

BAB IV

PEMBAHASAN

Pada bab IV ini menjelaskan hasil penelitian dan pembahasan analisis pada data yang diperoleh dari penelitian ini. Penelitian dilakukan dengan simulasi untuk mendapatkan data hasil pengukuran sistem komunikasi FSO. Data yang disajikan merupakan hasil pengaruh dari variasi *signal generator*, modulator eksternal, *photodetector*, atenuasi cuaca, *power input*, dan responsivitas *photodetector*. Penulisan bab IV ini berupa pengambilan data, hasil eksperimen, dan pembahasan analisis data eksperimen.

4.1 Prosedur Pengambilan Data

Komponen dalam penelitian dan langkah pengambilan data akan dibahas pada sub bab ini. Blok diagram konfigurasi eksperimen telah ditunjukkan pada Gambar 3.3 dan diimplementasikan pada *software Optisystem 7.0*. Dalam penelitian ini membutuhkan komponen yang terdiri dari PRBS generator, *signal generator*, sumber cahaya, modulator eksternal, *free space optic*, *photodetector*, *filter*, dan BER analyzer.

a. Data primer yang digunakan pada eksperimen sebagai berikut:

Data primer didapatkan dari hasil pengujian dan pengukuran sistem. Cara pengambilan data primer dan diagram alir pengambilan data primer telah dijelaskan pada Gambar 3.2. Pada penelitian ini data primer didapatkan dari hasil pengukuran BER dan *Q-factor* berdasarkan pengaruh jenis *Line coding*, modulator optik, dan *photodetector* terhadap performansi sistem komunikasi *free space optic* saat kondisi cuaca cerah dan hujan lebat di daerah tropis. Parameter yang diamati dari penelitian ini adalah BER dan *Q-factor*.

b. Data sekunder yang digunakan pada eksperimen sebagai berikut:

Data sekunder didapatkan dari teori yang bersumber dari buku referensi, jurnal, penelitian, dan internet dari sumber terpercaya. Data tersebut digunakan sebagai acuan terhadap konsep-konsep yang terkait dengan *free space optic*, *Line coding*, CWlaser, *photodetector*, dan modulator. Data sekunder yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Parameter yang Digunakan Pada Sistem FSO

Parameter	Definisi	Nilai
λ	Panjang gelombang	1550 nm
Pin cuaca cerah	<i>Power input</i>	6-16 mW/ 8-12 dBm
Pin cuaca hujan lebat	<i>Power input</i>	40-100 mW/ 16-20 dBm
d_1	<i>Transmitter aperture diameter</i>	2.5 cm
d_2	<i>Receive aperture diameter</i>	16 cm
θ	Sudut divergensi	2 mrad
(f)	Frekuensi	193.1 Thz
<i>Linewidth</i>	-	1 MHz
T	Temperature	-40-85 °C
R pin	Respsivitas PIN InGaAs	0,6-0,9 A/W
R APD	Respsivitas APD InGaAs	6-9 A/W
M	Gain APD	10
A cuaca cerah	Atenuasi cuaca cerah	0,233 dB/km
A cuaca hujan	Atenuasi cuaca hujan	19,28 dB/km
r propagasi cuaca cerah	Jarak propagasi cuaca cerah	5 km
r propagasi cuaca hujan lebat	Jarak propagasi	1,2 km

c. Perhitungan Atenuasi Cuaca Cerah dan Hujan Lebat di Daerah Tropis

Sistem *free space optic* menggunakan media propagasi atmosfer dalam penjarannya. Kondisi cuaca merupakan faktor utama penyebab atenuasi pada sistem FSO tersebut. Kondisi cuaca cerah belum sepenuhnya menjamin sistem FSO tersebut bebas dari redaman. Cuaca cerah juga memiliki dampak atenuasi pada sistem FSO 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 m² dengan catatan tidak ada yang menguap, meresap atau mengalir. Dari data BMKG Indonesia pada Tabel 2.6 diperoleh bahwa intensitas curah hujan di Indonesia adalah 10-20 mm/jam. Intensitas curah hujan dapat menimbulkan atenuasi pada sistem FSO 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 4.2.

Tabel 4.2 Parameter Perhitungan Atenuasi Cuaca Hujan Lebat

No	Parameter	Nilai
1	a	0,1 cm
2	Q_{scat}	2
3	R	5.56×10^{-4}
4	ρ	1 gr/cm ³
5	g	980 cm/sec ²
6	η	1.8×10^{-4} gr/cm.sec
7	Z_a	20 mm/jam

Maka atenuasi yang dihasilkan dari intensitas hujan lebat di daerah tropis ditunjukkan pada persamaan 2.7, 2.8, 2.9 dan 2.10 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

$$N_a = \frac{R}{1.33 (\pi a^3) V_a}$$

$$= \frac{5.56 \times 10^{-4}}{\frac{4}{3} \times (3.14 \times 0.1^3) \times 12098.76} = 1.098 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-3}$$

- Koefisien scattering hujan

$$\beta_{rain\ scat} = \pi a^2 N_a Q_{scat} \left(\frac{a}{\lambda}\right)$$

$$= 3.14 \times 0.1^2 \times 1.098 \times 10^{-5} \times 2 \times \left(\frac{0.1}{1550 \times 10^{-7}}\right)$$

$$= 4.45 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1} = 44,5 \text{ km}^{-1}$$

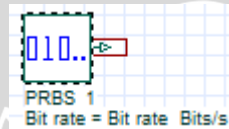
- Redaman hujan

$$\begin{aligned}\tau &= \exp(-\beta_{rain\ scat}L) \\ &= e^{-4.45 \times 10^{-4} \times 1} = 83,17 = 10 \log 83,17 = 19,28 \text{ dB/km}\end{aligned}$$

4.1.1 Komponen Eksperimen

Pada konfigurasi sistem komunikasi FSO dengan simulasi *Optisystem* 7.0 akan ditentukan komponen-komponen pada sistem tersebut. Pada proses simulasi sistem FSO melalui *Optisystem* diperlukan model-model sistem yang merupakan representasi dari kondisi sistem sebenarnya. Pada Tabel 4.3 merupakan penjelasan mengenai komponen sistem yang akan digunakan pada eksperimen pada simulasi menggunakan *Optisystem*.

a. Pseudo-Random Bit Sequence Generator

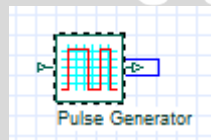


Gambar 4.1 Komponen PRBS Generator

(Sumber: Optiwave, 2008)

Membangkitkan urutan biner *pseudorandom* berdasarkan mode operasi yang berbeda. Urutan bit ini dirancang untuk pendekatan karakteristik dari data *random*. Membangkitkan pola acak dengan panjang tertentu dan pola akan berulang dengan sendirinya setelah setiap panjang pola. Dalam tiap pola bit, kombinasi bit harus seacak mungkin untuk mensimulasikan trafik data digital secara aktual. Hal ini membutuhkan panjang pola yang cukup panjang.

b. Pulse Generator



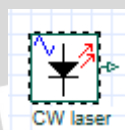
Gambar 4.2 Komponen signal generator

(Sumber: Optiwave, 2008)

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 setengan

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.

d. Sumber Cahaya



Gambar 4.3 Komponen CW laser

(Sumber: Optiwave, 2008)

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.

e. Modulator Eksternal



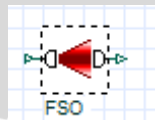
Gambar 4.4 Komponen modulator eksternal

(Sumber: Optiwave, 2008)

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*).

f. *Free space optic*

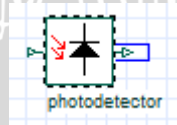


Gambar 4.5 Komponen FSO

(Sumber: Optiwave, 2008)

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.

g. *Photodetector*



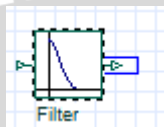
Gambar 4.6 Komponen *photodetector*

(Sumber: Optiwave, 2008)

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 *intrinsic*. 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 junctionnya. Hal ini menghasilkan suatu medan listrik yang tinggi pada lapisan instrinsik 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*.

h. *Filter*

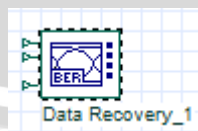


Gambar 4.7 Komponen *filter*

(Sumber: Optiwave, 2008)

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.

i. *BER Analyzer*



Gambar 4.8 Komponen *BER Analyzer*

(Sumber: Optiwave, 2008)

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*.

