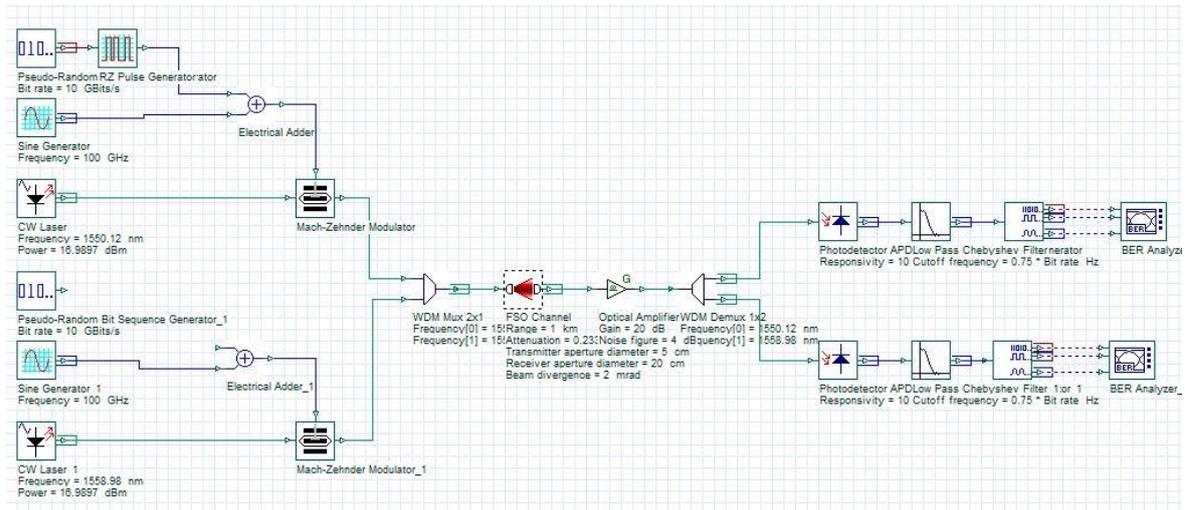


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab IV ini menyajikan data hasil simulasi dan pembahasannya. Eksperimen dilakukan dengan simulasi untuk mendapatkan data hasil pengukuran sistem komunikasi FSO. Data yang disajikan merupakan hasil pengaruh dari variasi *bit rate*, *line coding*, atenuasi cuaca, dan jarak transmisi. Penulisan bab IV ini berupa konfigurasi perangkat eksperimen, prosedur pengambilan data, konfigurasi rangkaian eksperimen, komponen perangkat eksperimen, hasil eksperimen, dan pembahasan.

4.1 Konfigurasi Rangkaian Eksperimen

Pada sub sub bab ini akan menunjukkan bentuk desain simulasi pada *software Optisystem* yang telah dirancang dan dikombinasikan setiap komponen pada *Tabel 4.2*. Bentuk desain simulasi pada *software Optisystem 7.0* akan ditunjukkan pada gambar berikut ini.



Gambar 4.1 Desain Konfigurasi Sistem Komunikasi RoFSO

Pada *Gambar 4.1* menunjukkan desain konfigurasi sesuai dengan *Tabel 4.2*. Prinsip kerja dari sistem RoFSO dengan simulasi menggunakan *software Optisystem 7.0* diawali dengan komponen *pseudo-random bit sequence generator* yang menghasilkan sinyal biner secara acak dan *bit rate* diatur 10 Gbps dan 15 Gbps. Keluaran dari PRBS menuju ke *Pulse Generator* yang berfungsi membangkitkan pulsa yang umumnya berbentuk kotak dimana

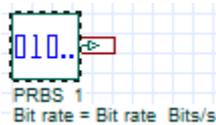
sinyal acak dari keluaran PRBS dioalah di dalam *pulse generator*. Pada penelitian ini pulse generator yang digunakan berupa *line coding* RZ ataupun NRZ. Deret 0 dan 1 akan dikonversi menjadi sinyal listrik. Kemudian sinyal listrik tersebut dimodulasi dengan sinyal carrier dari *sine generator* memakai frekuensi 100 GHz. Sinyal termodulasi akan menjadi *input* dari modulator eksternal (*Mach Zehnder modulator*). *Mach-Zehnder* merupakan sebuah interferometer yang bekerja menurut prinsip elektro-optik, dimana medan listrik yang diberikan dapat mempengaruhi karakteristik cahaya yang melewatinya. Sinyal dari *electrical adder* dan CW LASER dimodulasi di dalam *mach-zehnder* untuk kemudian ditransmisikan ke serat optik. LD yang memiliki berkas sinar lebih sempit dibandingkan LED sehingga cocok diimplementasikan pada komunikasi serat optik jarak jauh khususnya pada sistem transmisi RoF. *Continuous Wave* LASER membangkitkan sinyal optik sebagai sinyal masukan dengan panjang gelombang 1550.12 nm untuk kanal 1 dan panjang gelombang 1558.98 nm untuk kanal 2 dan daya *input* 50 mW sesuai daya yang dibutuhkan pada RoFSO. *Output* dari modulator eksternal berupa sinyal optik dan ditransmisikan menuju *receiver* dengan media propagasi atmosfer. Dalam proses propagasi melalui FSO, nilai atenuasi disesuaikan dengan variasi cuaca yang digunakan, yakni 0,233 dB/km ketika cuaca cerah dan 19,28 dB/km ketika cuaca hujan lebat. Untuk menjaga tingkat daya informasi saat proses transmisi agar ketika sampai di penerima sinyal tetap pada kondisi yang baik maka diperlukan komponen yang bernama *optical amplifier*. Sinyal informasi yang telah dikuatkan oleh *optical amplifier* kemudian menuju *photodetector* untuk dikonversi dari sinyal cahaya menjadi sinyal elektrik. Pada sisi *receiver*, *photodetector* (PIN atau APD) akan mengkonversi sinyal optik yang diterima menjadi sinyal listrik. Sinyal listrik ini dilewatkan melalui *low pass filter* (LPF) untuk menghilangkan *noise* pada frekuensi tinggi. BER *analyzer* menampilkan hasil parameter BER dan *Q factor* pada sistem FSO tersebut.

