

**DESAIN DAN ANALISIS SISTEM KOMUNIKASI WAVELENGTH
DIVISION MULTIPLEXING-FREE SPACE OPTIC (WDM-FSO) PADA
CUACA YANG BERVARIATIF**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TELEKOMUNIKASI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



MUHAMMAD FAHREZA KRESNAMURTI
NIM. 155060300111014

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2019

LEMBAR PENGESAHAN**DESAIN DAN ANALISIS SISTEM KOMUNIKASI WAVELENGTH
DIVISION MULTIPLEXING-FREE SPACE OPTIC (WDM-FSO) PADA
CUACA YANG BERVARIATIF****SKRIPSI**

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK TELEKOMUNIKASI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**MUHAMMAD FAHREZA KRESNAMURTI**
NIM. 155060300111014Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 27 Mei 2019

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS.
NIP. 19580728 198701 1 001Dr. Fakhriy Hario P., ST., MT.
NIP. 201201 840501 1 001Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik ElektroHadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM.
NIP. 19730520 200801 1 013

JUDUL SKRIPSI

DESAIN DAN ANALISIS SISTEM KOMUNIKASI *WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING-FREE SPACE OPTIC* (WDM-FSO) PADA CUACA YANG BERVARIATIF

Nama Mahasiswa : Muhammad Fahreza Kresnamurti
 NIM : 155060300111014
 Program Studi : TEKNIK ELEKTRO
 Konsentrasi : TEKNIK TELEKOMUNIKASI

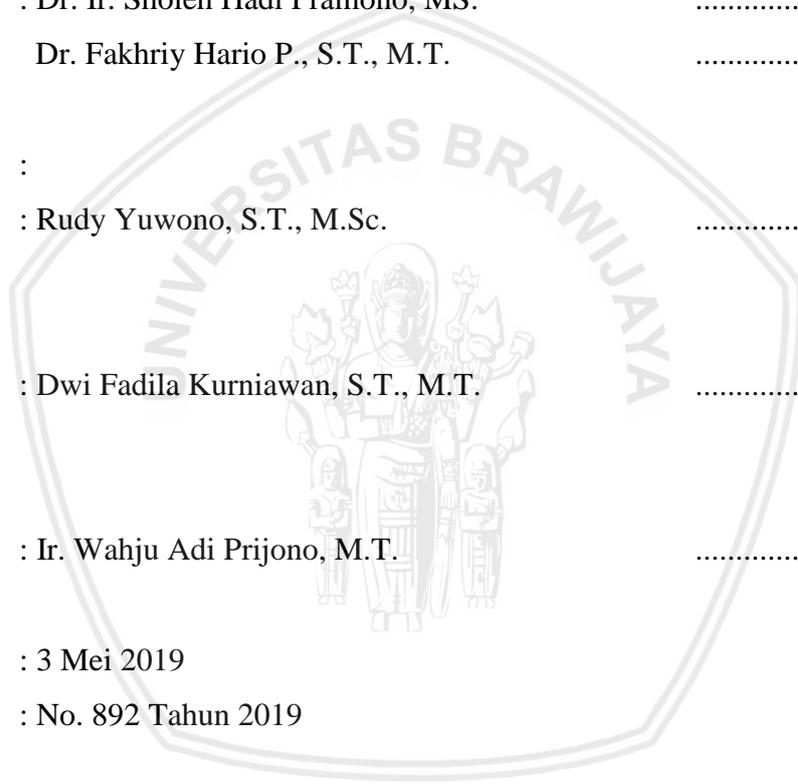
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS.
 Dr. Fakhriy Hario P., S.T., M.T.

Tim Dosen Penguji :
 Dosen Penguji 1 : Rudy Yuwono, S.T., M.Sc.

Dosen Penguji 2 : Dwi Fadila Kurniawan, S.T., M.T.

Dosen Penguji 3 : Ir. Wahyu Adi Prijono, M.T.

Tanggal Ujian : 3 Mei 2019
 SK Penguji : No. 892 Tahun 2019



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 26 April 2019

Mahasiswa,

Muhammad Fahreza Kresnamurti
NIM. 155060300111014





*Teriring Ucapan Terima Kasih kepada:
Ayah dan Mama tercinta*

RINGKASAN

Muhammad Fahreza Kresnamurti, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, April 2019, Desain dan Analisis Sistem Komunikasi *Wavelength Division Multiplexing-Free Space Optic* (WDM-FSO) pada Cuaca yang Bervariatif, Dosen Pembimbing: Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS. dan Dr. Fakhriy Hario P. ST., MT.

Implementasi WDM tergantung pada ketersediaan instalasi kabel serat optik, oleh karena itu, dengan tidak adanya infrastruktur serat, sistem WDM-FSO yang diusulkan bisa dengan mudah diaplikasikan. Sistem komunikasi FSO bila dibandingkan dengan sistem komunikasi nirkabel lainnya yaitu *bandwidth* yang lebih lebar, biaya instalasi yang lebih murah dibandingkan dengan serat optik, lebih mudah dan cepat dalam proses penyebaran, tidak membutuhkan lisensi. Kondisi cuaca seperti hujan, debu, salju, dan kabut / asap menjadi kendala pada media transmisi sistem FSO. Penelitian ini dilakukan secara simulasi dengan *Optisystem* yang bertujuan untuk mengkaji pengaruh jenis *line coding* dan *photodetector* serta kondisi cuaca pada kinerja sistem komunikasi WDM-FSO. Pengujian menggunakan 8 *channel* WDM dilakukan pada panjang gelombang 192.1 THz untuk kanal 1 dan 192.8 THz untuk kanal 8, bit rate 10 Gbps, *line coding* NRZ dan RZ serta *photodetector* APD dan PIN. Atenuasi cuaca cerah yang digunakan 0,233 dB/km dan cuaca hujan lebat 19,28 dB/km.

Hasil penelitian menunjukkan pada cuaca cerah, kombinasi rangkaian sistem komunikasi WDM-FSO yang memberikan kinerja parameter BER terbaik yaitu *bit rate* 10 Gbps, *line coding* RZ, panjang gelombang 192,4 THz nm, dan jarak transmisi 10 km. Nilai BER yaitu $1,62432 \times 10^{-52}$ dan *Q-Factor* 14,5472. Pada cuaca hujan lebat, kombinasi rangkaian sistem komunikasi WDM-FSO yang memberikan kinerja parameter BER terbaik yaitu *bit rate* 10 Gbps, *line coding* RZ, panjang gelombang 192,2 THz, dan jarak transmisi 1 km. Nilai terendah BER yaitu $6,17485 \times 10^{-22}$ dan *Q-Factor* tertinggi pada nilai 9,5471. Sistem komunikasi WDM-FSO dengan kombinasi rangkaian *bit rate* 10 Gbps, *line coding* RZ dan jenis *photodetector* APD pada cuaca cerah maupun hujan memiliki kinerja yang paling baik dibandingkan dengan kombinasi rangkaian yang lain. Saat cuaca cerah yaitu dengan nilai rata-rata BER yaitu $9,04242 \times 10^{-46}$ dan *Q-Factor* sebesar 14,5472 dan saat cuaca hujan lebat dengan nilai rata-rata BER $2,70330 \times 10^{-21}$ dan *Q-Factor* 9,4291.

Kata kunci : WDM-FSO, cuaca, detektor cahaya, BER, Q-Factor, Optisystem.

SUMMARY

Muhammad Fahreza Kresnamurti, *Departement of Electrical Engineering, Faculty of Engineering University of Brawijaya, April 2019, Design and Analysis of Wavelength Division Multiplexing-Free Space Optic Communication System (WDM-FSO) for Various Weather, Academic Supervisor: Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS. and Dr. Fakhriy Hario P., S.T., M.T.*

WDM implementation depends on fiber optic cabling, therefore, with no fiber infrastructure, the proposed WDM-FSO system can be easily applied. FSO communication system when compared to other wireless communication systems, namely wider bandwidth, cheaper installation costs with optical fiber, easier and faster in the distribution process, does not require a license. Weather conditions such as rain, dust, snow and fog / immediately become an obstacle to the FSO transmission system media. This research was conducted with a simulation with Opticsystem which aims to examine variations in the type of coding and photodetector and weather conditions on the performance of the WDM-FSO communication system. Testing using 8 channel WDM is carried out at 192.1 THz wavelength for channels 1 and 192.8 THz for channel 8, 10 Gbps bit rate, NRZ and RZ line coding and APD and PIN photodetector. Bright weather attenuation used is 0.233 dB / km and rainy weather is 19.28 dB / km.

The results showed that in the end, the combination of the WDM-FSO communication system series that gave the best BER performance parameters were 10 Gbps bit rate, RZ line coding, 192.4 THz nm wavelength, and 10 km transmission distance. BER values are 1.62432×10^{-52} and Q-Factor 14.5472. In heavy rain, the combination of the WDM-FSO communication system that provides the best BER performance parameters is a 10 Gbps bit rate, RZ line coding, 192.2 THz wavelength, and 1 km transmission distance. The lowest value of BER is 6.17485×10^{-22} and the highest Q-Factor is 9.5471. WDM-FSO communication system with a combination of 10 Gbps bit rate, RZ line coding and PPE photodetector type in the rainy and rainy seasons has the best performance with other series combinations. When the weather is sunny, with an average BER value of 9.04242×10^{-46} and Q-Factor of 14.5472 and currently heavy rain with an average BER value of 2.70330×10^{-21} and Q-Factor 9, 4291.

Keyword : WDM-FSO, Weather, Photodetector, BER, Q-Factor, Optisystem.



PENGANTAR

Bismillahirrohmanirrohim. Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “DESAIN DAN ANALISIS SISTEM KOMUNIKASI *WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING-FREE SPACE OPTIC* (WDM-FSO) PADA CUACA YANG BERVARIATIF” dengan baik. Tak lepas shalawat serta salam tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW yang telah menjadi suri tauladan bagi yang mengharapkan rahmat dan hidayah-Nya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan serta dorongan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar – besarnya kepada:

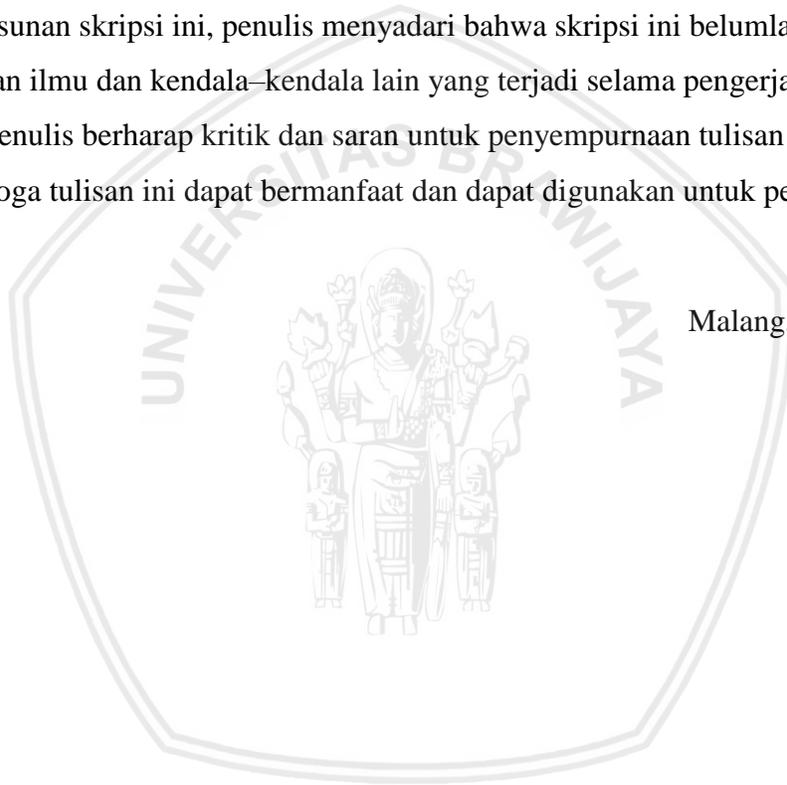
1. Bapak, Mama, Adek, dan seluruh keluarga besar tercinta, Bapak Eko Nurcahyo, Ibu Luki, Adek Vira, Yubi dan Zidan. Terima kasih untuk dukungan dan doa tak pernah putus telah diberikan.
2. Bapak Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D, IPM. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
3. Ibu Ir. Nurussa’adah, MT. selaku Sekertaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
4. Ibu Rahmadwati, S.T., M.T., PhD. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
5. Bapak Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, M.S. dan Bapak Dr. Fakhriy Hario P., S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan banyak waktu dan tenaga sejak bimbingan awal, memberikan saran, nasehat, dan pelajaran.
6. Ibu Rusmi Ambarwati S.T.,M.T, selaku KKDK konsentrasi telekomunikasi yang banyak memberikan pengarahan dalam hal akademik dan penulisan skripsi.
7. Teman-teman Ashabul Coffee, Anas, Aldo, Teki, Shofi, Kevin, Raihan, Ghifari, Ridho dan Falah yang telah menjadi teman diskusi tentang apapun.
8. Teman-teman Da’im Squad, Jabal, Bodo, Udin, Hasbi, Gerdy, Adit, Fikri, Dhani, Karil, Sabar yang selalu mendukung dan menjadi teman diskusi.

9. Sahabat ANTIPS, Tito, Ade, Ukik, Ica, Samid, Nindy yang selalu mendukung saya sedari SMA.
10. Sahabat Anak Polos, Dio, Furqon, Opal, Sat, Tod yang selalu memberikan semangat dan selalu menjadi teman diskusi.
11. Keluarga besar Teknik Telekomunikasi (Paket Cuu) 2015 dan SERVO 2015 yang telah berbagi ilmu telekomunikasi, pelajaran kehidupan, kenangannya.
12. Rekan-rekan asisten Laboratorium Telekomunikasi 2013, 2014, 2015 dan 2016.
13. Semua pihak, yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung atas penyusunan skripsi ini.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa skripsi ini belumlah sempurna, karena keterbatasan ilmu dan kendala-kendala lain yang terjadi selama pengerjaan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis berharap kritik dan saran untuk penyempurnaan tulisan di masa yang akan datang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Malang, 26 April 2019

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
RINGKASAN	i
SUMMARY	iii
PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penulisan.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sistem Komunikasi <i>Free Space Optical</i> (FSO).....	5
2.2 Arsitektur <i>Free Space Optical</i> (FSO).....	6
2.3 Propagasi <i>Line of Sight</i> (LoS).....	7
2.4 Spesifikasi Redaman dalam FSO.....	9
2.4.1. Pengaruh Hujan Terhadap Sistem FSO.....	9
2.5 Arsitektur <i>Wavelength Division Multiplexing-Free Space Optic</i> (WDM-FSO). 11	
2.5.1. <i>Line Coding</i>	11
2.5.1.1 <i>Non Return to Zero</i> (NRZ).....	12
2.5.1.2 <i>Return to Zero</i> (RZ).....	12
2.5.2. Pemancar Optik.....	13
2.5.3. <i>Optical Modulator</i>	14
2.5.4. <i>Mach-Zehnder Modulator</i>	15
2.5.5. <i>Electroabsorption Modulator</i>	16
2.5.6. <i>Receiver</i>	17
2.6 <i>Wavelength Division Multiplexing</i> (WDM).....	18
2.6.1. <i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i> (CWDM).....	19

2.6.2. <i>Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)</i>	20
2.7 Parameter Kinerja	21
2.7.1. <i>Bit Error Rate (BER)</i>	21
2.7.2. <i>Q-factor</i>	21
2.8 <i>Software Optisystem</i>	22
BAB III METODE PENELITIAN	23
3.1 Penentuan Jenis dan Cara Pengambilan Data	23
3.1.1. Perolehan Data Primer	24
3.1.2. Perolehan Data Sekunder	25
3.1.3. Konfigurasi Rangkaian Eksperimen	29
3.1.4. Komponen Perangkat Eksperimen	30
3.2 Variabel dan Cara Analisis Data.....	35
3.3 Kerangka Solusi Masalah	35
3.3.1. Pengaruh <i>Photodetector</i> dan <i>Line Coding</i> Pada Sistem WDM-FSO	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	38
4.1 Prosedur Pengambilan Data.....	38
4.2 Hasil Eksperimen dan Pembahasan	42
4.2.1. Analisis Kinerja <i>Line Coding</i> NRZ dan Jenis <i>Photodetector</i> terhadap <i>Bit Error Rate (BER)</i>	42
4.2.2. Analisis Kinerja <i>Line Coding</i> NRZ dan Jenis <i>Photodetector</i> terhadap <i>Q-Factor</i>	44
4.2.3. Analisis Kinerja <i>Line Coding</i> RZ dan Jenis <i>Photodetector</i> terhadap <i>Bit Error Rate (BER)</i>	45
4.2.4. Analisis Kinerja <i>Line Coding</i> RZ dan Jenis <i>Photodetector</i> terhadap <i>Q-Factor</i>	46
4.2.5. Analisis Rata-Rata Kinerja Sistem <i>Wavelength Division Multiplexing-Free Space Optic (WDM-FSO)</i>	48
BAB V PENUTUP	51
5.1 Kesimpulan.....	51
5.2 Saran	51
DAFTAR PUSTAKA	52
LAMPIRAN	54

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Kriteria Intensitas Curah Hujan di Indonesia Menurut BMKG.....	10
Tabel 3.1	Spesifikasi Sistem Komunikasi FSO	26
Tabel 3.2	Spesifikasi CW Laser	26
Tabel 4.1	Parameter Perhitungan Atenuasi Cuaca Hujan Lebat	39
Tabel 4.2	Kombinasi Desain Simulasi Sistem Komunikasi WDM-FSO	41



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Gambar Skema Konfigurasi Link FSO.....	5
Gambar 2.2	Blok Diagram Sistem Komunikasi FSO secara umum.....	6
Gambar 2.3	<i>Line of Sight (LoS)</i>	8
Gambar 2.4	Blok Diagram Sistem Komunikasi WDM-FSO	11
Gambar 2.5	Blok Diagram <i>Line Coding</i>	11
Gambar 2.6	Skema <i>Line Coding</i>	13
Gambar 2.7	Konfigurasi Pemancar dengan Modulasi Eksternal.....	14
Gambar 2.8	<i>Mach Zehnder Modulator (MZM)</i>	15
Gambar 2.9	Proses Modulator Eksternal	16
Gambar 2.10	Komponen Penerima Optik	17
Gambar 2.11	WDM Demultiplexer.....	19
Gambar 2.12	Panjang Gelombang CWDM.....	20
Gambar 2.13	Panjang Gelombang CWDM dan DWDM.....	20
Gambar 2.14	<i>Software</i> simulasi <i>Optisystem</i>	22
Gambar 3.1	Diagram Alir Langkah Penelitian	23
Gambar 3.2	Diagram Alir Pengambilan Data.....	24
Gambar 3.3	Blok Diagram Sistem WDM-FSO	27
Gambar 3.4	Kerangka Penelitian	28
Gambar 3.5	Desain Konfigurasi Sistem WDM-FSO.....	29
Gambar 3.6	Komponen <i>Transmitter</i>	29
Gambar 3.7	Komponen <i>Receiver</i>	29
Gambar 3.8	Komponen <i>Pseudo-Random Bit Sequence Generator</i>	31
Gambar 3.9	Komponen <i>Pulse Generator</i>	31
Gambar 3.10	Komponen WDM Mux	32
Gambar 3.11	Komponen Sumber Cahaya	32
Gambar 3.12	Komponen Modulator Eksternal.....	33
Gambar 3.13	Komponen <i>Free Space Optic</i>	33
Gambar 3.14	Komponen <i>Photodetector</i>	34
Gambar 3.15	Komponen <i>Filter</i>	35
Gambar 3.16	Komponen BER <i>Analyzer</i>	35
Gambar 3.17	Diagram Alir Pengujian	37

Gambar 4.1 Grafik Panjang Gelombang terhadap BER pada Cuaca Cerah..... 43

Gambar 4.2 Grafik Panjang Gelombang terhadap BER pada Cuaca Hujan Lebat 44

Gambar 4.3 Grafik Panjang Gelombang terhadap *Q-Factor* pada Cuaca Cerah 45

Gambar 4.4 Grafik Panjang Gelombang terhadap *Q-Factor* pada Cuaca Hujan Lebat.. 45

Gambar 4.5 Grafik Panjang Gelombang terhadap BER pada Cuaca Cerah..... 46

Gambar 4.6 Grafik Panjang Gelombang terhadap BER pada Cuaca Hujan Lebat 46

Gambar 4.7 Grafik Panjang Gelombang terhadap *Q-Factor* pada Cuaca Cerah 47

Gambar 4.8 Grafik Panjang Gelombang terhadap *Q-Factor* pada Cuaca Hujan Lebat.. 48

Gambar 4.9 Grafik Nilai Rata-Rata BER untuk Setiap Kombinasi Komponen..... 49

Gambar 4.10 Grafik Nilai Rata-Rata *Q-Factor* untuk Setiap Kombinasi Komponen 49



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1	Tabel Kombinasi NRZ APD.....	54
Lampiran 2	Tabel Kombinasi RZ APD.....	55
Lampiran 3	Tabel Kombinasi NRZ PIN.....	56
Lampiran 4	Tabel Kombinasi RZ PIN.....	57
Lampiran 5	Tabel Nilai Rata-Rata Sistem WDM-FSO.....	58
Lampiran 6	Tabel ERFC.....	59
Lampiran 7	<i>Eye Diagram</i> NRZ APD Cerah.....	60
Lampiran 8	<i>Eye Diagram</i> NRZ APD Hujan.....	61
Lampiran 9	<i>Eye Diagram</i> NRZ PIN Cerah.....	62
Lampiran 10	<i>Eye Diagram</i> NRZ PIN Hujan.....	63
Lampiran 11	<i>Eye Diagram</i> RZ APD Cerah.....	64
Lampiran 12	<i>Eye Diagram</i> RZ APD Hujan.....	65
Lampiran 13	<i>Eye Diagram</i> RZ PIN Cerah.....	66
Lampiran 13	<i>Eye Diagram</i> RZ PIN Hujan.....	67



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi telekomunikasi pada zaman ini mengalami kemajuan yang sangat cepat. Ini diakibatkan adanya permintaan dan peningkatan kebutuhan akan informasi, sehingga memacu para pengembang untuk terus memacu pengembang untuk memberikan suatu sistem komunikasi yang dapat diandalkan dari segi kualitas. Dengan demikian kebutuhan pengguna semakin besar dengan mobilitas, kecepatan data dan kapasitas data yang tinggi sehingga dapat mengakses informasi kapan saja dan dimana saja.

Teknologi optik dipercaya memiliki *bandwidth* dan *bitrate* yang tinggi terus dikembangkan demi memenuhi kebutuhan informasi tersebut. Salah satu perkembangannya adalah *Free Space Optic* (FSO) dan *Wavelength Division Multiplexing* (WDM). *Free Space Optic* (FSO) merupakan teknologi nirkabel komunikasi optik yang merupakan komunikasi *line of sight* (LOS) dari pemancar ke penerima dengan medium ruang bebas. FSO memiliki kelebihan *bandwidth* yang lebar, tidak adanya lisensi dan biaya instalasi yang lebih murah dibandingkan dengan serat optik. Kemudian terdapat teknologi *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) yang merupakan teknologi komunikasi optik dimana sejumlah sinyal optik dengan panjang gelombang yang berbeda ditransmisikan dalam satu kanal transmisi. Kelebihan dari WDM adalah mampu untuk melakukan penambahan *bandwidth* dan *bitrate* yang besar dalam suatu jaringan dengan mengintegrasikan perangkat serat optik yang sudah ada.

Kinerja dari sistem komunikasi FSO memiliki banyak kendala yang dihadapi yaitu redaman (*attenuation*) akibat adanya penyerapan (*absorption*), hamburan (*scattering*) dan turbulensi atmosfer, kondisi cuaca seperti hujan, kabut, asap, salju. Di daerah tropis, khususnya di Indonesia, memiliki kondisi cuaca yang bervariasi, salah satunya adalah hujan lebat yang menjadi salah satu penyebab utama gangguan redaman pada sistem komunikasi FSO. Faktor hujan menyebabkan daya laser melemah dan menyebabkan kinerja dari sistem komunikasi FSO menurun.