4.2 Langkah Pengambilan Data

Langkah pengambilan data pada penelitian ini diawali dengan tahap persiapan perangkat, antara lain mempersiapkan *software Optisystem 7.0* pada PC. Selanjutnya merangkai sistem FSO 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 3.6. Pada penelitian ini, komponen pada sistem FSO menggunakan variasi *Line coding* NRZ dan RZ. Modulator eksternal yang akan digunakan yaitu variasi *Mach-Zehnder modulator* dan *Electroabsorption modulator*. Sedangkan untuk variasi *photodetector* yang digunakan PIN *Photodiode* dan *avalanche photodiode* (APD). Dalam desain simulasi ini, sistem FSO difokuskan pada *bit rate* 40 Gbps. Kombinasi desain simulasi sistem FSO dengan variasi tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Kombinasi Desain Simulasi Sistem FSO

A	B	C	D	E	F	G	H
1	40 Gbps	1550 nm	CWLASER	RZ	FSO	MZM	PIN
2	40 Gbps	1550 nm	CWLASER	RZ	FSO	MZM	APD
3	40 Gbps	1550 nm	CWLASER	RZ	FSO	EAM	PIN
4	40 Gbps	1550 nm	CWLASER	RZ	FSO	EAM	APD
5	40 Gbps	1550 nm	CWLASER	NRZ	FSO	MZM	PIN
6	40 Gbps	1550 nm	CWLASER	NRZ	FSO	MZM	APD
7	40 Gbps	1550 nm	CWLASER	NRZ	FSO	EAM	PIN
8	40 Gbps	1550 nm	CWLASER	NRZ	FSO	EAM	APD

Keterangan Tabel 4.3:

A= urutan kombinasi desain simulasi sistem FSO

B= *bit rate* yang digunakan (Gbps)

C= Panjang gelombang sistem FSO (λ)

D= sumber optik

E= variasi komponen *Line coding*

F= media transmisi

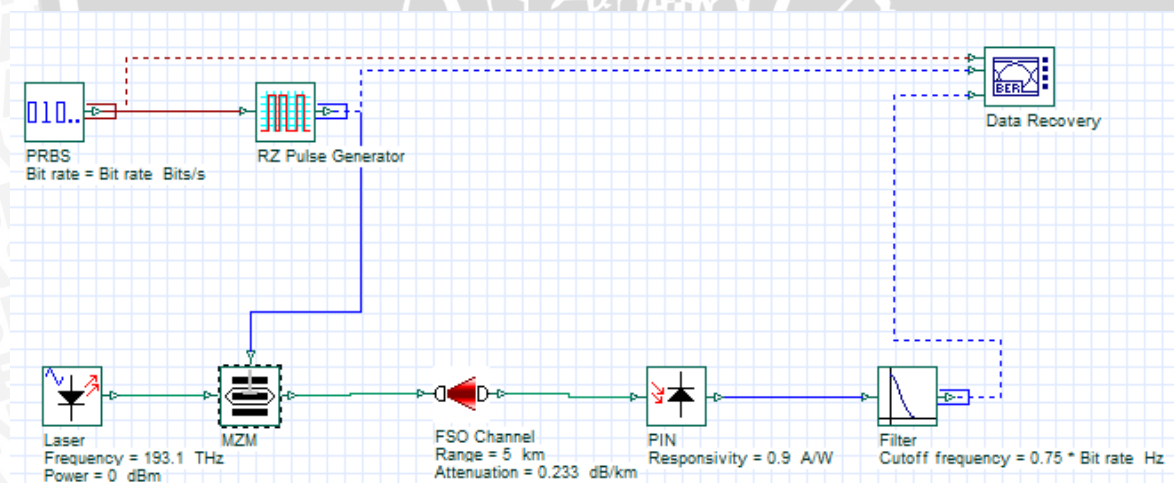
G= variasi modulator eksternal

H= variasi *photodetector*

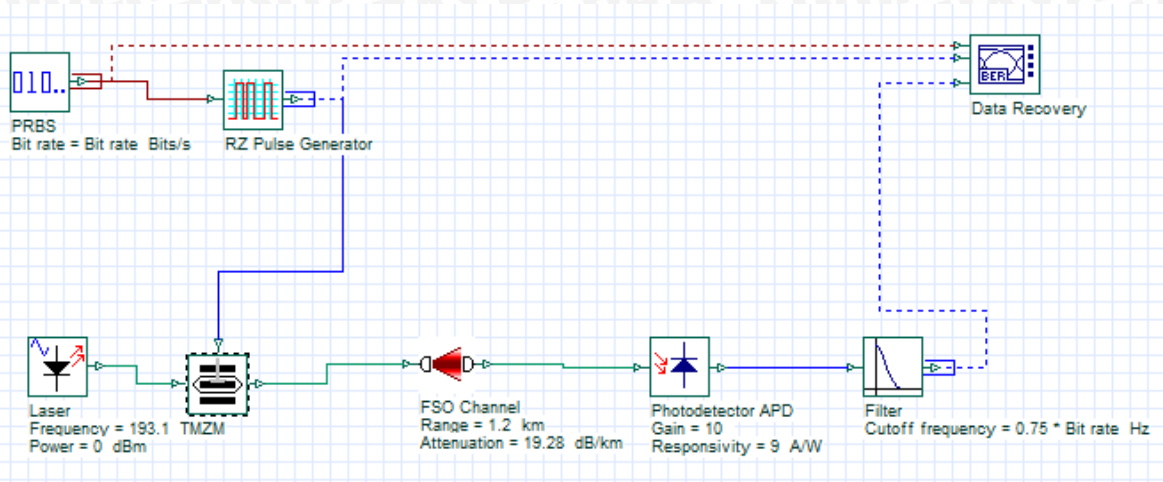
Tabel 4.3 menjelaskan kombinasi desain simulasi dengan berbagai variasi komponen yang akan diuji pada *software Optisystem*. 8 kombinasi desain simulasi tersebut akan diuji dengan parameter attenuasi cuaca cerah yaitu sebesar 0.233 dB/km dan attenuasi cuaca hujan lebat yaitu sebesar 19,28 dB/km. Selain itu pengujian sistem juga akan divariasikan dengan parameter *power input* saat cuaca cerah sebesar 8-12 dBm dan *power input* 16-20 dBm saat cuaca hujan lebat. Nilai responsivitas detector pada PIN *photodiode* juga divariasikan yaitu sebesar 0,6 dan 0,9. Sedangkan pada *photodetector* APD nilai responsivitas divariasikan sebesar 6 dan 9. Jarak propagasi atmosfer untuk penelitian sistem FSO dengan kondisi cuaca cerah difokuskan pada jarak 5 km. Sedangkan saat kondisi cuaca hujan lebat difokuskan pada jarak propagasi 1,2 km. Selanjutnya perancangan desain simulasi yang dirancang pada Tabel 4.3 akan diimplementasikan pada tahap selanjutnya.

4.2.1 Konfigurasi Rangkaian Sistem FSO Pada Setiap Kombinasi dengan Menggunakan *Software Optisystem 7.0*

Pada sub sub bab ini akan menunjukkan bentuk desain simulasi pada *software Optisystem* yang telah dirancang dan dikombinasikan setiap komponen pada Tabel 4.3. Cara kerja sistem FSO juga dijelaskan pada bagian ini. Bentuk desain simulasi pada *software Optisystem 7.0* akan ditunjukkan pada gambar berikut ini.



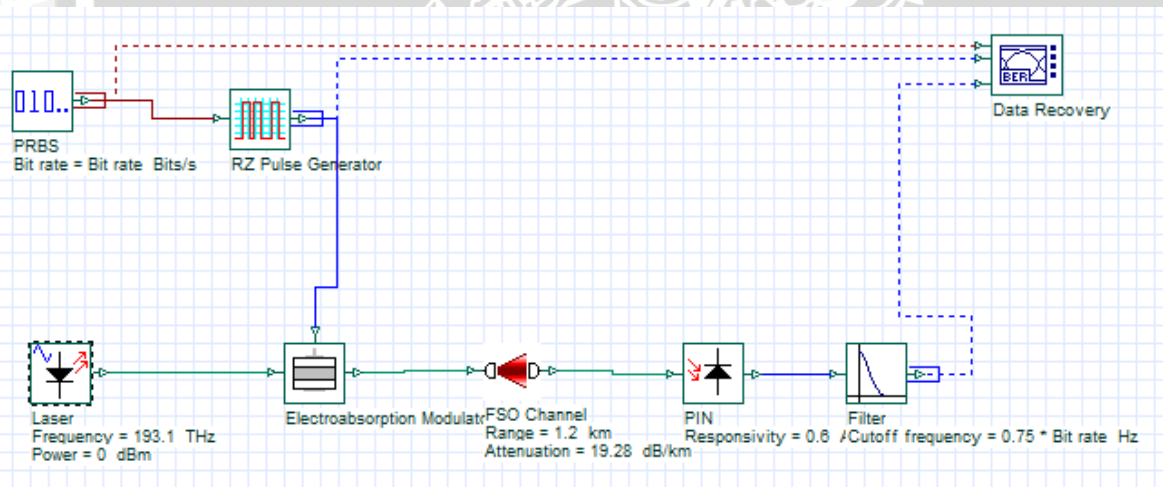
(a)



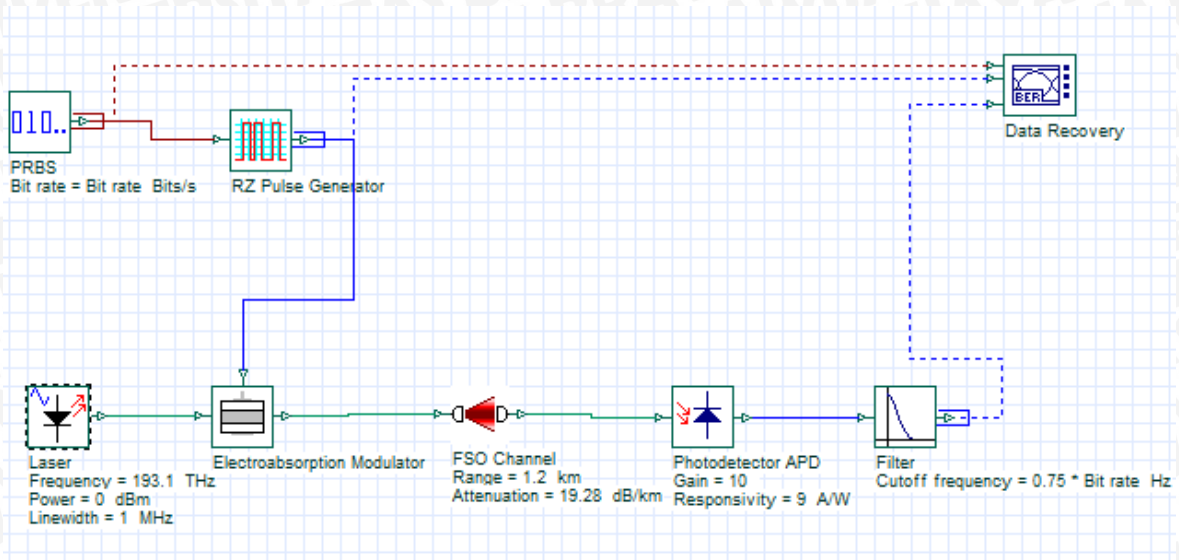
(b)

Gambar 4.9 Desain simulasi dengan (a) kombinasi 1 dan (b) kombinasi 2

Pada Gambar 4.9 (a) dan (b) menunjukkan desain simulasi dari kombinasi 1 dan kombinasi 2 sesuai dengan Tabel 4.3. Kombinasi 1 merupakan variasi komponen RZ, modulator eksternal MZM dan *photodetector* PIN. Sedangkan kombinasi 2 berupa RZ, MZM dan *photodetector* APD. Desain kombinasi 3 dan kombinasi 4 akan dijelaskan pada Gambar 4.10 berikut ini.