4.2 Komponen Perangkat Eksperimen

Konfigurasi sistem komunikasi *Radio over FSO* (RoFSO) dengan simulasi *Optisystem* akan ditentukan komponen-komponen pada sistem tersebut. Proses simulasi sistem RoFSO melalui *Optisystem* diperlukan model-model sistem yang merupakan representasi dari kondisi sistem sebenarnya. Berikut adalah penjelasan mengenai komponen sistem yang akan digunakan pada eksperimen yang disimulasi menggunakan *Optisystem*.

a. *Pseudo-Random Bit Sequence Generator*

Komponen ini membangkitkan urutan biner *pseudorandom* sebagai salah satu sinyal uji dalam suatu proses identifikasi dinamis. Urutan biner pseudorandom (PRBS) adalah urutan biner yang sementara dihasilkan dengan algoritma deterministik, sulit diprediksi, dan menunjukkan perilaku statistik yang serupa dengan urutan acak yang sebenarnya. Gambar komponen dapat dilihat pada *Gambar 4.2* :

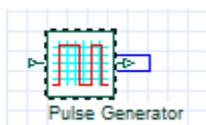


Gambar 4.2 Komponen *Pseudo-Random Bit Sequence Generator*

(Sumber: *Optiwave System 07*)

b. Pulse Generator

Line coding yang digunakan adalah RZ dan NRZ. Setelah data biner dihasilkan pada PRBS generator, maka dilanjutkan pada proses *line coding*. *Line coding* RZ mengkonversi data biner menjadi sinyal elektrik yang akan digunakan sebagai masukan modulator. Dengan pengkodean RZ, bentuk gelombang pulsa nampak kembali ke *level zero* untuk setengah interval bit nya. Bentuk gelombang tersebut mempunyai peruntukan level gelombangnya secara spesifik yang menyatakan data biner. Pada unipolar RZ, bit “1” direpresentasikan oleh setengah periode bit pertama atau kedua. Bit “0” direpresentasikan pada saat tidak adanya sinyal yang masuk selama periode bit. Sedangkan *Line coding* NRZ, skema *Non-Return-to-Zero* (NRZ) di mana tegangan positif mendefinisikan bit 1 dan tegangan nol mendefinisikan bit 0. Oleh karena itu disebut NRZ karena sinyal tidak kembali ke nol. Gambar komponen dapat dilihat pada *Gambar 4.3* :

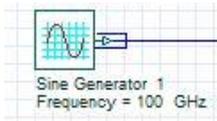


Gambar 4.3 Komponen *Pulse Generator*

(Sumber: *Optiwave System 07*)

c. Sine Generator

Sine Generator menghasilkan sinyal gelombang sinus elektrik. Dalam konfigurasi menggunakan frekuensi 100 GHz. Sinyal ini digunakan sebagai sinyal carrier. Gambar komponen dapat dilihat pada *Gambar 4.4* :

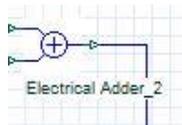


Gambar 4.4 Komponen Sine Generator

(Sumber: Optiwave System 07)

d. Electrical Adder

Electrical adder memodulasi sinyal listrik masukan dari *pulse generator* dan *sine generator*. Gambar komponen dapat dilihat pada Gambar 4.5 :

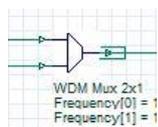


Gambar 4.5 Komponen Electrical Adder

(Sumber: Optiwave System 07)

e. Multiplexer

WDM (Wavelength-Devision Multiplexing) Mux berfungsi sebagai pengubah 2^n sinyal menjadi satu sinyal keluaran. Pada rangkaian menggunakan WDM Mux 2 x 1. Gambar komponen dapat dilihat pada Gambar 4.6 :



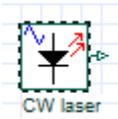
Gambar 4.6 Komponen WDM Mux

(Sumber: Optiwave System 07)

f. Sumber Cahaya

Laser dihasilkan dari proses relaksasi elektron. Pada saat proses ini maka sejumlah foton akan di lepaskan berbeda sengan cahaya senter emisi pada laser terjadi dengan teratur dan emisi akan menghasilkan cahaya yang memiliki panjang gelombang tertentu. Emisi akan mengasilkan cahaya dengan banyak panjang gelombang. proses yang terjadi adalah elektron pada keadaan *ground state* (pada pita valensi) mendapat energi kemudian statusnya naik menuju pita konduksi (keadaan eksitasi) kemudian elektron tersebut kembali ke keadaan awal (*ground state*) diikuti dengan beberapa foton yang terlepas. Laser dapat beroperasi pada modus kontinu (*continuous wave*) dengan amplitudo keluaran konstan atau dalam bentuk

pulsa. Berfungsi untuk membangkitkan sinyal optik sebagai sinyal masukan dengan panjang gelombang 1550 nm. Gambar komponen dapat dilihat pada *Gambar 4.7* :