Pada penelitian ini akan membahas tentang desain dan kinerja sistem komunikasi FSO berbasis WDM (WDM-FSO) yang dilakukan secara simulasi dengan aplikasi *Optisystem*. Desain sistem WDM-FSO yang dirangkai terdiri atas *transmitter*, *transmission channel* yang

berupa FSO, dan *receiver*. Parameter kinerja dari sistem WDM-FSO dilihat berdasarkan nilai BER dan *Q-factor*. Penelitian ini ditekankan pada pengaruh jumlah kanal WDM, jenis *line coding*, jenis *photodetector*, nilai *bit rate* dan kondisi cuaca. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya adalah penggunaan jenis WDM dan jumlah kanal pada WDM yang digunakan, variasi dari jenis *photodetector* dan *line coding* yang digunakan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi pertimbangan untuk sistem komunikasi yang lebih baik dan menghasilkan kinerja yang lebih optimal dari sistem komunikasi sebelumnya.

1.2 Rumusan Masalah

Sistem komunikasi WDM-FSO menggunakan atmosfer sebagai medium propagasinya, dalam proses transmisi sering terjadi gangguan saat transmisi yaitu terjadinya redaman. Kondisi cuaca seperti cerah, berawan, hujan, kabut, salju menimbulkan redaman pada media transmisi sistem WDM-FSO. Selain itu, sistem komunikasi serat optik memiliki beberapa komponen pendukung yang mendukung proses transmisi, salah satu komponen tersebut adalah *multiplexer*. Teknologi *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) juga menjadi komponen pendukung pada kinerja sistem komunikasi WDM-FSO. Pada skripsi kali ini menggunakan WDM-FSO. Maka rumusan masalah ditekankan pada:

1. Bagaimana nilai BER pada setiap kombinasi jumlah kanal WDM, nilai *bit rate*, jenis *line coding*, jenis *photodetector* dan cuaca terhadap kinerja sistem komunikasi WDM-FSO?
2. Bagaimana nilai *Q-factor* pada setiap kombinasi jumlah kanal WDM, nilai *bit rate*, jenis *line coding*, jenis *photodetector* dan cuaca terhadap kinerja sistem komunikasi WDM-FSO?
3. Bagaimana mendesain dan menyimulasikan sistem WDM-FSO pada *software Optisystem*?

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disebutkan diatas, maka penelitian ini dibatasi sebagai berikut :

1. Simulasi dilakukan menggunakan aplikasi *OptiSystem*.
2. *Bit rate* yang digunakan yaitu 10 Gbps.
3. *Photodetector* yang digunakan adalah APD dan PIN.

4. Sumber cahaya yang digunakan adalah laser dengan panjang gelombang 192.1 THz (1560.61 nm) -192.8 THz (1554.94 nm) dengan spasi kanal 100 GHz (0.8 nm).
5. Modulator yang digunakan adalah modulator optik jenis *Mach-Zehnder Modulator* (MZM).
6. Menggunakan 8 *channel* WDM.
7. Jenis *line coding* yang digunakan adalah NRZ dan RZ.
8. Pengamatan dilakukan berdasarkan parameter redaman pada saat kondisi cuaca hujan dengan jarak 1 km dan cerah dengan jarak 10km.
9. Media transmisi yang digunakan adalah *Free Space Optic* (FSO).
10. Parameter yang diamati adalah BER dan *Q-factor*.
11. Kondisi yang diterapkan pada sistem adalah *Line of Sight* (LOS).

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini yaitu menganalisis pengaruh cuaca, jenis *line coding* dan jenis photodetector terhadap kinerja sistem WDM-FSO sehingga dapat merancang sistem komunikasi yang optimal dengan melakukan simulasi menggunakan aplikasi *Optisystem*.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang dipergunakan dalam penyusunan laporan penelitian ini yang terdiri atas pendahuluan, tinjauan pustakan, metode penelitian, hasil eksperimen, pembahasan, kesimpulan, dan saran.

Bab I berisi tentang pendahuluan adalah memuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan sistematika penulisan.

Bab II mengkaji teori-teori yang menunjang skripsi meliputi konsep dasar *Free Space Optic* (FSO), Teknik *multiplexing* WDM, komponen komunikasi optik, redaman pada cuaca yang berbeda, dan parameter kinerja berupa BER, *Q-Factor*, dan serta aplikasi *Optisystem*.

Bab III metode penelitian menjelaskan metode penelitian yang digunakan untuk menjawab rumusan masalah yaitu penentuan jenis dan cara pengambilan data, variabel dan cara analisis yang digunakan, serta kerangka solusi masalah yang disajikan dalam bentuk diagram alir dan pembahasannya.

Bab IV berisi hasil eksperimen dan pembahasan analisis data. Pada bab ini dijelaskan proses untuk mendapatkan ata pengukuran beserta spesifikasi perangkat yang digunakan dan analisis data yang telah didapatkan dari hasil eksperimen.

Bab V berisi kesimpulan dan saran yang diperoleh dari analisis yang telah dilakukan serta pemberian saran.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

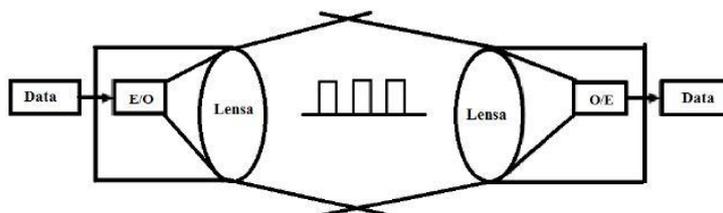
2.1 Sistem Komunikasi *Free Space Optical* (FSO)

Free Space Optic (FSO) adalah teknologi akses *broadband* yang menawarkan *data rate* yang tinggi dari *point to point*. Teknologi ini 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 atau teleskop untuk mentransmisikan informasi cahaya melewati atmosfer menuju lensa pada sisi penerima. FSO dapat bekerja pada jarak ratusan meter sampai beberapa kilo meter.

Keuntungan dari komunikasi FSO dibandingkan dengan komunikasi kabel konvensional dan komunikasi nirkabel Radio frekuensi (RF) diantaranya :

- Mengonsumsi daya yang relatif rendah
- Menawarkan keamanan yang tinggi selama cakupan *beam* pada daerah yang sangat sempit
- Sensitivitas rendah terhadap interferensi elektromagnetik
- Kapasitas informasi yang besar

Keunggulan sistem komunikasi FSO bila dibandingkan dengan sistem komunikasi nirkabel lainnya yaitu memiliki *bandwidth* yang lebih lebar, biaya instalasi yang lebih murah bila dibandingkan dengan serat optik, lebih mudah dan cepat dalam proses penyebaran, tidak membutuhkan lisensi, dan praktis karena *transceiver* FSO dapat diletakkan didekat jendela maupun pada atap gedung (Octiana Widyarena dkk, 2012). *Gambar 2.1* menunjukkan skema konfigurasi *link* FSO.



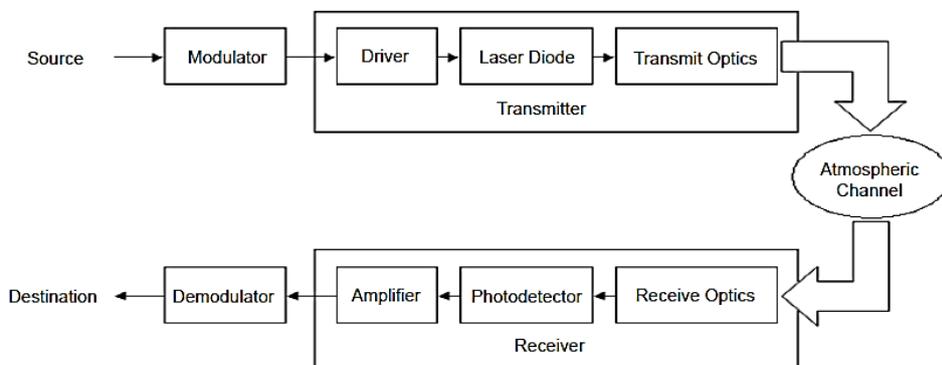
Gambar 2.1 Gambar skema konfigurasi *Link* FSO
(Digambar ulang setelah sumber: Abd E-Naser dkk, 2009)

Pada *Gambar 2.1* menunjukkan konfigurasi dasar jalur sistem komunikasi optik nirkabel untuk mengirimkan data informasi. Jalur tersebut terdiri dari sebuah alat konversi elektrik/optik (E/O) dan sebuah alat konversi optik/elektrik (O/E). Konversi E/O terdiri dari laser dioda dan modulator eksternal, sementara konversi O/E dilakukan oleh *photodiode* seperti PIN dioda dan APD. Kecepatan transmisi data bergantung pada kecepatan modulasi di sisi perangkat E/O (Abd E-Naser dkk, 2009). Data di konversi menjadi sinyal optik oleh E/O yang kemudian ditransmisikan melalui lensa melalui udara dan diterima oleh lensa di penerima untuk selanjutnya dikonversi lagi menjadi sinyal elektrik oleh O/E sehingga didapatkan data informasi.

Sistem komunikasi FSO adalah teknologi yang mengalamatkan konektivitas yang diinginkan kedalam jaringan optik. Dalam *Metropolitan Area Network* (MAN), FSO dapat digunakan untuk memperluas jaringan yang sudah ada. FSO dapat digunakan untuk menghubungkan LAN ke LAN dan hubungan antar kampus. Di daerah tropis hujan lebat adalah penyebab utama dari keterbatasan *link* FSO. Curah hujan ada karena adanya hamburan non selektif yang memiliki panjang gelombang yang independen. Sistem dengan frekuensi sinyal dibawah 10 GHz tidak terpengaruh oleh kondisi cuaca. Sistem dengan frekuensi sinyal diatas 10 GHz, yang dalam sistem FSO dipengaruhi oleh hujan (Willebrand dan Ghuman, 2002).

2.2 Arsitektur *Free Space Optical* (FSO)

Dalam sistem transmisi dasar *point-to-point*, *transceiver* FSO diletakkan pada kedua sisi transmisi. Kebutuhan utama dari sistem FSO adalah kondisi *line-of-sight* antara dua lokasi jaringan. Sistem FSO menggunakan cahaya untuk komunikasi yang tidak dapat melewati halangan padat seperti dinding atau pohon. Skema sederhana dari sistem transmisi *free-space optic* ditunjukkan dalam *Gambar 2.2*



Gambar 2.2 Blok diagram sistem komunikasi *free space optic* secara umum (Sumber: Miglani, 2017)

Pada *Gambar 2.2* dijelaskan bahwa sistem komunikasi FSO teresterial dapat dibagi menjadi tiga bagian yaitu: *Transmitter* (Tx), *atmospheric Channel* dan *receiver* (Rx). Inti dari sistem ini merupakan penggunaan sinar infra-merah atau laser sebagai media transmisi pada jarak antara pemancar dan penerima secara *Line-Of Sight* (LOS), yang memiliki karakteristik transmisi *half duplex* dan *full duplex* (tergantung aplikasi pada jaringan yang dibutuhkan).

Hubungan antara daya yang ditransmisikan dan daya yang diterima ditunjukkan oleh persamaan (2-1) (Zuliyana, 2015)

$$P_R = P_T \left(\frac{A_{RX}}{(\theta L)^2} \right) \cdot e^{-\alpha L} \dots\dots\dots(2-1)$$

Dimana:

P_R : Daya di *receiver* (dBm)

P_T : Daya di *transmitter* (dBm)

A_{RX} : *Receiver aperture area* (m²)

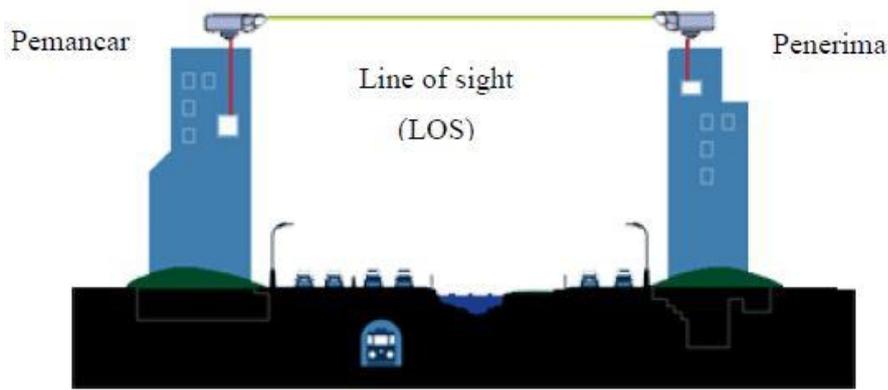
θ : Sudut divergensi (mrad)

α : Redaman atmosfer (dB)

L : Jarak antara *transmitter* dan *receiver* (m)

2.3 Propagasi *Line of Sight* (LoS)

Propagasi *line of sight*, disebut dengan propagasi dengan gelombang langsung (*direct wave*), karena gelombang yang terpancar dari antena pemancar langsung berpropagasi menuju antena penerima dan tidak merambat di atas permukaan tanah. Sesuai dengan namanya, propagasi secara garis pandang yang lebih dikenal dengan *line of sight propagation*, mempunyai keterbatasan pada jarak pandang. Dengan demikian, ketinggian antena dan kelengkungan permukaan bumi merupakan faktor pembatas yang utama dari propagasi ini. Jarak jangkauannya sangat terbatas, kira-kira 30 –50 mil per *link*, tergantung topologi daripada permukaan buminya. Sistem operasi FSO membutuhkan *line of sight* (LOS) yaitu pemancar dan penerima tidak boleh terdapat penghalang pada sisi transmisinya.



Gambar 2.3 Line of Sight (LoS)

(Digambar ulang setelah sumber : Monika Mehra, 2007)

Menurut teori, jumlah *fresnel zone* adalah tidak terhingga namun *fresnel zone* yang pertama atau biasa kita sebut dengan *first fresnel zone* merupakan radius kritis dimana LOS tidak mendapatkan halangan. Pada praktiknya 60% radius dari *first fresnel zone* harus bebas dari halangan seperti pohon atau gedung untuk menghindari *fading* pada sinyal yang diterima. Radius *first fresnel zone* dapat dinyatakan dengan persamaan berikut: (Chambell scientific .inc, 2016)

$$R_{FFZ} = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \dots \dots \dots (2-2)$$

Dimana

R_{FFZ} : radius first fresnel zone (m)

λ : panjang gelombang sinyal propagasi (m)

d_1 : jarak antara sisi *transmitter* ke ujung jalur yang terkena halangan

d_2 : jarak antara sisi *receiver* ke ujung jalur yang terkena halangan

Untuk mendapatkan toleransi *clearance* dari jalur LOS untuk menemukan toleransi *first fresnel zone* dapat dihitung melalui persamaan berikut: (Chambell scientific .inc, 2016)

$$C_{LOS} = h_1 + \frac{h_2 - h_1}{d} d_1 - h_{ER} - h_0 \dots \dots \dots (2-3)$$

Dimana

C_{LOS} : LOS *clearance relative*

h_1 : tinggi antenna dengan jarak d_1 (m)

h_2 : tinggi antenna dengan jarak d_2 (m)

h_{ER} : tinggi lokasi titik kelengkungan dari perhitungan *effective earth radius* (m)

h_0 : tinggi dari penghalang yang ada pada jalur LOS (m)

Nilai dari h_{ER} dapat ditentukan melalui persamaan berikut : (Chambell scientific .inc, 2016)

$$h_{ER} = \frac{d_1 \cdot d_2}{12.74 \cdot k} \dots\dots\dots (2-4)$$

Dimana

k : konstanta *k-factor* = 1.33

Dari beberapa persamaan di atas maka nilai toleransi clearance dari *first fresnel zone* sebesar 60% dapat dinyatakan sebagai berikut: (Chambell scientific .inc, 2016)

$$C_{FFZ} = C_{LOS} - 0.6 \cdot R_{FFZ} \dots\dots\dots (2-5)$$

Link Free-Space Optic (FSO) melibatkan transmisi, penyerapan dan hamburan cahaya oleh atmosfer bumi. Setiap saat cahaya selalu berinteraksi dengan atmosfer bumi dalam kondisi normal yang terdiri dari berbagai molekul berbeda dan partikel kecil yang disebut *aerosol*. Interaksi ini menghasilkan berbagai fenomena optik:

- 1) Selektif redaman radiasi yang menyebar di atmosfer,
- 2) Serapan pada panjang gelombang optik tertentu karena molekul,
- 3) Sintilasi yang disebabkan oleh turbulensi suhu dalam media propagasi yang mengakibatkan sel terdistribusi secara acak. Sintilasi menyebabkan gelombang terdistorsi yang menghasilkan pemfokusan *beam* berkurang (ITU-R. 1817).

2.4 Spesifikasi Redaman dalam FSO

Kekurangan sistem FSO adalah tidak kebal terhadap efek atmosfer seperti redaman dan *scintillation* yang dapat mengurangi kemampuan transmisi. Parameter utama dalam desain FSO adalah pertimbangan mengenai performansi FSO. Beberapa spesifikasi redaman yang terjadi pada FSO adalah berikut ini.

2.4.1 Pengaruh Hujan terhadap Sistem FSO

Hujan merupakan presipitasi uap air yang berasal dari awan yang terdapat di atmosfer. 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. Berdasarkan Badan Meteorologi, Klimatologi, Kualitas Udara dan Geofisika (BMKG) di Indonesia menyatakan terdapat beberapa kriteria intensitas curah hujan yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1
Kriteria Intensitas Curah Hujan di Indonesia Menurut BMKG

KATEGORI	KETERANGAN
Hujan ringan	1-5 mm/jam
Hujan sedang	5-10 mm/jam
Hujan lebat	10-20 mm/jam

Sumber: bmkgo.go.id

Scattering yang terjadi karena radius hujan (100-1000 μm) secara signifikan lebih besar daripada panjang gelombang yang bekerja pada FSO. Laser dapat melewati partikel hujan, dengan efek *scattering* yang terjadi lebih rendah. Partikel kabut (*haze*) sangatlah kecil dan berada lebih lama di atmosfer, tetapi partikel hujan sangat besar dan berada tidak lama di atmosfer. Koefisien *scattering* hujan dapat dihitung menggunakan hukum *Stroke* pada persamaan (2-6) berikut ini: (Fadhil, 2012)

$$\beta_{rain\ scat} = \pi a^2 N_a Q_{scat} \left(\frac{a}{\lambda}\right) \dots \dots \dots (2-6)$$

Dimana

a : radius hujan (cm)

N_a : distribusi hujan (cm^{-3})

Q_{scat} : Efisiensi *scattering*

Distribusi hujan N_a dapat dihitung dengan persamaan (2-7) sebagai berikut: (Fadhil, 2012)

$$N_a = \frac{R}{1,33 (\pi a^3) V_a} \dots \dots \dots (2-7)$$

Dimana

R : rata-rata hujan turun (cm/s)

V_a : batas kecepatan hujan

Batasan kecepatan hujan diberikan oleh persamaan (2-8) sebagai berikut: (Fadhil, 2012)

$$V_a = \frac{2a^2 \rho g}{9\eta} \dots \dots \dots (2-8)$$

Dimana

ρ : kerapatan air ($\rho = 1 \text{ gr/cm}^3$)

g : konstanta gravitasi ($g = 980 \text{ cm/sec}^2$)

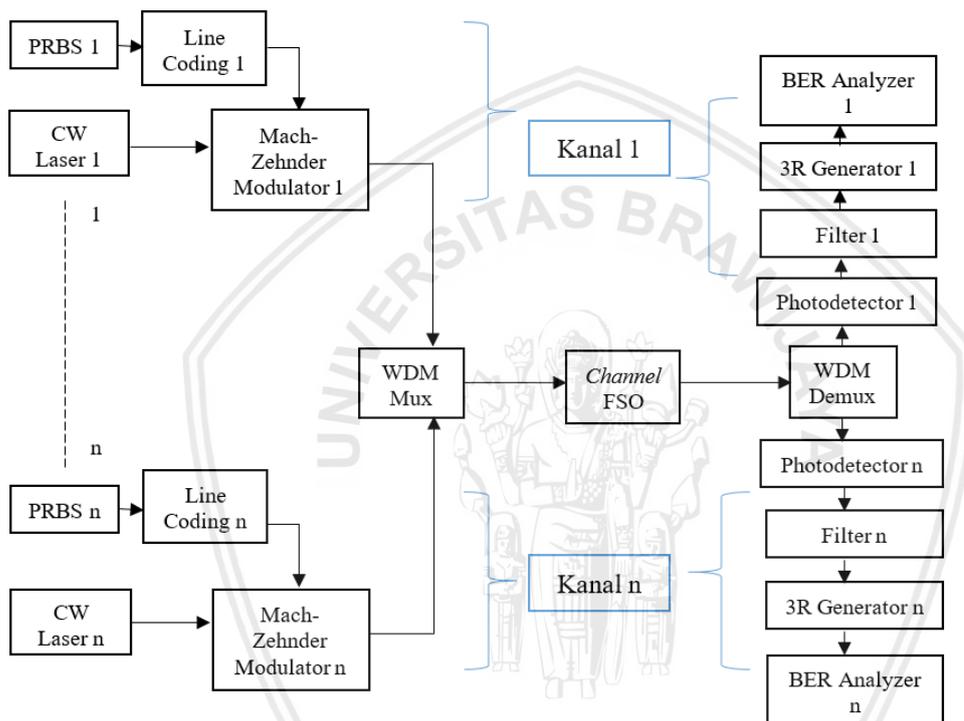
η : viskositas udara ($\eta = 1.8 \cdot 10^{-4} \text{ gr/cm} \cdot \text{sec}$)

Redaman hujan dapat dihitung dengan persamaan Beer (2-9): (Fadhil, 2012)

$$\tau = \exp(-\beta_{rain\ scat}L) \dots \dots \dots (2-9)$$

2.5 Arsitektur Wavelength Divison Multiplexing-Free Space Optic (WDM-FSO)

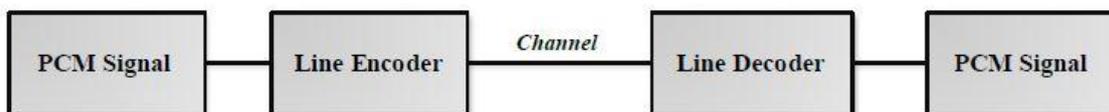
Prinsip dasar transmisi WDM-FSO adalah sama seperti transmisi FSO lainnya, gelombang cahaya dimultipleks menggunakan WDM menjadi satu kanal transmisi, pada WDM memiliki spasi kanal 0,8nm. Gambar di bawah ini menunjukkan blok diagram sistem WDM-FSO.



Gambar 2.4 Blok diagram sistem WDM-FSO (Sumber :Perancangan,2019)

2.5.1 Line Coding

Proses pengkodean saluran pada prinsipnya mengubah informasi data menjadi bentuk sinyal yang lain sehingga sinyal tersebut cocok dengan saluran yang digunakan. Blok diagram *line encoder* dan *decoder* digunakan sebagai *transmitter* dan *receiver* ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Blok diagram Line Coding (Sumber: Vaishali Et Al, 2011)



Faktor yang menentukan kesuksesan *receiver* dalam mengartikan sinyal ditentukan oleh perbandingan sinyal terhadap *noise*, *data rate* dan *bandwidth* (Stalling. W, 2001). Ada faktor lain yang dapat dipergunakan untuk meningkatkan kinerja yaitu skema pengkodean. Skema pengkodean adalah pemetaan sederhana mulai dari bit-bit data sampai menjadi elemen-elemen sinyal. Skema pengkodean yang lebih kompleks digunakan untuk meningkatkan kinerja dengan cara mengubah spektrum sinyal serta dengan menyediakan kemampuan sinkronisasi (Stalling. W, 2001). Selain itu, tujuan *line coding* dapat meningkatkan kapasitas informasi, proses sinkronisasi antara pengirim dan penerima, dan menaikkan data rate.

