

BAB IV

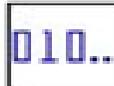
HASIL EKSPERIMEN DAN PEMBAHASAN

Hasil eksperimen dan pembahasan analisis data dari penelitian yang dilakukan akan dijelaskan dalam bab IV ini. Data yang disajikan merupakan hasil pengaruh dari variasi daya input optik, jarak propagasi serta *bit rate* pada panjang gelombang 850 nm dan 1550 nm dengan menggunakan jenis fotodetektor yaitu PIN dan APD. Pengamatan dilakukan berdasarkan pengaruhnya terhadap BER dan *Q-factor*. Penulisan bab IV meliputi Komponen-komponen simulasi, prosedur pengambilan data, hasil eksperimen dan pembahasan.

4.1 Komponen-Komponen Simulasi

Pada sub bab ini akan dibahas tentang komponen-komponen dalam simulasi yang digunakan dalam sistem komunikasi FSO. Dalam simulasi ini menggunakan *software Optisystem* versi 7.

1. PRBS (*Pseudo-Random Binary Sequence*) Generator



Gambar 4.1 PRBS Generator

(Sumber : *Optiwave*)

PRBS *generator* adalah sebuah komponen yang merepresentasikan informasi atau data yang ingin ditransmisikan. Output PRBS *generator* adalah aliran bit dari pulsa *binary*; urutan “1” (ON) atau “0” (OFF) atau dikenal dengan pola yang tereproduksi.

2. NRZ Pulse Generator

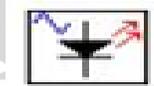


Gambar 4.2 Pembangkit pulsa listrik NRZ

(Sumber : *Optiwave*)

Pembangkit Pulsa (*Pulse Generator*) yang digunakan dalam simulasi ini adalah dengan menggunakan NRZ (*Non Return to Zero*). Pembangkit ini merupakan jenis pembangkit pulsa listrik. Sub sistem ini mengencodekan data dari *generator* PRBS dengan menggunakan teknik *encoding* NRZ. Pada format NRZ, pulsa optik tetap di dalam bit slot dan amplitudonya tidak kembali ke nol diantara dua atau lebih bit 1 yang berurutan. Pada komunikasi optik, format NRZ memiliki keuntungan sebagai pengendali *bandwidth*.

3. CW Laser



Gambar 4.3 CW laser

(Sumber : *Optiwave*)

Komponen ini membangkitkan sinyal optic CW (*Continous Wave*). Pada simulasi ini spesifikasi CW laser didapat dari *datasheet*.

Tabel 4.1 Spesifikasi CW laser type LPM03-27-50R

Frekuensi (f)	352.9 Thz
Daya output (P)	300-1000 mW
<i>Linewidth</i>	10 Mhz

Sumber : *Datasheet* CW laser type LPM03-27-50R

Tabel 4.2 Spesifikasi CW laser type DS-7038

Frekuensi (f)	193.1 Thz
Daya output (P)	10-18 mW
<i>Linewidth</i>	1 MHz

Sumber : *Datasheet* CW laser type DS-7038

4. Modulator Mach Zehnder



Gambar 4.4 Mach Zehnder Modulator

(Sumber : *Optiwave*)

Dalam simulasi ini Modulator Mach Zehnder digunakan sebagai modulator optik yang berfungsi untuk memvariasikan intensitas sumber cahaya dari laser berdasarkan keluaran dari generator pulsa NRZ. Komponen terdiri dari dua sambungan Y yang memberikan pembagian yang sama dari suatu daya input.

5. Kanal FSO (*Free Space Optic*)



Gambar 4.5 Kanal FSO

(Sumber : *Optiwave*)

Ruang bebas diantara pemancar dan penerima disebut kanal FSO yang mana merupakan medium propagasi untuk cahaya yang ditransmisikan. Pada simulasi dengan menggunakan *software OptySistem*. Dimana diameter pemancar pada sistem adalah 5 cm sedangkan, diameter penerimaan *transmitter* pada sistem adalah 20 cm.

6. Fotodetektor



(a)



(b)

Gambar 4.6. a) Simbol PIN b) Simbol APD

(Sumber : *Optiwave*)

Dalam simulasi ini fotodetektor berfungsi sebagai penerima daya yang telah ditransmisikan kemudian diubah kembali menjadi sinyal listrik. Pada bagian *receiver* ini terdapat noise jenis *thermal noise* dan *shot noise*. *Thermal noise* adalah noise yang dibangkitkan oleh agitasi thermal dari elektron di konduktor. *Shot noise* adalah noise yang disebabkan oleh fluktuasi acak pada gerakan muatan pembawa di konduktor (Ghumman, 2002).

Tabel 4.3 Spesifikasi PIN Si

Panjang gelombang (λ)	850 nm
Responsivitas (R)	0.6 A/W
Quantum efisiensi (η)	87.5 %
Dark current	10 nA
Thermal noise	1.8×10^{-25} W/Hz

Tabel 4.4 Spesifikasi PIN InGaAs

Panjang gelombang (λ)	1550 nm
Responsivitas (R)	0.9 A/W
Quantum efisiensi (η)	72 %
Dark current	10 nA
Thermal noise	1.8×10^{-25} W/Hz

Sumber : Agrawal, 2002

Tabel 4.5 Spesifikasi APD Si

Panjang gelombang (λ)	850 nm
Responsivitas (R)	60 A/W
Gain	100
Rasio Ionisasi	0.06
Dark current	10 nA
Thermal noise	1.0×10^{-22} W/Hz

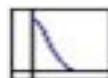
Sumber : Agrawal, 2002

Tabel 4.6 Spesifikasi APD InGaAs

Panjang gelombang (λ)	1550 nm
Responsivitas (R)	9 A/W
Gain	10
Rasio Ionisasi	0.45
Dark current	10 nA
Thermal noise	1.0×10^{-22} W/Hz

Sumber : Agrawal, 2002

7. Bessel Low Pass Bessel Filter



Gambar 4.7. Simbol Bessel Low Pass Filter

(Sumber : *Optiwave*)

Low Pass Filter digunakan untuk membuang frekuensi sinyal frekuensi tinggi yang tidak diinginkan. Filter ini hanya akan melewatkan sinyal dengan frekuensi dibawah frekuensi *cut off*. Sehingga sinyal yang berada diatas frekuensi *cut off* ini akan diredam atau bahkan tidak dilewatkan sama sekali. Bessel LPF digunakan dengan frekuensi *cut-off* $0.75 \times \text{bit rate}$ sinyal.

8. BER Analyzer



Gambar 4.8 Simbol BER Analyzer

(Sumber : Optiwave)

Visualizer ini mengijinkan pengguna untuk menghitung dan menampilkan BER (*Bit Error Rate*) dari sinyal listrik secara otomatis. Komponen ini dapat memperkirakan nilai BER dengan memperoleh metric diagram mata, seperti *Q-factor*, *eye opening*, *eye closure*, *extinction ratio*, tinggi mata, *jitter*, dll.

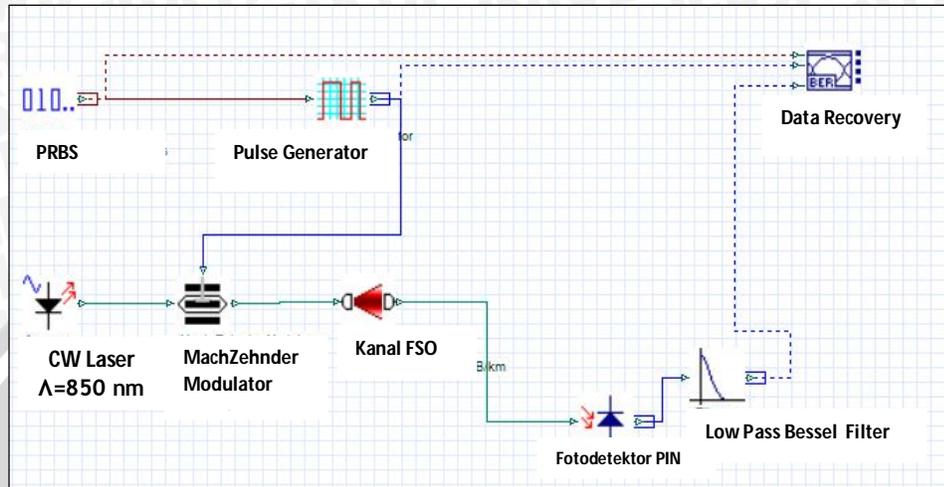
4.2 Langkah Pengambilan Data

Langkah pertama yang dilakukan untuk melakukan pengambilan data ini adalah dengan menyusun blog diagram. Simulasi pertama yaitu membuat blog diagram sistem komunikasi FSO pada panjang gelombang 850 nm dengan menggunakan jenis fotodetektor PIN. Kemudian diuji dengan memvariasikan besar daya input, jarak propagasi pada setiap *bit rate* (2.5 Gbps, 10 Gbps, dan 40 Gbps). Selanjutnya diuji pada jenis fotodetektor APD dengan variasi parameter yang sama. Kemudian membuat blok diagram pada panjang gelombang 1550 nm dengan langkah-langkah yang sama dengan simulasi pada panjang gelombang 850 nm.

Berdasarkan blok diagram pada gambar 4.9 konfigurasi simulasi, digunakan frekuensi 352.9 THz untuk panjang gelombang 850 nm. Sumber cahaya dihasilkan oleh CW laser yang menghasilkan gelombang kontinu. Besar daya masing-masing panjang gelombang berbeda. Untuk daya CW laser panjang gelombang 850 nm adalah 25 dBm. *Pseudo Random Bit Sequence* (PRBS) menghasilkan aliran bit dari pulsa *binary*. Pulsa *binary* tersebut akan di kodekan oleh *line coding* jenis NRZ. Keluaran dari NRZ berupa sinyal elektrik akan bersama-sama dengan keluaran CW laser dimodulasi secara eksternal oleh modulator optik jenis *Machzehnder* (MZM). Hasil keluaran MZM adalah sinyal optik termodulas kemudian ditransmisikan melalui

medium udara dari *transmitter* ke *receiver*. Sesampainya di *receiver* sinyal optik akan diterima oleh fotodetektor.