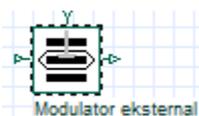


Gambar 4.7 Komponen Sumber Cahaya

(Sumber: *Optiwave System 07*)

g. Modulator Eksternal

Melakukan proses modulasi dengan teknik modulasi yang menggunakan berkas cahaya berupa pulsa-pulsa cahaya sebagai sinyal pembawa dengan perangkat eksternal. Sinyal masukan berupa sinyal optik berasal dari CW laser dan sinyal *electric* 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 4.8* :



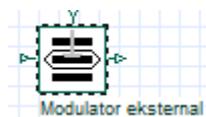
Gambar 4.8 Komponen Modulator Eksternal

(Sumber: *Optiwave System 07*)

h. Free Space Optic

FSO merupakan jaringan nirkabel *line off sight* (LOS) yang menggunakan *beam* cahaya yaitu mengacu pada laser pada jaringan optik. Masing-masing unit *optical wireless* menggunakan sumber optik dengan lensa untuk mentransmisikan informasi cahaya

melewati atmosfer menuju lensa pada sisi penerima. Sistem komunikasi yang menggunakan sumber cahaya berupa LED atau laser dan meneruskannya ke daerah penerima menggunakan media propagasi atmosfer. Gambar komponen dapat dilihat pada *Gambar 4.9* :

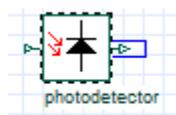


Gambar 4.9 Komponen *Free Space Optic*

(Sumber: *Optiwave System 07*)

i. Photodetector

Photodetector yang digunakan adalah PIN *photodiode* dan APD. Pada PIN *photodiode* Cahaya yang diterima dari sisi *transmitter* jatuh pada suatu lapisan *intrinsic* dari material semi konduktor yang diletakkan antara lapisan tipe n dan tipe p. Diode *junction* yang dibentuk oleh lapisan-lapisan ini dibias mundur (*reverse-bias*) dan jumlah arus yang mengalir melalui *junction* tersebut ditentukan oleh intensitas cahaya (jumlah *photon*) yang masuk dalam lapisan intrinsik. Mengubah energi optik (*foton*) yang diterima menjadi arus keluaran berdasarkan *photo voltaic effect*. APD lebih sensitif, diperoleh melalui penggunaan tegangan bias mundur yang tinggi pada diode *junction*nya. Hal ini menghasilkan suatu medan listrik yang tinggi pada lapisan intrinsik diode. Pada saat suatu elektron dilepas karena adanya suatu *photon* yang masuk ke lapisan intrinsik, medan listrik akan menyebabkan elektron tersebut bergerak sepanjang lapisan pada kecepatan yang tinggi dan bertubrukan dengan molekul-molekul lain sehingga melepaskan lebih banyak elektron-elektron yang selanjutnya akan bergerak sepanjang lapisan dengan kecepatan tinggi. Proses ini dinamakan *avalanche breakdown*. Proses tersebut merupakan pengkonversian sinyal optik menjadi sinyal elektrik kembali dan diteruskan menuju *filter*. Gambar komponen dapat dilihat pada *Gambar 4.10* :

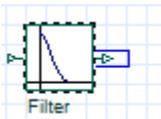


Gambar 4.10 Komponen *Photodetector*

(Sumber: *Optiwave System 07*)

j. Filter

Sinyal elektrik hasil keluaran dari *photodetector* kemudian di *filter* dengan *low pass filter* *bessel*. Respon Bessel ini menunjukkan karakteristik fasa yang linier. Hal ini berarti bahwa pergeseran fasa meningkat secara linier terhadap frekuensi. Pada hasil akhirnya hampir tidak ada *overshoot* pada *output*. Karena hal ini maka *filter* yang menggunakan respon Bessel pada umumnya digunakan untuk menyaring gelombang pulsa tanpa merubah bentuk pulsa gelombang itu. *Filter* Bessel mempunyai respon fase yang linear melalui rentang frekuensi yang lebar, yang menghasilkan grup *delay* yang konstan di dalam rentang frekuensi tersebut. Bessel juga menghasilkan sifat transmisi gelombang kotak. Bessel memberikan optimasi terhadap *step response*. Fungsinya untuk menghilangkan *noise* pada frekuensi tinggi seperti yang digunakan pada sistem FSO. Gambar komponen dapat dilihat pada *Gambar 4.11* :



Gambar 4.11 Komponen *Filter*

(Sumber: *Optiwave System 07*)

k. **BER Analyzer**

Bit Error Rate Analyzer berfungsi untuk menghitung dan menampilkan parameter hasil pengukuran BER dan *Q factor* pada sistem FSO tersebut. *Input* data biner dari PRBS generator, sinyal elektrik dari *line coding* yang digunakan dan sinyal elektrik dari keluaran sistem FSO yang telah di *filter* sebelumnya diproses pada *BER analyzer* sehingga mendapatkan hasil parameter BER dan *Q factor*. Gambar komponen dapat dilihat pada *Gambar 4.12* :