2.5.1.1 Non Return to Zero (NRZ)

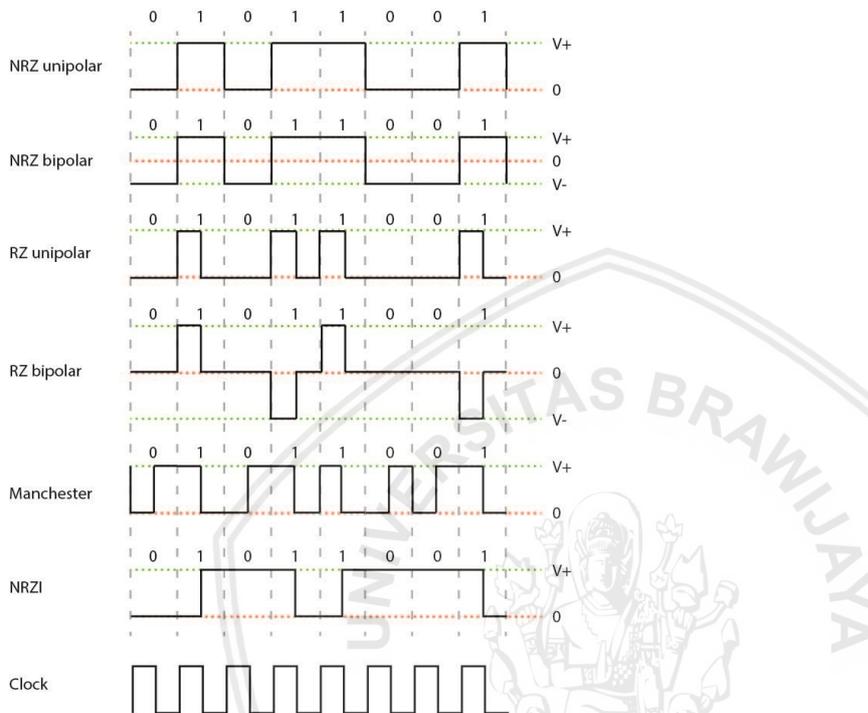
Non Return to Zero (NRZ) adalah format modulasi yang paling banyak diaplikasikan saat ini. Teknik untuk membangkitkan pulsa NRZ dikenal dengan teori telekomunikasi klasik. *Non Return to Zero* (NRZ) adalah skema modulasi yang dominan digunakan di sistem komunikasi *Free Space Optic* (FSO) sistem komunikasi komersial. Format kode NRZ merupakan cara termudah dalam mengefisienkan penggunaan *bandwidth*. Kelemahan utama untuk sinyal NRZ adalah keberadaan komponen DC dan kurangnya kemampuan sinkronisasi. NRZ memiliki sistem yang sederhana dan tahan terhadap *nonlinearities* laser dan modulator eksternal. (Liu et al., 2008).

Pulsa NRZ memiliki spektrum optik yang sempit selama transisi *on-off* yang lebih rendah dalam aliran bit NRZ. Spektrum NRZ difokuskan di sekitar frekuensi pembawa. Spektrum yang sempit dari pulsa NRZ memberikan hasil yang lebih baik dari spasi kanal dalam sistem DWDM. Memungkinkan pemanfaatan yang lebih baik dari *bandwidth* sistem dan membuat pulsa NRZ lebih kuat terhadap dampak dispersi kromatik, sehingga toleransi dispersi tinggi. Sebuah toleransi dispersi yang besar penting dalam sistem 40 Gbps WDM dengan sejumlah besar saluran, karena adanya dispersi residual permanen yang besarnya tergantung pada sistem total *bandwidth* dan jenis serat transmisi yang digunakan.

2.5.1.2 Return to Zero (RZ)

Pada format pengkodean RZ, transisi level sinyal timbul selama beberapa atau semua periode bit yang mengandung *timing* informasi. 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. Kekurangan format RZ *unipolar* adalah jika terlalu banyak bit “0” selama periode bit yang lama, maka akan menimbulkan rugi-rugi waktu sinkronisasi. Format data yang umum untuk mengatasi masalah ini adalah dengan

menggunakan pengkodean *optical Manchester code*. Sinyal pengkodean ini didapatkan karena terdapat penambahan secara langsung pada sinyal *baseband* (NRZ-L) dan pada *clock* sinyal. Karena pengkodean ini termasuk pengkodean RZ, maka kode ini membutuhkan dua kali *bandwidth* NRZ dan juga tidak terdapat kemampuan koreksi dan deteksi *error*. (Gerd Keiser, 2010).



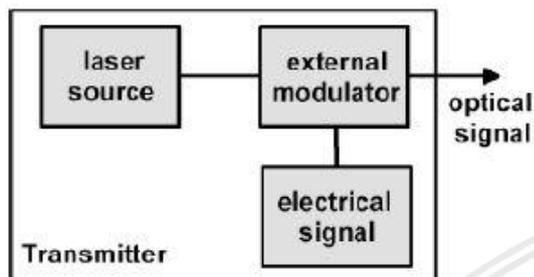
Gambar 2.6 Skema Line Coding
Sumber : www.electronicdesign.com

2.5.2 Pemancar Optik

Peran pemancar optik menjadi penting dengan peningkatan *data rate* pada sistem. Pada saat pemancar optik berada pada kanal yang lebih rendah, *data rate* menjadi lebih sederhana dan lebih mudah untuk direalisasikan menggunakan modulasi langsung dari laser dioda. Realisasi menjadi lebih kompleks dengan menaikkan kanal *data rate*. Dengan demikian, persyaratan komponen elektrik dan optik pada pemancar optik ditingkatkan. Pemancar optik konvensional menggunakan modulasi amplitudo/intensitas dari cahaya laser, biasa dikenal dengan *on-off keying* (OOK), karena level sinyal yang berbeda untuk menandai dan memberikan jarak ditandai dengan adanya daya optik.

Modulasi amplitudo dapat direalisasikan secara langsung atau menggunakan modulator eksternal dari laser dioda. Untuk merealisasikan sistem transmisi dengan kanal *data rate* lebih besar dari 10 Gbps, modulasi eksternal mewakili solusi yang lebih baik karena dampak dari *laser internal chirp* dari sinyal optik dapat dikurangi secara efisien. Tetapi di sisi lain,

kompleksitas dari pemancar optik meningkat. Modulasi eksternal direalisasikan dengan modulasi dari cahaya laser dalam modulator eksternal seperti pada *Gambar 2.10*. Modulator eksternal dapat berupa *Mach-Zehnder Modulator (MZM)* atau *Electroabsorption Modulator (EAM)*. Modulator eksternal dikendalikan oleh sinyal elektrik yang sesuai dengan *data rate*. Berdasarkan sinyal elektrik yang mengendalikan dan aturan operasional dari modulator eksternal, AM berbeda yang berbasis format modulasi dapat direalisasikan.



Gambar 2.7 Konfigurasi pemancar dengan modulasi eksternal
(Sumber: Hodžić, 2004:9)

2.5.3 Optical Modulator

Proses modulasi adalah suatu proses pengubahan sinyal-sinyal informasi ke dalam bentuk tertentu, sehingga dapat ditransmisikan ke tujuan. Modulasi optik atau modulasi cahaya adalah teknik modulasi yang menggunakan berkas cahaya berupa pulsa-pulsa cahaya sebagai sinyal pembawa. Berkas cahaya yang digunakan di sini adalah berkas cahaya yang dihasilkan oleh suatu sumber cahaya. Teknik modulasi optik mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan teknik modulasi konvensional yang menggunakan sinyal elektrik sebagai sinyal pembawa informasi. Selain, ketahanannya terhadap derau yang sangat tinggi karena sinyal tidak dapat dipengaruhi oleh medan elektromagnetik, kecepatan pengiriman sinyal atau *bit rate* yang mencapai ratusan gigabit per detik juga menjadi keunggulan tersendiri.

Berdasarkan tempat terjadinya modulasi cahaya, terdapat dua macam modulator optik yaitu modulator internal dan modulator eksternal. Modulator internal memodulasi cahaya di dalam perangkat sumber cahayanya, sedangkan modulator eksternal memodulasi cahaya di luar perangkat sumber cahayanya. Laser dan LED pada aplikasi sistem telekomunikasi menggunakan 2 metode untuk modulasi yaitu modulasi langsung dan modulasi eksternal.

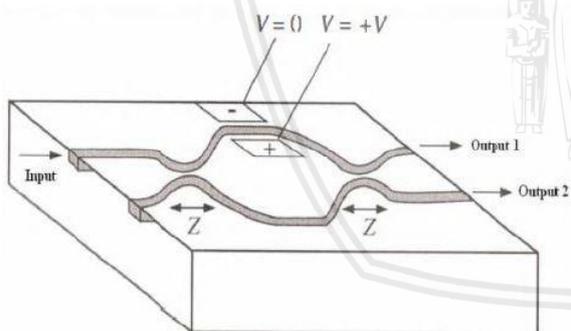
Modulator eksternal memiliki karakteristik umum yaitu modulasi dan generasi cahaya dipisahkan, menawarkan *bandwidth* yang lebih luas hingga 60 GHz, lebih mahal dan kompleks, digunakan dalam sistem *high end*. Modulasi eksternal biasanya digunakan dalam aplikasi kecepatan tinggi seperti telekomunikasi jarak jauh. Kelebihan modulasi eksternal adalah jauh lebih cepat dan dapat digunakan dengan sumber daya laser yang lebih tinggi.

Pada penelitian ini akan dibahas garis besar mengenai modulator eksternal *Mach Zehnder* dan *Electroabsorption*.

2.5.4 Mach-Zehnder Modulator

Teknik modulasi merupakan proses perubahan sinyal informasi dalam bentuk tertentu. Modulasi optik merupakan teknik modulasi yang menggunakan berkas cahaya sebagai sinyal pembawa, berkas cahaya yang digunakan yaitu keluaran dari sumber optik LED dan Laser. Teknik modulasi yang biasa digunakan dalam komunikasi serat optik yaitu *Mach Zehnder Modulator* (MZM). (Sary, 2012)

Mach Zehnder Modulator (MZM) adalah salah satu jenis modulator eksternal yang memanfaatkan interaksi sinyal masukan elektrik dengan media interaksi adalah modulator *electro-optic Mach Zehnder*. Interaksi elektro-optik itu sendiri merupakan perubahan indeks bias media interaksi optik akibat pengaruh medan elektrik yang diberikan kepada media interaksi tersebut. Sehingga karakteristik pandu gelombang optik atau karakteristik media interaksi menjadi berubah. Berubahnya karakteristik tersebut maka mode perambatan berkas cahaya akan berubah. Modulasi eksternal biasanya dicapai menggunakan modulator optik terintegrasi yang menggabungkan pandu *mach zehnder interferometer* dibuat pada lempengan *niobate lithium* (LiNbO_3). Berikut gambar perangkat dari modulator *Mach zehnder* pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Mach Zehnder Modulator (MZM)
(Sumber: Zaiton Binti Abdul Mutalip, 2010)

Secara umum Modulator *Mach-Zehnder* terdapat dua bagian sistem modulasi yaitu modulasi fasa untuk menjelaskan efek elektro optik dan modulasi amplitudo untuk menjelaskan proses interferometer. Pada Gambar 2.11 ditampilkan sinyal pembawa (cahaya) yang memasuki modulator dibagi menjadi dua jalur, satu jalur tidak diubah (*unmodulated*) dan satu jalur lainnya dimodulasi. Ketika cahaya tersebut direkombinasi kembali, dua gelombang tersebut saling mengganggu satu sama lain. Jika dua gelombang

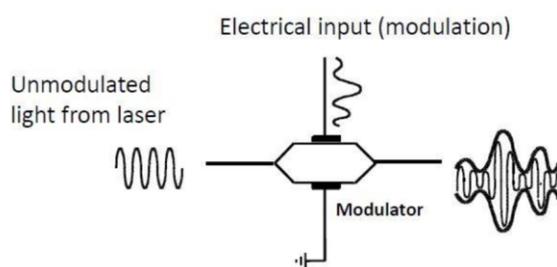
berada dalam fasa maka terjadi gangguan yang konstruktif dan *output* adalah ON. Jika keluar dari fasa maka akan terjadi interferensi destruktif dan gelombang akan saling membatalkan satu sama lain, maka *output* adalah OFF. Untuk lampu ON diwakili biner 1 dan untuk OFF cahaya diwakili biner 0. (Norizan,2008)

Modulator ini digunakan untuk mendukung kinerja sistem komunikasi optik, dan bekerja berdasarkan prinsip perpaduan (*interfering*) dua berkas cahaya. Perpaduan dua berkas cahaya ini akan menghasilkan intensitas maksimum ataupun minimum, tergantung dari perbedaan fasa antara kedua berkas cahaya tersebut. (Mangiwa, 2012).

Prinsip kerja Modulator *Mach Zehnder* ini, 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. Bahan yang mempunyai sifat demikian disebut bahan elektro-optik.

2.5.5 *Electroabsorption Modulator*

Modulator *Electroabsorption* (EAM) adalah perangkat semikonduktor yang dapat digunakan untuk modulasi intensitas sinar laser melalui tegangan listrik. *Electro-Absorption Modulator* (EAM) merupakan modulator yang memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan modulator lainnya. EAM memiliki keunggulan yaitu modulasi berkecepatan tinggi, pengaturan dengan tegangan rendah, *extinction ratio* yang tinggi, dan mudah diintegrasikan dengan device lainnya. Kebanyakan EAM dibuat dalam bentuk *waveguide* dengan elektroda untuk menerapkan medan listrik dalam arah tegak lurus terhadap sinar termodulasi. *Electro-Absorption Modulator* (EAM) bekerja menggunakan prinsip dasar efek *electroabsorption* yaitu perubahan koefisien absorpsi berdasarkan pada perubahan medan listrik. Berikut Gambar modulator optik pada *Gambar 2.9*.



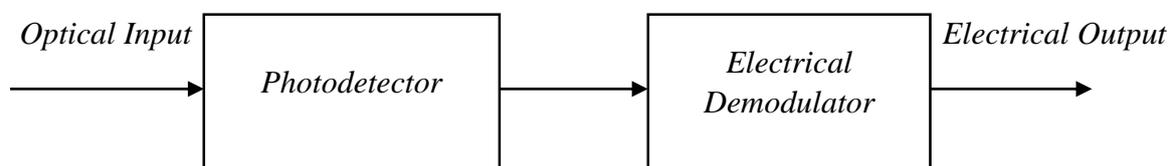
Gambar 2.9 Proses Modulator Eksternal
(Sumber : Stavros Lezekiel, 2015)

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

EAM dapat beroperasi dengan tegangan jauh lebih rendah beberapa volt. EAM dapat dioperasikan pada kecepatan yang sangat tinggi, *bandwidth* modulasi puluhan *gigahertz* dapat dicapai dan membuat perangkat ini berguna untuk komunikasi serat optik. EAM didasarkan pada struktur semikonduktor dimana cahaya diserap bila tegangan diterapkan untuk semikonduktor. EAM sering dibuat dari bahan yang sama seperti laser semikonduktor. Modulator ini beroperasi di *reverse bias*, sehingga konsumsi daya bisa sangat rendah. Selain itu, memiliki efisiensi modulasi tinggi, dan dapat bekerja dengan frekuensi IF kurang dari 10GHz. Sedangkan MZM mampu bekerja dengan frekuensi IF kurang dari 1GHz. Selain itu, tegangan bias dari 1-3V biasanya cukup untuk EAM sedangkan untuk MZM tegangan DC 4-5 V. (Razali ngah, 2008)

2.5.6 Receiver

Penerima optik adalah perangkat yang bertugas untuk mengubah sinyal optik menjadi informasi. Penerima untuk sistem optik nirkabel menggunakan *intensity modulation* dengan *direct detection* (IM/DD). Penerima ini langsung mengubah pulsa optik mejadi pulsa elektrik secara langsung. (Scott Bloom, 2002). *Gambar 2.10* menunjukkan diagram blok dari penerima optik yang terdiri dari coupler, *photodetector*, dan demodulator.



Gambar 2.10 Komponen penerima optik
(Sumber: Agrawal, 2010)

Komponen utamanya adalah *photodetector* yang mengubah cahaya menjadi listrik melalui efek fotolistrik. *Photodetector* harus memiliki sensitivitas tinggi, respon yang cepat,

noise rendah, biaya rendah, dan kehandalan yang tinggi. Persyaratan ini paling baik dipenuhi oleh *photodetector* yang terbuat dari bahan semikonduktor (Agrawal, 2002).

Photodetector yang biasa digunakan adalah PIN dioda atau *Avalanche Photodiode* (APD). Untuk aplikasi FSO, APD sangat menguntungkan karena rugi-rugi atmosfer dapat melemahkan sinyal sampai level yang lebih rendah. Biasanya penguat *trans-impedance* digunakan setelah *detector* karena dapat menyediakan *gain* yang tertinggi dengan kecepatan yang tinggi.

2.6 Wavelength Division Multiplexing (WDM)

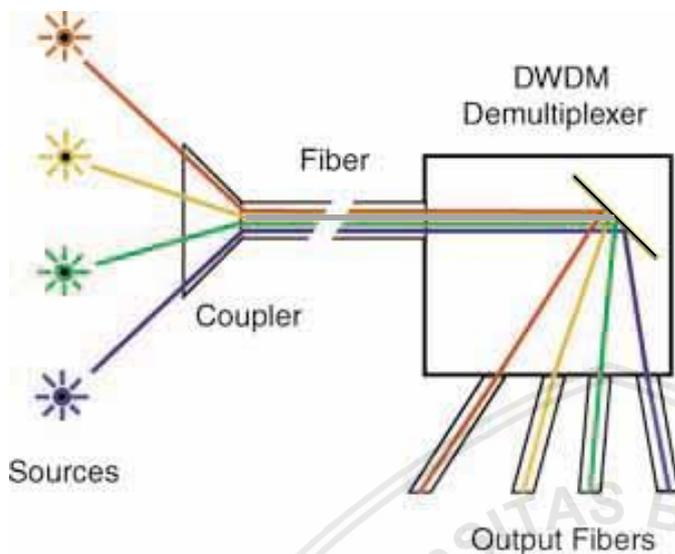
Dalam komunikasi jaringan optik, Wavelength Division Multiplexing (WDM) adalah teknologi yang digunakan untuk menggabungkan beberapa optical sinyal carrier kedalam satu serat optik dengan menggunakan berbagai panjang gelombang dari cahaya/ laser. Teknik ini mengizinkan komunikasi melalui satu fisik serat dengan kapasitas yang besar.

Pada sistem WDM menggunakan sebuah multiplexer di transmitter untuk menggabungkan sinyal, dan sebuah demultiplexer di receiver untuk memisahkan kembali sinyal yang telah digabungkan. Sistem WDM memang sesuai untuk digunakan pada perusahaan telekomunikasi, karena mereka dapat mengembangkan kapasitas dari jaringan tanpa menambah serat.

Kebanyakan dari sistem WDM beroperasi dalam mode single-mode fiber cables, yang memiliki diameter inti 9 μm . mode lain adalah multi-mode fiber cables (juga dikenal dengan premises cables) yang memiliki diameter inti 50 atau 62,5 μm . WDM pada awalnya mahal dan sulit untuk dijalankan. Bagaimanapun, pembaharuan standarisasi dan dengan pemahaman yang lebih baik dari sistem WDM membuat WDM menjadi lebih murah untuk dijalankan. Sistem WDM dibagi menjadi beberapa pola panjang gelombang, Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM) dan Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM). (Gilang Andhika,2006).

Cara kerja WDM adalah dengan prinsip refraksi dari prisma, warna-warna ditransmisikan bersama-sama dan dapat bercampur tetapi dapat dipisahkan dengan mudah menggunakan perangkat sederhana seperti prisma dengan memisahkan cahaya putih dari matahari menjadi spektrum warna dengan prisma. Masukan dari WDM sangat sederhana yaitu coupler yang menggabungkan semua input menjadi satu output. Pada bagian *demultiplexer*, cahaya masukan akan dipisahkan dengan kisi yaitu cermin yang bekerja mirip seperti prisma yang kemudian memisahkan cahaya menjadi panjang gelombang yang

berbeda dengan mengirimkannya pada sudut yang berbeda sehingga menciptakan keluaran terpisah untuk setiap panjang gelombang cahaya yang terpisah.



Gambar 2.11 WDM Demultiplexer

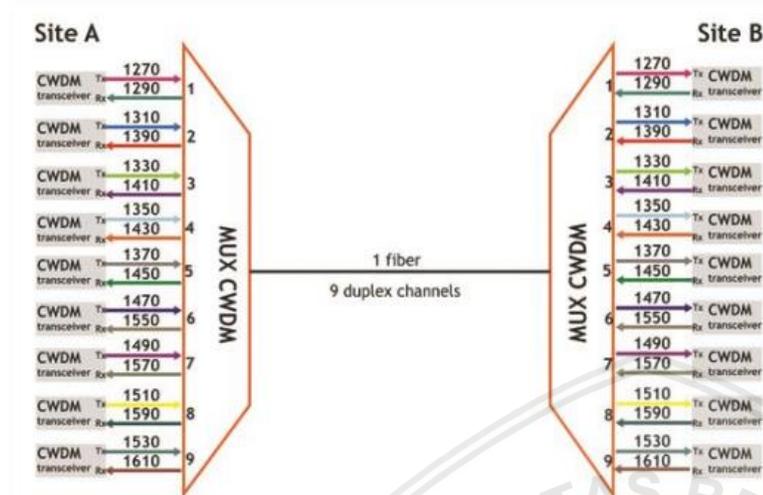
Sumber: www.thefoa.org

2.6.1 Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM)

Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM) adalah salah satu multiplexer yang terdapat pada jaringan komunikasi optik. Salah satu arti dari coarse WDM adalah dua (atau kemungkinan lebih) sinyal dimultipleks-kan menjadi satu serat. CWDM dapat digunakan pada serat ragam jamak dan juga serat ragam tunggal. CWDM memiliki jarak tempuh yang pendek dibandingkan dengan multiplexer lain, oleh sebab itu CWDM sesuai untuk wilayah yang memiliki rapat pelanggan, contoh perkotaan. Walaupun, tidak memiliki jarak tempuh yang jauh CWDM lebih murah dalam hal pengoperasian dan juga tetap efisien dalam hal komunikasi data. Jumlah channel yang dapat ditangani CWDM memang tidak sebanyak DWDM, Namun tetap lebih banyak dibandingkan dengan konvensional WDM (A.K. Putri, 2016).

Sistem CWDM memiliki channel pada spasi panjang gelombang 20nm, dibandingkan dengan DWDM yang mencapai 0,4 nm. CWDM memberikan biaya yang lebih murah rendah untuk mengoperasinyanya. Energi dari laaser yang dipancarkan oleh sistem CWDM, tersebar ke area yang lebih luas pada panjang gelombang dibandingkan dengan energi pada laser di sistem DWDM. Toleransi pada laser CWDM kurang lebih 3 nm, oleh karena itu presisi laser yang rendah sistem CWDM lebih murah dan mengkonsumsi lebih sedikit daya dibandingkan dengan DWDM. Sistem CWDM tidak dapat menempuh jarak

yang jauh karena panjang gelombangnya tidak dapat dikuatkan (A.K.Putri,2016). Pembagian alokasi panjang gelombang pada CWDM dapat dilihat pada gambar 2.11.

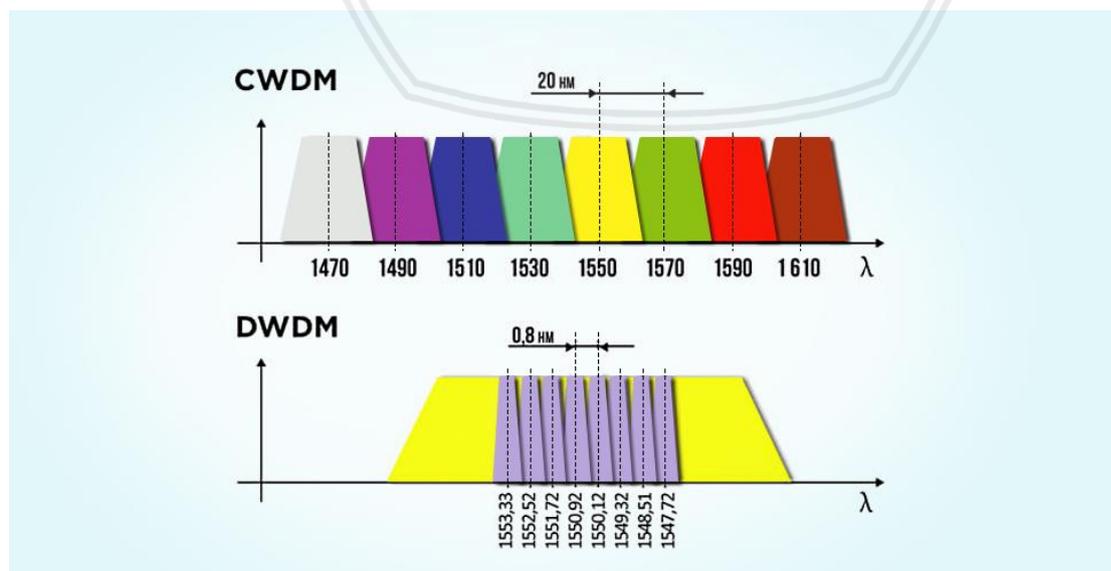


Gambar 2.12 Panjang Gelombang CWDM

Sumber: www.fs.com.

2.6.2 Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)

Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) adalah salah satu multiplexer yang terdapat pada jaringan komunikasi optik. Sistem DWDM memiliki channel pada spasi panjang gelombang 100 GHz (0,8 nm) atau 50 GHz (0,4 nm), dibandingkan dengan CWDM yang hanya 0,4 nm. Sistem DWDM dalam pengoperasiannya lebih mahal dibandingkan dengan CWDM disebabkan oleh kebutuhan transceiver yang lebih canggih dibandingkan dengan CWDM.