✚ Simulasi panjang gelombang 850 nm



Gambar 4.9. Rangkaian simulasi SKFSO panjang gelombang 850 nm dengan PIN

(Sumber: *Optiwave*)

Fotodetektor yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis PIN dan APD yang akan mengonversi sinyal elektrik menjadi sinyal optik kembali. Selanjutnya akan difilter dengan *Low Pass Bessel Filter* yang akan menghilangkan sinyal *noise* frekuensi tinggi. *BER analyzer* akan menampilkan hasil performansi sistem melalui nilai BER dan *Q-factor*.

Langkah pertama yaitu menyusun blok diagram pada lembar kerja *OptiSystem*. Kemudian mengubah-ubah nilai daya input. Dimana digunakan range antara 10-18 mW (10-12.5 dBm). Saat nilai daya input diubah-ubah, nilai parameter yang lain dibuat tetap. Jarak ditetapkan 1 km, responsivitas PIN 0.6. Data pertama diambil pada *bit rate* 2.5 Gbps, dengan atenuasi hujan lebat yaitu 38.07 dB/km.

- Kecepatan hujan (Va)

$$Va = \frac{2a^2 \rho g}{9\eta} = \frac{2 \times (0.1)^2 \times 1 \times 980}{9 \times 1.8 \times 10^{-4}} = 12098,76 \text{ cm}^2/\text{s}^3$$

- Distribusi hujan (Na)

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

- Koefisien *Scattering* (β)

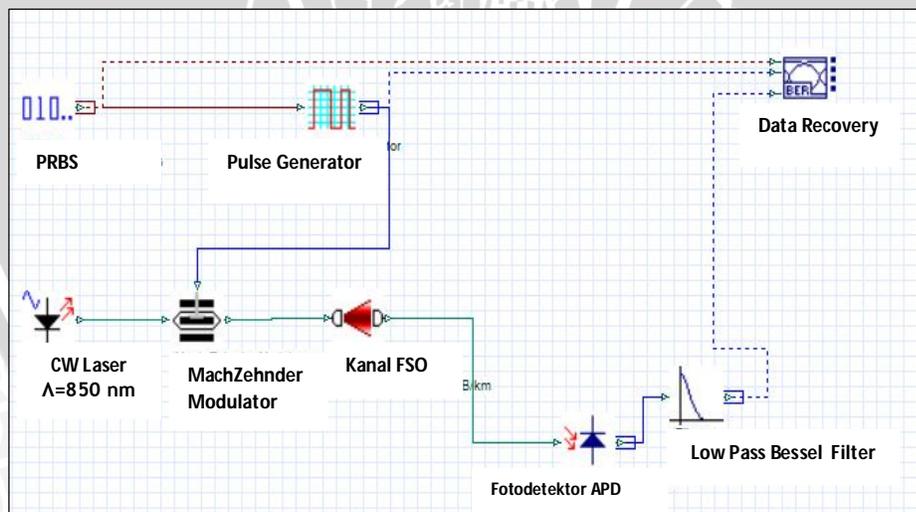
$$\begin{aligned} \beta &= \pi a^2 \times Na \times Q_{sct} \times \left(\frac{a}{\lambda}\right) \\ &= 3.14 \times 0.1^2 \times 1.098 \times 10^{-5} \times 2 \times \left(\frac{0.1}{850 \times 10^{-7}}\right) \\ &= 8.112 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1} = 81.2 \text{ km}^{-1} \end{aligned}$$

- Redaman hujan

$$\tau = e^{-\beta L} = 10 \log(e^{81.2 \times 1}) = 6412 = 10 \log 6412 = 38.07 \text{ dB}$$

Karena redaman dihitung pada jarak 1 km, maka nilai $\tau = 38.07 \text{ dB/km}$

Kemudian pada *bit rate* yang sama (2.5 Gbps) parameter yang diubah jarak propagasi, dengan daya input ditetapkan 25 dBm. Setelah itu mengganti dengan *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps. Perhitungan didasarkan pada BER dan *Q-factor* yang ditampilkan pada BER analyzer



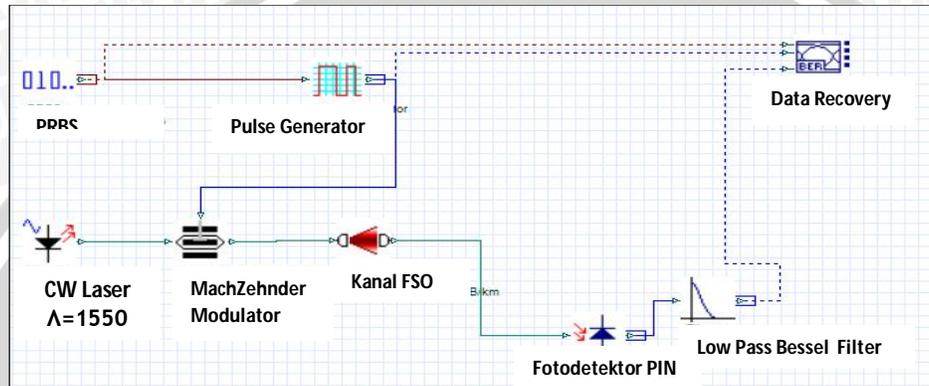
Gambar 4.10 Rangkaian simulasi SKFSO panjang gelombang 850 nm dengan APD

(Sumber: *Optiwave*)

Selanjutnya dengan mengganti jenis fotodetektor dengan APD. Pertama, yang diubah adalah daya input. Dengan membuat tetap parameter yang lain yaitu jarak pada

1 km, responsivetas APD 60 dan atenuasi 38.07 dB/km. Data pertama diambil pada *bit rate* 2.5 Gbps kemudian *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps. Selanjutnya dengan *bit rate* 2.5 Gbps parameter yang diubah adalah jarak propagasi, dengan parameter yang lain dibuat tetap diantaranya adalah daya input dibuat 25 dBm. Selanjutnya simulasi dengan *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps. Perhitungan didasarkan pada BER dan *Q-factor* yang ditampilkan pada BER analyzer.

✚ Simulasi panjang gelombang 1550 nm



Gambar 4.11. Rangkaian simulasi SKFSO pada panjang gelombang 1550 nm dengan PIN fotodetektor

Sumber : (Optiwave)

Berdasarkan blok diagram konfigurasi simulasi, digunakan frekuensi 193.1 THz untuk panjang gelombang 1550 nm. Sumber cahaya dihasilkan oleh CW laser yang menghasilkan gelombang kontinu. Besar daya masing-masing panjang gelombang berbeda. Untuk daya CW laser panjang gelombang 1550 nm adalah 25 dBm. *Pseudo Random Bit Sequence* (PRBS) menghasilkan aliran bit dari pulsa *binary*. Pulsa *binary* tersebut akan di kodekan oleh *line code* jenis NRZ. Keluaran dari NRZ berupa sinyal elektrik akan bersama-sama dengan keluaran CW laser dimodulasi secara eksternal oleh modulator optik jenis *Machzehnder* (MZM). Hasil keluaran MZM adalah sinyal optik termodulasi kemudian ditransmisikan melalui medium udara dari *transmitter* ke *receiver*. Sesampainya di *receiver* sinyal optik akan diterima oleh fotodetektor. Fotodetektor yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis PIN dan APD yang akan mengonversi sinyal elektrik menjadi sinyal optik kembali. Selanjutnya akan difilter dengan *Low Pass Bessel Filter* yang akan menghilangkan sinyal *noise*

frekuensi tinggi. BER *analyzer* akan menampilkan hasil performansi sistem melalui nilai BER dan *Q-factor*

Langkah pertama yaitu menyusun blog diagram pada lembar kerja *OptiSystem*. Kemudian mengubah-ubah nilai daya input. Dimana digunakan range antara 10-12.5 dBm. Saat nilai daya input diubah-ubah, nilai parameter yang lain dibuat tetap. Jarak ditetapkan 1 km, responsivitas PIN 0.9. Data pertama diambil pada *bit rate* 2.5 Gbps, dengan atenuasi hujan lebat yaitu 19.2795 dB/km dengan intensitas hujan 20 mm/jam.

- Kecepatan hujan (Va)

$$Va = \frac{2a^2\rho g}{9\eta} = \frac{2 \times (0.1)^2 \times 1 \times 980}{9 \times 1.8 \times 10^{-4}} = 12098,76 \text{ cm}^2/s^3$$

- Distribusi hujan (Na)

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

- Koefisien *Scattering* (β)

$$\begin{aligned} \beta &= \pi a^2 \times Na \times Q_{sct} \times \left(\frac{a}{\lambda}\right) \\ &= 3.14 \times 0.1^2 \times 1.098 \times 10^{-5} \times 2 \times \left(\frac{0.1}{1550 \times 10^{-7}}\right) \\ &= 4.45 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1} = 44.5 \text{ km}^{-1} \end{aligned}$$

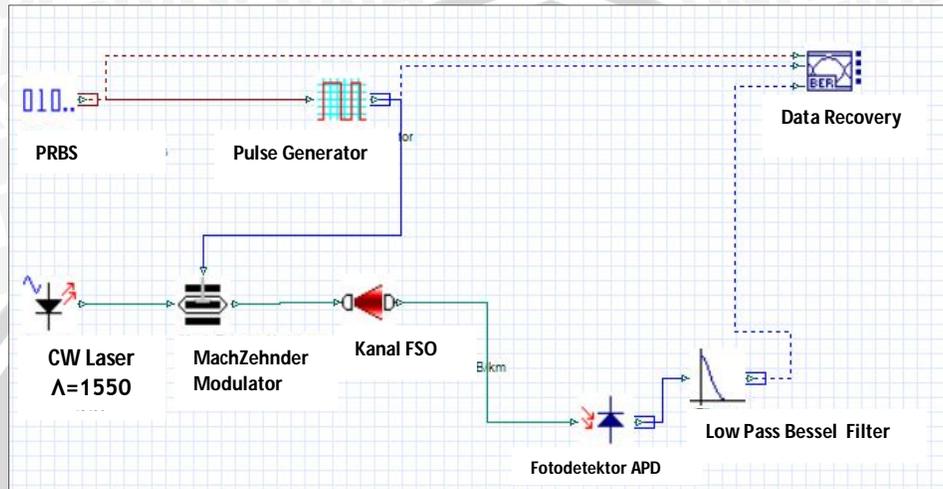
- Redaman hujan

$$\tau = e^{-\beta L} = 10 \log(e^{44.5 \times 1}) = 83.17 = 10 \log 83.17 = 19.2795 \text{ dB}$$

Karena redaman dihitung pada jarak 1 km, maka nilai $\tau = 19.2795 \text{ dB/km}$.