Gambar 4.12 Komponen *BER Analyzer*

(Sumber: *Optiwave System 07*)

4.3 **Prosedur Pangambilan Data**

Prosedur pengambilan data pada eksperimen ini diawali dengan tahap persiapan perangkat, antara lain mempersiapkan *software Optisystem 7.0* pada PC. Selanjutnya merangkai sistem *Radio over FSO* (RoFSO) sesuai dengan blok diagram yang ditunjukkan pada *Gambar 3.3*. Rangkaian sistem dibuat sesuai dengan komponen yang dibutuhkan dan

divariasikan sesuai dengan digram alir rencana penelitian pada *Gambar 3.4*. Pada eskperimen ini, komponen pada sistem RoFSO menggunakan variasi *line coding* NRZ dan RZ. Modulator eksternal yang akan digunakan yaitu *Mach-Zehnder modulator*. Dalam simulasi, sistem RoFSO difokuskan pada *bit rate* 10 Gbps dan 15 Gbps, jarak 0,1-1 km pada atenuasi cuaca hujan lebat, jarak 1-10 km untuk atenuasi cuaca cerah di daerah tropis.

Sistem RoFSO menggunakan media propagasi atmosfer dalam penjalarnya. Kondisi cuaca merupakan faktor utama penyebab atenuasi pada sistem RoFSO tersebut. Kondisi cuaca cerah belum sepenuhnya menjamin sistem RoFSO tersebut bebas dari redaman. Cuaca cerah juga memiliki dampak atenuasi pada sistem RoFSO meskipun relatif kecil. Atenuasi cuaca cerah yang digunakan pada eksperimen ini adalah 0,233 dB/km. (Hilal A. Fadhil, dkk. 2013)

Presipitasi adalah sebuah proses jatuhnya butiran air atau kristal es ke permukaan bumi. Jumlah curah hujan dicatat dalam inci atau milimeter (1 inci=25.4 mm). Curah hujan sebesar 1 mm artinya adalah tinggi air hujan yang terukur setinggi 1 mm pada daerah seluas 1 m^2 dengan catatan tidak ada yang menguap, meresap atau mengalir. Dari data BMKG Indonesia pada Tabel 4.1 diperoleh bahwa intensitas curah hujan di Indonesia adalah 10-20 mm/jam. Intensitas curah hujan dapat menimbulkan atenuasi pada sistem RoFSO tersebut. Atenuasi cuaca hujan lebat diperoleh dari perhitungan aspek intensitas hujan dan beberapa parameter lainnya. Parameter yang digunakan dalam menghitung atenuasi cuaca hujan lebat ditunjukkan pada *Tabel 4.1*.

Tabel 4.1

Parameter Perhitungan Atenuasi Cuaca Hujan Lebat

Parameter	Nilai
a	0.1 cm
Q_{scat}	2
R	5.56×10^{-4}
ρ	1 gr/cm^3
g	980 cm/sec^2
η	1.8×10^{-4}
Za	20 mm/jam

Maka atenuasi yang dihasilkan dari internsitas hujan lebat ditunjukkan pada persamaan 2-10, 2-11, 2-12, dan 2-13 dengan proses perhitungan sebagai berikut.

- Batasan kecepatan hujan

$$V_a = \frac{2a^2 \rho g}{9\eta} = \frac{2 \times (0.1)^2 \times 1 \times 980}{9 \times 1.8 \times 10^{-4}} = 12098.76 \text{ cm}^2/\text{s}^3$$

- Distribusi hujan

$$N_a = \frac{R}{1,33 (\pi a^3) V_a} = \frac{5.56 \times 10^{-4}}{1.33 \times (3.14 \times 0.1^3) \times 12098,76} = 1.098 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-3}$$

- Koefisien scattering hujan kanal 1 1550.12 nm

$$\begin{aligned} \beta_{rain\ scat} &= \pi a^2 N_a Q_{scat} \left(\frac{a}{\lambda}\right) \\ &= 3.14 \times (0.1)^2 \times 1.098 \times 10^{-5} \times 2 \times \left(\frac{0.1}{1550.12 \times 10^{-7}}\right) \\ &= 4.45 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1} \\ &= 44.5 \text{ km}^{-1} \end{aligned}$$

- Koefisien scattering hujan kanal 2 1558.98 nm

$$\begin{aligned} \beta_{rain\ scat} &= \pi a^2 N_a Q_{scat} \left(\frac{a}{\lambda}\right) \\ &= 3.14 \times (0.1)^2 \times 1.098 \times 10^{-5} \times 2 \times \left(\frac{0.1}{1558.98 \times 10^{-7}}\right) \\ &= 4.42 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1} \\ &= 44.2 \text{ km}^{-1} \end{aligned}$$

- Redaman hujan kanal 1 1550.12 nm

$$\tau = \exp(-\beta_{rain\ scat} L) = e^{-4.45 \times 10^{-4} \times 1} = 19.28 \text{ dB/km}$$

- Redaman hujan kanal 2 1558.98 nm

$$\tau = \exp(-\beta_{rain\ scat} L) = e^{-4.42 \times 10^{-4} \times 1} = 19.95 \text{ dB/km}$$

Kombinasi desain simulasi sistem RoFSO dengan variasi tersebut ditunjukkan pada *Tabel 4.2*.