Gambar 2.13 Panjang Gelombang CWDM dan DWDM

Sumber: www.fs.com.

2.7 Parameter Kinerja

Parameter kinerja merupakan parameter yang diamati untuk mengetahui kinerja yang dihasilkan oleh sistem. Pada penelitian ini parameter yang akan diamati adalah *bit error rate* dan *Q-factor*.

2.7.1 Bit Error Rate (BER)

BER adalah perbandingan banyaknya bit yang salah dengan banyaknya bit yang ditransmisikan. BER dalam sistem transmisi serat optik berkisar antara $10^{-6} - 10^{-10}$ (Keiser, 1991:275). Untuk menghitung BER pada sebuah sistem komunikasi terdapat beberapa cara. Secara teori dapat menggunakan perbandingan *error bit* (E_b) terhadap total bit yang ditransmisikan (T_b) dalam periode t detik.

$$BER = \frac{E_b}{T_b} \dots \dots \dots (2-10)$$

Dimana :

E_b = *Error bit*

T_b = *Total bit*

Performansi sistem gelombang cahaya digital ditandai dengan *bit error rate* (BER). BER dapat ditentukan sebagai jumlah *error* dalam satu detik. BER biasanya digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan rata-rata bit yang salah. Oleh karena itu, BER senilai 10^{-6} setara dengan rata-rata satu *error* per jutaan bit. Kebanyakan gelombang cahaya menentukan BER 10^{-9} sebagai persyaratan operasi. Beberapa bahkan menggunakan persyaratan BER hingga 10^{-14} .

2.7.2 Q-factor

Kriteria *Q-factor* untuk evaluasi kinerja pada sistem transmisi optik sering digunakan dalam kombinasi dengan pengukuran BER memungkinkan representasi terkait statistik noise secara efisien.

Hubungan antara BER dan *Q-factor*:

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

Di sisi lain, *Q-factor* dapat ditandai sebagai fungsi dari *optimum decision threshold* (I_D).

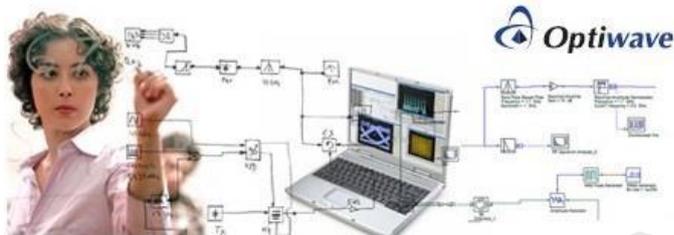
$$Q = \frac{I_D - I_0}{\sigma_0} = \frac{I_1 - I_D}{\sigma_1} \dots \dots \dots (2-12)$$

dengan :

$$I_D = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \dots \dots \dots (2-13)$$

Q -factor = 6 sesuai dengan BER = 10^{-9} . Untuk perhitungan Q -factor yang benar, jumlah minimum dari bit yang disimulasikan harus ditentukan melalui beberapa perhitungan Q dengan menaikkan panjang urutan bit.

2.8 Software Optisystem



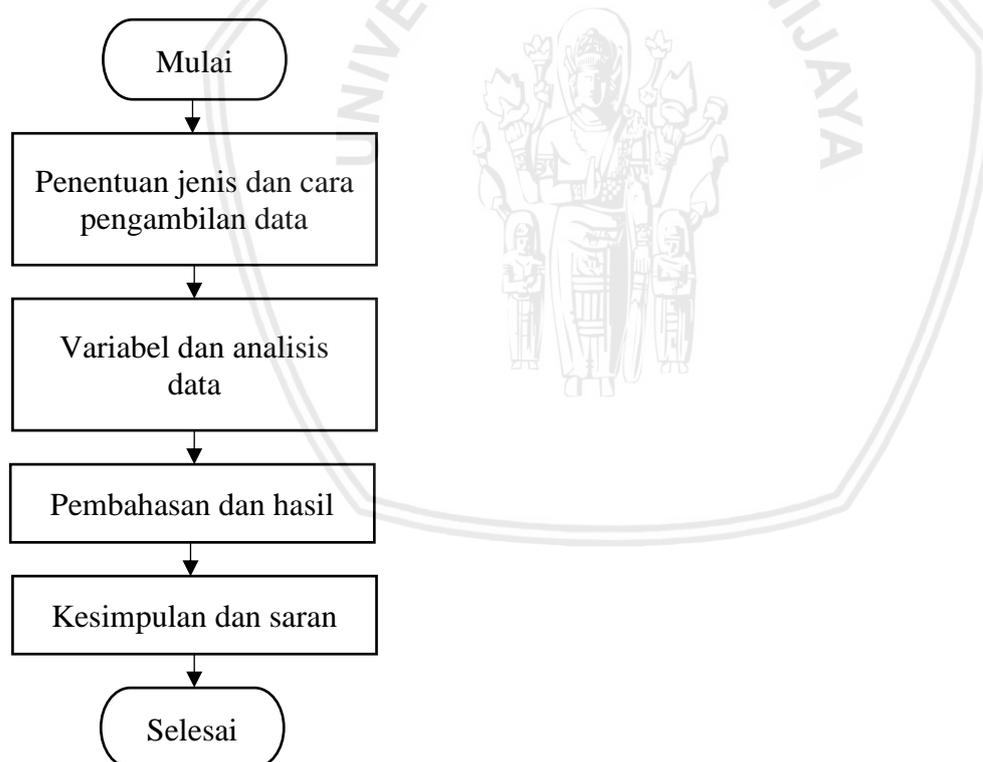
Gambar 2.14 Software simulasi OptiSystem
(Sumber: www.optiwave.com)

OptiSystem merupakan piranti lunak desain yang memungkinkan pengguna untuk merencanakan, menguji, dan mensimulasikan jaringan optik modern (www.optiwave.com, diakses November 2017). *Optisystem* menyediakan virtual komponen optik yang lengkap dan komprehensif sehingga pengguna dapat mendesain dan menganalisa sistem jaringan sesuai dengan kondisi nyata. Hal ini juga dimaksudkan untuk penghematan biaya, karena tidak perlu mengadakan komponen-komponen jaringan optik nyata yang *notabene* memiliki harga yang sangat mahal (Setiyadi, 2012).

BAB III

METODE PENELITIAN

Kajian yang dilakukan dalam penelitian ini bersifat simulasi menggunakan *software Optisystem* yang berupa pengujian pengaruh perubahan cuaca terhadap kinerja sistem komunikasi *Wavelength Divison Multiplexing FSO (WDM-FSO)* mengacu pada studi literatur. Aspek yang dikaji dalam penelitian ini meliputi pengaruh variasi *line coding* dan jenis *photodetector*, jumlah kanal WDM dan cuaca terhadap kinerja sistem komunikasi *Wavelength Divison Multiplexing FSO (WDM-FSO)* ditinjau dari parameter BER dan *Q-factor*. Adapun tahapan pada metodologi yang digunakan pada penelitian dapat dilihat pada diagram alir *Gambar 3.1*



Gambar 3.1 Diagram Alir Langkah Penelitian

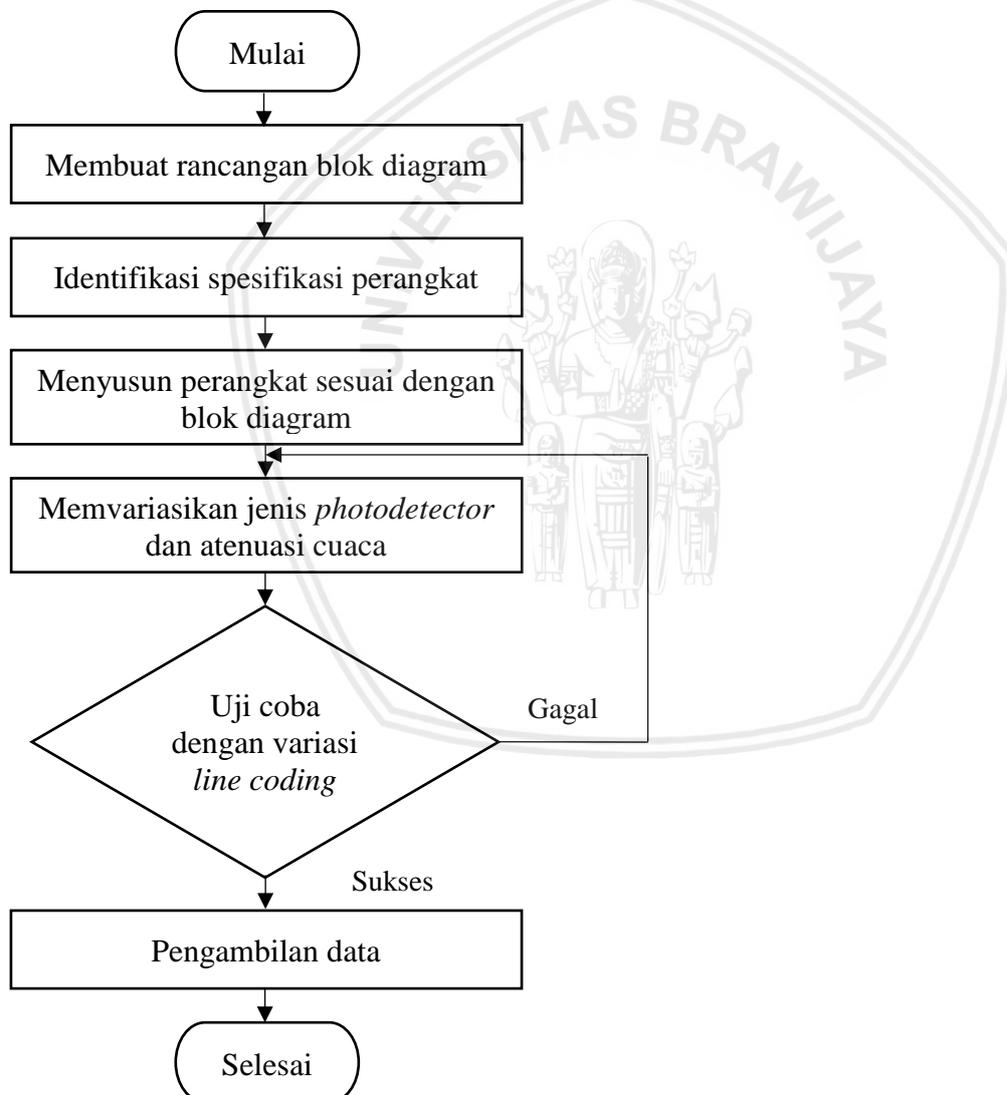
3.1 Jenis dan Cara Perolehan Data

Jenis data yang diperlukan dalam penelitian kali ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Pengambilan data digunakan untuk mendukung analisis suatu sistem. Data primer didapatkan dari hasil pengujian dan pengukuran sistem. Sedangkan data sekunder

didapatkan dari teori yang bersumber dari buku referensi, jurnal, penelitian, dan internet dari sumber terpercaya.

3.1.1 Perolehan Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh dari pengukuran kinerja sistem secara langsung. Pada penelitian ini data primer didapatkan dari hasil pengukuran BER dan Q -factor berdasarkan pengaruh jenis *line coding* dan jenis *photodetector* terhadap kinerja sistem komunikasi *Wavelength Division Multiplexing FSO* (WDM-FSO) saat kondisi cuaca cerah dan hujan lebat di daerah tropis. Parameter yang diamati dari penelitian ini adalah BER dan Q -factor. Gambar 3.2 menunjukkan diagram alir metode pengambilan data melalui simulasi.



Gambar 3.2 Diagram Alir Pengambilan Data

Diagram alir dimulai dengan membuat rancangan blok diagram penelitian pada simulasi dengan menggunakan software *Optisystem*. Memvariasikan parameter panjang gelombang yang digunakan 192.1 THz- 192.8 THz dengan spasi kanal 100 GHz, jarak transmisi dan atenuasi cuaca cerah dan hujan lebat di daerah tropis. Dilakukan uji coba dengan memvariasikan komponen *line coding* dan *photodetector*. Kemudian data primer didapatkan dari hasil pengukuran BER dan *Q factor*.

3.1.2 Perolehan Data Sekunder

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 dalam pembahasan skripsi ini adalah:

- a. Konsep dasar FSO, digunakan untuk mengetahui prinsip kerja dan arsitektur FSO sehingga mempermudah pemahaman mengenai perhitungan kinerja sistem.
- b. Parameter teknologi FSO, digunakan untuk mengetahui nilai variabel yang akan digunakan dalam perhitungan yaitu meliputi daya pancar, sudut divergensi, diameter aperture pemancar, diameter aperture penerima dan responsivitas penerima.

Perhitungan dan analisis data dalam makalah ini meliputi kinerja berikut:

- a. Pengaruh jumlah kanal pada panjang gelombang 1310 nm- 1610 nm terhadap kinerja sistem komunikasi *Wavelength Division Multiplexing* FSO (WDM-FSO).
- b. Pengaruh variasi komponen *line coding* pada parameter BER dan *Q factor* dalam sistem komunikasi *Wavelength Division Multiplexing* FSO (WDM-FSO).
- c. Pengaruh atenuasi cuaca cerah dan cuaca hujan pada parameter BER dan *Q factor* dalam sistem komunikasi *Wavelength Division Multiplexing* FSO (WDM-FSO).

Berikut data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini meliputi :

- a. Standarisasi sistem untuk *Free Space Optic* (FSO) berdasarkan ITU-R (*International Telecommunication Union-Radiocommunication*) sebagai berikut :
Berdasarkan standard IEC825/EN60825, keamanan pada laser dapat dioperasikan pada daya $3.4 < P < 27$ dBm.
- b. Parameter pada performansi sistem komunikasi FSO yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1
Spesifikasi Sistem Komunikasi FSO

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Panjang gelombang	λ	1550	Nm
Transmitter aperture diameter	d_1	2.5	Cm
Receiver aperture diameter	D_2	16	Cm
Divergensi beam	θ	2	Mrad

- c. Sumber Optik yang digunakan yaitu *Continuous Wave (CW)* laser. CW laser dipilih karena memiliki daya keluaran yang lebih besar dan *spectrum* yang lebih kecil pada pola radiasi lebih kecil. Pada penelitian ini digunakan CW laser type DS-7009 yang bekerja pada panjang gelombang 1550 nm memiliki spesifikasi yang ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2
Spesifikasi CW Laser

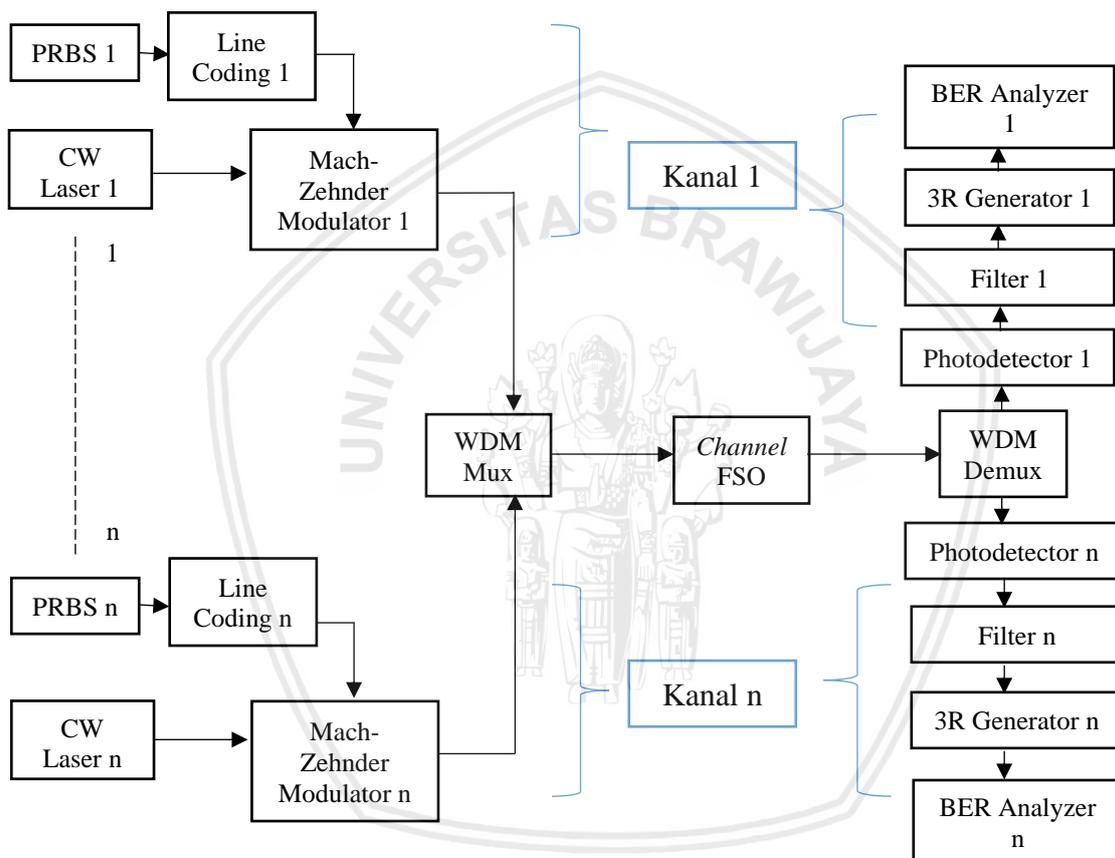
Parameter	Nilai
Frekuensi	193.1 Thz
Daya output	40-100 mW
Linewidth	1 MHz
Temperature	-40-85°C

Sumber : *Datasheet CW Laser Type DS-7009*

- d. Media transmisi yang digunakan adalah ruang bebas. Referensi dari BMKG Indonesia digunakan untuk menentukan atenuasi saat kondisi hujan lebat di Indonesia. Data dari BMKG Indonesia menyatakan bahwa intensitas hujan lebat di daerah Indonesia adalah 10-20 mm/jam.
- e. Menggunakan modulasi eksternal *Mach-Zehnder Modulator* karena prosesnya lebih cepat dan dapat digunakan dengan sumber laser yang memiliki daya yang tinggi.
- f. Jenis *coding* yang digunakan adalah NRZ dan RZ karena jenis *coding* ini tidak memerlukan *bandwidth* yang lebar. *Return to Zero (RZ)* dan *Non Return to Zero (NRZ)* merupakan skema format modulasi yang banyak digunakan dalam sistem komunikasi FSO komersial karena kemudahan implementasi dan efisiensi *bandwidth* (Liu et al., 2008).

- g. Spesifikasi detektor optik yang digunakan adalah *Avalanche Photodiode* (APD) dengan bahan InGaAsP karena memiliki responsivitas, penguatan, dan arus cahaya yang lebih besar dibandingkan *Photodiode Positive Intrinsic Negatif* (PIN) dengan waktu jangkit 0,1 ns.

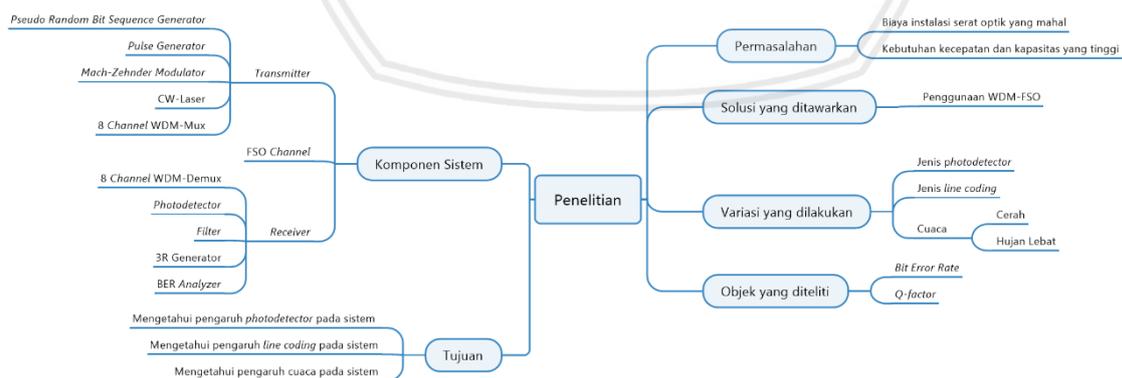
Selain itu data sekunder juga digunakan untuk menentukan aspek perancangan konfigurasi perangkat sistem komunikasi WDM-FSO. *Gambar 3.3* merupakan rancangan konfigurasi sistem komunikasi WDM-FSO.



Gambar 3.3 Blok Diagram Sistem WDM-FSO

Berdasarkan blok diagram *Gambar 3.3* PRBS membangkitkan sinyal informasi dengan urutan biner secara acak dan *bit rate* diatur 10 Gbps. Keluaran dari PRBS menuju ke *Pulse Generator* yang berfungsi membangkitkan pulsa yang berbentuk kotak dimana sinyal acak dari keluaran PRBS dialah di dalam *pulse generator*. Pada penelitian ini *pulse generator* yang dipakai ada 2 macam yaitu NRZ dan RZ. *Mach-Zehnder* merupakan sebuah interferometer yang bekerja menurut prinsip elektro-optik, dimana medan listrik yang diberikan dapat mempengaruhi karakteristik cahaya yang melewatinya. Sinyal dari *pulse generator* dan CW LASER dimodulasi di dalam *mach-zehnder* untuk kemudian di-

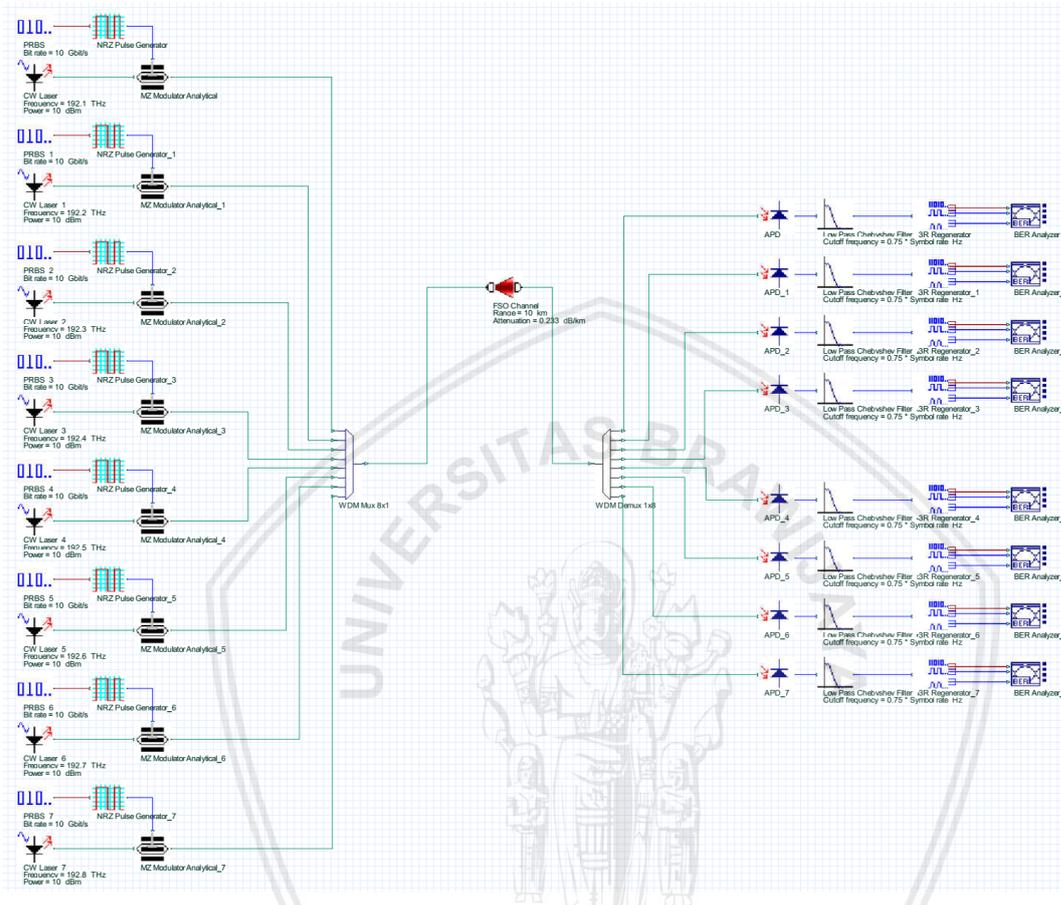
multiplexing di WDM dan kemudian ditransmisikan ke *Free Space Optic* (FSO) . Pada skripsi ini menggunakan 8 *channel* WDM. Proses dilakukan pada masing-masing kanal. *Continous Wave Laser* membangkitkan sinyal optik dengan panjang gelombang 192.1 THz untuk *channel* 1 hingga 192.8 THz untuk *channel* ke 8 dengan spasi kanal 100 GHz. Kemudian kanal tersebut dilewatkan dalam WDM Mux. *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) Mux merupakan suatu teknologi *multiplexing* yang bekerja dengan membawa sinyal informasi yang berbeda pada satu serat optik menggunakan panjang gelombang berbeda. Transmisi dilakukan di medium ruang bebas (*free space optic*) dengan variasi cuaca cerah dan cuaca hujan . Proses transmisi *Free Space Optic* menggunakan variasi jarak 1 km dan 10 km. Setelah itu, sinyal dipisahkan kembali menjadi dua kanal menggunakan WDM Demux. *Photodetector* pada sisi penerima optik mengubah cahaya menjadi listrik melalui efek fotolistrik. Skripsi ini akan membandingkan kinerja *photodetector* APD dan PIN. Menggunakan penerima APD karena rata-rata penerima APD memiliki sensitivitas 10 dB lebih besar daripada penerima PIN. *Low pass filter* dibutuhkan untuk memfilter atau meloloskan frekuensi rendah dengan kata lain menghilangkan *noise* frekuensi tinggi. BER Analyzer merupakan komponen untuk menghitung dan menampilkan nilai *bit error rate* dan *Q-factor* (faktor mutu) pada sistem secara otomatis ketika simulasi sudah menggunakan *software Optisystem*. Penyusunan rencana penelitian dimulai dengan pembuatan kerangka dasar penelitian. Kerangka dapat dilihat pada *Gambar 3.4*:



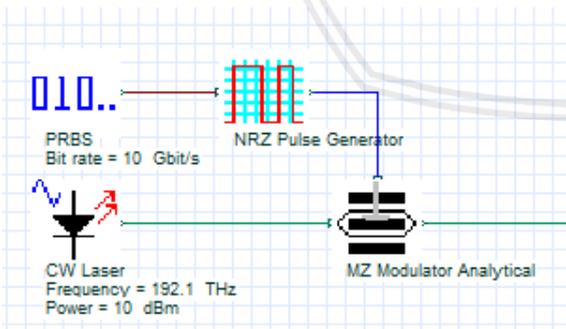
Gambar 3.4 Kerangka Penelitian

3.1.3 Konfigurasi Rangkaian Eksperimen

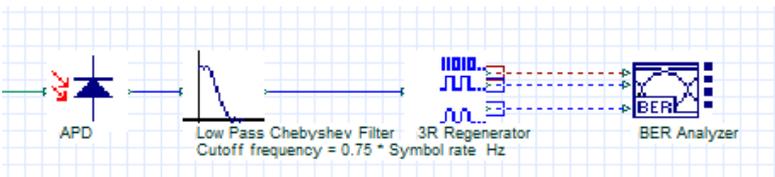
Pada sub sub bab ini akan menunjukkan bentuk desain simulasi pada *software Optisystem* yang telah dirancang dan dikombinasikan setiap komponen pada *Tabel 4.2*. Bentuk desain simulasi pada *software Optisystem 15.0* akan ditunjukkan pada gambar berikut ini.