Kemudian pada *bit rate* 2.5 Gbps parameter yang diubah jarak propagasi, dengan daya input ditetapkan 25 dBm. Setelah itu ganti pada *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps. Perhitungan didasarkan pada BER dan *Q-factor* yang ditampilkan pada BER *analyzer*. Simulasi selanjutnya dengan mengganti jenis fotodetektor dengan APD. Pertama, yang diubah adalah daya input. Seperti ditunjukkan oleh blog diagram pada gambar 4.12. Dengan membuat tetap parameter yang lain yaitu jarak pada 1 km, responsivitas APD 9 dan atenuasi 19.2795 dB/km. .Data pertama diambil pada *bit rate*

2.5 Gbps. Selanjutnya dengan *bit rate* yang sama parameter yang diubah adalah jarak propagasi, dengan parameter yang lain dibuat tetap antara lain daya input 10 dBm. Selanjutnya simulasi dengan *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps. Perhitungan didasarkan pada BER dan *Q-factor* yang ditampilkan pada BER analyzer.



Gambar 4.12 Rangkaian simulasi SKFSO panjang gelombang 1550 nm dengan APD fotodetektor

(Sumber : Optiwave)

4.3 Data Hasil Simulasi dan Analisa

Performansi parameter BER dan *Q-factor* diketahui dari hasil simulasi yang ditampilkan secara visual melalui BER analyzer. BER merupakan perbandingan nilai bit yang salah dari sejumlah bit yang ditransmisikan. BER semakin rendah dan *Q-factor* yang semakin besar, maka performansi sistem akan semakin baik. Nilai BER yang diperbolehkan untuk komunikasi data adalah 10^{-9} .

✚ Simulasi dengan panjang gelombang 850 nm dengan fotodetektor PIN

a) Variasi daya input

Tabel 4.7 Variasi Daya Input pada *bit rate* 2.5 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			<i>Q-factor</i>	BER
25	1	2.5	4.976	3.253×10^{-7}
25.5	1	2.5	5.553	1.405×10^{-8}
26	1	2.5	6.194	2.932×10^{-10}

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
26.5	1	2.5	6.905	2.503×10^{-12}
27	1	2.5	7.694	7.149×10^{-15}

Tabel 4.8 Variasi Daya Input pada *bit rate* 10 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
25	1	10	2.499	0.0062
25.5	1	10	2.767	0.0027
26	1	10	3.106	0.0009
26.5	1	10	3.461	0.00027
27	1	10	3.853	5.813×10^{-5}

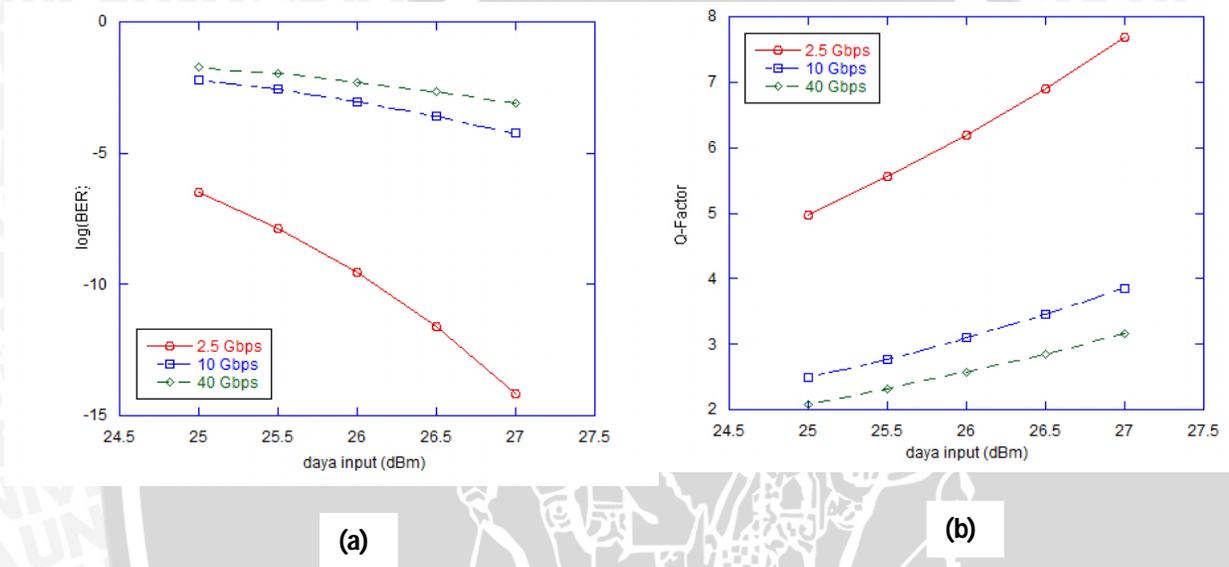
Tabel 4.9 Variasi Daya Input pada *bit rate* 40 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
25	1	40	2.0823	0.0186
25.5	1	40	2.3141	0.0103
26	1	40	2.57003	0.005
26.5	1	40	2.85219	0.0022
27	1	40	3.16277	0.00078

Grafik 4.13 (a) dan (b) menunjukkan variasi daya input pada *bit rate* yang berbeda dengan menggunakan PIN photodiode pada panjang gelombang 850 nm. Pada setiap *bit rate* ditunjukkan semakin besar daya input maka nilai BER akan semakin kecil. *Bit rate* 2.5 Gbps dapat menempuh jarak 1 km dengan nilai BER minimum 7.149×10^{-15} dan *Q-factor* 7.694. Bila dibandingkan dengan *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps memerlukan daya input yang lebih rendah untuk bisa mendapatkan nilai BER minimum yang sama. *Bit rate* 40 Gbps bahkan tidak sesuai bila digunakan pada sistem dengan jarak 1 km pada saat kondisi hujan lebat ditunjukkan dengan nilai BER yang masih $> 10^{-9}$ dan *Q-factor* < 6 .

Grafik 4.13 (a) dan (b) menunjukkan nilai daya input yang semakin besar memberikan nilai BER yang semakin kecil dan *Q-factor* yang semakin besar karena daya yang semakin besar dapat melewati partikel hujan. Sehingga kemungkinan terjadinya absorpsi dan *scattering* juga dapat diminimalisir.

Oleh karena itu, untuk mendapatkan nilai BER dan Q -factor yang semakin optimum dapat menggunakan *bit rate* 2.5 Gbps. Untuk mendapatkan nilai BER dan Q -factor yang sama bisa dicapai dengan menambah daya input pada *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps agar dapat melewati partikel hujan dengan data yang dilewatkan lebih banyak. Karena semakin besar nilai *bit rate* akan menyebabkan sensitivitas detektor berkurang.



Gambar 4.13 Variasi daya Input pada masing-masing *bit rate* pada 850 nm dengan PIN dilihat dari a) log(BER) dan b) Q -factor

Atenuasi yang disebabkan oleh hujan lebat salah satunya adalah absorpsi, merupakan penyerapan foton oleh molekul termasuk air, CO₂, dan molekul ozon. Absorpsi pada FSO akan menyebabkan daya pada laser berkurang secara bertahap sehingga, mempengaruhi secara langsung kehandalan sistem FSO.

Hamburan (*scattering*) merupakan proses terjadinya hamburan gelombang cahaya oleh partikel-partikel yang ada di atmosfer secara acak. Pada *infra red*, panjang gelombang jauh lebih kecil daripada diameter hujan. Hamburan yang terjadi akibat hujan adalah *Geometric scattering* karena $r \gg \lambda$ (ITU-R P.1814).

b) Variasi jarak propagasi

Tabel 4.10 Variasi jarak propagasi pada *bit rate* 2.5 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
25	0.7	2.5	57.9844	0
25	0.75	2.5	37.6129	6.428×10^{-300}
25	0.8	2.5	23.8237	9.368×10^{-126}
25	0.85	2.5	14.7333	1.959×10^{-49}
25	0.90	2.5	8.93926	1.956×10^{-19}
25	0.95	2.5	5.35889	4.185×10^{-8}

Tabel 4.11 Variasi jarak propagasi pada *bit rate* 10 Gbps

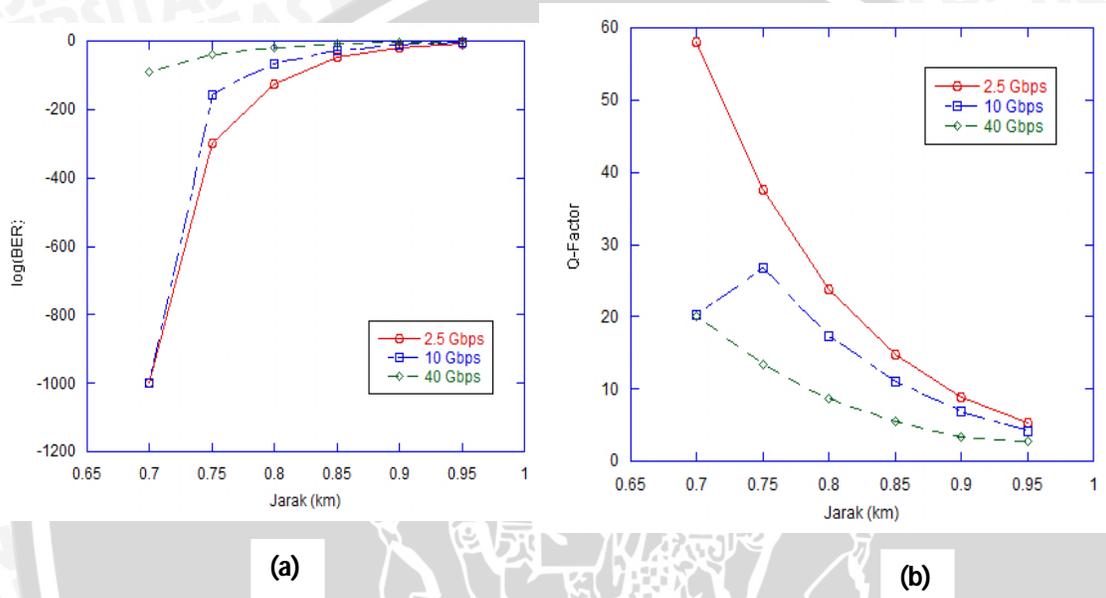
Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
25	0.7	10	20.194	0
25	0.75	10	26.721	1.274×10^{-157}
25	0.8	10	17.3459	1.031×10^{-67}
25	0.85	10	10.9825	2.291×10^{-28}
25	0.90	10	6.80159	5.512×10^{-12}
25	0.95	10	4.14252	1.715×10^{-5}

Tabel 4.12 Variasi jarak propagasi pada *bit rate* 40 Gbps

Daya Input	jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
25	0.7	40	20.0805	4.967×10^{-90}
25	0.75	40	13.341	6.324×10^{-41}
25	0.80	40	8.66025	2.9046×10^{-18}
25	0.85	40	5.48876	1.999×10^{-8}
25	0.9	40	3.40581	0.000328
25	0.95	40	2.786	0.0186

Pada grafik pada gambar 4.14 (a) dan (b) menunjukkan variasi jarak propagasi pada *bit rate* yang berbeda dengan menggunakan PIN fotodiode pada panjang gelombang 850 nm. Pada masing-masing *bit rate* menunjukkan semakin jauh jarak propagasi maka nilai BER semakin kecil dan nilai *Q-factor* yang semakin kecil pula. Karena jarak yang semakin jauh akan menimbulkan atenuasi yang semakin besar. Atenuasi yang terjadi diantara disebabkan oleh terjadinya absorpsi dan *scattering*.