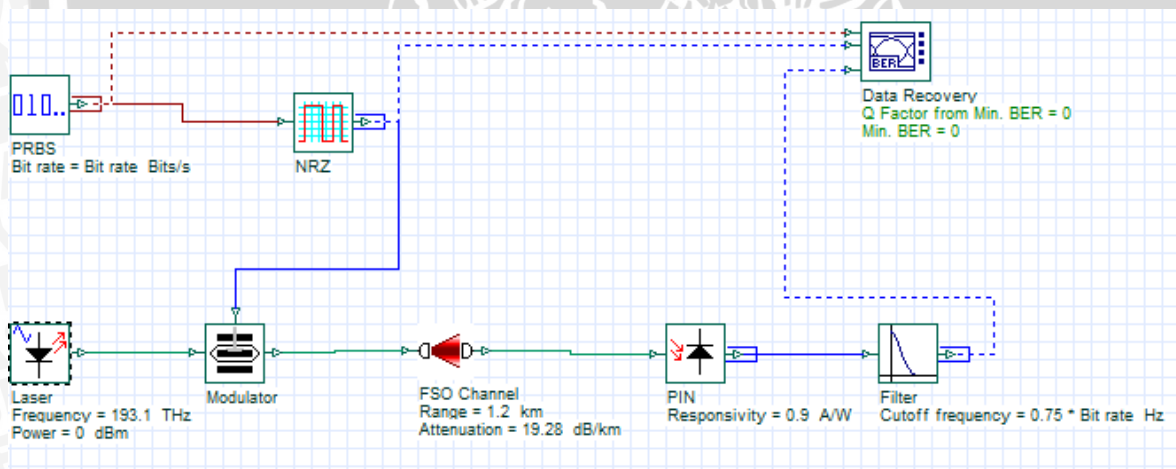
(a)



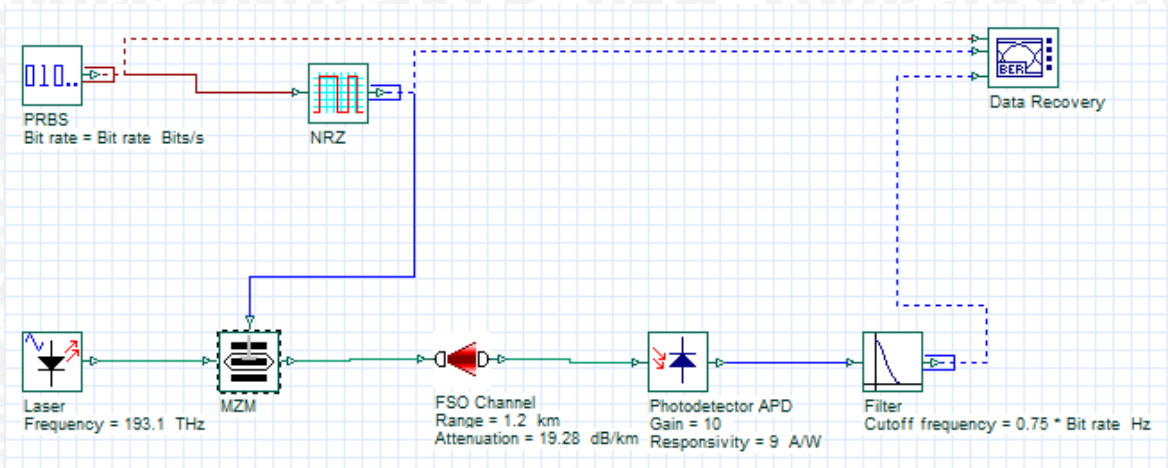
(b)

Gambar 4.10 Desain simulasi dengan (a) kombinasi 3 dan (b) kombinasi 4

Gambar 4.10 merupakan desain simulasi dari kombinasi 3 dan kombinasi 4. Kombinasi 3 merupakan variasi dengan komponen RZ, modulator EAM, dan *photodetector* PIN. Kombinasi 4 merupakan variasi komponen RZ, modulator EAM dan *photodetector* APD. Sedangkan desain simulasi kombinasi 5 dan 6 akan ditunjukkan pada Gambar 4.11.



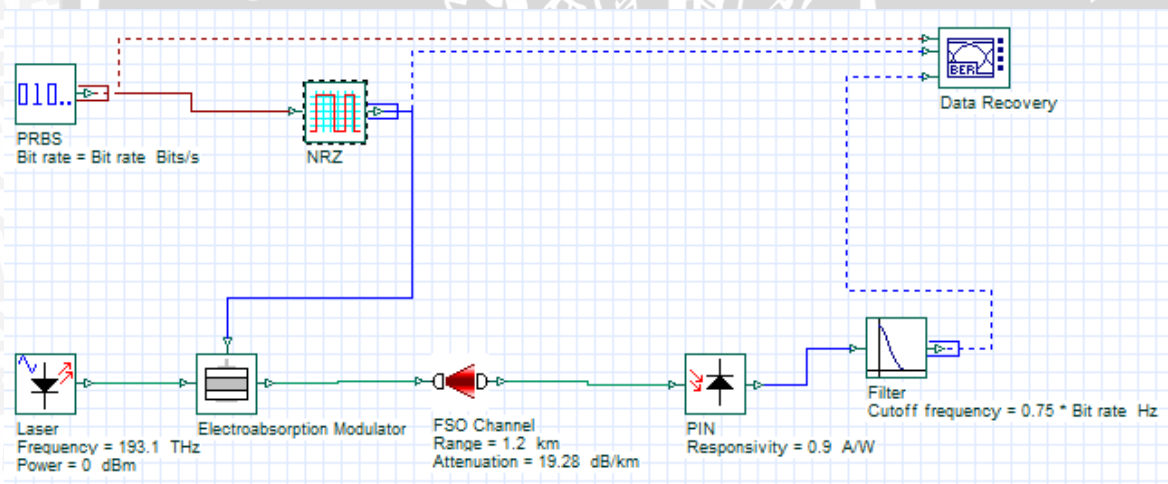
(a)



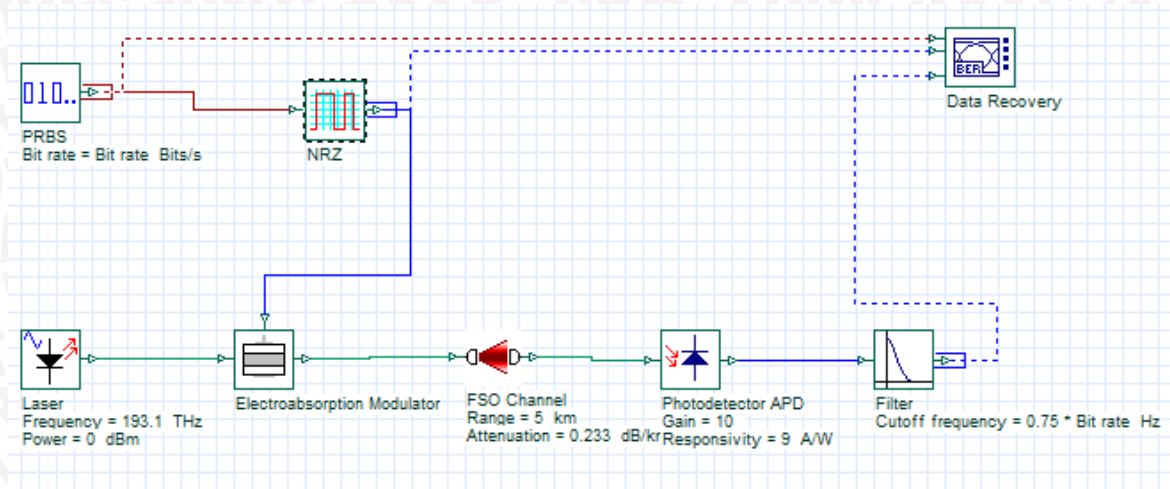
(b)

Gambar 4.11 Desain simulasi dengan (a) kombinasi 5 dan (b) kombinasi 6

Desain simulasi kombinasi 5 dan 6 ditunjukkan pada Gambar 4.3. Kombinasi 5 memiliki variasi komponen yaitu NRZ, modulator MZM, dan *photodetector* PIN. Sedangkan kombinasi 6 memiliki variasi komponen NRZ, MZ dan APD. Kombinasi 7 dan kombinasi 8 akan ditunjukkan pada Gambar 4.12 berikut ini.