Gambar 3.5 Desain Konfigurasi Sistem WDM-FSO



Gambar 3.6 Komponen Transmitter



Gambar 3.7 Komponen Receiver



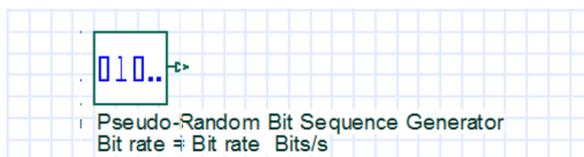
Pada *Gambar 3.5* menunjukkan desain konfigurasi sesuai dengan *Tabel 4.2*. Prinsip kerja dari sistem WDM-FSO dengan simulasi menggunakan *software Optisystem 15.0* diawali dengan komponen *pseudo-random bit sequence generator* yang menghasilkan sinyal biner secara acak dan *bit rate* diatur sebesar 10 Gbps. Keluaran dari PRBS menuju ke *pulse generator* yang berfungsi membangkitkan pulsa yang umumnya berbentuk kotak dimana sinyal acak dari keluaran PRBS diolah 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 RZ atau NRZ 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 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. *Continuous Wave LASER* membangkitkan sinyal optik sebagai sinyal masukan dengan panjang gelombang 1554.94 nm (192.8 THz) pada kanal 1 hingga 1560.61 nm (192.1 THz) pada kanal 8 dengan spasi kanal sebesar 100 GHz dan daya *input* 10 dBm. *Output* dari modulator eksternal berupa sinyal optik dan ditransmisikan dari *transmitter* 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. Sinyal informasi 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.

3.1.4 Komponen Perangkat Eksperimen

Konfigurasi sistem komunikasi WDM-FSO dengan simulasi *Optisystem* akan ditentukan komponen-komponen pada sistem tersebut. Proses simulasi sistem WDM-FSO 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 3.8* :

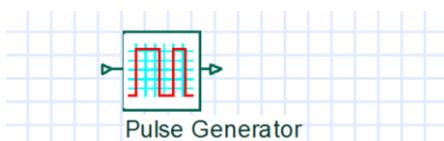


Gambar 3.8 Komponen *Pseudo-Random Bit Sequence Generator*

(Sumber: *Optiwave System 15*)

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 3.9* :

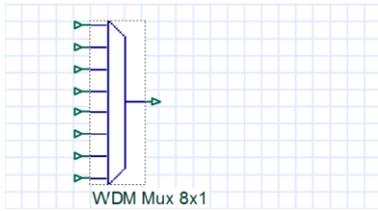


Gambar 3.9 Komponen *Pulse Generator*

(Sumber: *Optiwave System 15*)

c. *WDM Multiplexer*

WDM (Wavelength-Devision Multiplexing) Mux berfungsi sebagai pengubah 2^n sinyal menjadi satu sinyal keluaran. Pada rangkaian menggunakan WDM Mux 8×1 . Gambar komponen dapat dilihat pada *Gambar 3.10* :

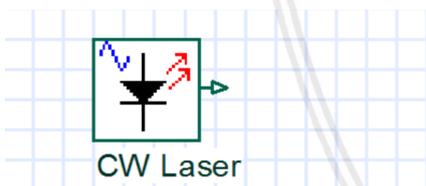


Gambar 3.10 Komponen WDM Mux

(Sumber: *Optiwave System 15*)

d. 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 3.11* :



Gambar 3.11 Komponen Sumber Cahaya

(Sumber: *Optiwave System 15*)

e. 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 3.12 :

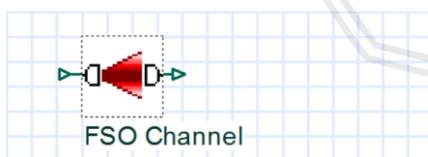


Gambar 3.12 Komponen Modulator Eksternal

(Sumber: *Optiwave System 15*)

f. *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 3.13:



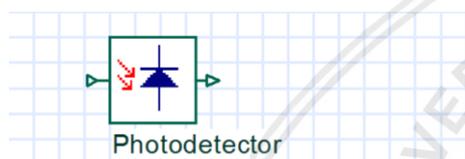
Gambar 3.13 Komponen *Free Space Optic*

(Sumber: *Optiwave System 15*)

g. *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 (*photon*) 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 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*. Gambar komponen dapat dilihat pada *Gambar 3.14* :

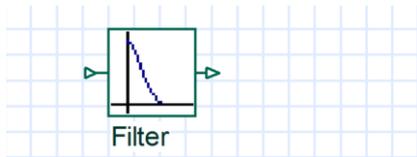


Gambar 3.14 Komponen *Photodetector*

(Sumber: *Optiwave System 15*)

h. 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 3.15* :



Gambar 3.15 Komponen Filter

(Sumber: *Optiwave System 15*)

i. 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 3.16 :



Gambar 3.16 Komponen BER Analyzer

(Sumber: *Optiwave System 15*)

3.2 Variabel dan Cara Analisis Data

Variabel-variabel pada penelitian ini ditekankan pada parameter kinerja, yaitu BER dan *Q-factor*. Variabel bebas yang digunakan adalah variasi jarak transmisi, dan atenuasi cuaca yang akan memberikan konsekuensi pada kinerja sistem. Analisis data dilakukan dengan pendekatan matematis yang disesuaikan dengan konsep dasar dari data sekunder. Analisis didasarkan pada rumusan masalah yang dijelaskan sebelumnya.

Data primer dari tahapan pengolahan data dijadikan dalam satu tabel untuk setiap konfigurasi sistem. Setelah ditabelkan maka data tersebut dicari nilai rata-rata untuk setiap konfigurasi sistem dan dibandingkan dengan setiap konfigurasi melalui penggambaran grafik.

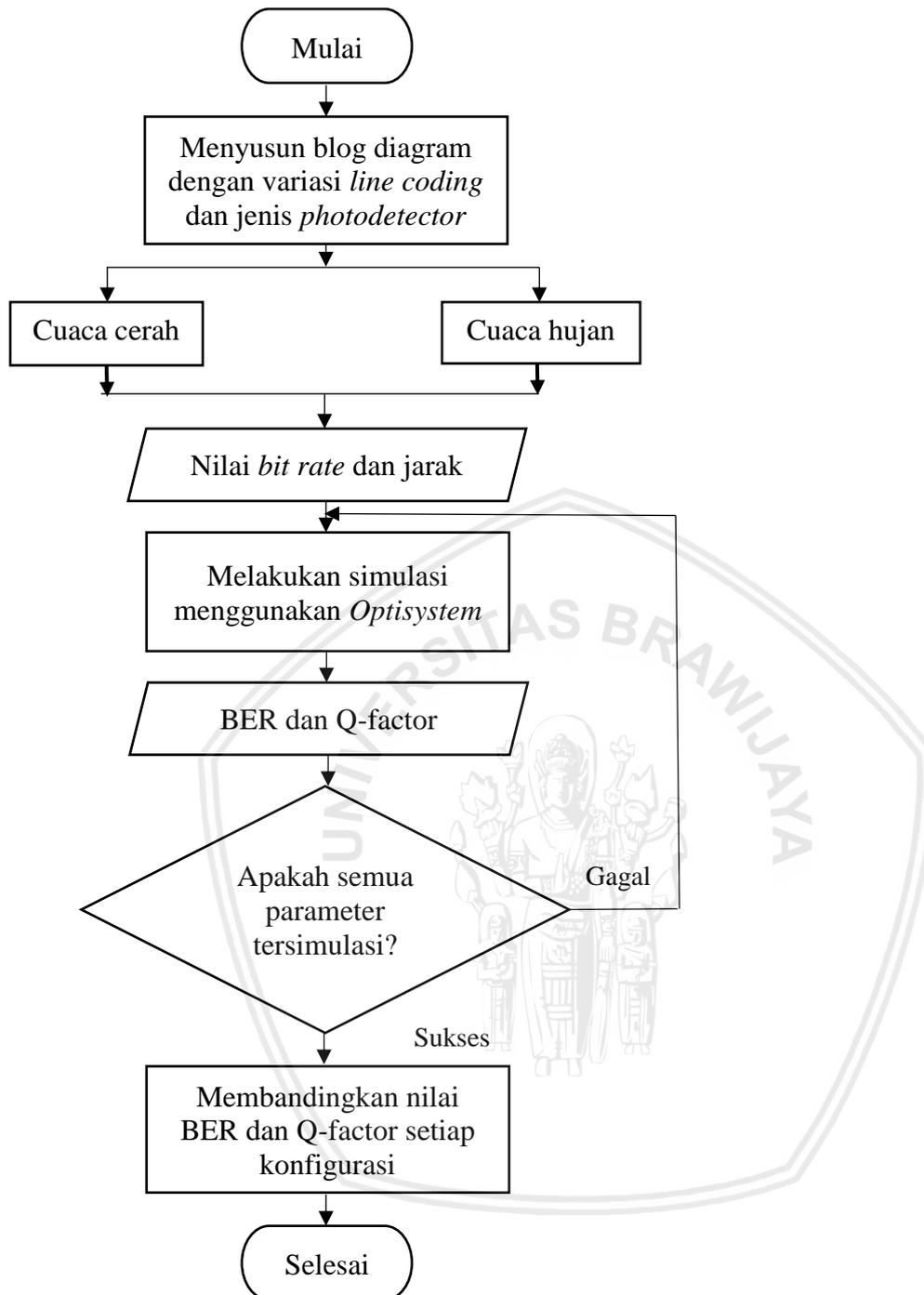
3.3 Kerangka Solusi Masalah

Kerangka solusi masalah pada penelitian ini merupakan langkah-langkah yang dilakukan untuk menyelesaikan masalah dalam bentuk diagram alir. Solusi kerangka

masalah yang dimaksudkan dalam skripsi ini adalah tahapan yang dilakukan untuk menyelesaikan masalah dalam bentuk diagram alir. Parameter kinerja sistem FSO yang digunakan yaitu *bit error rate* dan *Q-factor*. Langkah-langkah untuk mendapatkan parameter kinerja yang diinginkan dijelaskan pada sub bab berikutnya.

3.3.1 Pengaruh *Photodetector* dan *Line Coding* Pada Sistem WDM-FSO

Bit rate yang digunakan adalah 10 Gbps. *Gambar 3.4* menunjukkan diagram alir langkah pengujian pengaruh jumlah kanal pada sistem WDM-FSO. Langkah pertama menyusun blok diagram sesuai dengan penelitian. Blok diagram merupakan variasi dari setiap komponen yang diteliti. Pada skripsi ini memvariasikan komponen *line coding* (RZ dan NRZ) dan *photodetector* (APD dan PIN). Konfigurasi ini menggunakan panjang gelombang 192.1 THz hingga 192.8 THz dengan spasi kanal 100 GHz, jarak 1 km pada attenuasi cuaca hujan lebat, jarak 10 km untuk attenuasi cuaca cerah di daerah tropis. Attenuasi dihasilkan melalui empat proses perhitungan, pertama menghitung batasan kecepatan hujan (V_a), kedua menghitung distribusi hujan (N_a), kemudian ketiga menghitung koefisien scattering hujan ($\beta_{rain\ scat}$), dan terakhir menghitung redaman hujan (τ). Analisis dilakukan dengan menghitung nilai BER dan *Q-factor* untuk tiap jarak yang digunakan. Kemudian membandingkan nilai BER dan *Q factor* pada setiap konfigurasi.



Gambar 3.17 Diagram Alir Pengujian

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 WDM-FSO. Data yang disajikan merupakan hasil pengaruh dari variasi *photodetector*, *line coding*, dan atenuasi cuaca. Penulisan bab IV ini berupa konfigurasi perangkat eksperimen, prosedur pengambilan data, konfigurasi rangkaian eksperimen, komponen perangkat eksperimen, hasil eksperimen, dan pembahasan.

4.1 Prosedur Pengambilan Data

Prosedur pengambilan data pada eksperimen ini diawali dengan tahap persiapan perangkat, antara lain mempersiapkan *software Optisystem 15.0* pada PC. Selanjutnya merangkai sistem WDM-FSO sesuai dengan blok diagram yang ditunjukkan pada *Gambar 3.3*. Rangkaian sistem dibuat sesuai dengan komponen yang dibutuhkan dan divariasikan sesuai dengan diagram alir rencana penelitian pada *Gambar 3.4*. Pada eksperimen ini, komponen pada sistem WDM-FSO menggunakan variasi *line coding* NRZ dan RZ. Modulator eksternal yang akan digunakan yaitu *Mach-Zehnder modulator*. Dalam simulasi, sistem WDM-FSO difokuskan pada *bit rate* 10 Gbps, jarak 1 km pada atenuasi cuaca hujan lebat, 10 km untuk atenuasi cuaca cerah di daerah tropis dan menggunakan variasi *photodetector* APD dan PIN.

Sistem WDM-FSO menggunakan media propagasi atmosfer dalam penjarannya. Kondisi cuaca merupakan faktor utama penyebab atenuasi pada sistem WDM-FSO tersebut. Kondisi cuaca cerah belum sepenuhnya menjamin sistem WDM-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 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 WDM-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 4.1*.

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 intensitas hujan lebat ditunjukkan 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

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

- Redaman hujan

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

Hubungan redaman hujan dengan BER dapat dirumuskan pada persamaan dibawah:

$$P_R = P_T \left(\frac{A_{RX}}{(\theta L)^2} \right) \cdot e^{-\alpha} \dots\dots\dots(4-1)$$

Dimana:

P_R : Daya di *receiver* (dBm)

P_T : Daya di *transmitter* (dBm)

A_{RX} : *Receiver aperture area* (m²)

θ : Sudut divergensi (mrad)

α : Redaman atmosfer (dB)

L : Jarak antara *transmitter* dan *receiver* (m)

Kemudian untuk persamaan SNR adalah sebagai berikut:

$$SNR = \frac{(P_R \cdot R)^2}{2qB(I_p + I_D) + 4KTBF_n/R_L} \dots\dots\dots(4-2)$$

Dimana:

SNR: *Signal to Noise Ratio* (dB)

P_R : Daya di *receiver* (dBm)

R: Responsivitas *photodetector* (A/W)

q: Konstanta muatan elektron (1,6 x 10⁻¹⁹ C)

B: Bandwidth (GHz)

I_p : *Average Photocurrent* (A)

I_D : *Darkcurrent* (nA)

K: Konstanta Boltzman (1,38 x 10⁻²³ J.k)

T: Temperatur Absolut Photodiode (K)

F_n : Photodiode Noise Figure

RL: Beban resistansi Photodetector (Ω)

Average Photocurrent (I_p) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$I_p = P_r \times R \dots\dots\dots(4-3)$$

Sehingga dari persamaan diatas BER dapat dirumuskan sebagai berikut:

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

Kombinasi desain simulasi sistem WDM-FSO dengan variasi tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Kombinasi Desain Simulasi Sistem Komunikasi WDM-FSO

A	B	C	D	E	F	G	H	I
10 Gbps	APD	192,1	MZM	CW LASER	FSO	NRZ	CERAH	10 km
		192,2						
		192,3						
		192,4						
		192,5						
		192,6						
		192,7						
		192,8						
10 Gbps	APD	192,1	MZM	CW LASER	FSO	NRZ	HUJAN	1 km
		192,2						
		192,3						
		192,4						
		192,5						
		192,6						
		192,7						
		192,8						
10 Gbps	APD	192,1	MZM	CW LASER	FSO	RZ	CERAH	10 km
		192,2						
		192,3						
		192,4						
		192,5						
		192,6						
		192,7						
		192,8						
10 Gbps	APD	192,1	MZM	CW LASER	FSO	RZ	HUJAN	1 km
		192,2						
		192,3						
		192,4						
		192,5						
		192,6						
		192,7						
		192,8						
10 Gbps	PIN	192,1	MZM	CW LASER	FSO	NRZ	CERAH	10 km
		192,2						
		192,3						
		192,4						
		192,5						
		192,6						
		192,7						
		192,8						

10 Gbps	PIN	192,1	MZM	CW LASER	FSO	NRZ	HUJAN	1 km
		192,2						
		192,3						
		192,4						
		192,5						
		192,6						
		192,7						
		192,8						
10 Gbps	PIN	192,1	MZM	CW LASER	FSO	RZ	CERAH	10 km
		192,2						
		192,3						
		192,4						
		192,5						
		192,6						
		192,7						
		192,8						
10 Gbps	PIN	192,1	MZM	CW LASER	FSO	RZ	HUJAN	1 km
		192,2						
		192,3						
		192,4						
		192,5						
		192,6						
		192,7						
		192,8						

Keterangan Tabel 4.2 :

A = *bit rate* (Gbps)

B = *Photodetector*

C = Panjang gelombang (THz)

D = Modulator eksternal

E = Sumber cahaya

F = Media transmisi

G = *Line coding*

H = Variasi cuaca

I = Jarak transmisi (km)

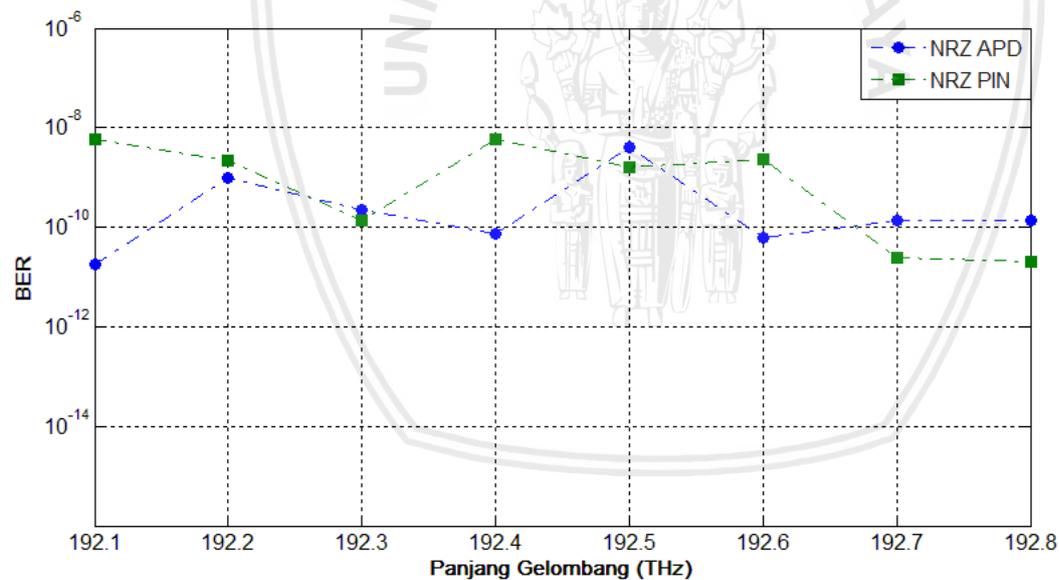
Tabel 4.2 menjelaskan kombinasi desain simulasi dengan berbagai variasi komponen yang akan diuji pada *software Optisystem*. Kombinasi desain simulasi tersebut akan diuji dengan parameter atenuasi cuaca cerah yaitu sebesar 0.233 dB/km dan atenuasi cuaca hujan lebat yaitu sebesar 19,28 dB/km. Jarak propagasi atmosfer untuk eksperimen sistem WDM-

FSO dengan kondisi cuaca cerah difokuskan pada jarak 10 km, sedangkan saat kondisi cuaca hujan lebat difokuskan pada jarak 1 km. Selanjutnya perancangan desain simulasi yang dirancang pada Tabel 4.2 akan diimplementasikan pada tahap selanjutnya.

4.2 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*) dan *photodetector* APD dan PIN yang akan dibahas pada sub bab ini. Data yang didapatkan dari hasil simulasi, dan dihitung sesuai dengan persamaan seperti dalam teori. Analisis performansi sistem pada penelitian yang dibahas meliputi BER dan *Q-factor*. Hasil eksperimen ditunjukkan dalam bentuk grafik untuk jenis *linecoding* dan *photodetector* dan atenuasi terhadap BER dan *Q-factor* serta hitungan secara teori untuk BER yang dianalisis.

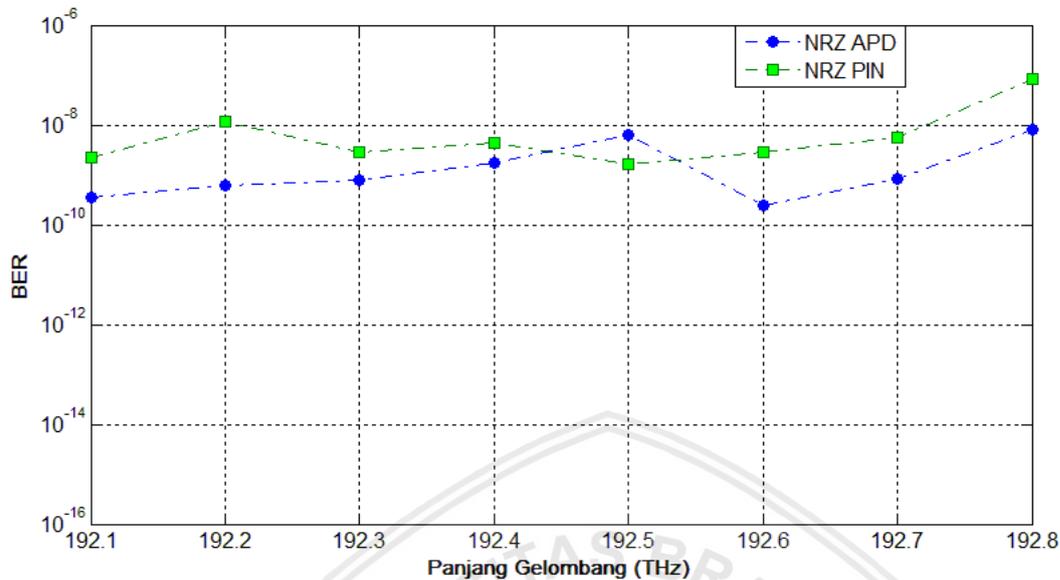
4.2.1 Analisis Kinerja *Line Coding* NRZ dan Jenis *Photodetector* terhadap *Bit Error Rate*



Gambar 4.1 Grafik Panjang Gelombang terhadap BER pada Cuaca Cerah

Berdasarkan Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 menunjukkan nilai BER untuk kombinasi *line coding* NRZ dengan *photodetector* APD dan PIN pada *bit rate* 10 Gbps baik dengan cuaca terang dan cuaca hujan lebat. Pada cuaca terang dengan menggunakan NRZ dengan *photodetector* APD didapatkan nilai BER terendah yaitu $1,83655 \times 10^{-11}$ pada panjang gelombang 192,1 THz dan tertinggi yaitu $4,15926 \times 10^{-9}$ pada panjang gelombang 192,5 THz. Lalu untuk kombinasi *line coding* NRZ dengan *photodetector* PIN didapatkan nilai

BER terendah yaitu $1,97824 \times 10^{-11}$ pada panjang gelombang 192,8 THz dan tertinggi yaitu $5,73956 \times 10^{-9}$ pada panjang gelombang 192,1 THz.