Absorpsi dan *scattering* dapat menyebabkan terjadinya distorsi pada sinyal yang diterima. Pada absorpsi akan terjadi penyerapan sehingga daya yang diterima oleh *receiver* akan berkurang. Sedangkan pada hamburan (*scattering*) daya cenderung di arahkan pada tujuan yang lain sehingga meleset dari arah *beam receiver*. Tetapi dalam hal ini tidak terjadi pengurangan daya, hanya saja arahnya yang menyebar sehingga daya *beam* yang mengandung sinyal informasi diterima tidak lengkap.



Gambar 4.14 Variasi jarak propagasi pada masing-masing *bit rate* pada 850 nm dengan PIN dilihat dari a) log(BER) dan b) *Q-factor*

Atenuasi yang disebabkan oleh hujan lebat salah satunya adalah absorpsi, merupakan penyerapan foton oleh molekul termasuk air, CO₂, dan molekul ozon. Absorpsi pada FSO akan menyebabkan daya pada laser berkurang secara bertahap sehingga, mempengaruhi secara langsung kehandalan sistem FSO.

Hamburan (*scattering*) merupakan proses terjadinya hamburan gelombang cahaya oleh partikel-partikel yang ada di atmosfer secara acak. Pada *infra red*, panjang gelombang jauh lebih kecil daripada diameter hujan. Hamburan yang terjadi akibat hujan adalah *Geometric scattering* karena $r \gg \lambda$ (ITU-R P.1814).

Bit rate 2.5 Gbps memberikan performansi yang lebih baik. Untuk *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps memerlukan jarak yang lebih pendek untuk mendapatkan nilai BER yang sama dengan 2.5 Gbps. Sehingga untuk jarak yang berbeda untuk mendapat nilai BER yang sama dapat menggunakan *bit rate* 40 Gbps karena data yang dibawa bisa lebih banyak dengan performansi yang masih optimal yaitu sesuai standard untuk BER $< 10^{-9}$ dan *Q-factor* > 6 . Pada *bit rate* 2.5 Gbps, menghasilkan nilai BER 1.956×10^{-19} dan *Q-factor* 8.93926. *Bit rate* 10 Gbps menghasilkan BER 5.512×10^{-12} dan *Q-factor* 6.80159 masing-masing pada jarak 0.9 km. Sedangkan *bit rate* 40 Gbps menghasilkan BER 2.9046×10^{-18} dan *Q-factor* 8.66025 pada jarak 0.80 km.

✚ Simulasi dengan panjang gelombang 850 nm dengan fotodetektor APD

a) Variasi daya input

Tabel 4.13 Variasi daya input pada *bit rate* 2.5 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (s)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
25	1	2.5	8.09703	2.8148×10^{-16}
25.5	1	2.5	9.07964	5.444×10^{-20}
26	1	2.5	10.179	1.229×10^{-24}
26.5	1	2.5	11.4086	1.892×10^{-30}
27	1	2.5	12.7833	1.016×10^{-37}

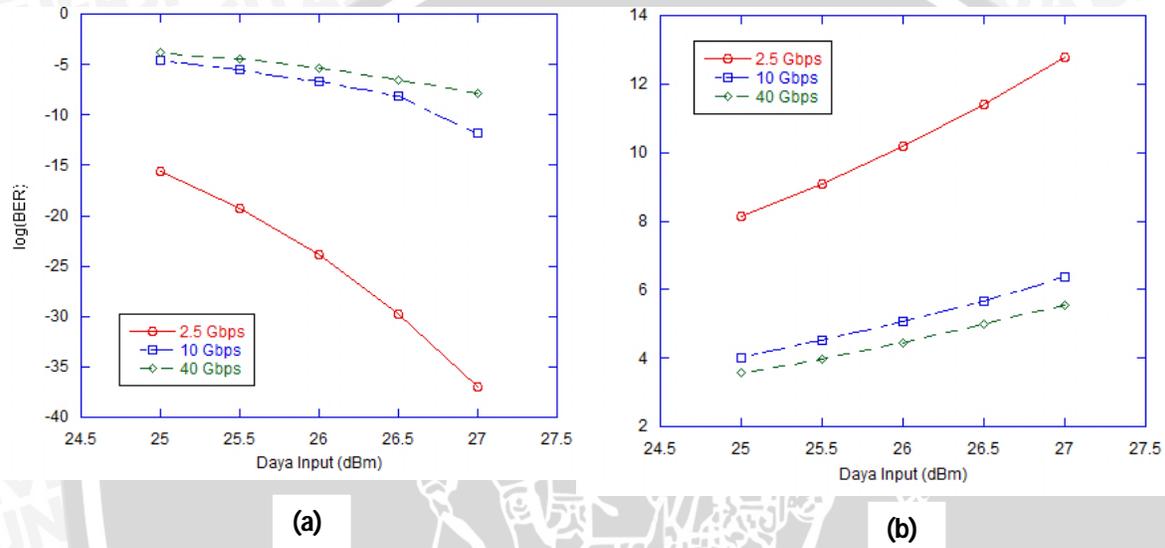
Tabel 4.14 Variasi daya input pada *bit rate* 10 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
25	1	10	4.0177	2.937×10^{-5}
25.5	1	10	4.50853	3.2627×10^{-6}
26	1	10	5.05773	2.120×10^{-7}
26.5	1	10	5.67203	7.052×10^{-9}
27	1	10	6.35889	0.0155×10^{-10}

Tabel 4.15 Variasi daya input pada *bit rate* 40 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
25	1	40	3.56106	0.000184
25.5	1	40	3.98487	3.371×10^{-5}
26	1	40	4.45625	4.163×10^{-6}
26.5	1	40	4.980	3.172×10^{-7}
27	1	40	5.56161	1.333×10^{-8}

Grafik pada gambar 4.15 (a) dan (b) menunjukkan variasi daya input pada *bit rate* yang berbeda dengan menggunakan APD fotodiode pada panjang gelombang 850 nm. Pada setiap *bit rate* ditunjukkan semakin besar daya input maka nilai BER akan semakin kecil. *Bit rate* 2.5 Gbps dapat menempuh jarak 1 km dengan nilai BER minimum 1.016×10^{-37} dan *Q-factor* 12.7833. Bila dibandingkan dengan *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps memerlukan daya input yang lebih rendah untuk bisa mendapatkan nilai BER minimum yang sama.



Gambar 4.15. Variasi daya Input pada masing-masing *bit rate* pada 850 nm dengan APD dilihat dari a) $\log(\text{BER})$ dan b) *Q-factor*

. *Bit rate* 40 Gbps memberikan nilai BER $>10^{-9}$ pada daya input 26.5-27 dBm saat dioperasikan pada sistem dengan jarak 1 km, sedangkan untuk *bit rate* 40 Gbps BER minimum yang bisa dicapai hanya 1.333×10^{-8} dan *Q-factor* 5.56161 pada saat kondisi hujan lebat ditunjukkan dengan nilai BER yang masih $>10^{-9}$ dan *Q-factor* <6 .

Gambar 4.15 (a) dan (b) ditunjukkan nilai daya input yang semakin besar memberikan nilai BER yang semakin kecil dan *Q-factor* yang semakin besar karena daya yang semakin besar dapat melewati partikel hujan. Sehingga kemungkinan terjadinya absorpsi dan *scattering* juga dapat diminimalisir. Oleh karena itu, untuk mendapatkan nilai BER yang semakin rendah dan *Q-factor* yang semakin tinggi

dengan *bit rate* 2.5 Gbps. Untuk mendapatkan nilai BER dan *Q-factor* yang sama bisa dicapai dengan menambah daya input pada *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps agar dapat melewati partikel hujan dengan data yang dilewatkan lebih banyak.

Absorpsi pada FSO akan menyebabkan daya pada laser berkurang secara bertahap sehingga, mempengaruhi secara langsung kehandalan sistem FSO. Atenuasi yang disebabkan oleh hujan lebat salah satunya adalah absorpsi, merupakan penyerapan foton oleh molekul termasuk air, CO₂, dan molekul ozon. Absorpsi pada FSO akan menyebabkan daya pada laser berkurang secara bertahap sehingga, mempengaruhi secara langsung kehandalan sistem FSO.