(a)



(b)

Gambar 4.12 Desain simulasi dengan (a) kombinasi 7 dan (b) kombinasi 8

Pada Gambar 4.12 menunjukkan desain simulasi sistem FSO dengan kombinasi 7 dan kombinasi 8. Kombinasi 7 merupakan variasi komponen NRZ, modulator EAM dan *photodetector* PIN. Kombinasi 8 meliputi variasi komponen NRZ, modulator EAM dan APD.

Prinsip kerja dari sistem FSO dengan simulasi menggunakan *software Optisystem 7.0* diawali dengan komponen *pseudo-random bit sequence generator* yang menghasilkan sinyal biner dan ditransmisikan ke *signal generator* berupa *Line coding* RZ ataupun NRZ. Deret 0 dan 1 akan dikonversi menjadi sinyal listrik. Kemudian sinyal listrik tersebut akan menjadi *input* dari modulator eksternal (*Mach Zehnder modulator* atau *Electroabsorption modulator*) yang memodulasi sinyal optik dari sumber cahaya CW laser pada panjang gelombang 1550 nm. *Output* dari modulator eksternal berupa sinyal optik dan ditransmisikan menuju *receiver* dengan media propagasi atmosfer. 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.

4.3 Hasil Eksperimen dan Pembahasan

Hasil eksperimen optimasi *bit error rate* dan *Q factor* pada sistem FSO berdasarkan variasi *Line coding* dan modulasi 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 yang memberikan performansi terbaik pada sistem FSO di kondisi cuaca cerah dan hujan lebat telah dianalisis pada sub bab ini. Kombinasi komponen pada desain sistem FSO yang telah dijelaskan pada Tabel 4.3. Sedangkan parameter yang digunakan pada penelitian ini telah dijabarkan pada Tabel 4.1. Pada bab ini juga dianalisis optimasi dilakukan dengan mengamati parameter BER dan *Q factor* pada sistem FSO. Pengaruh responsivitas *photodetector* dan *power input* terhadap performansi sistem FSO juga telah dianalisis. Pada eksperimen ini hasil nilai BER dan *Q factor* pada setiap kombinasi komponen sistem FSO saat kondisi cuaca cerah dan hujan lebat dapat ditunjukkan pada tabel berikut ini.

Tabel 4.4 Data Eksperimen Sistem FSO Kondisi Cuaca Cerah

Cerah	Pin	R	BER	Q factor	
KOMBINASI 1 (RZ, MZM, PIN)	8	0,6	4,60370E-03	2,59895	
		0,9	1,11412E-04	3,68606	
	9	0,6	7,40693E-04	3,17288	
		0,9	3,72295E-06	4,47471	
	10	0,6	5,48865E-05	3,86229	
		0,9	3,05391E-08	5,40950	
	11	0,6	1,36528E-06	4,68423	
		0,9	3,62299E-11	6,50903	
	12	0,6	7,44285E-09	5,65668	
		0,9	3,10802E-15	7,79269	
	KOMBINASI 2 (RZ, MZM, APD)	8	6	2,21807E-07	5,01355
			9	3,47104E-11	6,48759
9		6	2,51603E-09	5,81110	
		9	2,93990E-14	7,47756	
10		6	7,51836E-12	6,71349	
		9	3,18506E-18	8,59389	
11		6	4,07171E-15	7,73247	
		9	2,50031E-23	9,85150	
12		6	2,49518E-19	8,88102	
		9	6,91663E-30	11,26680	
KOMBINASI 3 (RZ, EAM, PIN)		8	0,6	6,74718E-03	2,46530
			0,9	2,43548E-04	3,48241
	9	0,6	1,31324E-03	3,00314	
		0,9	1,21029E-05	4,21656	
	10	0,6	1,30091E-04	3,64664	
		0,9	1,80066E-07	5,08314	
	11	0,6	5,00962E-06	4,41118	
		0,9	5,21317E-10	6,09670	
	12	0,6	5,26402E-08	5,31153	
		0,9	1,68637E-13	7,27230	
	KOMBINASI 4 (RZ, EAM, APD)	8	6	4,05569E-07	4,89723
			9	2,39589E-10	6,19456
9		6	8,67570E-09	5,60346	
		9	7,34392E-13	7,04865	
10		6	6,76275E-11	6,39052	
		9	5,05855E-16	7,99911	
11		6	1,49420E-13	7,26675	
		9	5,39962E-20	9,05663	
12		6	6,83842E-17	8,24178	
		9	5,61194E-25	10,23340	

Cerah	Pin	R	BER	Q-Factor	
Kombinasi 5 (NRZ, MZM PIN)	8	0,6	5,39679E-04	3,26239	
		0,9	1,66446E-06	4,64297	
	9	0,6	3,17958E-05	3,99260	
		0,9	8,26880E-09	5,63836	
	10	0,6	5,51704E-07	4,86581	
		0,9	4,58535E-12	6,81246	
	11	0,6	1,72641E-09	5,90203	
		0,9	1,27561E-16	8,18629	
	12	0,6	5,07448E-13	7,12197	
		0,9	6,31841E-23	9,78184	
	KOMBINASI 6 (NRZ, MZM APD)	8	6	6,39084E-12	6,73958
			9	1,61011E-18	8,67391
9		6	2,65224E-15	7,78901	
		9	8,65264E-24	9,95934	
10		6	1,15516E-19	8,96826	
		9	1,40960E-30	11,40550	
11		6	2,98262E-25	10,28830	
		9	2,87619E-39	13,03230	
12		6	1,85032E-32	11,77800	
		9	2,48327E-50	14,84890	
KOMBINASI 7 (NRZ, EAM, PIN)		8	0,6	1,03633E-03	3,07354
			0,9	6,51170E-06	4,35392
	9	0,6	8,56707E-05	3,75202	
		0,9	6,57696E-08	5,27098	
	10	0,6	2,49255E-06	4,55965	
		0,9	1,06056E-10	6,34663	
	11	0,6	1,70666E-08	5,51310	
		0,9	1,44458E-14	7,59754	
	12	0,6	1,62455E-11	6,62915	
		0,9	7,44462E-20	9,03993	
	KOMBINASI 8 (NRZ, EAM, APD)	8	6	2,22974E-09	5,83711
			9	6,50921E-14	7,38016
9		6	1,01644E-11	6,67636	
		9	1,83700E-17	8,39903	
10		6	1,09391E-14	7,61373	
		9	6,07004E-22	9,53504	
11		6	1,92941E-18	8,65953	
		9	1,37524E-27	10,80080	
12		6	3,54219E-23	9,82536	
		9	1,06895E-34	12,21220	

Tabel 4.5 Data Eksperimen Sistem FSO Kondisi Cuaca Hujan Lebat

Hujan Lebat	Pin	R	BER	Q factor
KOMBINASI 1 (RZ, MZM, PIN)	16	0,6	1,00000E+00	0,00000
		0,9	3,83600E-03	2,66086
	17	0,6	1,10558E-02	2,28317
		0,9	5,71096E-04	3,24749
	18	0,6	2,58175E-03	2,79132
		0,9	3,79168E-05	3,95155
	19	0,6	3,24815E-04	3,40451
		0,9	8,08812E-07	4,79021
	20	0,6	1,70009E-05	4,13915
		0,9	3,56619E-09	5,78154
KOMBINASI 2 (RZ MZM, APD)	16	6	4,09057E-05	3,90303
		9	1,39069E-07	5,10208
	17	6	2,25178E-06	4,55076
		9	1,37158E-09	5,91136
	18	6	5,13236E-08	5,28650
		9	3,42544E-12	6,82680
	19	6	3,75742E-10	6,12015
		9	1,47505E-15	7,86029
	20	6	6,40504E-13	7,06269
		9	6,75081E-20	9,02496
KOMBINASI 3 (RZ, EAM, PIN)	16	0,6	1,00000	0,00000
		0,9	5,72650E-03	2,52341
	17	0,6	1,48647E-02	2,16853
		0,9	1,01414E-03	3,07292
	18	0,6	4,01322E-03	2,64579
		0,9	9,37967E-05	3,72975
	19	0,6	6,29997E-04	3,21966
		0,9	3,16366E-06	4,50954
	20	0,6	4,61826E-05	3,90439
		0,9	2,77615E-08	5,42679
KOMBINASI 4 (RZ, EAM APD)	16	6	4,20433E-05	3,89345
		9	2,70261E-07	4,97617
	17	6	3,10703E-06	4,48208
		9	5,19369E-09	5,69149
	18	6	1,14091E-07	5,14017
		9	3,54121E-11	6,48857
	19	6	1,74692E-09	5,87433
		9	6,61962E-14	7,37587
	20	6	8,96831E-12	6,69216
		9	2,45871E-17	8,36319
KOMBINASI 5 (NRZ, MZM, PIN)	16	0,6	9,89466E-03	2,32328
		0,9	4,07154E-04	3,34131
	17	0,6	2,07913E-03	2,85917
		0,9	2,12215E-05	4,08730
	18	0,6	2,20681E-04	3,50749
		0,9	3,09782E-07	4,97859
	19	0,6	8,81832E-06	4,28644
		0,9	7,62295E-10	6,03529