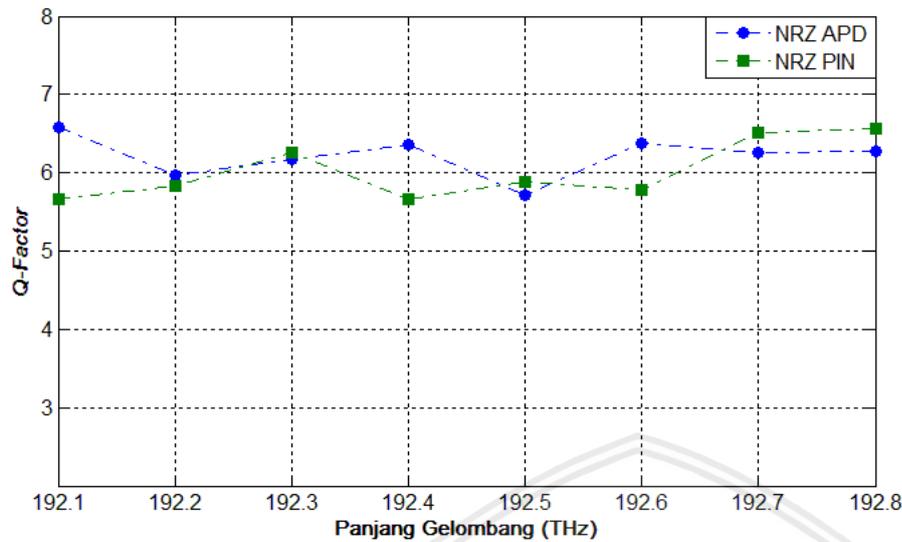
Gambar 4.2 Grafik Panjang Gelombang terhadap BER pada Cuaca Hujan Lebat

Pada cuaca hujan lebat dengan menggunakan NRZ dan APD didapatkan nilai BER terendah yaitu $2,43514 \times 10^{-10}$ pada panjang gelombang 192,6 THz dan nilai BER tertinggi yaitu $8,02759 \times 10^{-9}$ pada panjang gelombang 192,8 THz, sedangkan pada NRZ dan PIN didapatkan nilai BER terendah yaitu $1,593556 \times 10^{-9}$ pada panjang gelombang 192,5 THz dan tertinggi yaitu $8,15755 \times 10^{-8}$ pada panjang gelombang 192,8 THz. Dari hasil tersebut, pada kombinasi NRZ dan APD dengan jarak transmisi 10 km pada panjang gelombang 192,1 THz cuaca terang didapatkan nilai $1,83655 \times 10^{-11}$ dan memiliki nilai Q-Factor sebesar 6,5788. Secara matematis, nilai BER yang dihasilkan dari nilai Q-Factor dapat dibuktikan melalui persamaan (2-15):

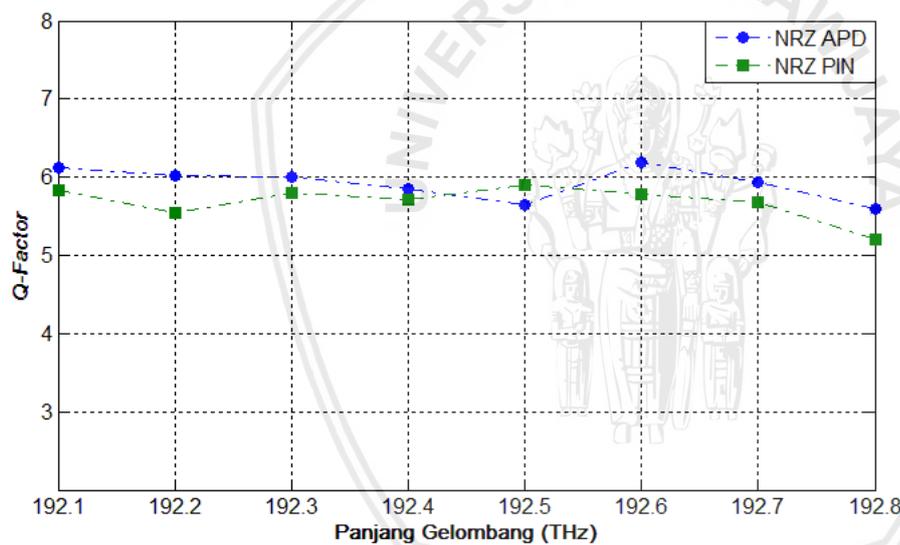
$$\begin{aligned}
 BER &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \\
 &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{6,5788}{\sqrt{2}}\right) \\
 &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(4,652) \\
 &= \frac{1}{2} \times \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{4,652}^{\infty} e^{-t^2} dt \\
 &= \frac{1}{2} \times 4,7426 \times 10^{-11} \\
 &= 2,37130 \times 10^{-11}
 \end{aligned}$$

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

4.2.2 Analisis Kinerja *Line Coding* NRZ dan Jenis *Photodetector* terhadap *Q-Factor*



Gambar 4.3 Grafik Panjang Gelombang terhadap *Q-Factor* pada Cuaca Cerah

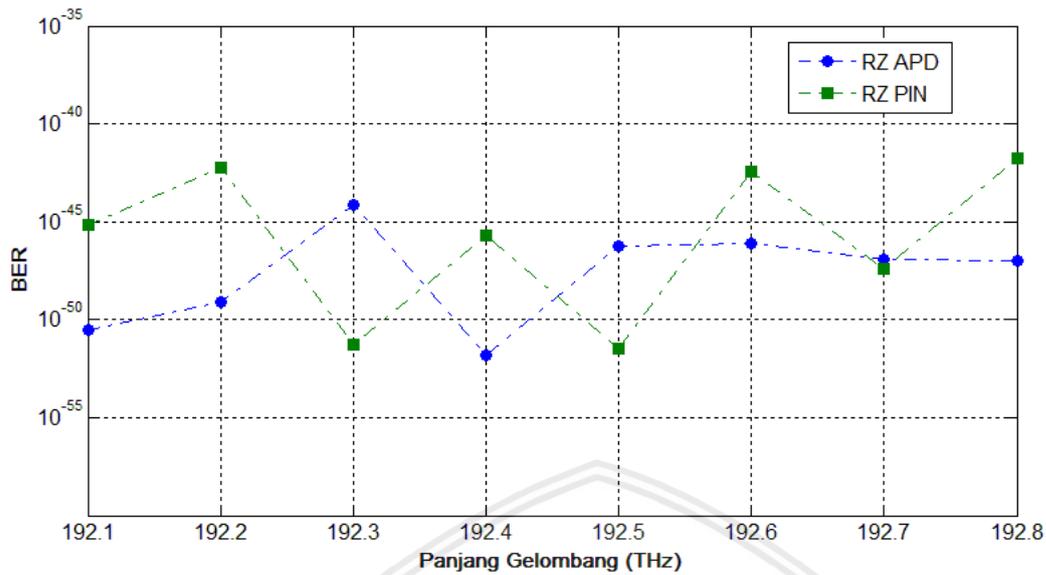


Gambar 4.4 Grafik Panjang Gelombang terhadap *Q-Factor* pada Cuaca Hujan Lebat

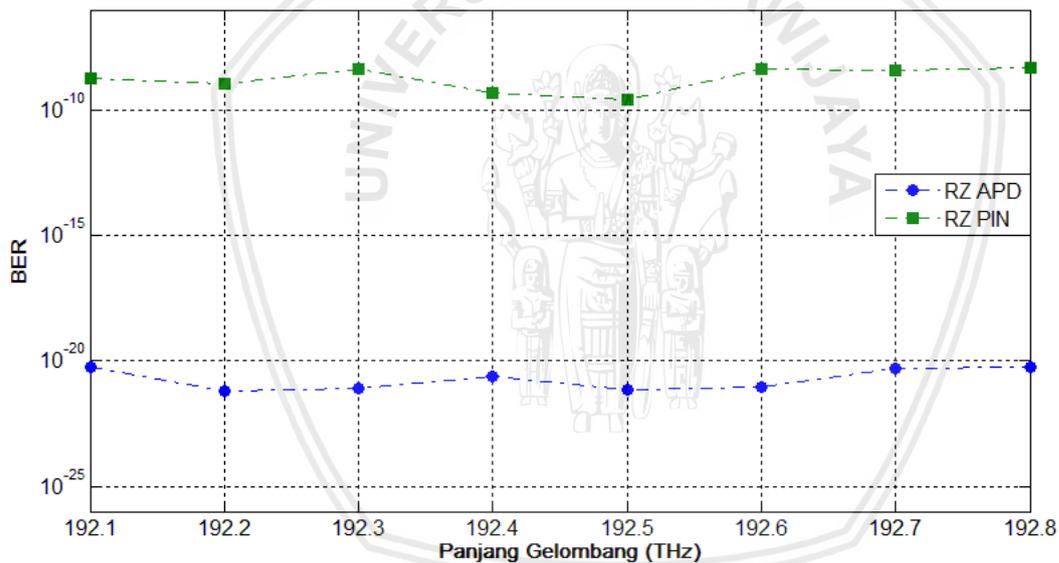
Berdasarkan Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 menunjukkan nilai *Q-Factor* dari kombinasi *line coding* NRZ dengan *photodetector* APD dan PIN, nilai *Q-Factor* berbanding terbalik dengan nilai BER dimana semakin kecil BER maka nilai *Q-Factor* akan semakin besar. Pada cuaca terang dengan menggunakan NRZ dan APD didapatkan nilai *Q-Factor* terendah yaitu 5,714 dan tertinggi yaitu 6,5788. Kemudian dengan menggunakan NRZ dan PIN didapatkan nilai *Q-Factor* terendah yaitu 5,6557 dan tertinggi yaitu 6,5571.

Pada cuaca hujan lebat dengan menggunakan NRZ dan APD didapatkan nilai *Q-Factor* terendah yaitu 5,6015 dan tertinggi yaitu 6,187. Sedangkan pada kombinasi NRZ dan PIN didapatkan nilai *Q-Factor* terendah yaitu 5,2006 dan tertinggi yaitu 5,9019.

4.2.3 Analisis Kinerja *Line Coding* RZ dan Jenis *Photodetector* terhadap *Bit Error Rate*



Gambar 4.5 Grafik Panjang Gelombang terhadap BER pada Cuaca Cerah



Gambar 4.6 Grafik Panjang Gelombang terhadap BER pada Cuaca Hujan Lebat

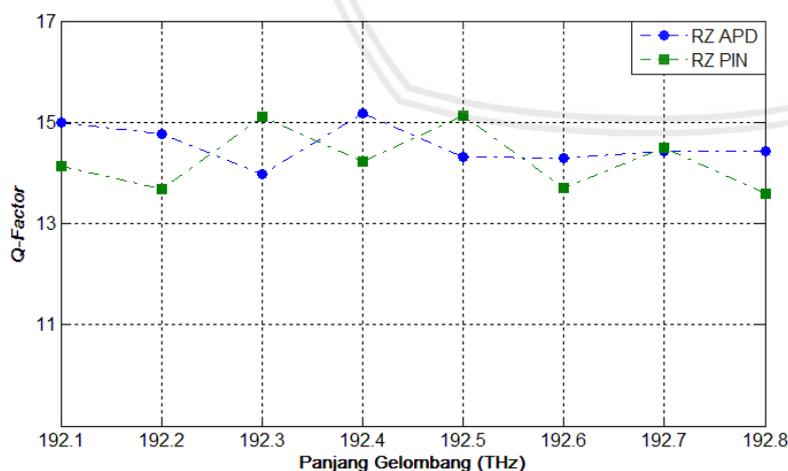
Berdasarkan Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 menunjukkan nilai BER untuk kombinasi *line coding* RZ dengan *photodetector* APD dan PIN pada *bit rate* 10 Gbps baik dengan cuaca terang dan cuaca hujan lebat. Pada cuaca terang dengan menggunakan RZ dengan *photodetector* APD didapatkan nilai BER terendah yaitu $1,62432 \times 10^{-52}$ pada panjang gelombang 192,4 THz dan tertinggi yaitu $7,06975 \times 10^{-45}$ pada panjang gelombang 192,3 THz. Lalu untuk kombinasi *line coding* RZ dengan *photodetector* PIN didapatkan nilai BER terendah yaitu $3,31818 \times 10^{-52}$ pada panjang gelombang 192,5 THz dan tertinggi yaitu $1,61625 \times 10^{-42}$ pada panjang gelombang 192,8 THz.

Pada cuaca hujan lebat dengan menggunakan RZ dan APD didapatkan nilai BER terendah yaitu $6,17485 \times 10^{-22}$ pada panjang gelombang 192,2 THz dan nilai BER tertinggi yaitu $5,60075 \times 10^{-21}$ pada panjang gelombang 192,1 THz, sedangkan pada kombinasi RZ dan PIN didapatkan nilai BER terendah yaitu $2,52354 \times 10^{-10}$ pada panjang gelombang 192,5 THz dan tertinggi yaitu $4,69056 \times 10^{-9}$ pada panjang gelombang 192,8 THz. Dari hasil tersebut, pada kombinasi RZ dan APD dengan jarak transmisi 10 km pada panjang gelombang 192,1 THz cuaca terang didapatkan nilai $1,62432 \times 10^{-52}$ dan memiliki nilai Q-Factor sebesar 15,177. Secara matematis, nilai BER yang dihasilkan dari nilai Q-Factor dapat dibuktikan melalui persamaan (2-15):

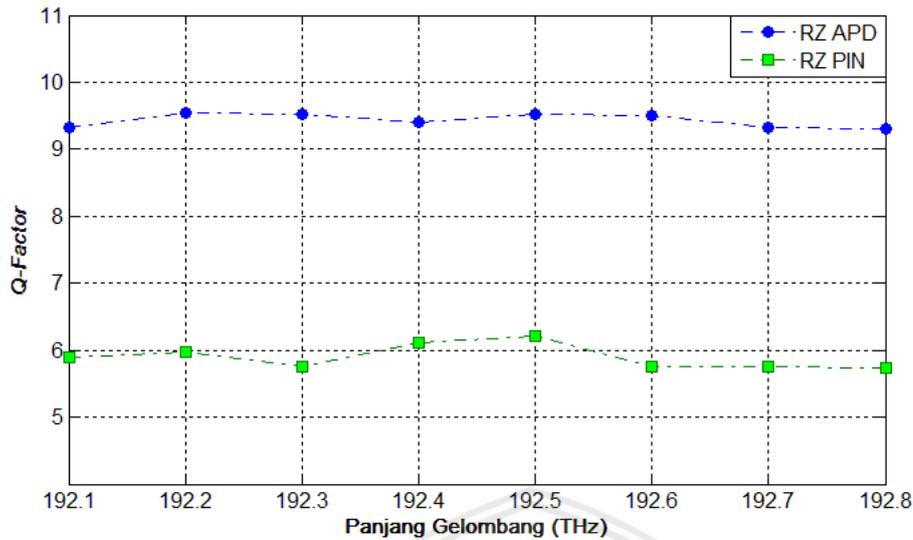
$$\begin{aligned}
 BER &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \\
 &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{15,177}{\sqrt{2}}\right) \\
 &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(10,731) \\
 &= \frac{1}{2} \times \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{10,731}^{\infty} e^{-t^2} dt \\
 &= \frac{1}{2} \times 5,0223 \times 10^{-52} \\
 &= 2,53037 \times 10^{-52}
 \end{aligned}$$

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

4.2.4 Analisis Kinerja Line Coding RZ dan Photodetector terhadap Q-Factor



Gambar 4.7 Grafik Panjang Gelombang terhadap Q-Factor pada Cuaca Cerah



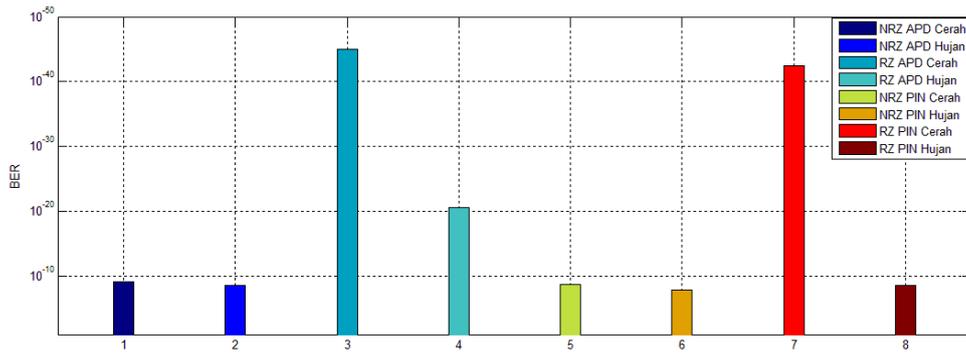
Gambar 4.8 Grafik Panjang Gelombang terhadap Q-Factor pada Cuaca Hujan Lebat

Berdasarkan Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 menunjukkan nilai Q-Factor dari kombinasi *line coding* RZ dengan *photodetector* APD dan PIN, nilai Q-Factor berbanding terbalik dengan nilai BER dimana semakin kecil BER maka nilai Q-Factor akan semakin besar. Pada cuaca terang dengan menggunakan RZ dan APD didapatkan nilai Q-Factor terendah yaitu 13,979 dan tertinggi yaitu 15,177. Kemudian dengan menggunakan RZ dan PIN didapatkan nilai Q-Factor terendah yaitu 13,593 dan tertinggi yaitu 15,13.

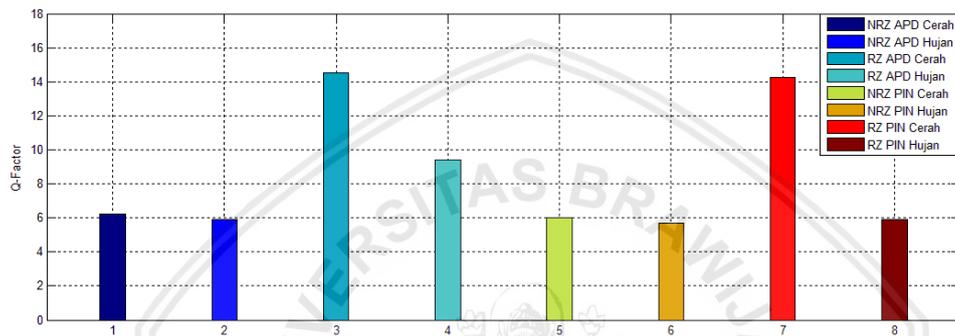
Pada cuaca hujan lebat dengan menggunakan RZ dan APD didapatkan nilai Q-Factor terendah yaitu 9,30891 dan tertinggi yaitu 9,54714. Sedangkan pada kombinasi RZ dan PIN didapatkan nilai Q-Factor terendah yaitu 5,73973 dan tertinggi yaitu 6,21389.

4.2.5 Analisis Rata-Rata Kinerja Sistem *Wavelength Division Multiplexing – Free Space Optic* (WDM-FSO)

Parameter kinerja sistem WDM-FSO yang dianalisis adalah BER dan *Q-Factor*. Pada sub sub bab ini akan dianalisis parameter BER dan Q-Factor pada setiap kombinasi komponen sistem yang telah dijabarkan pada tabel 4.2. BER menyatakan perbandingan bit yang salah dengan banyaknya bit yang ditransmisikan. Sedangkan *Q-Factor* merupakan parameter yang mengukur kualitas sinyal pada sistem WDM-FSO. Pada analisis ini akan diamati nilai rata-rata BER dan *Q-Factor* dari data hasil eksperimen dari kombinasi komponen sistem WDM-FSO yang sesuai pada tabel 4.2. Berikut adalah grafik nilai rata-rata BER dan *Q-Factor* pada setiap kombinasi komponen pada sistem WDM-FSO dalam Gambar 4.9 dan 4.10.



Gambar 4.9 Grafik Nilai Rata- Rata BER untuk Setiap Kombinasi Komponen



Gambar 4.10 Grafik Nilai Rata- Rata Q -Factor untuk Setiap Kombinasi Komponen

Dari Gambar 4.9 yang menunjukkan nilai rata-rata BER dari setiap kombinasi komponen sistem WDM-FSO dapat diketahui bahwa kombinasi rangkaian yang menggunakan *line coding* RZ dan jenis *photodetector* APD pada cuaca cerah memberikan kinerja yang terbaik dibandingkan dengan kombinasi yang lain dengan nilai rata-rata BER $9,04242 \times 10^{-46}$ dan kombinasi rangkaian yang memberikan kinerja yang buruk adalah kombinasi yang menggunakan *line coding* NRZ dan jenis *photodetector* PIN pada cuaca hujan dengan nilai rata-rata BER sistem $1,40889 \times 10^{-8}$.

Sedangkan dari Gambar 4.10 yang menunjukkan nilai rata-rata Q -Factor dari setiap kombinasi komponen sistem WDM-FSO dapat diketahui bahwa kombinasi *line coding* RZ dan jenis *photodetector* APD pada cuaca cerah juga yang memberikan kinerja terbaik yaitu dengan nilai rata-rata Q -Factor $14,5472$ dan yang memiliki kinerja yang terburuk adalah kombinasi *line coding* NRZ dan jenis *photodetector* PIN pada cuaca hujan dengan nilai rata-rata Q -Factor $5,6812$.

Berdasarkan data hasil penelitian, cuaca mempengaruhi kinerja rata-rata dari sistem, sistem bekerja dengan optimal ketika cuaca cerah dan bekerja kurang optimal ketika hujan lebat. Pada grafik diatas dapat dilihat bahwa sistem yang sama dengan kondisi cuaca yang

berbeda memiliki kinerja yang berbeda juga. Cuaca hujan memiliki atenuasi yang besar yaitu sebesar 19.28 dB/km sehingga sangat mempengaruhi parameter BER dan *Q-factor* pada sistem jika dibandingkan dengan cuaca cerah yang memiliki atenuasi yang kecil dengan 0.233 dB/km.

Photodetector APD memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan *photodetector* PIN karena APD merupakan komponen yang memiliki sensitivitas tinggi yang memanfaatkan efek *photoelectric* untuk mengubah cahaya menjadi sinyal listrik. Pada APD sendiri juga telah terdapat *gain internal* yang dapat menghasilkan kinerja yang lebih baik bila dibandingkan dengan *photodetector* PIN.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi pengaruh *line coding* dan jenis *photodetector* terhadap kinerja sistem komunikasi *Wavelength Division Multiplexing – Free Space Optic* (WDM-FSO) saat kondisi cuaca cerah dan hujan lebat di daerah tropis, memberikan hasil sebagai berikut :

1. Pada cuaca cerah, kombinasi rangkaian sistem komunikasi WDM-FSO yang memberikan kinerja parameter BER terbaik yaitu *bit rate* 10 Gbps, *line coding* RZ, panjang gelombang 192,4 THz nm, dan jarak transmisi 10 km. Nilai BER yaitu $1,62432 \times 10^{-52}$ dan *Q-Factor* 14,5472.
2. Pada cuaca hujan lebat, kombinasi rangkaian sistem komunikasi WDM-FSO yang memberikan kinerja parameter BER terbaik yaitu *bit rate* 10 Gbps, *line coding* RZ, panjang gelombang 192,2 THz, dan jarak transmisi 1 km. Nilai terendah BER yaitu $6,17485 \times 10^{-22}$ dan *Q-Factor* tertinggi pada nilai 9,5471.
3. Sistem komunikasi WDM-FSO dengan kombinasi rangkaian *bit rate* 10 Gbps, *line coding* RZ dan jenis *photodetector* APD pada cuaca cerah maupun hujan memiliki kinerja yang paling baik dibandingkan dengan kombinasi rangkaian yang lain. Saat cuaca cerah yaitu dengan nilai rata-rata BER yaitu $9,04242 \times 10^{-46}$ dan *Q-Factor* sebesar 14,5472 dan saat cuaca hujan lebat dengan nilai rata-rata BER $2,70330 \times 10^{-21}$ dan *Q-Factor* 9,4291.