Hamburan (*scattering*) merupakan proses terjadinya hamburan gelombang cahaya oleh partikel-partikel yang ada di atmosfer secara acak. Pada *infra red*, panjang gelombang jauh lebih kecil daripada diameter hujan. Hamburan yang terjadi akibat hujan adalah *Geometric scattering* karena $r \gg \lambda$ (ITU-R P.1814).

a) Variasi jarak propagasi

Tabel 4.16 Variasi jarak propagasi pada *bit rate* 2.5 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (s)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
25	0.7	2.5	160.927	0
25	0.75	2.5	281.523	0
25	0.8	2.5	212.526	0
25	0.85	2.5	160.927	0
25	0.9	2.5	122.178	0
25	0.95	2.5	92.9565	0
25	1	2.5	70.8302	0
25	1.1	2.5	26.3864	9.0043×10^{-154}
25	1.2	2.5	16.9956	4.2277×10^{-65}
25	1.3	2.5	10.6091	1.3222×10^{-26}
25	1.4	2.5	6.45009	5.5334×10^{-11}
25	1.5	2.5	3.85553	5.7466×10^{-5}

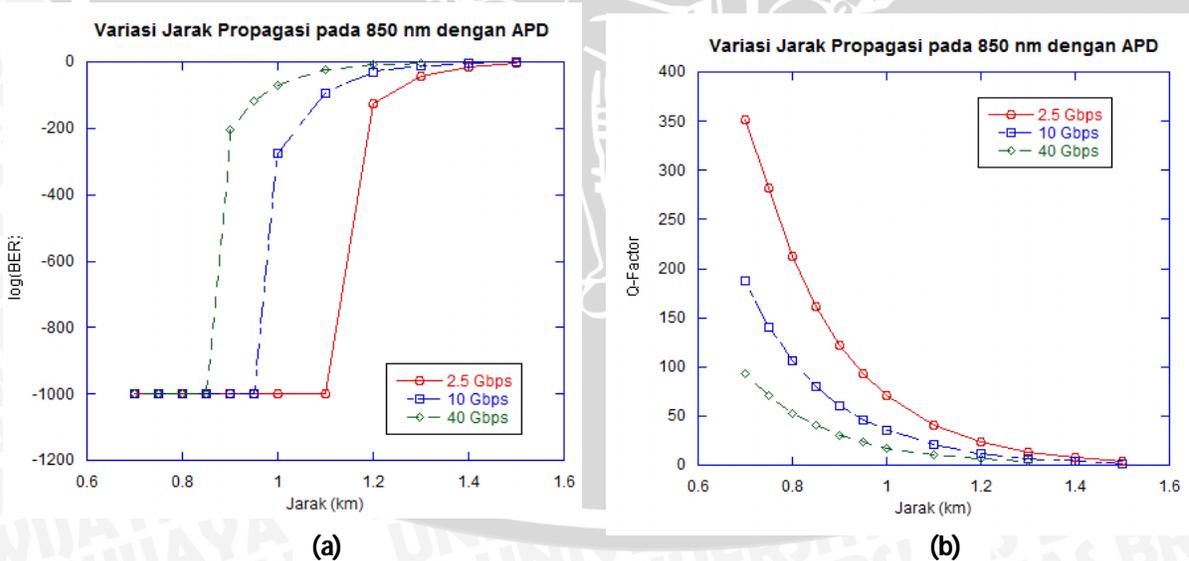
Tabel 4.17 Variasi jarak propagasi pada *bit rate* 10 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
25	0.7	10	187.496	0
25	0.75	10	140.889	0
25	0.8	10	106.273	0
25	0.85	10	80.4275	0

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate	Kinerja	
			Q-factor	BER
25	0.9	10	61.0357	0
25	0.95	10	46.4194	0
25	1	10	35.3549	2.377×10^{-274}
25	1.1	10	13.2863	1.273×10^{-40}
25	1.2	10	8.51062	8.248×10^{-18}
25	1.3	10	5.30213	5.5931×10^{-8}
25	1.4	10	3.2286	0.000615

Tabel 4.18 Variasi jarak propagasi pada bit rate 40 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
25	0.7	40	93.7361	0
25	0.75	40	70.4014	0
25	0.8	40	53.0822	0
25	0.85	40	40.1559	0
25	0.9	40	30.4591	2.531×10^{-204}
25	0.95	40	23.1509	3.983×10^{-119}
25	1	40	17.6722	1.969×10^{-70}
25	1.1	40	10.286	2.414×10^{-25}
25	1.2	40	5.97122	7.249×10^{-10}
25	1.3	40	3.39859	0.00022



Gambar 4.16 Variasi Jarak Propagasi pada masing-masing bit rate pada 850 nm dengan APD dilihat dari a) log(BER) dan b) Q-factor

Pada grafik 4.16 (a) dan (b) ditunjukkan bahwa semakin jauh jarak propagasi maka nilai BER semakin besar, dan nilai Q -factor semakin kecil. Hal ini terjadi karena semakin jauh jarak maka atenuasi juga bertambah besar. Sehingga pada saat kondisi hujan lebat akan terjadi absorpsi dan *scattering* oleh partikel air hujan. Namun, pada jarak tertentu pada tabel 4.16, 4.17 dan 4.18 nilai BER adalah 0, ini menunjukkan pada jarak tersebut atenuasi hujan tidak berpengaruh terhadap sistem.

Pada gambar 4.16 (a) dan (b) dapat diketahui *bit rate* 2.5 Gbps memberikan nilai BER yang lebih baik daripada 10 Gbps dan 40 Gbps. Sehingga untuk mendapatkan nilai BER yang sama dengan yang diberikan oleh *bit rate* 2.5 Gbps kedua *bit rate* yang lain harus dioperasikan pada jarak yang lebih pendek. Sehingga dengan jarak yang lebih pendek tersebut didapat BER yang minimum serta data yang ditransmisikan lebih besar. Atenuasi tersebut diakibatkan oleh absorpsi dan *scattering*. Pada *bit rate* 2.5 Gbps menghasilkan nilai BER 5.5334×10^{-11} dan Q -factor 6.45009 pada jarak 1.4 km, *bit rate* 10 Gbps menghasilkan BER 8.248×10^{-18} dan Q -factor 8.51062 pada jarak 1.2 km sedangkan pada *bit rate* 40 Gbps menghasilkan BER 7.249×10^{-10} dan Q -factor 5.97122 pada jarak 1.2 km.

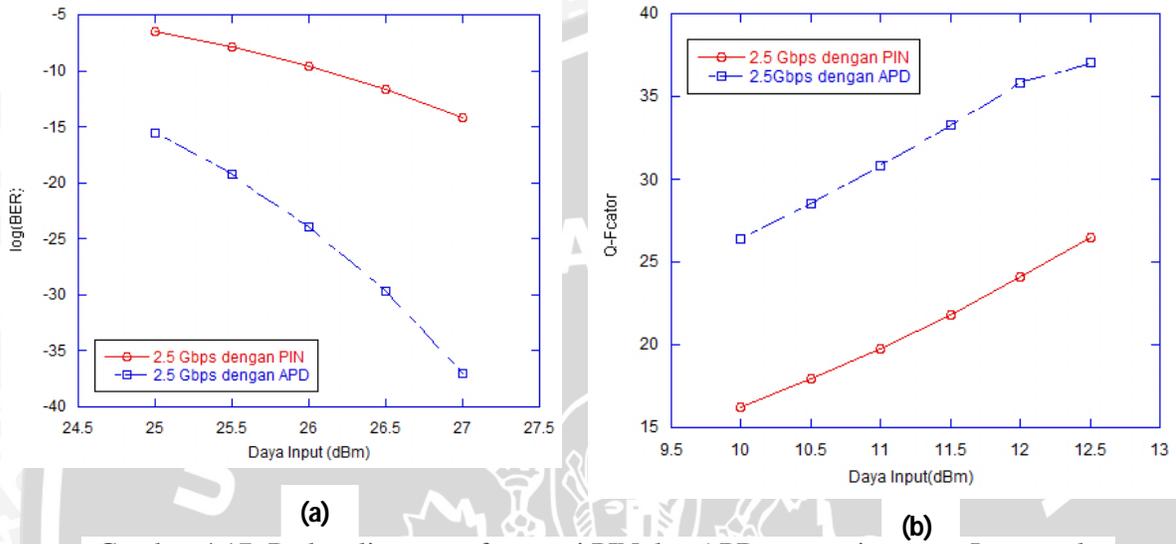
Absorpsi pada FSO akan menyebabkan daya pada laser berkurang secara bertahap sehingga, mempengaruhi secara langsung kehandalan sistem FSO. Atenuasi yang disebabkan oleh hujan lebat salah satunya adalah absorpsi, merupakan penyerapan foton oleh molekul termasuk air, CO₂ dan molekul ozon. Absorpsi pada FSO akan menyebabkan daya pada laser berkurang secara bertahap sehingga, mempengaruhi secara langsung kehandalan sistem FSO.

Hamburan (*scattering*) merupakan proses terjadinya hamburan gelombang cahaya oleh partikel-partikel yang ada di atmosfer secara acak. Pada *infra red*, panjang gelombang jauh lebih kecil daripada diameter hujan. Hamburan yang terjadi akibat hujan adalah *Geometric scattering* karena $r \gg \lambda$ (ITU-R P.1814).

Sintilasi terjadi apabila ada fluktuasi pada daya sinyal yang diterima. Turbulensi menghasilkan daerah udara dengan sedikit perbedaan temperature, perbedaan kerapatan dan perbedaan indeks refraksi. Selama transmisi *beam* dan sintilasi data menjadi rusak bentuknya sepanjang inhomogenitas indeks bias.

