text{ dBm}\end{aligned}$$

4.3.3 Analisis pengaruh Peletakan Kompensator Dispersi FBG pada *bit rate* 5 Gbps

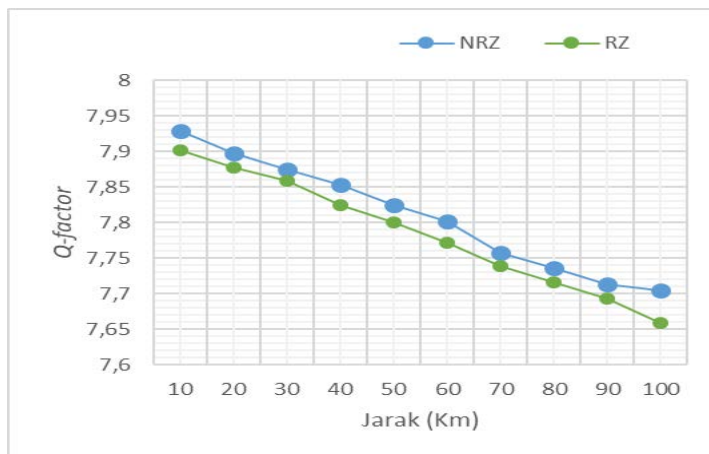
Berikut adalah data hasil simulasi dari pengaruh FBG pada *bit rate* 5 Gbps dilihat dari parameter BER, *Q-Factor*, dan Loss:

No	RF Carrier	Line Coding	fiber optic	Max. Q-Factor	Min. BER	P_{in} (dBm)	P_{out} (dBm)	Loss (dBm)	P_{EDFA} (dBm)
1	3,5 GHz	NRZ	10 km	7,92864	$1,0981 \times 10^{-15}$	-3,59	-6,261	2,671	2,142
2			20 km	7,8975	$1,4208 \times 10^{-15}$		-7,267	4,672	1,778
3			30 km	7,87445	$1,687 \times 10^{-15}$		-10,021	6,674	0,743
4			40 km	7,85249	$2,0389 \times 10^{-15}$		-11,905	8,673	-0,036
5			50 km	7,82379	$2,5388 \times 10^{-15}$		-14,382	10,672	-1,198
6			60 km	7,80174	$3,0358 \times 10^{-15}$		-16,254	12,673	-2,213
7			70 km	7,75689	$4,3454 \times 10^{-15}$		-17,367	14,672	-2,882
8			80 km	7,73599	$5,1242 \times 10^{-15}$		-19,794	16,672	-4,516
9			90 km	7,71355	$5,9916 \times 10^{-15}$		-21,367	18,672	-5,701
10			100 km	7,70439	$6,2915 \times 10^{-15}$		-24,382	20,672	-8,208

Tabel 4.7 Hasil Simulasi Pengaruh Peletakan FBG Bit Rate 5 Gbps NRZ

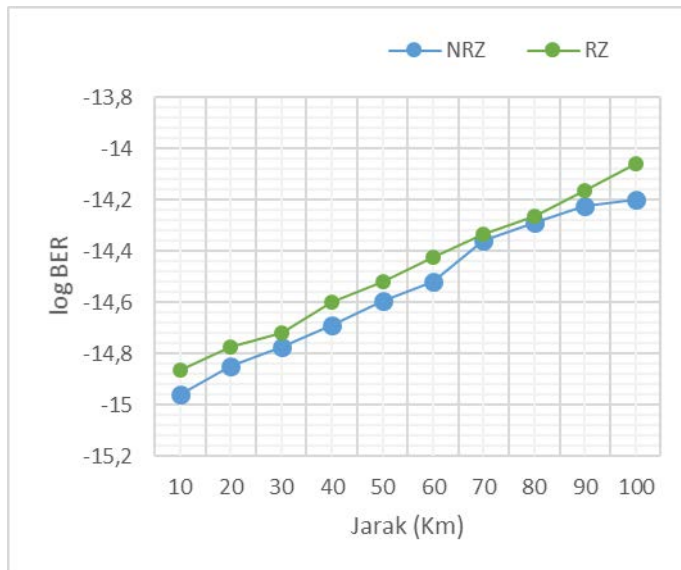
Tabel 4.8 Hasil Simulasi Pengaruh Peletakan FBG Bit Rate 5 Gbps RZ