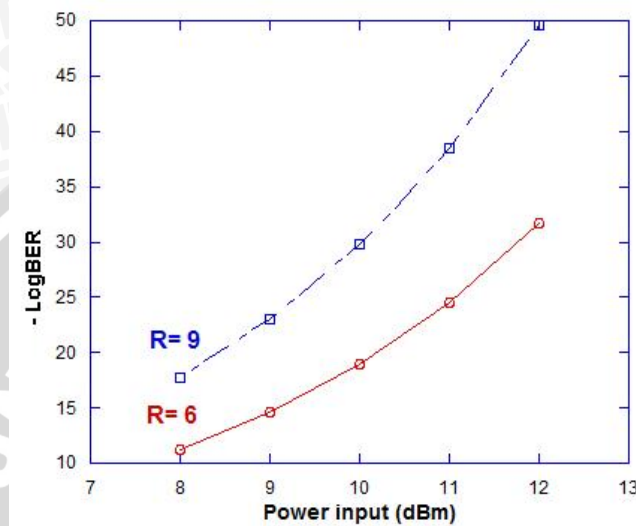
Hujan Lebat	Pin	R	BER	Q factor
	20	0,6	8,85751E-08	5,21541
		0,9	1,61221E-13	7,27816
KOMBINASI 6 (NRZ, MZM, APD)	16	6	5,78538E-08	5,26750
		9	2,83337E-12	6,85638
	17	6	3,64381E-10	6,12767
		9	9,26568E-16	7,92047
	18	6	4,99550E-13	7,09946
		9	2,98951E-20	9,11569
	19	6	9,84784E-17	8,19388
		9	5,31118E-26	10,45300
20	6	1,68169E-21	9,42210	
	9	1,98365E-33	11,96450	
KOMBINASI 7 (NRZ, EAM, PIN)	16	0,6	1,56401E-02	2,14760
		0,9	8,07832E-04	3,14701
	17	0,6	3,42688E-03	2,69761
		0,9	6,01123E-05	3,83980
	18	0,6	4,70487E-04	3,30161
		0,9	1,51019E-06	4,66367
	19	0,6	2,78806E-05	4,02423
		0,9	8,45173E-09	5,63534
	20	0,6	5,10240E-07	4,88191
		0,9	6,12502E-12	6,77156
KOMBINASI 8 (NRZ, EAM, APD)	16	6	1,44318E-06	4,64718
		9	1,26347E-09	5,93083
	17	6	3,83531E-08	5,34459
		9	4,94256E-12	6,78111
	18	6	3,77618E-10	6,12561
		9	4,39083E-15	7,73064
	19	6	1,06780E-12	6,99872
		9	6,09128E-19	8,78990
	20	6	6,21571E-16	7,97349
		9	8,28340E-24	9,97065

Pada Tabel 4.4 dan 4.5 telah dijabarkan data eksperimen setiap kombinasi komponen pada sistem FSO saat cuaca cerah dan hujan lebat di daerah tropis. Pada Tabel 4.4 merupakan penjabaran data hasil eksperimen pada setiap kombinasi komponen yang telah ditentukan sebelumnya pada Tabel 4.1 saat cuaca cerah di daerah tropis. Sedangkan Tabel 4.5 merupakan data hasil eksperimen pada setiap kombinasi komponen saat cuaca hujan lebat di daerah tropis. Hasil eksperimen berupa parameter performansi sistem FSO yaitu *Bit error rate* dan *Q factor*. Pada Tabel 4.4 dan 4.5 divariasikan pula *power input* dan responsivitas *photodetector* pada sistem FSO. Data hasil eksperimen tersebut kemudian dianalisis guna memperoleh optimasi pada sistem FSO tersebut.

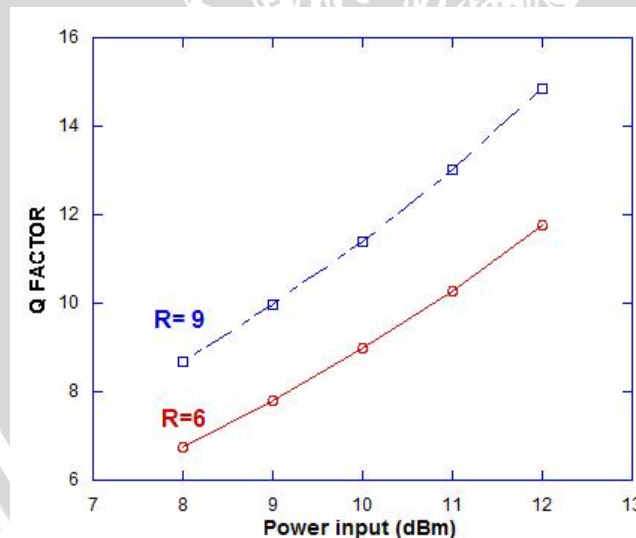
4.3.1 Analisis Pengaruh Variasi *Power input* Terhadap Performansi Sistem FSO

Performansi parameter BER dan *Q factor* pada sistem FSO akan dibahas pada sub sub bab ini. Eksperimen telah dilakukan pada saat kondisi cuaca cerah dan saat cuaca hujan lebat

di daerah tropis. Eksperimen dilakukan dengan memvariasikan komponen pada sistem FSO. Variasi *power input* juga diberikan pada eksperimen ini. Dari data eksperimen pada Tabel 4.4 dan 4.5 akan dianalisis pengaruh dari variasi *power input* terhadap performansi sistem FSO. Data eksperimen pengaruh variasi *power input* terhadap nilai BER dan *Q factor* pada cuaca cerah akan ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar berikut ini.



Gambar 4.13 Grafik hubungan *power input* terhadap BER saat cuaca cerah



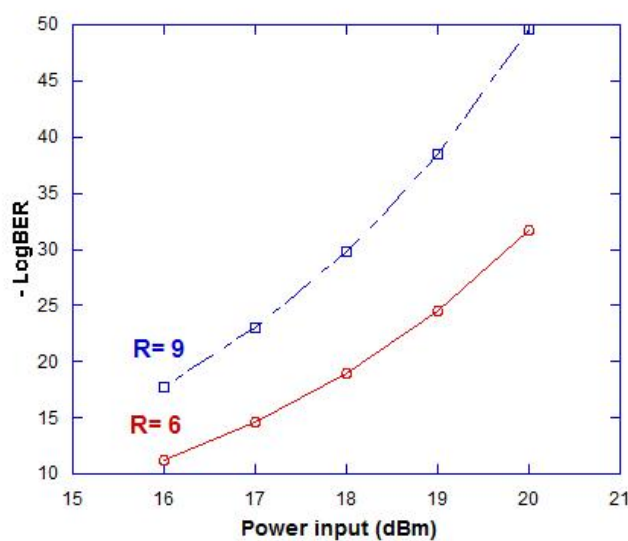
Gambar 4.14 Grafik hubungan *power input* terhadap *Q factor* saat cuaca cerah

Gambar 4.13 dan 4.14 menampilkan hubungan *power input* terhadap parameter performansi BER dan *Q factor* pada sistem FSO dalam bentuk grafik. Pada penelitian ini data yang digunakan adalah data hasil simulasi dengan kombinasi 6 yaitu komponen NRZ, MZM, dan APD. Parameter pengukuran dengan panjang gelombang 1550 nm, atenuasi

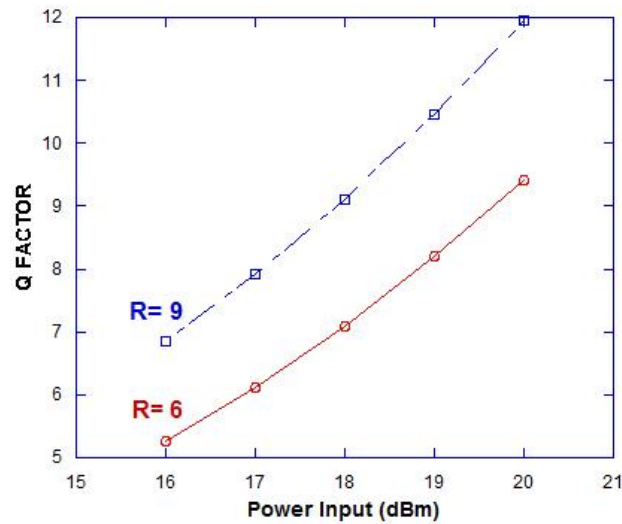
cuaca cerah 0,233 dB/km, dan divariasikan dengan *power input* 8-12 dBm untuk kondisi cuaca cerah.

Berdasarkan grafik hubungan *power input* terhadap nilai BER dan *Q factor* pada cuaca cerah dapat dilihat bahwa semakin besar *power input* yang diberikan pada sistem FSO maka nilai BER atau rasio kesalahan bit yang diterima semakin kecil. Begitu pula semakin besar *power input* pada sistem FSO maka *Q factor* semakin besar. Hal itu dibuktikan pada data eksperimen saat *power input* 8 dBm nilai BER yaitu $1,61011 \cdot 10^{-18}$ dan *Q factor* sebesar 8,67391. Sedangkan saat *power input* 12 dBm nilai BER yang dihasilkan $2,48327 \cdot 10^{-50}$ dan *Q factor* 14,84890. Grafik hubungan *power input* terhadap parameter logBER dan *Q factor* naik secara eksponensial. Hal ini terjadi karena sinyal dapat ditransmisikan dengan baik dengan atenuasi rendah pada sistem FSO tersebut. Atenuasi 0,233 dB/km saat cuaca cerah tidak memberikan dampak yang signifikan pada performansi sistem FSO karena semakin besar daya yang diberikan maka kemampuan sistem untuk tahan terhadap atenuasi akibat absorpsi dan turbulensi atmosfer juga semakin besar.