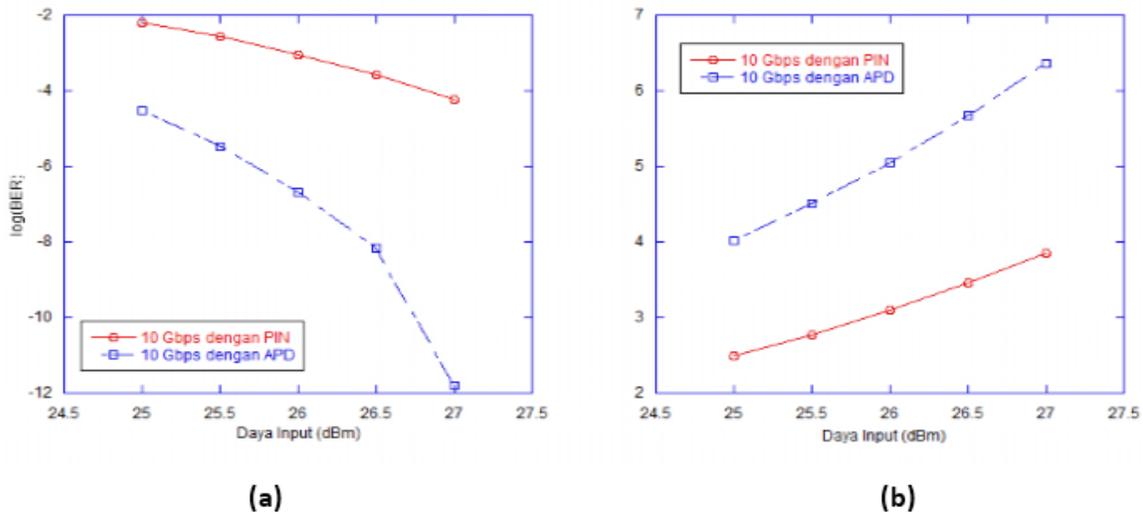
✚ Perbandingan Penggunaan PIN dan APD pada panjang gelombang 850 nm dengan variasi daya input

a) *Bit rate 2.5 Gbps*



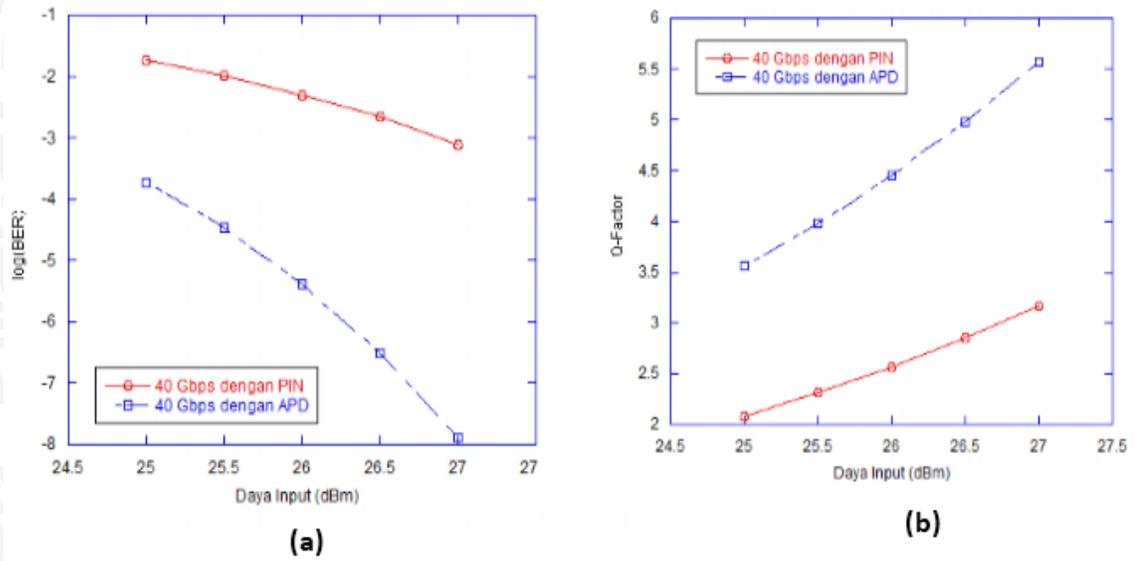
(a) (b)
Gambar 4.17 Perbandingan performansi PIN dan APD saat variasi daya Input pada bit rate 2.5 Gbps pada 850 nm dilihat dari a) log(BER) dan b) *Q-factor*

b) *Bit rate 10 Gbps*



(a) (b)
Gambar 4.18 Perbandingan performansi PIN dan APD saat variasi daya Input pada bit rate 10 Gbps pada 850 nm dilihat dari a) log(BER) dan b) *Q-factor*.

c) *Bit rate 40 Gbps*



Gambar 4.19 Perbandingan performansi PIN dan APD saat variasi daya Input pada *bit rate* 40 Gbps pada 850 nm dilihat dari a) log(BER) dan b) *Q-factor*

Pada grafik 4.17-4.19 (a) dan (b) ditunjukkan bahwa penggunaan Fotodetektor jenis APD memiliki performansi yang jauh lebih baik daripada PIN pada semua *bit rate*. Karena pada APD terdapat *gain* internal yang dapat meningkatkan sensitivitas. Sehingga saat kondisi hujan lebat APD dapat melewati partikel hujan dan mengurangi terjadinya *scattering* dan absorpsi yang dapat menyebabkan terjadinya distorsi pada sinyal informasi.

Semua detektor membutuhkan arus minimum tertentu untuk beroperasi secara handal. Arus tersebut perlu diubah menjadi daya minimum yang dibutuhkan sesuai dengan $P_{in} = I_p/R$. Detektor dengan responsivitas (R) yang besar membutuhkan daya yang lebih rendah. Pada *bit rate* 2.5 Gbps dengan PIN dihasilkan nilai BER 7.149×10^{-15} dan *Q-factor* 7.694 sedangkan dengan menggunakan APD menghasilkan BER 1.016×10^{-37} dan *Q-factor* 12.7833 pada daya input yang sama yaitu 27 dBm. Responsivitas fotodetektor meningkat seiring dengan bertambahnya panjang gelombang karena foton akan bertambah banyak dengan daya yang sama. APD memberikan nilai R yang lebih besar karena didesain untuk menyediakan penguatan arus internal seperti pada tabung *multiplier* (Agrawal, 2002:175).

✚ Simulasi dengan panjang gelombang 1550 nm dengan fotodetektor PIN

a) Variasi daya input

Tabel 4.19 Variasi daya input pada *bit rate* 2.5 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
10	1	2.5	16.2015	2.449×10^{-59}
10.5	1	2.5	17.9206	4.028×10^{-72}
11	1	2.5	19.7977	1.544×10^{-87}
11.5	1	2.5	21.842	4.583×10^{-106}
12	1	2.5	24.0633	2.989×10^{-128}
12.5	1	2.5	26.4513	7.849×10^{-155}

Tabel 4.20 Variasi daya input pada *bit rate* 10 Gbps

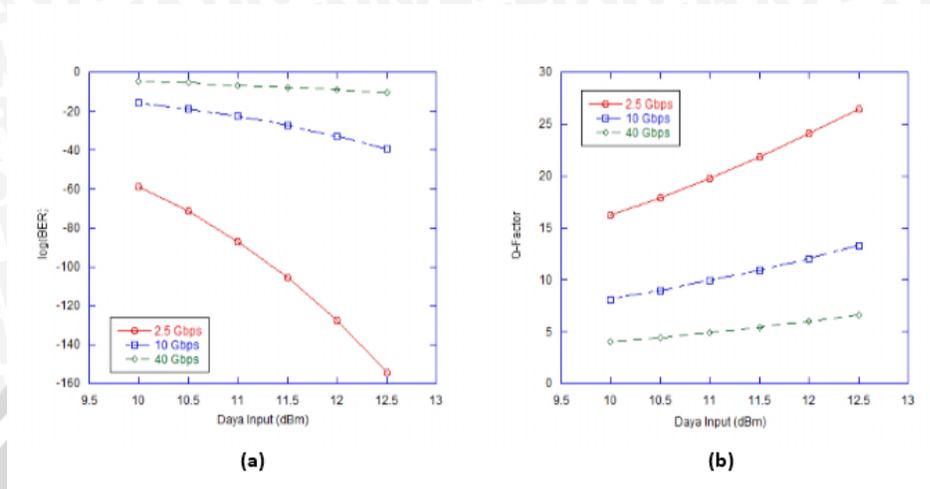
Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate	Kinerja	
			Q-factor	BER
10	1	10	8.09579	2.8267×10^{-16}
10.5	1	10	8.95314	1.7139×10^{-19}
11	1	10	9.88979	2.282×10^{-23}
11.5	1	10	10.9111	5.0385×10^{-28}
12	1	10	12.0239	1.3133×10^{-33}
12.5	1	10	13.2355	2.6939×10^{-40}

Tabel 4.21 Variasi daya input pada *bit rate* 40 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
10	1	40	4.04985	2.5458×10^{-5}
10.5	1	40	4.47703	3.7538×10^{-6}
11	1	40	4.94387	2.283×10^{-7}
11.5	1	40	5.45315	2.4443×10^{-8}
12	1	40	6.0077	9.2683×10^{-10}
12.5	1	40	6.61061	1.88×10^{-11}

Grafik pada gambar 4.20 (a) dan (b) menunjukkan variasi daya input pada *bit rate* yang berbeda dengan menggunakan APD fotodiode pada panjang gelombang 1550 nm. Pada setiap *bit rate* ditunjukkan semakin besar daya input maka nilai BER

akan semakin kecil. *Bit rate* 2.5 Gbps dapat menempuh jarak 1 km serta daya input 12.5 dBm menghasilkan nilai BER minimum 7.849×10^{-155} dan *Q-factor* 26.4513.



Gambar 4.20 Variasi daya Input pada masing-masing *bit rate* pada 1550 nm dengan PIN dilihat dari **a)** log(BER) dan **b)** *Q-factor*

Gambar 4.20 (a) dan (b) ditunjukkan nilai daya input yang semakin besar memberikan nilai BER yang semakin kecil dan *Q-factor* yang semakin besar karena daya yang semakin besar dapat melewati partikel hujan. Sehingga kemungkinan terjadinya absorpsi dan *scattering* juga dapat diminimalisir. Oleh karena itu, untuk mendapatkan nilai BER yang semakin rendah dan *Q-factor* yang semakin tinggi dengan *bit rate* 2.5 Gbps. Untuk mendapatkan nilai BER dan *Q-factor* yang sama bisa dicapai dengan menambah daya input pada *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps agar dapat melewati partikel hujan dengan data yang dilewatkan lebih banyak.

Absorpsi pada FSO akan menyebabkan daya pada laser berkurang secara bertahap sehingga, mempengaruhi secara langsung kehandalan sistem FSO. Atenuasi yang disebabkan oleh hujan lebat salah satunya adalah absorpsi, merupakan penyerapan foton oleh molekul termasuk air, CO₂, dan molekul ozon. Absorpsi pada FSO akan menyebabkan daya pada laser berkurang secara bertahap sehingga, mempengaruhi secara langsung kehandalan sistem FSO.