5.2 Saran

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini, saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian yaitu:

1. Pengembangan penelitian ini dapat dilakukan dengan menggunakan WDM dengan jumlah kanal, bit rate, *line coding* dan modulator eksternal yang lain.
2. Pengembangan penelitian ini dapat dilakukan dengan menggunakan cuaca lain yang terjadi di Indonesia, seperti cuaca berkabut.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal G P. 2002. *Fiber-Optic Communication Systems*. New York: JOHN WILEY & SONS, INC.
- Agrawal G. P. 2005. *Light Wave Technology Telecommunication Systems*. New Jersey: JOHN WILEY & SONS, INC.
- Fadhil, H A., Angela A, Hasrul, Shamsuddin, Thanaa H, Hamza, M.R. Al-Khafaji, S.A. Aljunid, Nasim A. 2013. *Optimization of free space optics parameters: An optimum solution for bad weather conditions*. ScienceDirect.
- Freeman, Roger L. 2005. *Fundamentals of Telecommunications Second Edition*. Canada : JOHN WILEY & SONS, INC.
- Hitam S, Siti N.S, Ahmad S, dkk. 2012. *Performance Analysis on 16-Channels Wavelength Division Multiplexing in Free Space Optical Transmission under Tropical Regions Environment*. Journal of Computer Science.
- ITU-R P.1817, R.. 2007. “*Propagation Data Required for the Design of Terrestrial Free-Space Optical links*”.
- Keiser, G. E. 1991. *Optical Fiber Communications*. USA: The McGraw-Hill Companies.
- K. Prabu, Sumanta Bose, Dr. D. Sriram Kumar. 2012. *Analysis of Optical Modulators for Radio Over Free Space Optical Communication Systems and Radio Over Fiber Systems*. IEEE.
- Biswas S.K, Pankaj Biswas, Jobaida Akhtar. 2017. *Estimation of Link Range and Bit Rate for 16 Channel WDM-FSO Considering Atmospheric Turbulence and Pointing Error Under Various Weather Condition*. IEEE.
- K. Tsukamoto, et. Al. 2007. *Development of DWDM Radio on Free Space Optic Link System for Ubiquitous Wireless*. Proc. Asia Pacific Photonics Conference (AP-MWP 2007)
- Mohamed, Abd El-Naser A. 2009. *Transmission Performance Analysis of Digital Wire and Wireless Optical Links in Local and Wide Areas Optical Network..* (IJCSIS) International Journal of Computer Science and Information Security, Vol. 3, No. 1, 2009

Stalling, W. 2001. *"Komunikasi Data Dan Komputer :Dasar-dasar Komunikasi Data. 6th Edition"*. Jakarta :Penerbit Salemba Teknika.

Willebrand, H., S.B. Ghuman, 2002. *Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity. Today's Network*, Sams Publishing, Indiana 46240.



Lampiran 1. Tabel Hasil Kombinasi NRZ APD

Bitrate (Gbps)	Panjang Gelombang (THz)	Modulator	Line Coding	Photodetector	Cuaca	Jarak	BER	Q-Factor
10	192,1	MZM	NRZ	APD	Cerah	10	1,83655E-11	6,57882
	192,2						9,63102E-10	5,96563
	192,3						2,24399E-10	6,18041
	192,4						7,38503E-11	6,35405
	192,5						4,15926E-09	5,71398
	192,6						6,05341E-11	6,38376
	192,7						1,35009E-10	6,26074
	192,8						1,39657E-10	6,27002
10	192,1	MZM	NRZ	APD	Hujan	1	3,46416E-10	6,11623
	192,2						6,20884E-10	6,01622
	192,3						7,66988E-10	5,99896
	192,4						1,78172E-09	5,852
	192,5						6,45219E-09	5,63957
	192,6						2,43514E-10	6,18699
	192,7						8,54759E-10	5,93608
	192,8						8,02759E-09	5,60154

Lampiran 2. Tabel Hasil Kombinasi RZ APD

Bitrate (Gbps)	Panjang Gelombang (THz)	Modulator	Line Coding	Photodetector	Cuaca	Jarak	BER	Q-Factor
10	192,1	MZM	RZ	APD	Cerah	10	3,08237E-51	14,9844
	192,2						8,46011E-50	14,7662
	192,3						7,06975E-45	13,9793
	192,4						1,62432E-52	15,1765
	192,5						6,05827E-47	14,3161
	192,6						7,98633E-47	14,2948
	192,7						1,26277E-47	14,4252
	192,8						1,10209E-47	14,4352
10	192,1	MZM	RZ	APD	Hujan	1	5,60075E-21	9,31708
	192,2						6,17485E-22	9,54714
	192,3						7,77107E-22	9,5182
	192,4						2,30454E-21	9,39743
	192,5						6,72952E-22	9,527
	192,6						9,43108E-22	9,49784
	192,7						5,23008E-21	9,31894
	192,8						5,48041E-21	9,30891

Lampiran 3. Tabel Hasil Kombinasi NRZ PIN

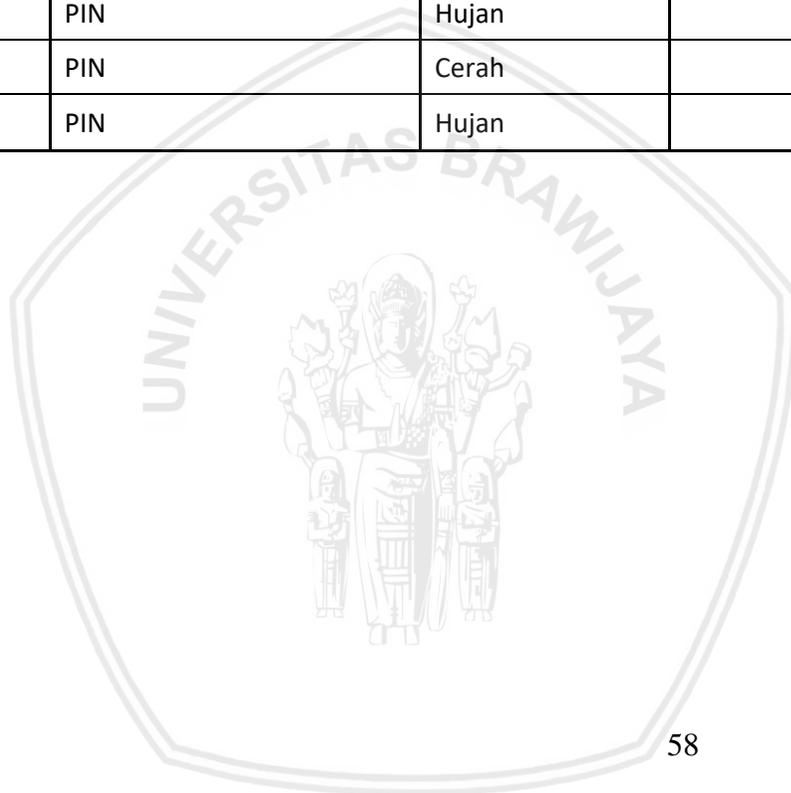
Bitrate (Gbps)	Panjang Gelombang (THz)	Modulator	Line Coding	Photodetector	Cuaca	Jarak	BER	Q-Factor
10	192,1	MZM	NRZ	PIN	Cerah	10	5,73956E-09	5,66025
	192,2						2,18213E-09	5,82993
	192,3						1,40629E-10	6,25219
	192,4						5,99417E-09	5,65571
	192,5						1,61289E-09	5,88142
	192,6						2,26938E-09	5,77612
	192,7						2,43717E-11	6,51263
	192,8						1,97824E-11	6,55705
	10						192,1	MZM
192,2		1,17211E-08	5,54528					
192,3		2,83845E-09	5,7907					
192,4		4,34493E-09	5,7181					
192,5		1,59356E-09	5,90188					
192,6		2,80932E-09	5,77903					
192,7		5,66917E-09	5,6743					
192,8		8,15755E-08	5,20058					

Lampiran 4. Tabel Hasil Kombinasi RZ PIN

Bitrate (Gbps)	Panjang Gelombang (THz)	Modulator	Line Coding	Photodetector	Cuaca	Jarak	BER	Q-Factor
10	192,1	MZM	RZ	PIN	Cerah	10	6,91101E-46	14,1407
	192,2						5,39525E-43	13,6743
	192,3						5,32910E-52	15,099
	192,4						1,89398E-46	14,2321
	192,5						3,31818E-52	15,1301
	192,6						3,40637E-43	13,6915
	192,7						4,06259E-48	14,4964
	192,8						1,61625E-42	13,5932
10	192,1	MZM	RZ	PIN	Hujan	1	1,92289E-09	5,89033
	192,2						1,19211E-09	5,96753
	192,3						4,20846E-09	5,75629
	192,4						4,64756E-10	6,12088
	192,5						2,52354E-10	6,21389
	192,6						4,56631E-09	5,74568
	192,7						3,96984E-09	5,76486
	192,8						4,69056E-09	5,73973

Lampiran 5. Tabel Nilai Rata-Rata Sistem WDM-FSO

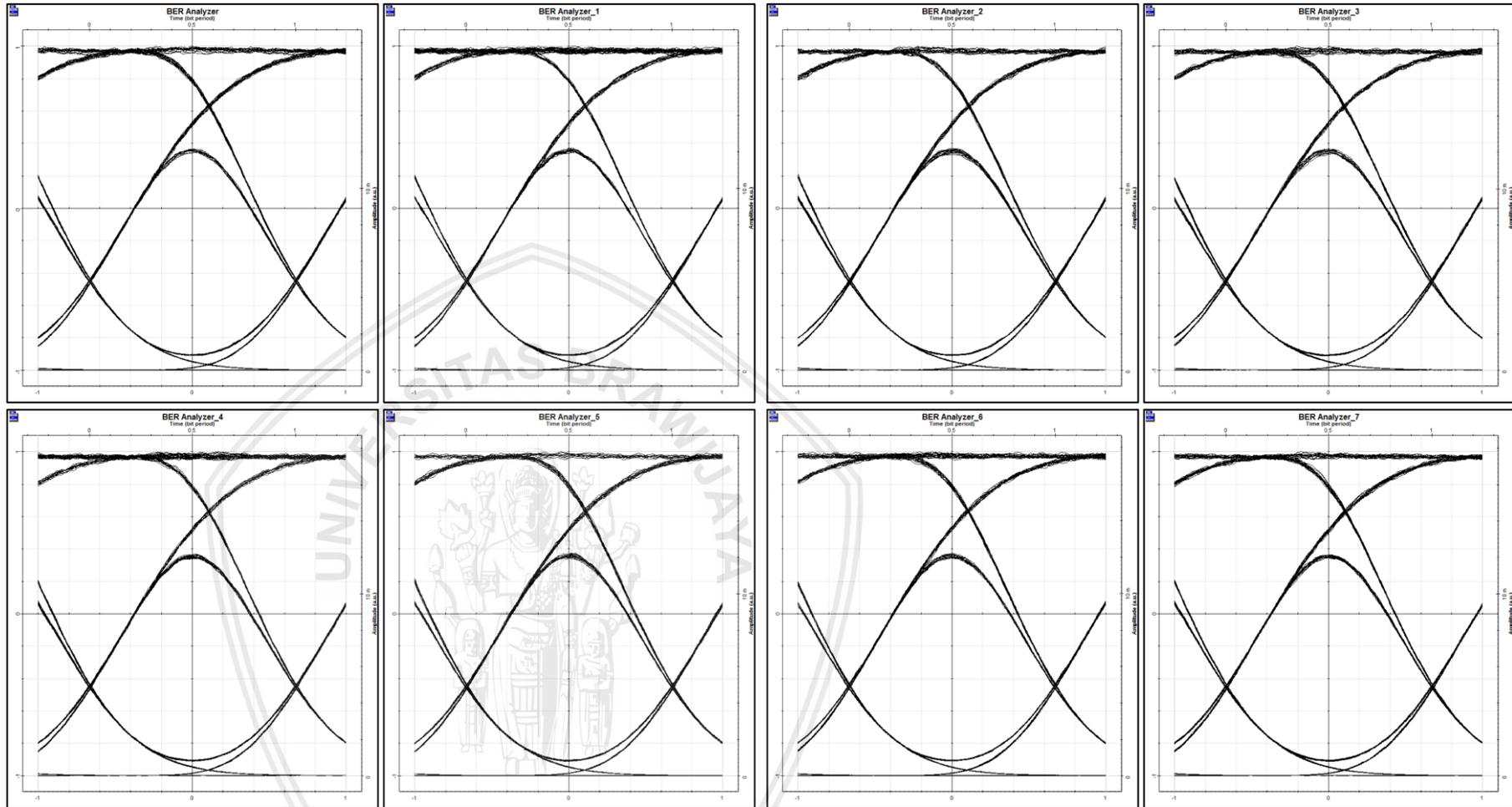
Line Coding	Photodetector	Cuaca	BER	Q-Factor
NRZ	APD	Cerah	7,21772E-10	6,2134
NRZ	APD	Hujan	2,38676E-09	5,9184
RZ	APD	Cerah	9,04242E-46	14,5472
RZ	APD	Hujan	2,70330E-21	9,4291
NRZ	PIN	Cerah	2,24786E-09	6,0157
NRZ	PIN	Hujan	1,40889E-08	5,6812
RZ	PIN	Cerah	3,12162E-43	14,2572
RZ	PIN	Hujan	2,65841E-09	5,8999



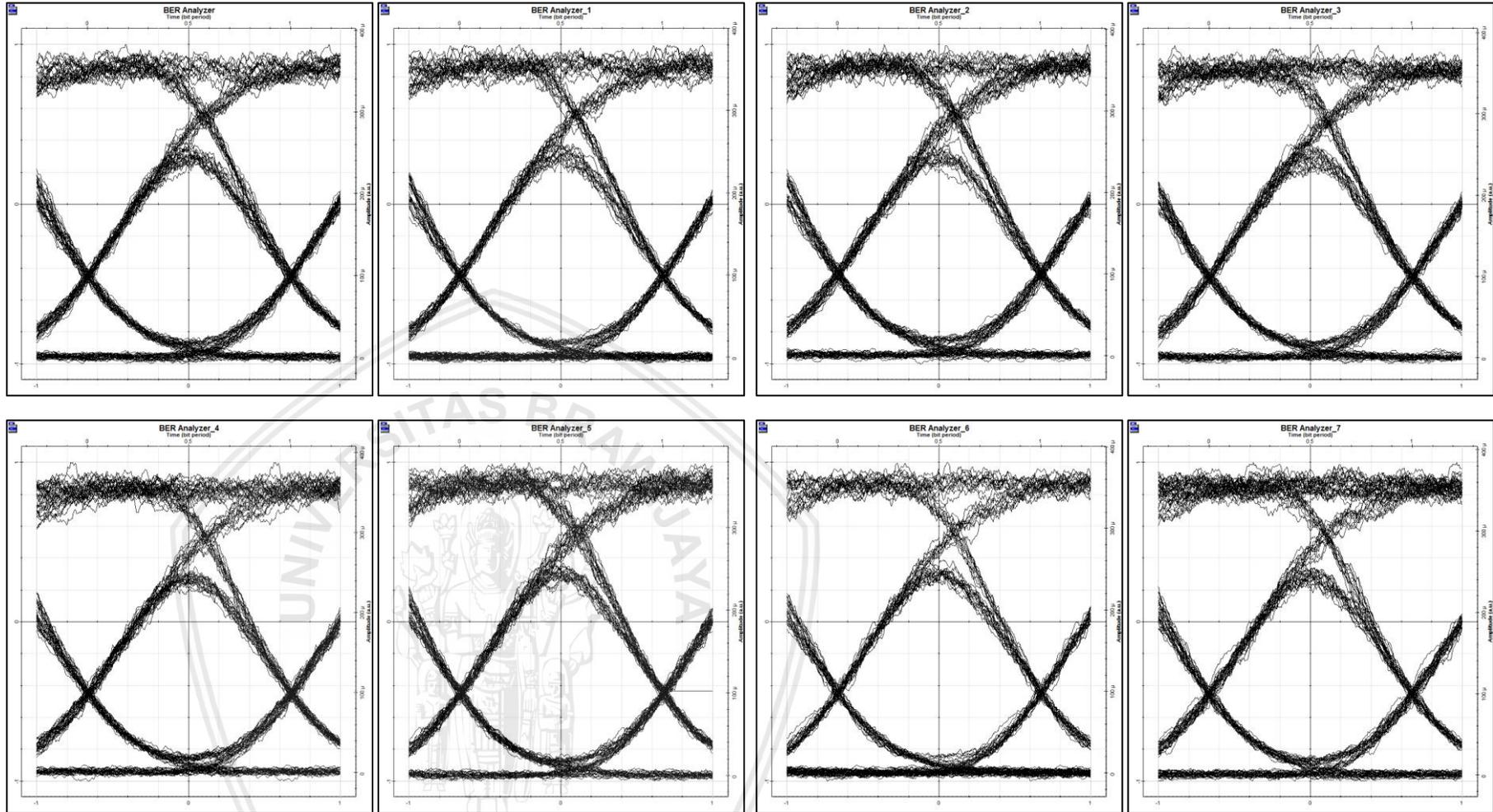
Lampiran 6. Tabel ERFC

x	erfc x										
0.01	9.89E-01	0.77	2.76E-01	1.53	3.05E-02	2.29	1.20E-03	3.05	1.61E-05	3.81	7.13E-08
0.02	9.77E-01	0.78	2.70E-01	1.54	2.94E-02	2.30	1.14E-03	3.06	1.52E-05	3.82	6.59E-08
0.03	9.66E-01	0.79	2.64E-01	1.55	2.84E-02	2.31	1.09E-03	3.07	1.42E-05	3.83	6.09E-08
0.04	9.55E-01	0.80	2.58E-01	1.56	2.74E-02	2.32	1.03E-03	3.08	1.33E-05	3.84	5.63E-08
0.05	9.44E-01	0.81	2.52E-01	1.57	2.64E-02	2.33	9.84E-04	3.09	1.24E-05	3.85	5.20E-08
0.06	9.32E-01	0.82	2.46E-01	1.58	2.55E-02	2.34	9.36E-04	3.10	1.17E-05	3.86	4.80E-08
0.07	9.21E-01	0.83	2.40E-01	1.59	2.45E-02	2.35	8.89E-04	3.11	1.09E-05	3.87	4.44E-08
0.08	9.10E-01	0.84	2.35E-01	1.60	2.37E-02	2.36	8.45E-04	3.12	1.02E-05	3.88	4.09E-08
0.09	8.99E-01	0.85	2.29E-01	1.61	2.28E-02	2.37	8.03E-04	3.13	9.59E-06	3.89	3.78E-08
0.10	8.88E-01	0.86	2.24E-01	1.62	2.20E-02	2.38	7.63E-04	3.14	8.98E-06	3.90	3.49E-08
0.11	8.76E-01	0.87	2.19E-01	1.63	2.12E-02	2.39	7.25E-04	3.15	8.41E-06	3.91	3.22E-08
0.12	8.66E-01	0.88	2.13E-01	1.64	2.04E-02	2.40	6.89E-04	3.16	7.87E-06	3.92	2.97E-08
0.13	8.54E-01	0.89	2.08E-01	1.65	1.96E-02	2.41	6.54E-04	3.17	7.36E-06	3.93	2.74E-08
0.14	8.43E-01	0.90	2.03E-01	1.66	1.89E-02	2.42	6.21E-04	3.18	6.89E-06	3.94	2.52E-08
0.15	8.32E-01	0.91	1.98E-01	1.67	1.82E-02	2.43	5.89E-04	3.19	6.45E-06	3.95	2.33E-08
0.16	8.21E-01	0.92	1.93E-01	1.68	1.75E-02	2.44	5.59E-04	3.20	6.03E-06	3.96	2.15E-08
0.17	8.10E-01	0.93	1.88E-01	1.69	1.68E-02	2.45	5.31E-04	3.21	5.64E-06	3.97	1.98E-08
0.18	7.99E-01	0.94	1.84E-01	1.70	1.62E-02	2.46	5.03E-04	3.22	5.27E-06	3.98	1.82E-08
0.19	7.88E-01	0.95	1.79E-01	1.71	1.56E-02	2.47	4.78E-04	3.23	4.93E-06	3.99	1.68E-08
0.20	7.77E-01	0.96	1.75E-01	1.72	1.50E-02	2.48	4.53E-04	3.24	4.61E-06	4.00	1.55E-08
0.21	7.66E-01	0.97	1.70E-01	1.73	1.44E-02	2.49	4.29E-04	3.25	4.31E-06	4.01	1.42E-08
0.22	7.56E-01	0.98	1.66E-01	1.74	1.39E-02	2.50	4.07E-04	3.26	4.02E-06	4.02	1.31E-08
0.23	7.45E-01	0.99	1.61E-01	1.75	1.33E-02	2.51	3.86E-04	3.27	3.76E-06	4.03	1.21E-08
0.24	7.34E-01	1.00	1.57E-01	1.76	1.28E-02	2.52	3.66E-04	3.28	3.51E-06	4.04	1.11E-08
0.25	7.24E-01	1.01	1.53E-01	1.77	1.23E-02	2.53	3.46E-04	3.29	3.28E-06	4.05	1.02E-08
0.26	7.13E-01	1.02	1.49E-01	1.78	1.18E-02	2.54	3.28E-04	3.30	3.06E-06	4.06	9.40E-09
0.27	7.03E-01	1.03	1.45E-01	1.79	1.14E-02	2.55	3.11E-04	3.31	2.86E-06	4.07	8.65E-09
0.28	6.92E-01	1.04	1.41E-01	1.80	1.09E-02	2.56	2.94E-04	3.32	2.67E-06	4.08	7.95E-09
0.29	6.82E-01	1.05	1.38E-01	1.81	1.05E-02	2.57	2.79E-04	3.33	2.49E-06	4.09	7.31E-09
0.30	6.71E-01	1.06	1.34E-01	1.82	1.01E-02	2.58	2.64E-04	3.34	2.32E-06	4.10	6.72E-09
0.31	6.61E-01	1.07	1.30E-01	1.83	9.65E-03	2.59	2.50E-04	3.35	2.17E-06	4.11	6.18E-09
0.32	6.51E-01	1.08	1.27E-01	1.84	9.26E-03	2.60	2.36E-04	3.36	2.02E-06	4.12	5.68E-09
0.33	6.41E-01	1.09	1.23E-01	1.85	8.89E-03	2.61	2.23E-04	3.37	1.88E-06	4.13	5.21E-09
0.34	6.31E-01	1.10	1.20E-01	1.86	8.56E-03	2.62	2.11E-04	3.38	1.75E-06	4.14	4.79E-09
0.35	6.21E-01	1.11	1.16E-01	1.87	8.18E-03	2.63	2.00E-04	3.39	1.64E-06	4.15	4.40E-09
0.36	6.11E-01	1.12	1.13E-01	1.88	7.84E-03	2.64	1.89E-04	3.40	1.52E-06	4.16	4.04E-09
0.37	6.01E-01	1.13	1.10E-01	1.89	7.52E-03	2.65	1.79E-04	3.41	1.42E-06	4.17	3.71E-09
0.38	5.91E-01	1.14	1.07E-01	1.90	7.21E-03	2.66	1.69E-04	3.42	1.32E-06	4.18	3.40E-09
0.39	5.81E-01	1.15	1.04E-01	1.91	6.91E-03	2.67	1.59E-04	3.43	1.23E-06	4.19	3.12E-09
0.40	5.72E-01	1.16	1.01E-01	1.92	6.62E-03	2.68	1.51E-04	3.44	1.15E-06	4.20	2.87E-09
0.41	5.62E-01	1.17	9.80E-02	1.93	6.34E-03	2.69	1.42E-04	3.45	1.07E-06	4.21	2.63E-09
0.42	5.53E-01	1.18	9.50E-02	1.94	6.08E-03	2.70	1.34E-04	3.46	9.94E-07	4.22	2.41E-09
0.43	5.43E-01	1.19	9.24E-02	1.95	5.82E-03	2.71	1.27E-04	3.47	9.25E-07	4.23	2.21E-09
0.44	5.34E-01	1.20	8.97E-02	1.96	5.57E-03	2.72	1.20E-04	3.48	8.60E-07	4.24	2.03E-09
0.45	5.25E-01	1.21	8.70E-02	1.97	5.34E-03	2.73	1.13E-04	3.49	8.00E-07	4.25	1.86E-09
0.46	5.15E-01	1.22	8.45E-02	1.98	5.11E-03	2.74	1.07E-04	3.50	7.44E-07	4.26	1.70E-09
0.47	5.06E-01	1.23	8.19E-02	1.99	4.89E-03	2.75	1.01E-04	3.51	6.92E-07	4.27	1.56E-09
0.48	4.97E-01	1.24	7.95E-02	2.00	4.88E-03	2.76	9.50E-05	3.52	6.43E-07	4.28	1.43E-09
0.49	4.88E-01	1.25	7.71E-02	2.01	4.48E-03	2.77	8.96E-05	3.53	5.98E-07	4.29	1.31E-09
0.50	4.79E-01	1.26	7.48E-02	2.02	4.28E-03	2.78	8.44E-05	3.54	5.56E-07	4.30	1.20E-09
0.51	4.71E-01	1.27	7.25E-02	2.03	4.09E-03	2.79	7.96E-05	3.55	5.16E-07	4.31	1.10E-09
0.52	4.62E-01	1.28	7.03E-02	2.04	3.91E-03	2.80	7.50E-05	3.56	4.80E-07	4.32	1.00E-09
0.53	4.54E-01	1.29	6.81E-02	2.05	3.74E-03	2.81	7.07E-05	3.57	4.45E-07	4.33	9.19E-10
0.54	4.45E-01	1.30	6.60E-02	2.06	3.58E-03	2.82	6.66E-05	3.58	4.14E-07	4.34	8.41E-10
0.55	4.37E-01	1.31	6.39E-02	2.07	3.42E-03	2.83	6.28E-05	3.59	3.84E-07	4.35	7.69E-10
0.56	4.28E-01	1.32	6.19E-02	2.08	3.27E-03	2.84	5.91E-05	3.60	3.56E-07	4.36	7.03E-10
0.57	4.20E-01	1.33	6.00E-02	2.09	3.12E-03	2.85	5.57E-05	3.61	3.31E-07	4.37	6.43E-10
0.58	4.12E-01	1.34	5.81E-02	2.10	2.98E-03	2.86	5.24E-05	3.62	3.07E-07	4.38	5.88E-10
0.59	4.04E-01	1.35	5.62E-02	2.11	2.85E-03	2.87	4.94E-05	3.63	2.85E-07	4.39	5.37E-10
0.60	3.96E-01	1.36	5.44E-02	2.12	2.72E-03	2.88	4.64E-05	3.64	2.64E-07	4.40	4.91E-10
0.61	3.88E-01	1.37	5.27E-02	2.13	2.59E-03	2.89	4.37E-05	3.65	2.45E-07	4.41	4.49E-10
0.62	3.81E-01	1.38	5.10E-02	2.14	2.47E-03	2.90	4.11E-05	3.66	2.27E-07	4.42	4.10E-10
0.63	3.73E-01	1.39	4.92E-02	2.15	2.36E-03	2.91	3.87E-05	3.67	2.11E-07	4.43	3.74E-10
0.64	3.65E-01	1.40	4.77E-02	2.16	2.25E-03	2.92	3.64E-05	3.68	1.95E-07	4.44	3.43E-10
0.65	3.58E-01	1.41	4.61E-02	2.17	2.15E-03	2.93	3.42E-05	3.69	1.81E-07	4.45	3.12E-10
0.66	3.51E-01	1.42	4.46E-02	2.18	2.05E-03	2.94	3.22E-05	3.70	1.67E-07	4.46	2.85E-10
0.67	3.43E-01	1.43	4.31E-02	2.19	1.95E-03	2.95	3.02E-05	3.71	1.55E-07	4.47	2.60E-10
0.68	3.36E-01	1.44	4.17E-02	2.20	1.86E-03	2.96	2.84E-05	3.72	1.44E-07	4.48	2.37E-10
0.69	3.29E-01	1.45	4.03E-02	2.21	1.78E-03	2.97	2.67E-05	3.73	1.22E-07	4.49	2.17E-10
0.70	3.22E-01	1.46	3.89E-02	2.22	1.69E-03	2.98	2.51E-05	3.74	1.23E-07	4.50	1.98E-10
0.71	3.15E-01	1.47	3.76E-02	2.23	1.61E-03	2.99	2.35E-05	3.75	1.14E-07	4.51	1.79E-10
0.72	3.02E-01	1.48	3.63E-02	2.24	1.54E-03	3.00	2.21E-05	3.76	1.05E-07	4.52	1.63E-10
0.73	3.01E-01	1.49	3.51E-02	2.25	1.46E-03	3.01	2.08E-05	3.77	9.76E-08	4.53	1.49E-10
0.74	2.95E-01	1.50	3.39E-02	2.26	1.39E-03	3.02	1.95E-05	3.78	9.03E-08	4.54	1.36E-10
0.75	2.89E-01	1.51	3.27E-02	2.27	1.33E-03	3.03	1.83E-05	3.79	8.35E-08	4.55	1.24E-10
0.76	2.82E-01	1.52	3.16E-02	2.28	1.26E-03	3.04	1.72E-05	3.80	7.72E-08	4.56	1.13E-10