Sedangkan analisis hubungan *power input* terhadap parameter BER dan *Q factor* saat kondisi hujan lebat akan ditunjukkan dengan grafik pada Gambar 4.15 dan 4.16. Pada Gambar tersebut menampilkan hubungan *power input* terhadap parameter performansi BER dan *Q factor* pada sistem FSO dalam bentuk grafik. Kombinasi 6 digunakan untuk mengetahui pengaruh *power input* terhadap parameter performansi BER dan *Q factor*. Parameter pengukuran dengan panjang gelombang 1550 nm, atenuasi cuaca cerah 19,28 dB/km, dan divariasikan dengan *power input* 16-20 dBm untuk kondisi cuaca hujan lebat.



Gambar 4.15 Hubungan *power input* terhadap BER saat cuaca hujan lebat



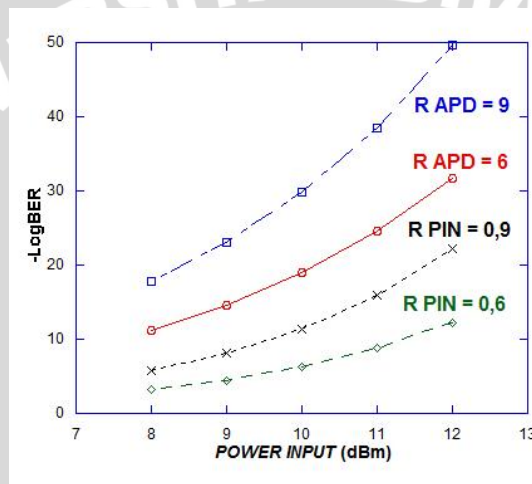
Gambar 4.16 Hubungan *power input* terhadap *Q factor* saat cuaca hujan lebat

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa dengan atenuasi cuaca hujan lebat 19,28 dB/km, semakin tinggi *power input* yang diberikan maka tingkat kesalahan bit (BER) semakin kecil. Sedangkan pada Gambar 4.16 menunjukkan bahwa semakin tinggi *power input* yang diberikan maka *Q factor* semakin besar. Hal tersebut berdasarkan data eksperimen simulasi yang menunjukkan *power input* terkecil 16 dBm menunjukkan nilai BER sebesar $2,83337 \times 10^{-12}$ dan *Q factor* 6,85638. Pada *power input* 20 dBm memberikan nilai BER $1,98365 \times 10^{-33}$ dan *Q factor* 11,96450. Atenuasi pada cuaca hujan lebat memberikan pengaruh yang lebih besar pada parameter BER dan *Q factor* bila dibandingkan dengan atenuasi cuaca cerah. Atenuasi bisa diakibatkan karena gangguan kondisi cuaca seperti absorpsi dan *scattering*. Absorpsi merupakan pelemahan cahaya yang menyebabkan daya laser berkurang dan mempengaruhi availability dari sistem FSO tersebut. Sedangkan *scattering* merupakan proses hamburan gelombang cahaya oleh partikel yang berada di atmosfer secara acak. *Scattering* terjadi karena sinyal berabrakan dengan tetesan hujan sehingga terjadi penyebaran sinyal. Namun dengan memberikan *power input* yang besar pada sistem FSO tersebut dapat memperbaiki parameter BER dan *Q factor*. Karena semakin besar daya pada sistem FSO maka kemampuan cahaya untuk menembus partikel hujan semakin besar pula. Sehingga kemungkinan terjadinya redaman semakin kecil. Performansi sistem FSO di kondisi cuaca hujan lebat juga semakin baik

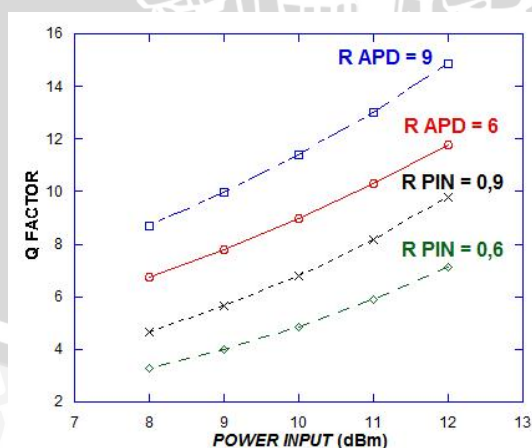
4.3.2 Analisis Pengaruh Variasi Responsivitas *Photodetector* Terhadap Performansi Sistem FSO

Pada sub sub bab ini akan membahas pengaruh variasi responsivitas *photodetector* terhadap performansi sistem FSO. Dari data eksperimen pada Tabel 4.4 dan 4.5 akan

dianalisis pengaruh dari variasi responsivitas *photodetector* terhadap performansi sistem FSO. Pada analisis ini menggunakan 5 data eksperimen dari kombinasi 5 yang terdiri dari komponen NRZ, MZM, PIN dan kombinasi 6 yang terdiri dari komponen NRZ, MZM dan APD pada panjang gelombang 1550 nm. Terdapat 2 variasi responsivitas *photodetector* PIN yang digunakan pada penelitian ini yaitu mengambil nilai terendah 0,6 (A/W) dan tertinggi 0,9 (A/W) sesuai data sheet yang digunakan. Sedangkan untuk responsivitas *photodetector* APD yaitu 6 (A/W) dan 9 (A/W). Eksperimen dilakukan dengan kondisi cuaca cerah (atenuasi 0,233 dB/km) dan hujan lebat (atenuasi 19,28 dB/km). Hasil eksperimen pengaruh variasi responsivitas *photodetector* terhadap nilai BER dan Q factor pada cuaca cerah akan ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 4.9 berikut ini.



Gambar 4.17 Hubungan variasi responsivitas *photodetector* PIN dan APD terhadap BER pada cuaca cerah

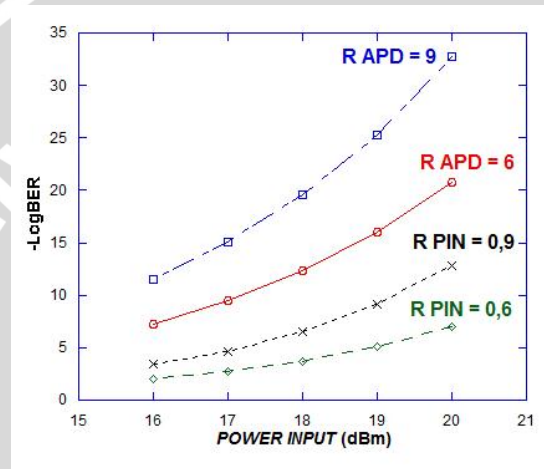


Gambar 4.18 Hubungan variasi responsivitas *photodetector* PIN dan APD terhadap Q factor pada cuaca cerah

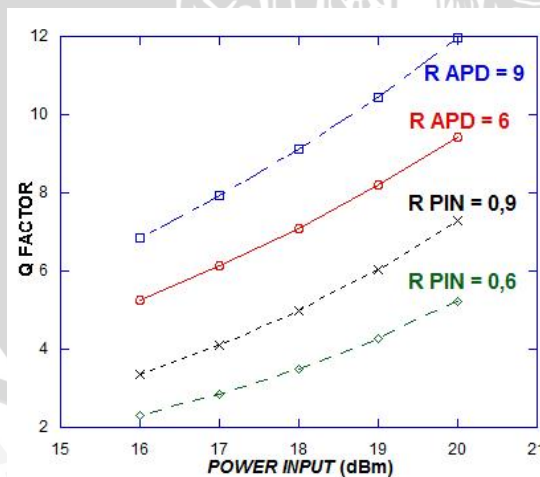
Gambar 4.17 dan 4.18 menunjukkan hubungan variasi responsivitas *photodetector* PIN dan APD terhadap BER dan Q factor pada cuaca cerah. Nilai responsivitas APD 9

(A/W) dan PIN pada 0,9 (A/W) memberikan nilai BER terendah dan Q factor tertinggi pada setiap kelima data yang diberikan. Berdasarkan data tersebut maka semakin besar responsivitas *photodetector* baik untuk jenis APD maupun PIN memberikan nilai BER yang semakin rendah. Sehingga nilai Q factor juga akan meningkat sesuai dengan peningkatan nilai responsivitas *photodetector*.

Kondisi cuaca hujan lebat juga dianalisis pada bagian ini. Eksperimen pengaruh responsivitas *photodetector* pada performansi sistem FSO saat cuaca hujan lebat juga dilakukan. Pada Gambar 4.19 dan 4.20 menampilkan hubungan responsivitas *photodetector* terhadap parameter performansi BER dan Q factor pada sistem FSO dalam bentuk grafik.