No	RF Carrier	Line Coding	fiber optic	Max. Q-Factor	Min. BER	P_{in} (dBm)	P_{out} (dBm)	Loss (dBm)	P_{EDFA} (dBm)
1	3,5 GHz	RZ	10 km	7,90213	$1,3664 \times 10^{-15}$	-5,214	-7,881	2,667	1,556
2			20 km	7,87677	$1,6730 \times 10^{-15}$		-10,315	4,668	0,626
3			30 km	7,85937	$1,9039 \times 10^{-15}$		-11,523	6,666	0,128
4			40 km	7,82446	$2,5165 \times 10^{-15}$		-14,063	8,666	-1,038
5			50 km	7,79966	$3,0156 \times 10^{-15}$		-16,384	10,668	-2,288
6			60 km	7,77085	$3,7567 \times 10^{-15}$		-18,457	12,666	-3,585
7			70 km	7,73931	$4,6292 \times 10^{-15}$		-20,509	14,668	-5,043
8			80 km	7,71598	$5,4407 \times 10^{-15}$		-22,575	16,666	-6,67
9			90 km	7,69267	$6,8165 \times 10^{-15}$		-24,082	18,664	-7,947
10			100 km	7,65786	$8,7446 \times 10^{-15}$		-26,349	20,664	-9,974



Gambar 4.23 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap Q-factor

Berdasarkan gambar 4.23 pada bit rate 5 Gbps, nilai Q-factor tertinggi dengan line coding NRZ pada jarak 10 km yaitu 7,92864, sedangkan nilai Q-factor tertinggi dengan line coding RZ pada jarak 10 km yaitu 7,90213. Dengan FBG dan EDFA terjadi perbaikan nilai Q-factor dibandingkan tanpa menggunakan FBG dan EDFA pada bit rate 5 Gbps.

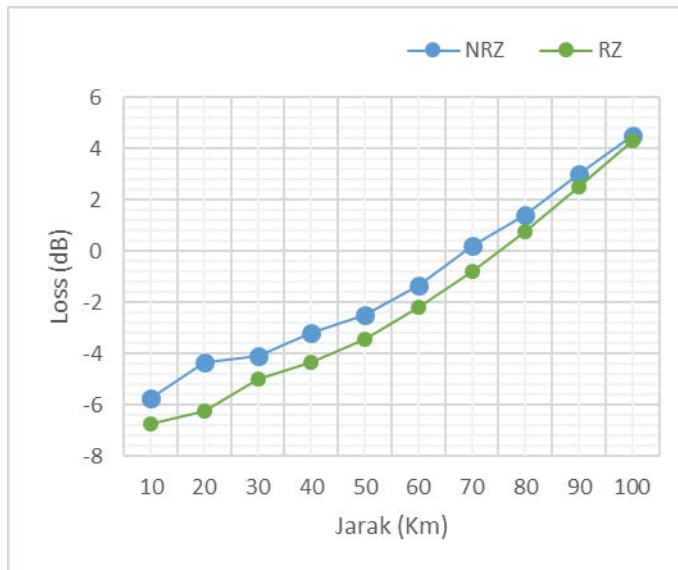


Gambar 4.24 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap BER

Berdasarkan gambar 4.24 pada *bit rate* 5 Gbps, nilai BER terendah yang didapatkan *line coding* NRZ pada jarak 10 km yaitu $1,0981 \times 10^{-15}$, BER terendah yang didapatkan *line coding* NRZ pada jarak 10 km yaitu $1,3664 \times 10^{-15}$. Dengan FBG dan EDFA terjadi perbaikan nilai BER dibandingkan tanpa menggunakan FBG dan EDFA pada *bit rate* 5 Gbps.