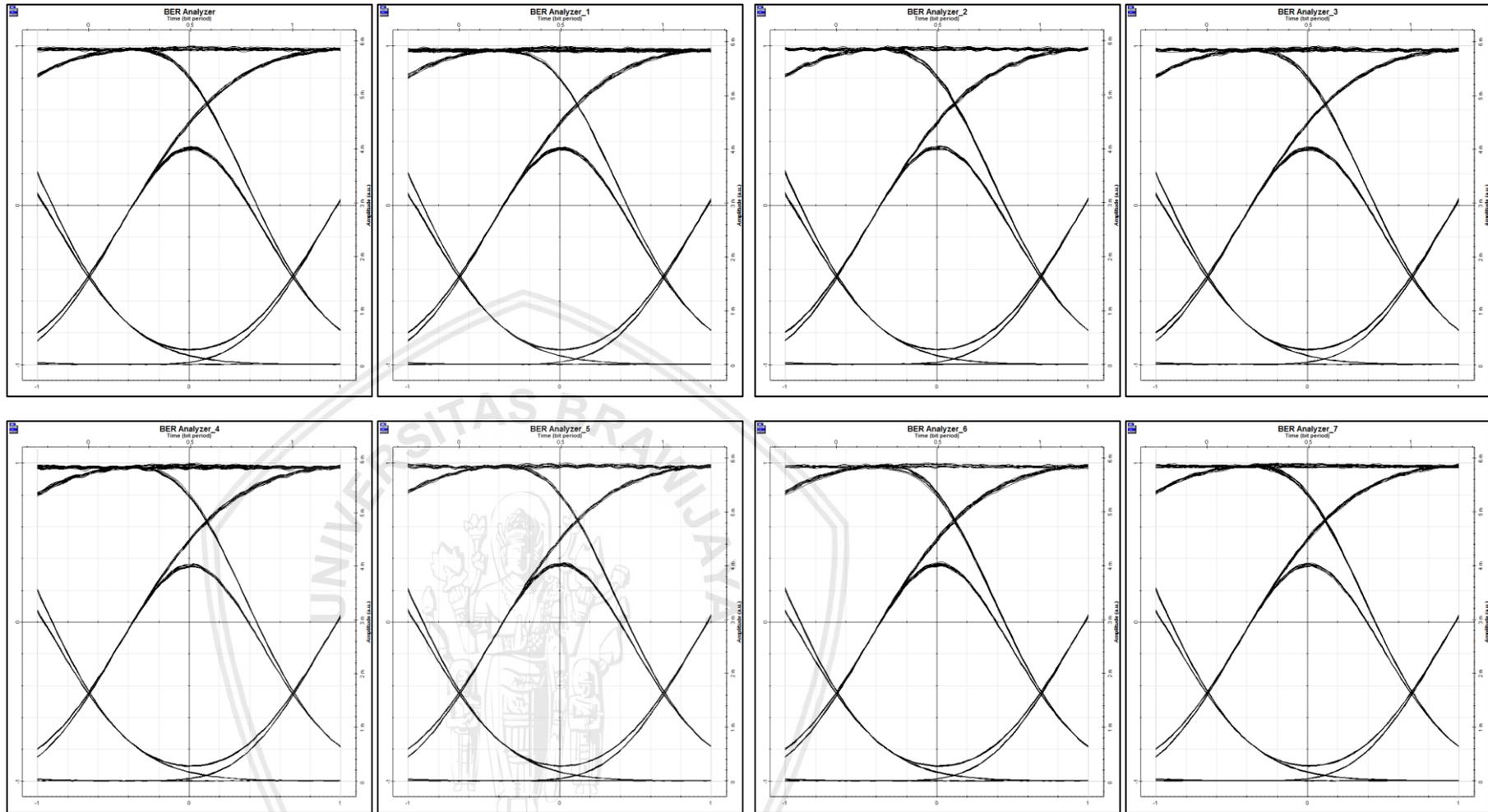
Lampiran 7. Eye Diagram NRZ APD Cerah



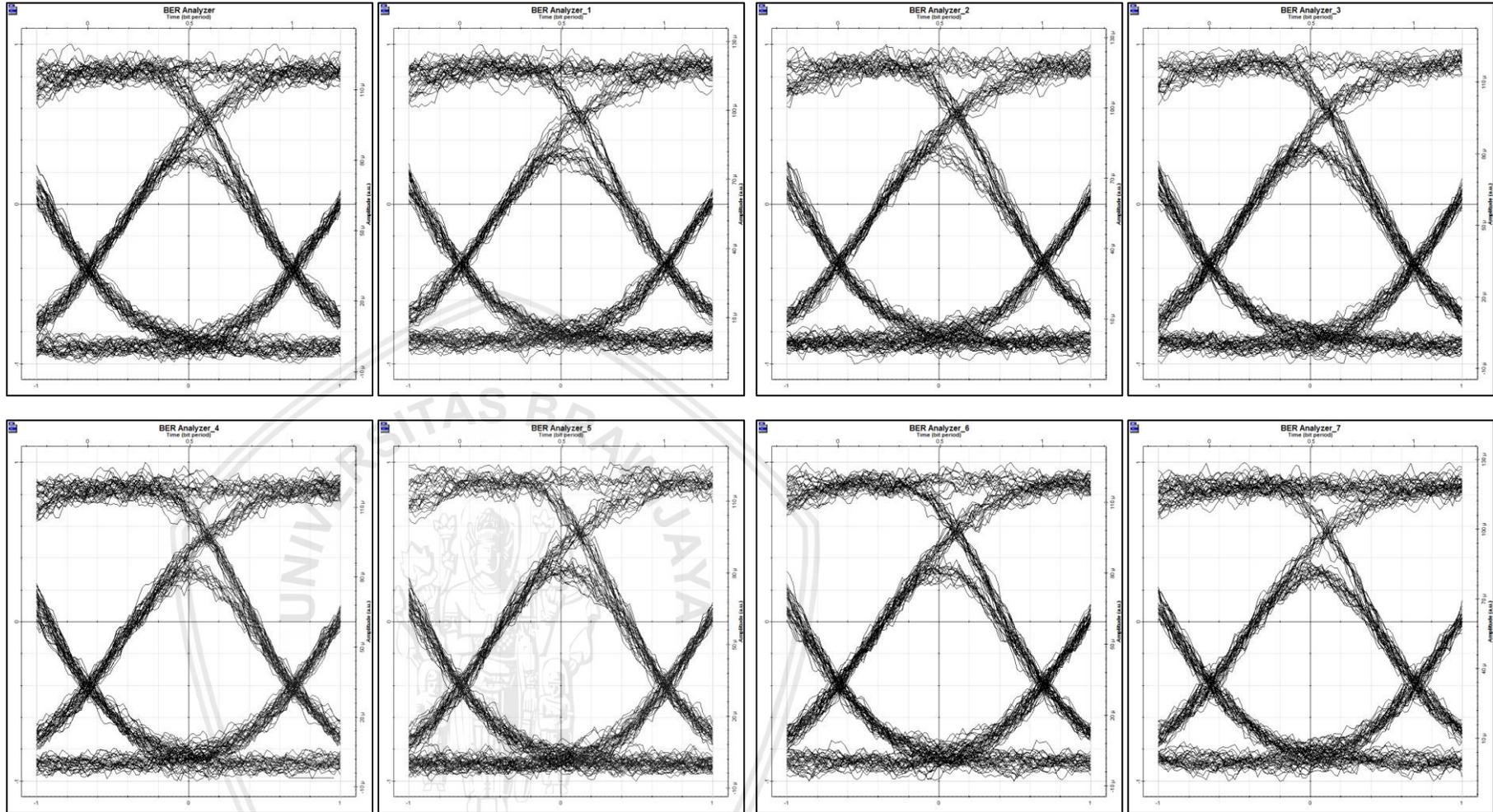
Lampiran 8. Eye Diagram NRZ APD Hujan



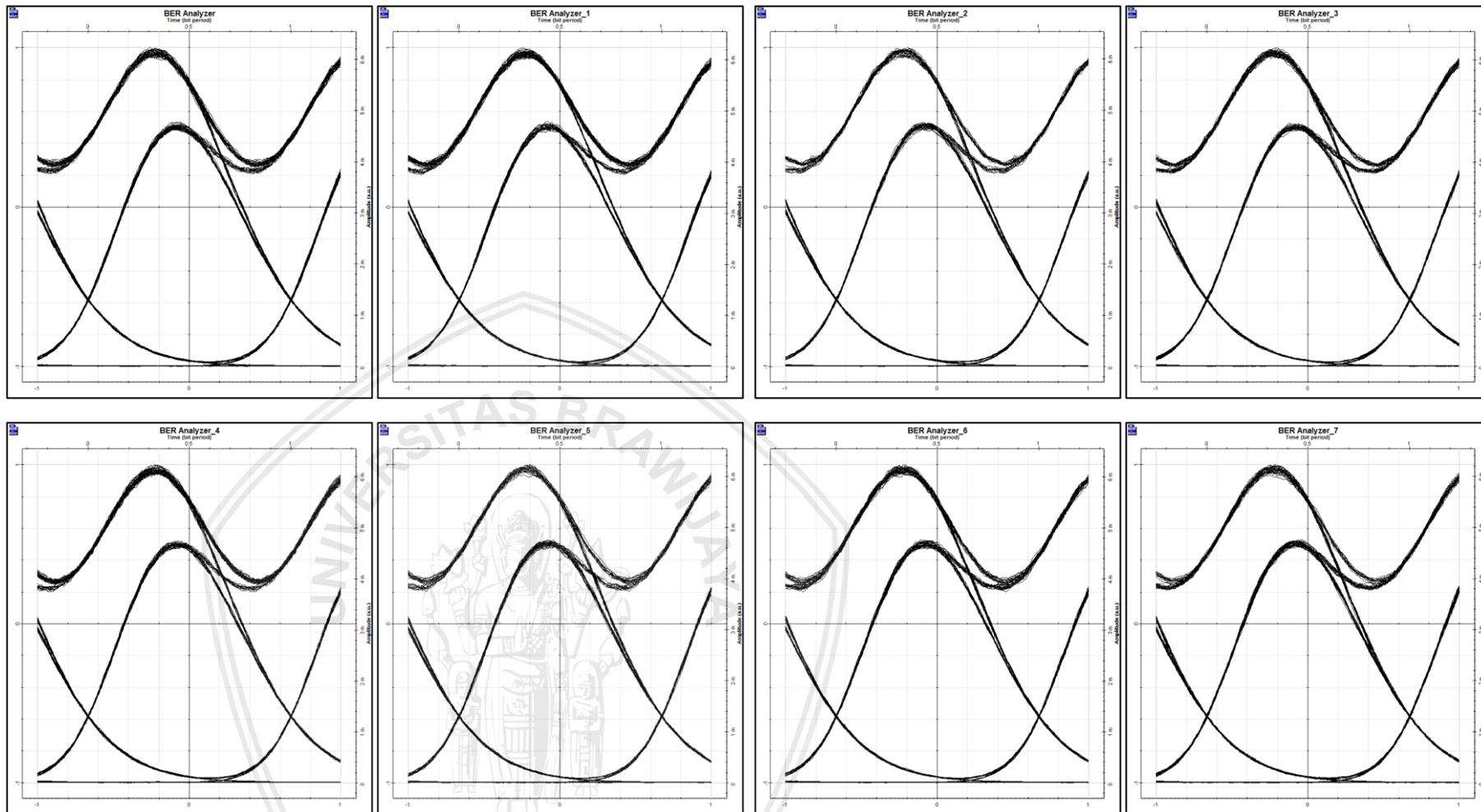
Lampiran 9. Eye Diagram NRZ PIN CeraH



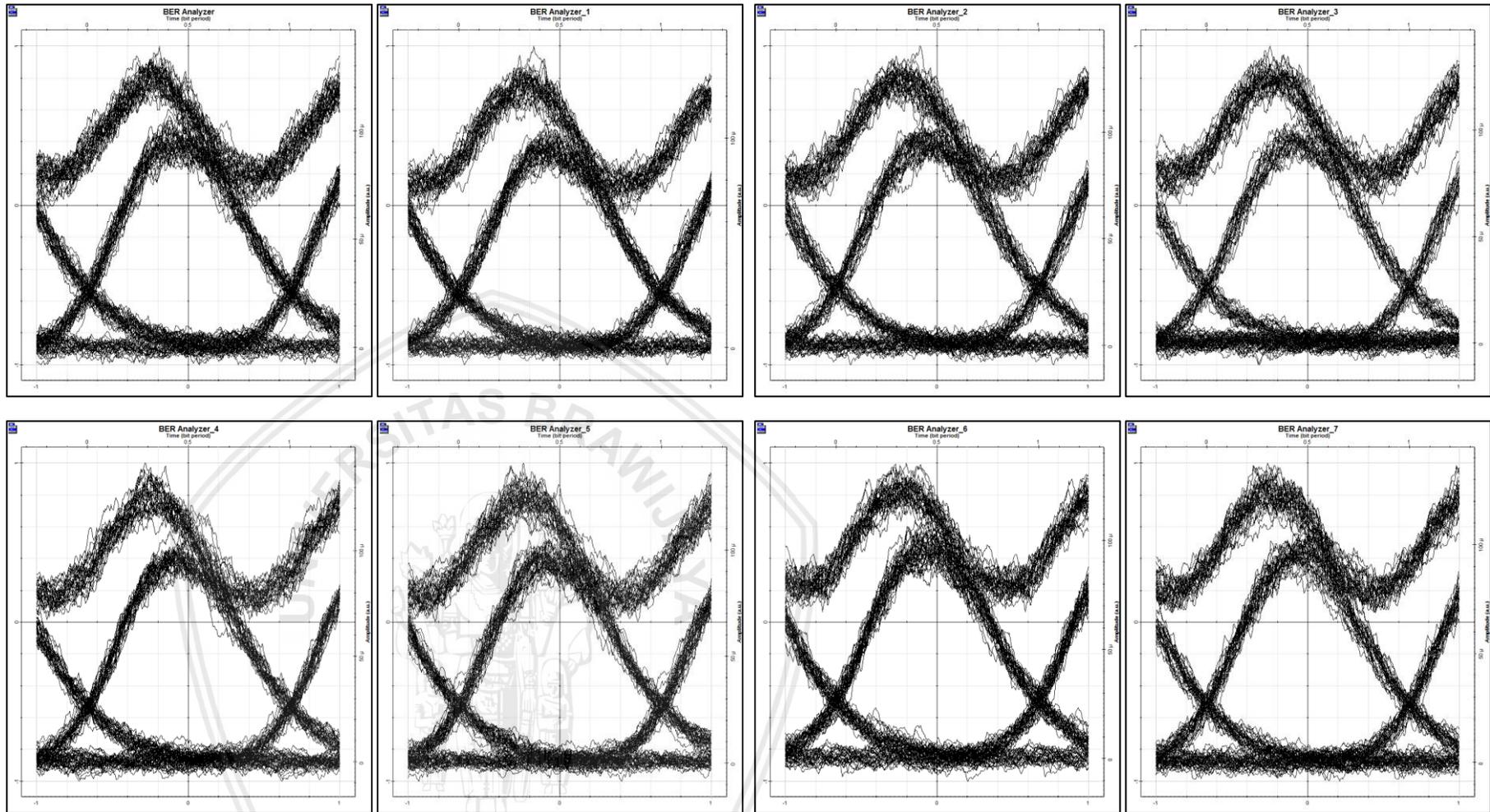
Lampiran 10. Eye Diagram NRZ PIN Hujan



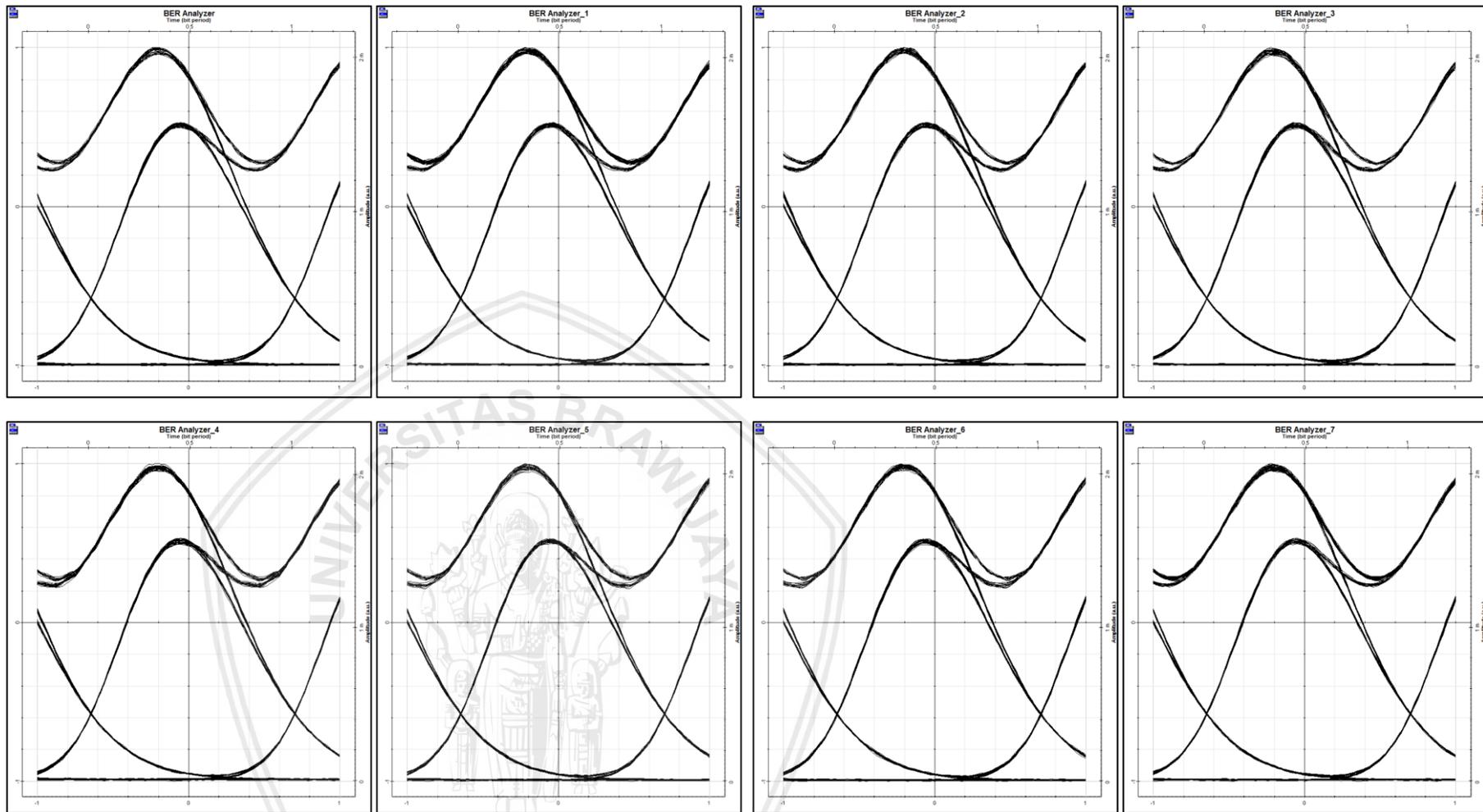
Lampiran 11. Eye Diagram RZ APD Cerah



Lampiran 12. Eye Diagram RZ APD Hujan



Lampiran 13. Eye Diagram RZ PIN Cerah



Lampiran 14. Eye Diagram RZ PIN Hujan