Tabel 4.2

Kombinasi Desain Simulasi Sistem Komunikasi RoFSO

A	B	C	D	E	F	G	H	I
10 Gbps	1550,12 nm	CW Laser	RZ	FSO	MZM	APD	Cuaca Cerah	1-10 km
	1558,98 nm							
10 Gbps	1550,12 nm	CW Laser	RZ	FSO	MZM	APD	Cuaca Hujan Lebat	0,1-1 km
	1558,98 nm							
10 Gbps	1550,12 nm	CW Laser	NRZ	FSO	MZM	APD	Cuaca Cerah	1-10 km
	1558,98 nm							
10 Gbps	1550,12 nm	CW Laser	NRZ	FSO	MZM	APD	Cuaca Hujan Lebat	0,1-1 km
	1558,98 nm							
15 Gbps	1550,12 nm	CW Laser	RZ	FSO	MZM	APD	Cuaca Cerah	1-10 km
	1558,98 nm							
	1550,12 nm	CW Laser	RZ	FSO	MZM	APD		

15 Gbps	1558,98 nm						Cuaca Hujan Lebat	0,1-1 km
15 Gbps	1550,12 nm	CW Laser	NRZ	FSO	MZM	APD	Cuaca Cerah	1-10 km
	1558,98 nm							
15 Gbps	1550,12 nm	CW Laser	NRZ	FSO	MZM	APD	Cuaca Hujan Lebat	0,1-1 km
	1558,98 nm							

Keterangan Tabel 4.2 :

A = *bit rate* (Gbps)

B = Panjang gelombang (nm)

C = Sumber optik

D = *Line coding*

E = Media transmisi

F = Modulasi eksternal

G = *Photodetector*

H = Variasi cuaca

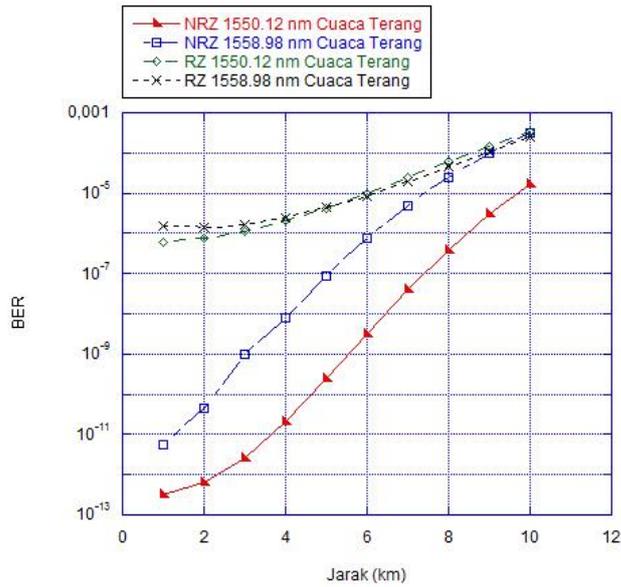
I = Jarak transmisi (km)

Tabel 4.2 menjelaskan kombinasi desain simulasi dengan berbagai variasi komponen yang akan diuji pada *software Optisystem*. 8 kombinasi desain simulasi tersebut akan diuji dengan parameter atenuasi cuaca cerah yaitu sebesar 0.233 dB/km dan atenuasi cuaca hujan lebat yaitu sebesar 19,28 dB/km. Jarak propagasi atmosfer untuk eksperimen sistem RoFSO dengan kondisi cuaca cerah difokuskan pada jarak 1-10 km. Sedangkan saat kondisi cuaca hujan lebat difokuskan pada jarak propagasi 0,1-1 km. Selanjutnya perancangan desain simulasi yang dirancang pada Tabel 4.2 akan diimplementasikan pada tahap selanjutnya.

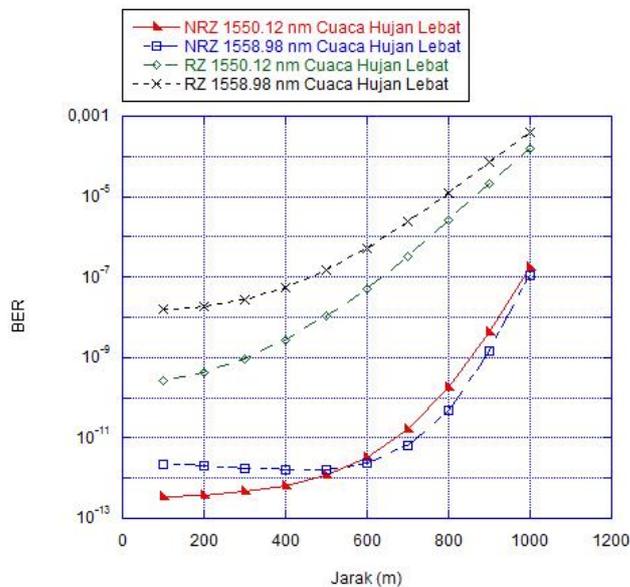
4.4 Hasil Eksperimen dan Pembahasan

Hasil penelitian pengaruh jarak dan atenuasi terhadap *bit error rate* (BER), baik ketika memakai *line coding* NRZ (*Non Return to Zero*) maupun RZ (*Return to Zero*) yang akan dibahas pada sub bab ini. Data yang didapatkan dari hasil simulasi, dan dihitung sesuai dengan persamaan seperti dalam teori. Analisis peformansi sistem pada penelitian yang dibahas meliputi BER dan *Q-factor*. Hasil eksperimen ditunjukkan dalam bentuk grafik untuk pengaruh jarak dan atenuasi terhadap BER dan *Q-factor* serta hitungan secara teori untuk BER yang dianalisis.