Dari data hasil percobaan dengan menggunakan format *line coding* RZ pada panjang serat optik 10 km, didapatkan nilai BER $1,3664 \times 10^{-15}$ dengan nilai *Q-factor* sebesar 7,90213. Secara sistematis, nilai BER yang dihasilkan *Q-factor* dapat dibuktikan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 BER &= \frac{1}{\sqrt{2\pi Q}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi(7,90213)}} e^{-\frac{(7,90213)^2}{2}} \\
 &= 3,9135 \times 10^{-15}
 \end{aligned}$$



Gambar 4.25 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap loss

Berdasarkan gambar 4.25 pada *bit rate* 5 Gbps, nilai *loss* terendah yang didapatkan *line coding* NRZ 10 km yaitu 2,671 dBm. dan RZ pada jarak 10 km yaitu 2,667 dBm. Dengan menggunakan FBG nilai *loss* semakin tinggi jika dibandingkan tanpa menggunakan FBG.

Dari data hasil percobaan dengan menggunakan format *line coding* RZ pada panjang serat optik 10 km, didapatkan nilai *loss* sebesar 2,667 dB. Secara sistematis, nilai *loss* yang dihasilkan dapat dibuktikan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 \text{Loss (dBm)} &= P_{\text{in}} \text{ (dBm)} - P_{\text{out}} \text{ (dBm)} \\
 &= -5,214 - (-7,881) \\
 &= 2,667 \text{ dBm}
 \end{aligned}$$

Tetapi dengan EDFA level daya sinyal membaik

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}} &= -7,881 \text{ dBm} & P_{\text{EDFA}} &= 1,556 \text{ dBm} \\
 &= 1\text{W} \times 10^{(-7,881/10)/1000} & &= 1\text{W} \times 10^{(1,556/10)/1000} \\
 &= 162,89 \times 10^{-6} \text{ W} & &= 1430,87 \times 10^{-6} \text{ W} \\
 \text{Amplification P signal} &= P_{\text{EDFA}} / P_{\text{out}} \\
 &= 1430,87 \times 10^{-6} \text{ W} / 162,89 \times 10^{-6} \text{ W} \\
 &= 8,78\text{x}
 \end{aligned}$$

4.3.4 Analisis pengaruh Peletakan Kompensator Dispersi FBG pada *bit rate* 10 Gbps

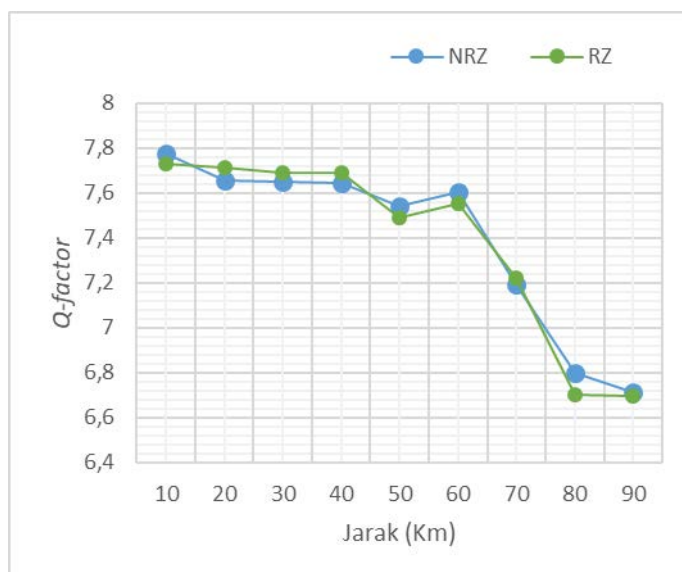
Berikut adalah data hasil simulasi dari pengaruh *bit rate* 10 Gbps terhadap jarak transmisi dilihat dari parameter BER, *Q-Factor*, dan Loss:

No	RF Carrier	Line Coding	fiber optic	Max. Q-Factor	Min. BER	P_{in} (dBm)	P_{out} (dBm)	Loss (dBm)	P_{EDFA} (dBm)
1	3,5 GHz	NRZ	10 km	7,77622	$3,7319 \times 10^{-15}$	-3,121	-5,789	2,668	2,312
2			20 km	7,6573	$9,4829 \times 10^{-15}$		-7,731	4,668	1,61
3			30 km	7,65156	$9,8012 \times 10^{-15}$		-9,787	6,668	0,834
4			40 km	7,6432	$1,0384 \times 10^{-14}$		-11,79	8,669	0,014
5			50 km	7,54282	$2,2893 \times 10^{-14}$		-13,847	10,668	-0,931
6			60 km	7,60608	$1,3986 \times 10^{-14}$		-15,912	12,668	-2,017
7			70 km	7,19471	$3,1287 \times 10^{-13}$		-17,736	14,667	-3,114
8			80 km	6,79711	$5,3342 \times 10^{-12}$		-15,092	16,666	-1,567
9			90 km	6,7145	$9,4329 \times 10^{-12}$		-12,444	18,666	-0,274

Tabel 4.9 Hasil Simulasi Pada Pengaruh Peletakan FBG Bit Rate 10 Gbps NRZ

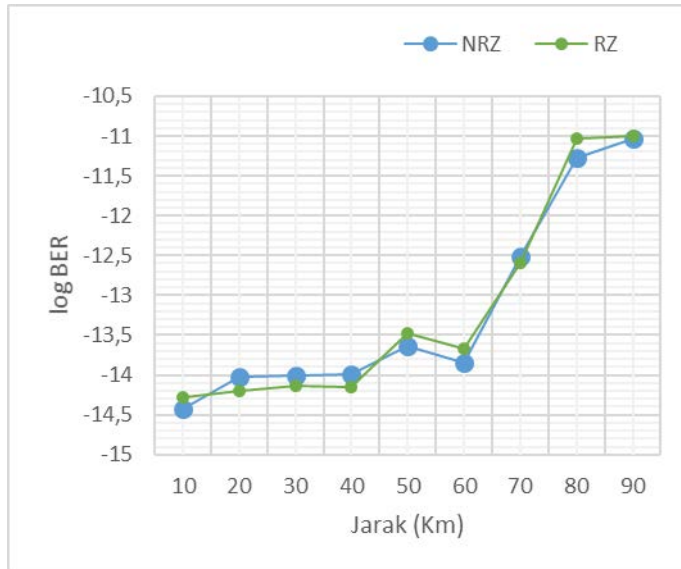
No	RF Carrier	Line Coding	fiber optic	Max. Q-Factor	Min. BER	P_{in} (dBm)	P_{out} (dBm)	Loss (dBm)	P_{EDFA} (dBm)
1	3,5 GHz	RZ	10 km	7,73281	$5,242 \times 10^{-15}$	-5,471	-8,122	2,651	1,465
2			20 km	7,71125	$6,1894 \times 10^{-15}$		-10,141	4,649	0,695
3			30 km	7,69096	$7,2292 \times 10^{-15}$		-12,135	6,649	-0,136
4			40 km	7,68816	$7,0782 \times 10^{-15}$		-14,381	8,646	-1,197
5			50 km	7,48951	$3,3286 \times 10^{-14}$		-16,443	10,645	-2,322
6			60 km	7,55376	$2,1060 \times 10^{-14}$		-6,725	12,64	1,975
7			70 km	7,22136	$2,5706 \times 10^{-13}$		-4,805	14,641	2,667
8			80 km	6,70392	$9,2565 \times 10^{-12}$		-4,756	16,642	2,685
9			90 km	6,69344	$9,9585 \times 10^{-12}$		-5,865	18,64	2,284

Tabel 4.10 Hasil Simulasi Pada Pengaruh Peletakan FBG Bit Rate 10 Gbps RZ



Gambar 4.26 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap Q-factor

Berdasarkan gambar 4.26 pada *bit rate* 10 Gbps, nilai *Q-factor* tertinggi dengan *line coding* NRZ pada jarak 10 km yaitu 7,77622, sedangkan nilai *Q-factor* tertinggi dengan *line coding* RZ pada jarak 10 km yaitu 7,73281. Dengan FBG dan EDFA terjadi perbaikan nilai *Q-factor* dibandingkan tanpa menggunakan FBG dan EDFA pada *bit rate* 10 Gbps pada *line coding* NRZ dan RZ.