Gambar 4.19 Hubungan variasi responsivitas *photodetector* PIN dan APD terhadap BER pada cuaca hujan lebat



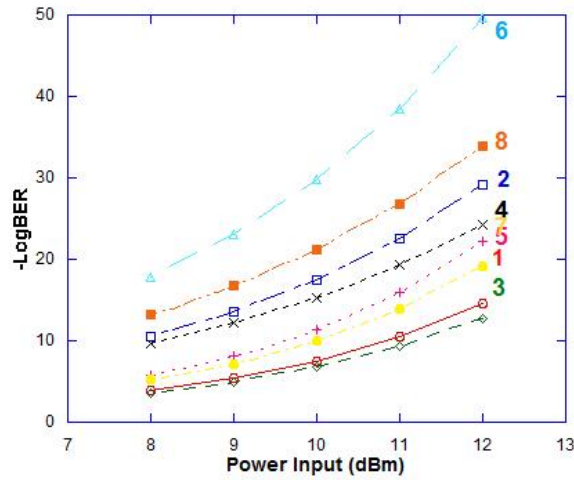
Gambar 4.20 Hubungan variasi responsivitas *photodetector* PIN dan APD terhadap Q factor pada cuaca hujan lebat

Pada Gambar 4.19 dan 4.20 menunjukkan hubungan variasi responsivitas *photodetector* PIN dan APD terhadap BER dan Q factor pada hujan lebat. Responsivitas

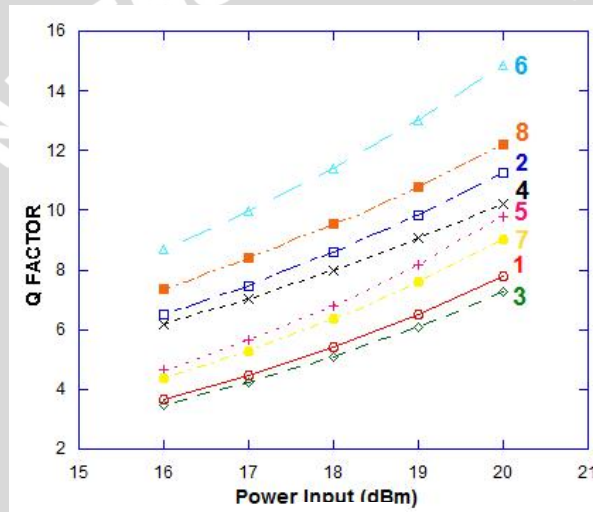
PIN divariasikan dengan dua nilai yaitu 0,6 dan 0,9 (A/W). Responsivitas APD divariasikan dengan dua nilai yaitu 6 dan 9 (A/W). Nilai responsivitas APD 9 (A/W) dan PIN pada 0,9 (A/W) memberikan nilai BER terendah pada masing-masing data penelitian. Performansi parameter Q factor juga meningkat seiring dengan meningkatnya responsivitas *photodetector*. Berdasarkan penelitian di cuaca cerah dan cuaca hujan lebat maka semakin besar responsivitas *photodetector* baik untuk jenis APD maupun PIN memberikan nilai BER yang semakin rendah. Sehingga nilai Q factor juga akan meningkat sesuai dengan peningkatan nilai responsivitas *photodetector*. Atenuasi yang timbul saat hujan lebat tentunya dapat mengganggu proses transmisi sinyal di udara. Sehingga dapat menyebabkan performansi parameter BER dan Q factor menurun. Pada sisi penerima, nilai responsivitas *photodetector* yang tinggi dapat diberikan guna memperbaiki performansi sistem FSO tersebut. Berdasarkan Gambar 4.19 dan 4.20, nilai BER dan Q factor terbaik dihasilkan oleh *photodetector* APD. Karena *Photodetector* APD memiliki *gain internal* yang menghasilkan nilai SNR yang tinggi. Namun dalam pemasarannya APD memang lebih mahal dari PIN *photodiode*.

4.3.3 Analisis Performansi Sistem FSO dengan Parameter *Bit error rate* dan Q factor Pada Kondisi Cuaca Cerah dan Hujan Lebat di Daerah Tropis

Parameter performansi sistem FSO yang dianalisis adalah BER dan Q factor. Pada sub bab ini telah dianalisis parameter BER dan Q factor pada setiap kombinasi komponen yang telah dijabarkan pada Tabel 4.3. BER menyatakan berapa jumlah bit salah yang terjadi dalam satuan detik. Sedangkan Q factor parameter yang mengukur kualitas sinyal pada sistem FSO. Pada analisis ini akan diamati nilai BER dan Q factor dari data hasil eksperimen kombinasi 1 hingga 8. Setiap kombinasi memberikan nilai BER dan Q factor terbaik pada responsivitas APD 9 (A/W) dan responsivitas PIN 0,9 (A/W). Hal ini dibuktikan juga pada sub sub bab sebelumnya yang menunjukkan semakin besar nilai responsivitas *photodetector* maka BER yang dihasilkan semakin rendah. Maka dari itu analisis performansi sistem FSO dilakukan pada responsivitas APD 9 (A/W) dan responsivitas PIN 0,9 (A/W) saat cuaca cerah dan hujan lebat. Berikut adalah grafik nilai BER pada setiap kombinasi komponen pada cuaca cerah dalam Gambar 4.21 (a) dan (b).

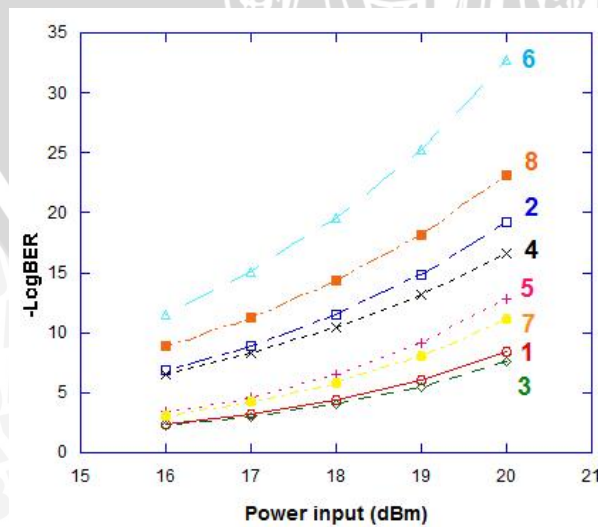


(a)

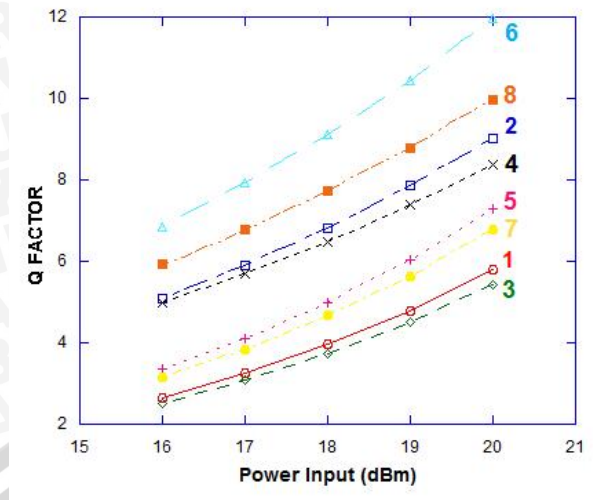


(b)

Gambar 4.21 Nilai (a) BER dan (b) Q factor untuk setiap kombinasi komponen pada cuaca cerah



(a)



(b)

Gambar 4.22 Nilai (a) BER dan (b) Q factor untuk setiap kombinasi komponen pada cuaca hujan lebat

Gambar 4.21 (a) menunjukkan nilai BER pada setiap kombinasi komponen 1 hingga 8 saat kondisi cuaca cerah di daerah tropis. Gambar 4.21 (b) menunjukkan nilai Q factor pada setiap kombinasi 1 hingga 8 di cuaca cerah. Sedangkan Gambar 4.22 (a) menunjukkan grafik nilai BER untuk setiap kombinasi komponen saat kondisi cuaca hujan lebat. Gambar 4.22 (b) merupakan grafik nilai Q factor pada setiap kombinasi 1 hingga 8 saat kondisi cuaca hujan lebat. BER disebut juga probabilitas *bit error* yang merupakan nilai ukur kualitas sinyal yang diterima untuk sistem transmisi *data digital*. Semakin rendah probabilitas *bit error* pada sistem FSO maka performansi sistem tersebut semakin baik. Sistem FSO dikatakan memenuhi standar kelayakan sebagai sistem komunikasi jika memiliki parameter BER maksimum 10^{-9} dan parameter Q factor minimum 6.

Dari Gambar 4.21 dan 4.22 tersebut diketahui bahwa kombinasi rangkaian sistem komunikasi FSO yang memberikan performansi parameter BER terbaik yaitu kombinasi 6 pada cuaca cerah yang meliputi *bit rate* 40 Gbps, panjang gelombang 1550 nm, jarak propagasi 5 km, responsivitas 9 (A/W), *power input* 8-12 dBm, menggunakan komponen CWlaser, *Line coding* NRZ, modulator eksternal MZM dan *photodetector* APD. Nilai terendah BER pada kombinasi 6 yaitu $2,48327 \times 10^{-50}$ dan Q factor tertinggi pada nilai 14,84890 dengan *power input* 12 dBm.

Pada cuaca hujan lebat, performansi parameter BER terbaik ditunjukkan pada kombinasi 6 pula yang meliputi *bit rate* 40 Gbps, panjang gelombang 1550 nm, jarak propagasi 1,2 km, responsivitas 9, variasi *power input* 16-20 dBm menggunakan komponen CWlaser, *Line coding* NRZ, modulator optik MZM dan *photodetector* APD. Kombinasi 6

menunjukkan nilai BER terendah yaitu $1,98365 \times 10^{-33}$ dan memiliki nilai Q factor yaitu 11,96450 dengan $power\ input$ 20 dBm. Nilai Q factor tersebut tentunya dapat menunjang performansi sistem FSO. Nilai dari BER dan Q factor pada kombinasi 6 sudah sangat memenuhi standar kelayakan sistem FSO yaitu memiliki parameter BER diatas 10^{-9} dan parameter Q factor lebih dari 6. Sehingga pada kondisi cuaca cerah maupun hujan lebat kombinasi 6 tetap dapat memberikan performansi terbaik. Kombinasi 6 dapat tahan terhadap atenuasi cuaca hujan lebat yang diakibatkan oleh absorpsi dan *scattering*. Karena kombinasi 6 dengan $power\ input$ tinggi memiliki kemampuan cahaya untuk menembus partikel hujan semakin besar pula. Responsivitas *photodetector* yang tinggi dapat memperbaiki parameter BER dan Q factor setelah terjadi atenuasi pada transmisi media udara. Hal tersebut dapat meningkatkan kinerja dari sistem FSO dalam kondisi cuaca cerah maupun hujan lebat.