4.4.1 Analisis Jarak dan Atenuasi terhadap *Bit Error Rate* pada Bit Rate 10 Gbps



Gambar 4.13 Grafik Jarak terhadap BER pada Cuaca Terang



Gambar 4.14 Grafik Jarak terhadap BER pada Cuaca Hujan Lebat

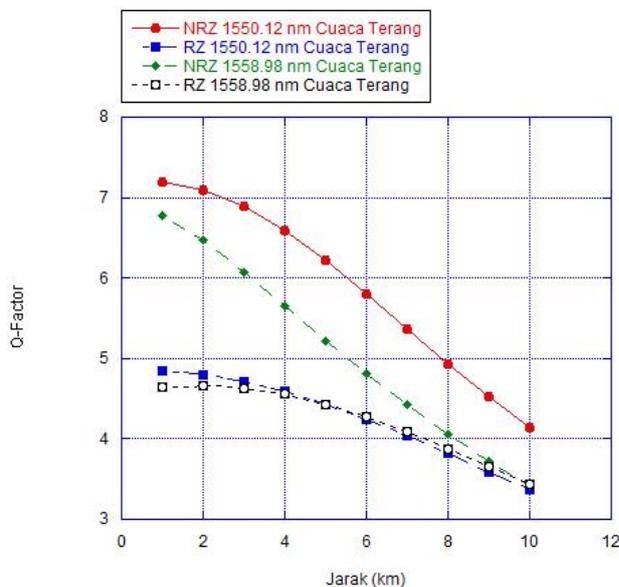
Berdasarkan Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 menunjukkan bahwa pengaruh jarak terhadap BER pada *bit rate* 10 Gbps baik dengan cuaca terang dan cuaca hujan lebat adalah semakin jauh jarak maka semakin besar nilai BER. Pada cuaca terang dengan panjang gelombang 1550.12 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai BER terendah yaitu $3,132 \times 10^{-13}$ dan tertinggi yaitu $1,706 \times 10^{-5}$ kemudian dengan panjang gelombang 1558.98 nm didapatkan nilai BER terendah yaitu $5,748 \times 10^{-12}$ dan tertinggi yaitu $3,121 \times 10^{-4}$. Lalu untuk cuaca terang dengan panjang gelombang 1550.12 nm menggunakan RZ didapatkan nilai BER terendah yaitu $6,019 \times 10^{-7}$ dan tertinggi yaitu $3,402 \times 10^{-5}$ kemudian dengan panjang

gelombang 1558.98 nm didapatkan nilai BER terendah yaitu $1,555 \times 10^{-6}$ dan tertinggi yaitu $2,492 \times 10^{-4}$. Pada cuaca hujan lebat dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai BER terendah yaitu $3,114 \times 10^{-13}$ dan tertinggi yaitu $1,825 \times 10^{-7}$, sedangkan pada panjang gelombang 1558,98 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai BER terendah yaitu $2,189 \times 10^{-12}$ dan tertinggi yaitu $1,432 \times 10^{-5}$. Untuk cuaca hujan lebat dengan panjang gelombang 1550.12 nm menggunakan RZ didapatkan nilai BER terendah yaitu $5,666 \times 10^{-7}$ dan tertinggi yaitu $4,473 \times 10^{-5}$ kemudian dengan panjang gelombang 1558.98 nm didapatkan nilai BER terendah yaitu $1,893 \times 10^{-6}$ dan tertinggi yaitu $3,408 \times 10^{-5}$. Dari hasil tersebut, Dari data hasil percobaan pada jarak transmisi 1 km pada panjang gelombang 1550,12 nm cuaca terang didapatkan nilai $3,132 \times 10^{-13}$ dan memiliki nilai Q-Factor sebesar 7,18946. Secara matematis, nilai BER yang dihasilkan dari nilai Q-Factor dapat dibuktikan melalui persamaan (2-15):

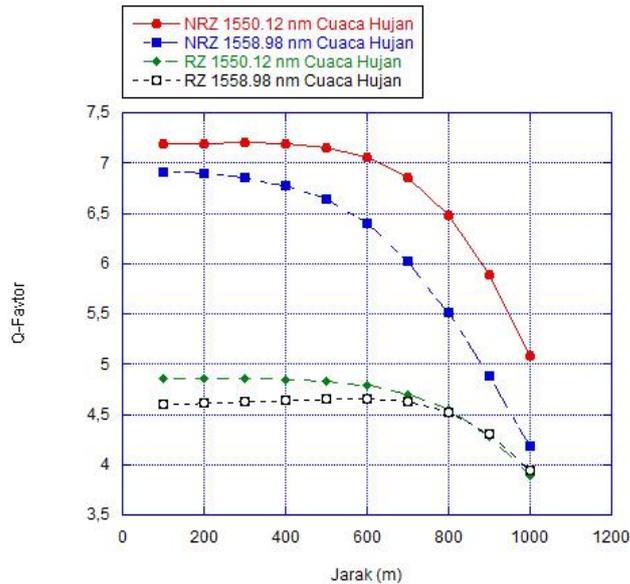
$$\begin{aligned} BER &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{7,18946}{\sqrt{2}}\right) \\ &= 3,313 \times 10^{-13} \end{aligned}$$