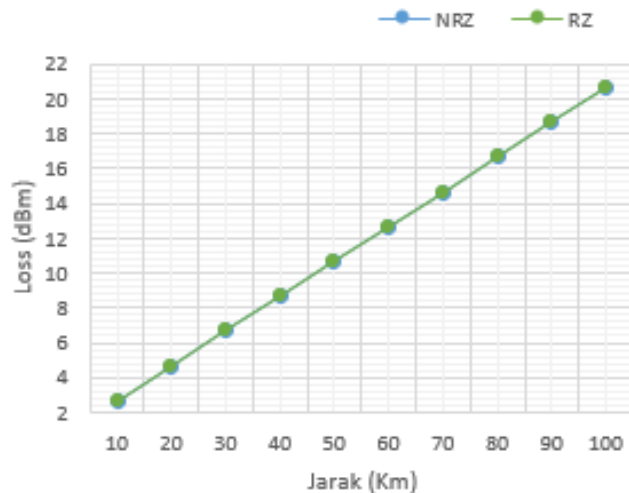


Gambar 4.27 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap BER

Berdasarkan gambar 4.27 pada *bit rate* 10 Gbps, nilai BER terendah yang didapatkan *line coding* NRZ pada jarak 10 km yaitu $3,7319 \times 10^{-15}$, BER terendah yang didapatkan *line coding* RZ pada jarak 10 km yaitu $5,242 \times 10^{-15}$. Dengan FBG dan EDFA terjadi perbaikan nilai BER dibandingkan tanpa menggunakan FBG dan EDFA pada *bit rate* 10 Gbps pada *line coding* NRZ dan RZ.

Dari data hasil percobaan dengan menggunakan format *line coding* RZ pada panjang serat optik 10 km, didapatkan nilai BER $5,242 \times 10^{-15}$ dengan nilai *Q-factor* sebesar 7,73281. Secara sistematis, nilai BER yang dihasilkan *Q-factor* dapat dibuktikan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 BER &= \frac{1}{\sqrt{2\pi Q}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi(7,73281)}} e^{-\frac{(7,73281)^2}{2}} \\
 &= 1,4863 \times 10^{-14}
 \end{aligned}$$



Gambar 4.28 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap loss

Berdasarkan gambar 4.28 pada *bit rate* 10 Gbps, nilai *loss* terendah yang didapatkan *line coding* NRZ 10 km yaitu 2,668 dBm, dan RZ pada jarak 10 km yaitu 2,651 dBm. Dengan menggunakan FBG nilai *loss* lebih besar jika dibandingkan tanpa menggunakan FBG.

Dari data hasil percobaan dengan menggunakan format *line coding* RZ pada panjang serat optik 10 km, didapatkan nilai *loss* sebesar 2,651 dBm. Secara sistematis, nilai *loss* yang dihasilkan dapat dibuktikan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 \text{Loss (dBm)} &= P_{\text{in}} \text{ (dBm)} - P_{\text{out}} \text{ (dBm)} \\
 &= -5,471 - (-8,122) \\
 &= 2,651 \text{ dBm}
 \end{aligned}$$

Tetapi dengan menggunakan EDFA nilai level daya sinyal membaik

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}} &= -8,122 \text{ dBm} & P_{\text{EDFA}} &= 1,465 \text{ dBm} \\
 &= 1\text{W} \times 10^{(-8,122/10)/1000} & &= 1\text{W} \times 10^{(1,465/10)/1000} \\
 &= 154,1 \times 10^{-6} \text{ W} & &= 1401,2 \times 10^{-6} \text{ W}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Amplification P signal} &= P_{\text{EDFA}} / P_{\text{out}} \\
 &= 1401,2 \times 10^{-6} \text{ W} / 154,1 \times 10^{-6} \text{ W} \\
 &= 9,09\text{x}
 \end{aligned}$$