Hamburan (*scattering*) merupakan proses terjadinya hamburan gelombang cahaya oleh partikel-partikel yang ada di atmosfer secara acak. Pada *infra red*, panjang gelombang jauh lebih kecil daripada diameter hujan. Hamburan yang terjadi akibat hujan adalah *Geometric scattering* karena $r \gg \lambda$ (ITU-R P.1814).

b) Variasi jarak propagasi

Tabel 4.22 Variasi jarak propagasi pada *bit rate* 2.5 Gbps

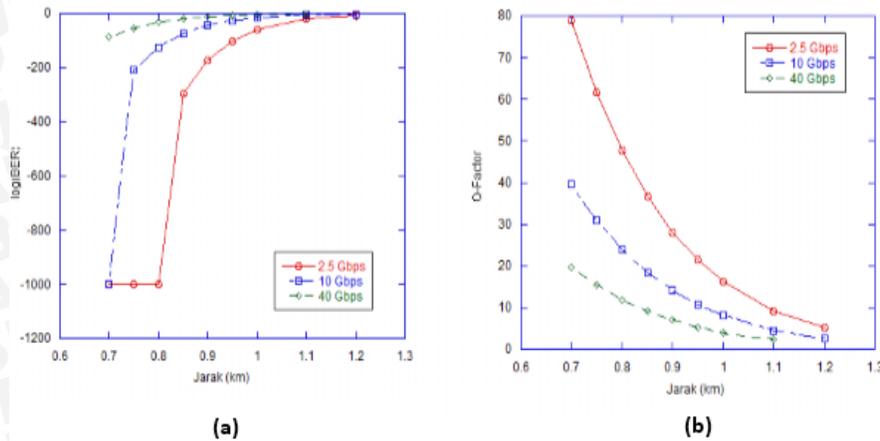
Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
10	0.7	2.5	79.0923	0
10	0.75	2.5	61.6845	0
10	0.8	2.5	47.7453	0
10	0.85	2.5	36.7554	4.644×10^{-296}
10	9	2.5	28.1383	1.638×10^{-174}
10	0.95	2.5	21.4124	5.068×10^{-102}
10	1	2.5	16.2015	2.449×10^{-59}
10	1.1	2.5	9.16396	2.498×10^{-20}
10	1.2	2.5	5.13924	5.13924×10^{-7}

Tabel 4.23 Variasi jarak propagasi pada *bit rate* 10 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
10	0.7	40	19.8085	1.144×10^{-87}
10	0.75	40	15.4045	7.1446×10^{-54}
10	0.80	40	11.9238	4.2428×10^{-33}
10	0.85	40	9.17726	2.1453×10^{-20}
10	0.90	40	7.02265	1.0671×10^{-12}
10	0.95	40	5.34605	4.4422×10^{-8}
10	1	40	4.04985	2.5458×10^{-5}
10	1.1	40	2.30292	0.0106

Tabel 4.24 Variasi jarak propagasi pada *bit rate* 40 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
10	0.7	10	39.6481	0
10	0.75	10	30.8372	3.898×10^{-209}
10	0.8	10	23.881	2.309×10^{-126}
10	0.85	10	18.3794	9.3129×10^{-76}
10	0.9	10	14.0634	3.1298×10^{-45}
10	0.95	10	10.6964	5.2307×10^{-27}
10	1	10	8.09579	2.827×10^{-16}
10	1.1	10	4.58534	2.262×10^{-6}
10	1.2	10	2.58058	0.0043



Gambar 4.21. Variasi jarak propagasi pada masing-masing *bit rate* pada 1550 nm dengan PIN dilihat dari a) log(BER) dan b) *Q-factor*

Pada gambar 4.21 (a) dan (b) ditunjukkan bahwa semakin jauh jarak propagasi maka nilai BER semakin besar dan *Q-factor* semakin kecil. Hal ini karena semakin jauh jarak maka nilai atenuasi juga semakin besar. Atenuasi atmosfer sebagai hasil dari interaksi dari *beam laser* dengan molekul udara dan aerosol sepanjang propagasi (Devide, 2010).

Grafik pada gambar 4.21 (a) dan (b) untuk *bit rate* 2.5 Gbps menunjukkan performansi paling optimal, ditunjukkan dengan nilai BER yang lebih kecil serta *Q-factor* yang lebih besar dibandingkan *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps. Jadi, untuk mendapatkan nilai BER yang sama dengan 2.5 Gbps maka, *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps harus dioperasikan pada jarak yang lebih pendek. *Bit rate* 2.5 Gbps memberikan nilai BER 2.498×10^{-20} dan *Q-factor* 9.16396 pada jarak 1.1 km, *bit rate* 10 Gbps memberikan nilai BER 2.827×10^{-16} dan *Q-factor* 8.09579 pada jarak 1 km, *bit rate* 40 Gbps memberikan nilai BER 1.0671×10^{-12} dan *Q-factor* 7.02265 pada jarak 0.9 km.

Semakin pendek jarak propagasi maka sistem akan semakin bagus. Jarak yang semakin panjang maka nilai redaman yang terjadi juga semakin besar sehingga kemungkinan terjadinya absorpsi dan *scattering* juga semakin besar.

Absorpsi pada FSO akan menyebabkan daya pada laser berkurang secara bertahap sehingga, mempengaruhi secara langsung kehandalan sistem FSO. Atenuasi

yang disebabkan oleh hujan lebat salah satunya adalah absorpsi, merupakan penyerapan foton oleh molekul termasuk air, CO₂, dan molekul ozon. Absorpsi pada FSO akan menyebabkan daya pada laser berkurang secara bertahap sehingga, mempengaruhi secara langsung kehandalan sistem FSO.

Hamburan (*scattering*) merupakan proses terjadinya hamburan gelombang cahaya oleh partikel-partikel yang ada di atmosfer secara acak. Pada *infra red*, panjang gelombang jauh lebih kecil daripada diameter hujan. Hamburan yang terjadi akibat hujan adalah *Geometric scattering* karena $r \gg \lambda$ (ITU-R P.1814).

Sintilasi mengakibatkan terjadinya fluktuasi pada sinyal yang diterima. Turbulensi atmosfer menghasilkan perbedaan temperature, perbedaan kerapatan dan perbedaan indeks refraksi. Selama transmisi *beam* dan sintilasi, data dapat hilang karena laser *beam* menjadi rusak bentuknya.

🚩 Simulasi dengan panjang gelombang 1550 nm dengan fotodetektor APD

a) Variasi Daya Input

Tabel 4.25 Variasi daya input pada *bit rate* 2.5 Gbps

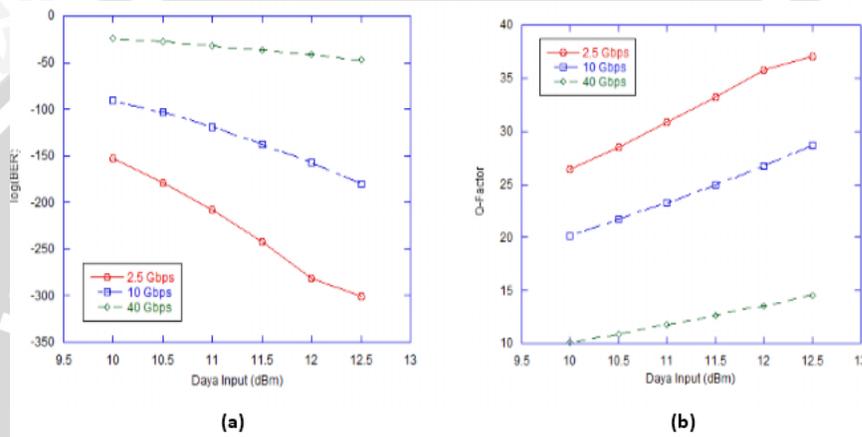
Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
10	1	2.5	26.3864	9.0043×10^{-154}
10.5	1	2.5	28.5268	2.4667×10^{-179}
11	1	2.5	30.8151	7.3679×10^{-209}
11.5	1	2.5	33.2432	1.1367×10^{-242}
12	1	2.5	35.8152	2.8134×10^{-281}
12.5	1	2.5	37.055	6.4707×10^{-301}

Tabel 4.26 Variasi daya input pada *bit rate* 10 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
10	1	10	20.1633	8.942×10^{-91}
10.5	1	10	21.6697	1.709×10^{-104}
11	1	10	23.2649	4.274×10^{-120}
11.5	1	10	24.9559	7.707×10^{-138}
12	1	10	26.7483	5.348×10^{-158}
12.5	1	10	28.6588	5.06×10^{-181}

Tabel 4.26 Variasi daya input pada *bit rate* 40 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
10	1	40	10.1508	1.42×10^{-24}
10.5	1	40	10.9271	3.655×10^{-28}
11	1	40	11.7504	2.967×10^{-32}
11.5	1	40	12.623	6.59×10^{-37}
12	1	40	13.5466	3.429×10^{-42}
12.5	1	40	14.532	3.53×10^{-48}



Gambar 4.22 Variasi daya input pada masing-masing *bit rate* pada 1550 nm dengan APD dilihat dari a) log(BER) dan b) *Q-factor*

Grafik pada gambar 4.22 (a) dan (b) menunjukkan variasi daya input pada *bit rate* yang berbeda dengan menggunakan APD fotodiode pada panjang gelombang 1550 nm. Pada setiap *bit rate* ditunjukkan semakin besar daya input maka nilai BER akan semakin kecil. *Bit rate* 2.5 Gbps dapat menempuh jarak 1 km serta daya input 12.5 dBm menghasilkan nilai BER minimum 6.4707×10^{-301} dan *Q-factor* 37.055. Bila dibandingkan dengan *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps memerlukan daya input yang lebih rendah untuk bisa mendapatkan nilai BER minimum yang sama. *Bit rate* 10 Gbps memberikan nilai BER 5.06×10^{-181} dan *Q-factor* 14.5232, sedangkan untuk *bit rate* 40 Gbps BER minimum yang bisa dicapai hanya 13.53×10^{-48} dan *Q-factor* 14.5232 pada saat kondisi hujan lebat.

Gambar 4.22 (a) dan (b) ditunjukkan nilai daya input yang semakin besar memberikan nilai BER yang semakin kecil dan *Q-factor* yang semakin besar karena daya yang semakin besar dapat melewati partikel hujan. Sehingga kemungkinan

terjadinya absorpsi dan *scattering* juga dapat diminimalisir. Oleh karena itu, untuk mendapatkan nilai BER yang semakin rendah dan *Q-factor* yang semakin tinggi dengan *bit rate* 2.5 Gbps. Untuk mendapatkan nilai BER dan *Q-factor* yang sama bisa dicapai dengan menambah daya input pada *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps agar dapat melewati partikel hujan dengan data yang dilewatkan lebih banyak.