Dari hasil persamaan di atas dapat menunjukkan bahwa nilai yang didapatkan dari hasil simulasi mendekati nilai yang didapatkan dari hasil perhitungan

4.4.2 Analisis Jarak dan Atenuasi terhadap Q -Factor pada Bit Rate 10 Gbps



Gambar 4.15 Grafik Jarak terhadap Q -Factor pada Cuaca Terang

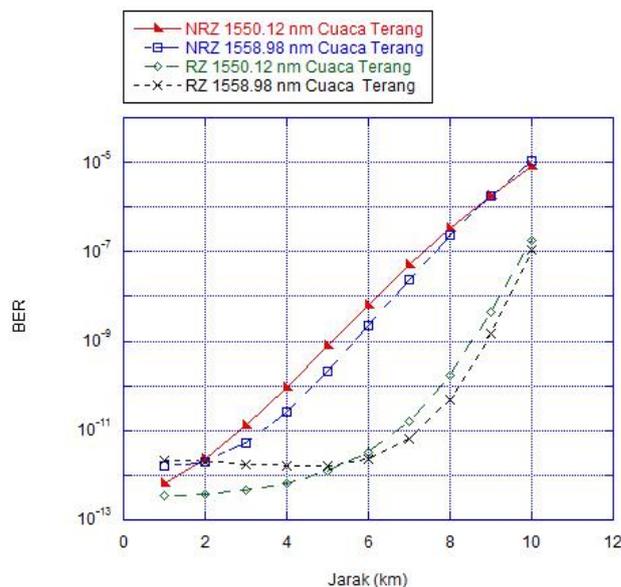


Gambar 4.16 Grafik Jarak terhadap Q -Factor pada Cuaca Hujan Lebat

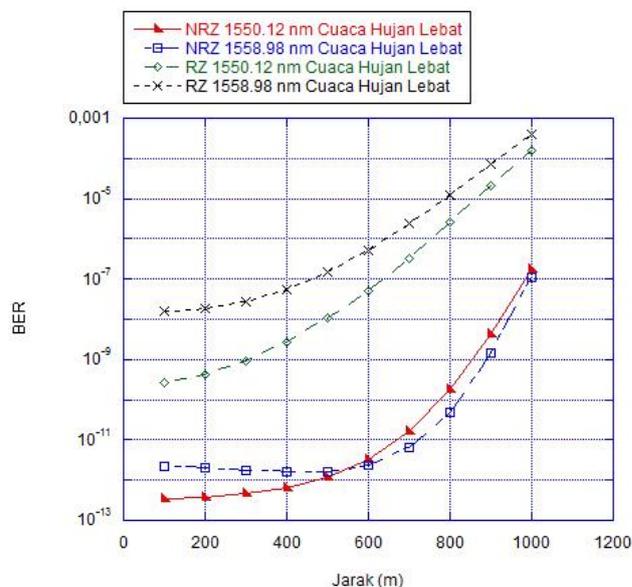
Berdasarkan Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 menunjukkan bahwa nilai Q -Factor berbanding terbalik dengan nilai BER dimana semakin jauh jarak transmisi maka nilai Q -Factor akan semakin kecil. Pada cuaca terang dengan panjang gelombang 1550.12 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai Q -Factor terendah yaitu 4,134 dan tertinggi yaitu 7,189 kemudian dengan panjang gelombang 1558.98 nm didapatkan nilai Q -Factor terendah yaitu 3,413 dan tertinggi yaitu 6,774. Pada cuaca hujan lebat dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai Q -Factor terendah yaitu 5,079 dan tertinggi yaitu 7,189, sedangkan pada panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai Q -Factor terendah yaitu 4,182 dan tertinggi yaitu 6,9111.

Pada cuaca terang dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan RZ didapatkan nilai Q -Factor yang terendah adalah 3,361 dan tertinggi adalah 4,843 kemudian pada panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai Q -Factor yang terendah adalah 3,429 dan yang tertinggi adalah 4,646. Pada cuaca hujan lebat dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan RZ didapatkan nilai Q -Factor yang terendah adalah 3,893 dan tertinggi adalah 4,856 lalu pada panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai Q -Factor yang terendah adalah 3,947 dan yang tertinggi adalah 4,605.