4.3.4 Optimasi Parameter BER dan Q factor Pada Sistem FSO Saat Kondisi Cuaca Cerah di Daerah Tropis

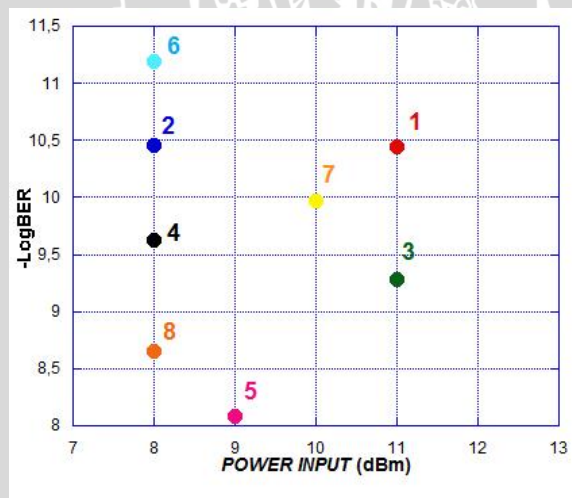
Pada sub bab ini membahas optimasi pada parameter *bit error rate* dan Q factor untuk memperbaiki dan meningkatkan kualitas kinerja dari sistem komunikasi FSO. Optimasi dilakukan untuk memperoleh kualitas sistem komunikasi FSO yang efisien dan efektif. Optimasi parameter *bit error rate* dan Q factor dilakukan dengan memperbaiki arsitektur jaringan terutama pada sisi *transmitter* yaitu dengan memvariasikan komponen *Line coding* dan modulator eksternal. Sedangkan pada sisi *receiver* memvariasikan komponen *photodetector*. Variasi komponen tersebut telah ditentukan sesuai Tabel 4.3. Kemudian diimplementasikan pada simulasi dengan variasi $power\ input$ dan responsivitas *photodetector* pada setiap kombinasi komponen 1 hingga 8. Tabel 4.6 menunjukkan data $power\ input$ terendah dengan nilai BER minimum ($\pm 10^{-9}$).

Data pada Tabel 4.6 diambil satu dari kombinasi 1 hingga 8. Setiap kombinasi rangkaian akan diambil data BER dengan $power\ input$ terendah namun sudah memiliki nilai minimal BER $\pm 10^{-9}$. Standar kelayakan sistem FSO yaitu memiliki nilai BER maksimum 10^{-9} dan memiliki Q factor minimal 6. Pada kombinasi 1, nilai BER minimal yang paling mendekati $\pm 10^{-9}$ yaitu $3,62299 \times 10^{-11}$ dan hasil tersebut didapatkan dari penggunaan $power\ input$ terendah 11 dBm. Sedangkan pada kombinasi 2, dengan $power\ input$ terendah 8 dBm sudah bisa memberikan nilai BER maksimum $\pm 10^{-9}$ yaitu $3,47104 \times 10^{-11}$. Gambar 4.23 menunjukkan nilai BER minimum ($\pm 10^{-9}$) pada setiap kombinasi dengan $power\ input$ terendah.

Tabel 4.6 Nilai BER Minimum dengan *Power Input* Terendah Pada Sistem FSO Saat Kondisi Cuaca Cerah

KOMBINASI	POWER INPUT (dBm)				
	8	9	10	11	12
1				3,62299E-11	
2	3,47104E-11				
3				5,21317E-10	
4	2,39589E-10				
5		8,26880E-09			
6	6,39084E-12				
7			1,06056E-10		
8	2,22974E-09				

Berdasarkan Tabel 4.6 maka nilai BER minimum di setiap kombinasi cuaca cerah akan ditampilkan pada Gambar 4.23 berikut ini.



Gambar 4.23 Nilai BER minimum pada setiap kombinasi rangkaian sistem FSO saat cuaca cerah

Gambar 4.23 menunjukkan nilai BER minimum dengan *power input* terendah pada setiap kombinasi rangkaian 1 hingga 8 sesuai dengan Tabel 4.6 pada kondisi cuaca cerah. Berdasarkan Gambar tersebut dapat dilihat kombinasi 6 pada cuaca cerah memiliki *power input* terendah 8 dBm namun sudah dapat menghasilkan nilai BER dibawah 10^{-9} yaitu $6,39084 \times 10^{-12}$ dengan Q-factor 6,73958. Kombinasi 6 pada rangkaian sistem FSO memiliki spesifikasi sumber optik berupa *Continous Wave Laser (CW Laser)*, modulator eksternal *Mach Zehnder* modulator, *Line coding NRZ*, *photodetector APD*. Sistem FSO kombinasi 6

menggunakan *bit rate* 40 Gbps, saat cuaca cerah dengan atenuasi 0,233 dB/km, dan responsivitas APD 6 (A/W). Hasil tersebut dapat diimplementasikan pada sistem FSO karena efisien dan efektif. Sistem FSO kombinasi 6 dapat diimplementasikan di cuaca cerah dengan *power input* yang rendah 8 dBm namun dapat mentransmisikan sinyal dengan performansi sistem yang baik. Karena dengan hasil BER minimum dan *Q factor* tinggi pada *power input* yang rendah dapat mengefisiensi umur perangkat dan biaya operasional sistem FSO tersebut.

4.3.5 Optimasi Parameter BER dan *Q factor* Pada Sistem FSO Saat Kondisi Cuaca Hujan Lebat di Daerah Tropis

Pada sub sub bab ini membahas optimasi pada parameter *bit error rate* dan *Q factor* untuk memperbaiki dan meningkatkan kualitas kinerja dari sistem komunikasi FSO pada cuaca hujan lebat. Hujan lebat merupakan faktor utama yang mengakibatkan atenuasi pada sistem FSO. Optimasi dilakukan untuk mengurangi dampak dari atenuasi tersebut. Seperti optimasi pada cuaca cerah, setiap kombinasi rangkaian akan diambil data BER dengan *power input* terendah namun sudah memiliki nilai minimal BER $\pm 10^{-9}$. Standar kelayakan sistem FSO yaitu memiliki nilai BER maksimum 10^{-9} dan memiliki *Q factor* minimal 6. Pada kombinasi 1, nilai BER $\pm 10^{-9}$ yaitu $3,56619 \times 10^{-9}$ didapatkan dari penggunaan power input 20 dBm. Tabel 4.7 merupakan data nilai BER pada kombinasi 1 hingga 8 yang memberikan nilai BER minimum dengan *power input* terendah saat kondisi hujan lebat di daerah tropis.

Tabel 4.7 Nilai BER Minimum dengan *Power Input* Terendah Pada Sistem FSO Saat Kondisi Cuaca Hujan Lebat

KOMBINASI KE-	POWER INPUT (dBm)				
	16	17	18	19	20
1					3,56619E-09
2		1,37158E-09			
3					
4		5,19369E-09			
5				7,62295E-10	
6	2,83337E-12				
7				8,45173E-09	
8	1,26347E-09				

Berdasarkan Tabel 4.7 nilai BER minimum dengan *power input* terendah pada sistem FSO saat kondisi cuaca hujan lebat ditampilkan pada Gambar 4.24 berikut ini.



Gambar 4.24 Nilai BER minimum pada setiap kombinasi rangkaian sistem FSO saat cuaca hujan lebat

Gambar 4.24 diperoleh hasil terbaik yaitu pada kombinasi 6. Kombinasi 6 saat cuaca hujan lebat memiliki *power input* terendah 16 dBm namun sudah dapat menghasilkan nilai BER dibawah 10^{-9} yaitu $2,83337 \times 10^{-12}$ dengan Q-factor 6,85638. Kombinasi 6 pada rangkaian sistem FSO memiliki spesifikasi sumber optik berupa *Continous Wave Laser* (CWLaser), modulator eksternal *Mach Zehnder* modulator, *Line coding* NRZ, dan *photodetector* APD. Sistem FSO kombinasi 6 menggunakan *bit rate* 40 Gbps, saat cuaca hujan lebat dengan atenuasi 19,28 dB/km, dan responsivitas APD 9 (A/W). Sehingga pada atenuasi hujan lebat 19,28 dB/km, parameter tersebut mampu digunakan dalam sistem FSO untuk menghasilkan nilai BER yang paling minimum. Standar ketentuan sistem FSO dengan nilai BER maksimum yang boleh digunakan pada sistem FSO 10^{-9} dan minimal *Q factor* pada sistem FSO yaitu 6.

Optimasi sistem FSO pada cuaca cerah maupun cuaca hujan lebat dapat dilakukan dengan memperbaiki jaringan arsitektur menggunakan komponen pada kombinasi 6. Komponen kombinasi 6 meliputi *Line coding* NRZ, MZM dan APD. *Line coding* NRZ memiliki *bandwidth* lebih sempit dibandingkan RZ namun dapat mentransmisikan sinyal dengan *bit rate* tinggi hingga 40 Gbps. *Line coding* RZ memiliki *bandwidth* 2 kali *bandwidth* NRZ karena RZ menggunakan dua elemen sinyal dalam proses konversi sinyal elektrik. Sedangkan untuk Prinsip kerja *Mach Zehnder* modulator telah dijelaskan pada bab II.

Photodetector APD memberikan performansi terbaik karena APD merupakan komponen elektrik semikonduktor dengan sensitivitas tinggi yang memanfaatkan efek

photoelectric untuk mengubah cahaya menjadi sinyal listrik. Pada APD sendiri sudah terdapat *gain internal* yang dapat menghasilkan SNR lebih baik bila dibandingkan dengan *photodetector* lainnya.