4.4.3 Analisis Jarak dan Atenuasi terhadap *Bit Error Rate* pada *Bit Rate* 15 Gbps



Gambar 4.17 Grafik Jarak terhadap BER pada Cuaca Terang

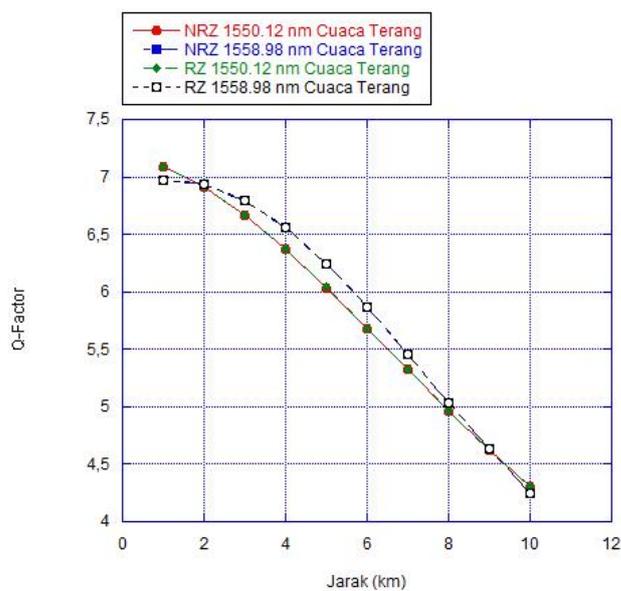


Gambar 4.18 Grafik Jarak terhadap BER pada Cuaca Hujan Terang

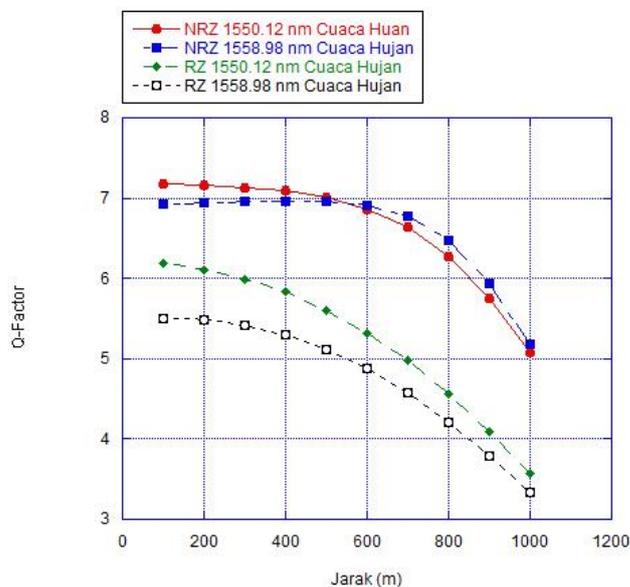
Berdasarkan Gambar 4.17 dan Gambar 4.18 menunjukkan bahwa pengaruh jarak terhadap BER pada *bit rate* 10 Gbps baik dengan cuaca terang dan cuaca hujan lebat adalah semakin jauh jarak maka semakin besar nilai BER. Pada cuaca terang dengan panjang gelombang 1550.12 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai BER terendah yaitu $6,019 \times 10^{-13}$ dan tertinggi yaitu $8,023 \times 10^{-6}$ kemudian dengan panjang gelombang 1558.98 nm didapatkan nilai BER terendah yaitu $1,603 \times 10^{-12}$ dan tertinggi yaitu $1,054 \times 10^{-5}$. Lalu untuk cuaca terang dengan panjang gelombang 1550.12 nm menggunakan RZ didapatkan nilai BER terendah yaitu $6,777 \times 10^{-13}$ dan tertinggi yaitu $8,223 \times 10^{-6}$ kemudian dengan panjang

gelombang 1558.98 nm didapatkan nilai BER terendah yaitu $1,623 \times 10^{-12}$ dan tertinggi yaitu $1,504 \times 10^{-5}$. Pada cuaca hujan lebat dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai BER terendah yaitu $3,448 \times 10^{-13}$ dan tertinggi yaitu $1,574 \times 10^{-4}$, sedangkan pada panjang gelombang 1558,98 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai BER terendah yaitu $2,212 \times 10^{-12}$ dan tertinggi yaitu $1,089 \times 10^{-7}$. Untuk cuaca hujan lebat dengan panjang gelombang 1550.12 nm menggunakan RZ didapatkan nilai BER terendah yaitu $2,726 \times 10^{-10}$ dan tertinggi yaitu $1,574 \times 10^{-4}$ kemudian dengan panjang gelombang 1558.98 nm didapatkan nilai BER terendah yaitu $1,651 \times 10^{-8}$ dan tertinggi yaitu $4,080 \times 10^{-4}$.

4.4.4 Analisis Jarak dan Atenuasi terhadap Q -Factor pada *Bit Rate* 15 Gbps



Gambar 4.19 Grafik Jarak terhadap Q -Factor pada Cuaca Terang



Gambar 4.20 Grafik Jarak terhadap Q -Factor pada Cuaca Hujan Lebat

Berdasarkan *Gambar 4.19* dan *Gambar 4.20* menunjukkan bahwa nilai Q-Factor berbanding terbalik dengan nilai BER dimana semakin jauh jarak transmisi maka nilai Q-Factor akan semakin kecil. Pada cuaca terang dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai Q-Factor terendah yaitu 4,310 dan tertinggi yaitu 7,086 kemudian dengan panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai Q-Factor terendah yaitu 4,250 dan tertinggi yaitu 6,967. Pada cuaca hujan lebat dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan NRZ didapatkan nilai Q-Factor terendah yaitu 5,089 dan tertinggi yaitu 7,179, sedangkan pada panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai Q-Factor terendah yaitu 5,181 dan tertinggi yaitu 6,922.

Pada cuaca terang dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan RZ didapatkan nilai Q-Factor yang terendah adalah 4,310 dan tertinggi adalah 7,086 kemudian pada panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai Q-Factor yang terendah adalah 4,250 dan yang tertinggi adalah 6,967. Pada cuaca hujan lebat dengan panjang gelombang 1550,12 nm menggunakan RZ didapatkan nilai Q-Factor yang terendah adalah 3,579 dan tertinggi adalah 6,181 lalu pada panjang gelombang 1558,98 nm didapatkan nilai Q-Factor yang terendah adalah 3,330 dan yang tertinggi adalah 5,499.