Absorpsi pada FSO akan menyebabkan daya pada laser berkurang secara bertahap sehingga, mempengaruhi secara langsung kehandalan sistem FSO. Atenuasi yang disebabkan oleh hujan lebat salah satunya adalah absorpsi, merupakan penyerapan foton oleh molekul termasuk air, CO₂, dan molekul ozon. Absorpsi pada FSO akan menyebabkan daya pada laser berkurang secara bertahap sehingga, mempengaruhi secara langsung kehandalan sistem FSO.

Hamburan (*scattering*) merupakan proses terjadinya hamburan gelombang cahaya oleh partikel-partikel yang ada di atmosfer secara acak. Pada *infra red*, panjang gelombang jauh lebih kecil daripada diameter hujan. Hamburan yang terjadi akibat hujan adalah *Geometric scattering* karena $r \gg \lambda$ (ITU-R P.1814).

b) Variasi Jarak Propagasi

Tabel 4.28 Variasi jarak propagasi pada *bit rate* 2.5 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
10	0.7	2.5	130.41	0
10	0.75	2.5	107.093	0
10	0.8	2.5	87.9974	0
10	0.85	2.5	72.2841	0
10	0.9	2.5	59.4489	0
10	0.95	2.5	48.8445	0
10	1	2.5	39.9364	0
10	1.1	2.5	26.3864	9.0043×10^{-154}
10	1.2	2.5	16.9956	4.2275×10^{-65}
10	1.3	2.5	10.6091	1.322×10^{-26}
10	1.4	2.5	6.45009	5.533×10^{-11}
10	1.5	2.5	3.85553	5.746×10^{-5}

Tabel 4.29 Variasi jarak *transmitter* dan *receiver* pada *bit rate* 10 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
10	0.7	10	65.212	0
10	0.75	10	53.5478	0
10	0.8	10	44.1934	0
10	0.85	10	36.3915	0
10	0.9	10	29.9396	0
10	0.95	10	24.6031	0
10	1	10	20.1633	0
10	1.1	10	13.2863	1.27×10^{-40}
10	1.2	10	8.51062	8.25×10^{-18}
10	1.3	10	5.30213	5.59×10^{-08}
10	1.4	10	3.2286	0.000615

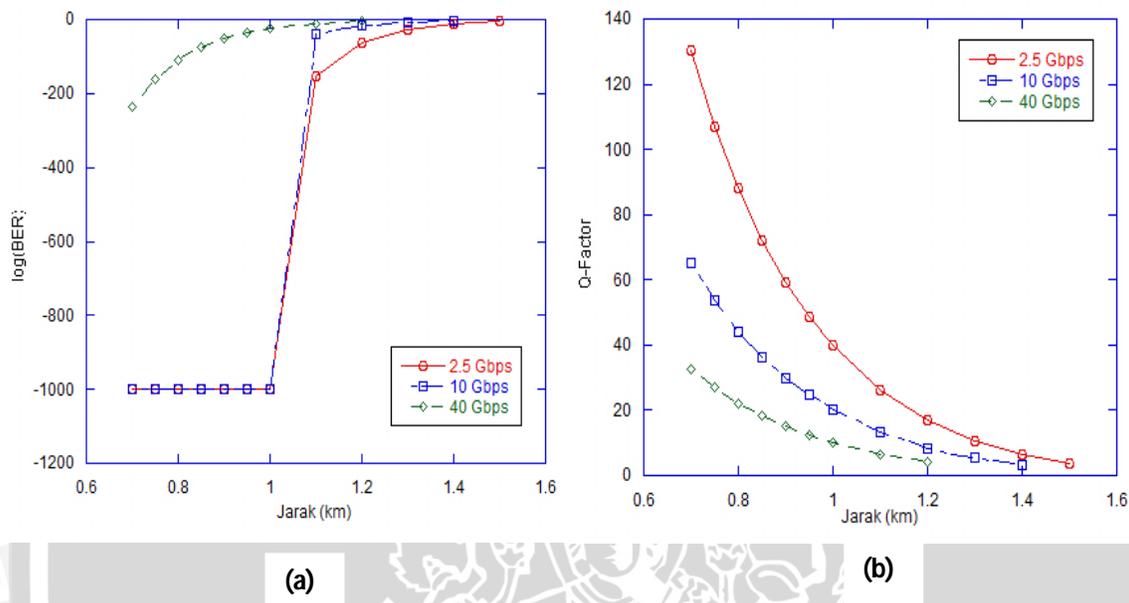
Tabel 4.30 Variasi jarak propagasi pada *bit rate* 40 Gbps

Daya Input (dBm)	Jarak (km)	Bit rate (Gbps)	Kinerja	
			Q-factor	BER
10	0.7	40	32.7817	3.7215×10^{-236}
10	0.75	40	26.984	8.2179×10^{-161}
10	0.8	40	22.2743	2.477×10^{-110}
10	0.85	40	18.4227	3.4074×10^{-76}
10	0.9	40	15.1761	2.0687×10^{-52}
10	0.95	40	12.4415	6.5105×10^{-36}
10	1	40	10.1508	1.4192×10^{-24}
10	1.1	40	6.65084	1.3298×10^{-11}
10	1.2	40	4.25362	1.0004×10^{-5}

Pada gambar 4.23 (a) dan (b) ditunjukkan bahwa semakin jauh jarak propagasi maka nilai BER semakin besar dan *Q-factor* semakin kecil. Hal ini karena semakin jauh jarak maka nilai atenuasi juga semakin besar. Atenuasi atmosfer sebagai hasil dari interaksi dari *beam laser* dengan molekul udara dan aerosol sepanjang propagasi. Sama dengan gelombang, daya *beam* optik berkurang secara eksponensial terhadap jarak (Devide, 2010).

Grafik pada gambar 4.23 (a) dan (b) untuk *bit rate* 2.5 Gbps menunjukkan performansi paling optimal, ditunjukkan dengan nilai BER yang lebih kecil serta *Q-factor* yang lebih besar dibandingkan *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps. Jadi, untuk mendapatkan nilai BER yang sama dengan 2.5 Gbps maka, *bit rate* 10 Gbps dan 40 Gbps harus dioperasikan pada jarak yang lebih pendek. *Bit rate* 2.5 Gbps memberikan

nilai BER 5.533×10^{-11} dan Q -factor 6.45009 pada jarak 1.4 km, bit rate 10 Gbps memberikan nilai BER 8.25×10^{-18} dan Q -factor 8.51062 pada jarak 1.2 km, bit rate 40 Gbps memberikan nilai BER 1.3298×10^{-11} dan Q -factor 6.65084 pada jarak 1.1 km.



Gambar 4.23 Variasi Jarak Propagasi pada masing-masing bit rate pada 1550 nm APD pada 1550 nm dilihat dari a) $\log(\text{BER})$ dan b) Q -factor

Semakin pendek jarak propagasi maka sistem akan semakin bagus. Jarak yang semakin panjang maka nilai redaman yang terjadi juga semakin besar sehingga kemungkinan terjadinya absorpsi dan scattering juga semakin besar.

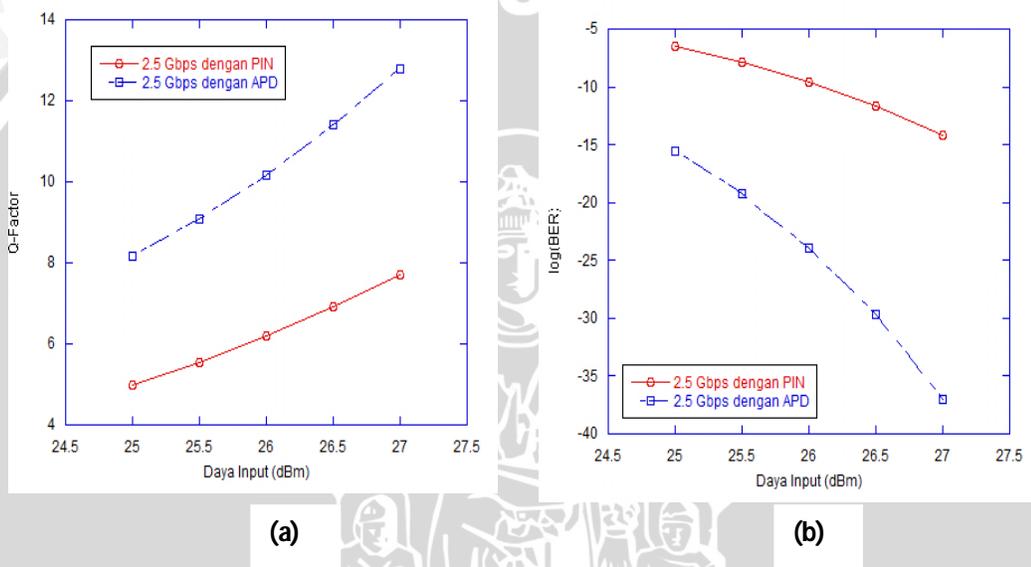
Absorpsi pada FSO akan menyebabkan daya pada laser berkurang secara bertahap sehingga, mempengaruhi secara langsung kehandalan sistem FSO. Atenuasi yang disebabkan oleh hujan lebat salah satunya adalah absorpsi, merupakan penyerapan foton oleh molekul termasuk air, CO_2 , dan molekul ozon. Absorpsi pada FSO akan menyebabkan daya pada laser berkurang secara bertahap sehingga, mempengaruhi secara langsung kehandalan sistem FSO.

Hamburan (*scattering*) merupakan proses terjadinya hamburan gelombang cahaya oleh partikel-partikel yang ada di atmosfer secara acak. Pada *infra red*, panjang gelombang jauh lebih kecil daripada diameter hujan. Hamburan yang terjadi akibat hujan adalah *Geometric scattering* karena $r \gg \lambda$ (ITU-R P.1814).

Sintilasi mengakibatkan fluktuasi pada daya sinyal yang diterima. Turbulensi atmosfer menghasilkan perbedaan temperatur, kerapatan dan perbedaan indeks refraksi. Data dapat hilang selama transmisi *beam* dan sintilasi karena laser *beam* bentuknya menjadi rusak.

➤ Perbandingan Penggunaan PIN dan APD pada panjang gelombang 1550 nm dengan variasi daya Input

a) **Bit rate 2.5 Gbps**

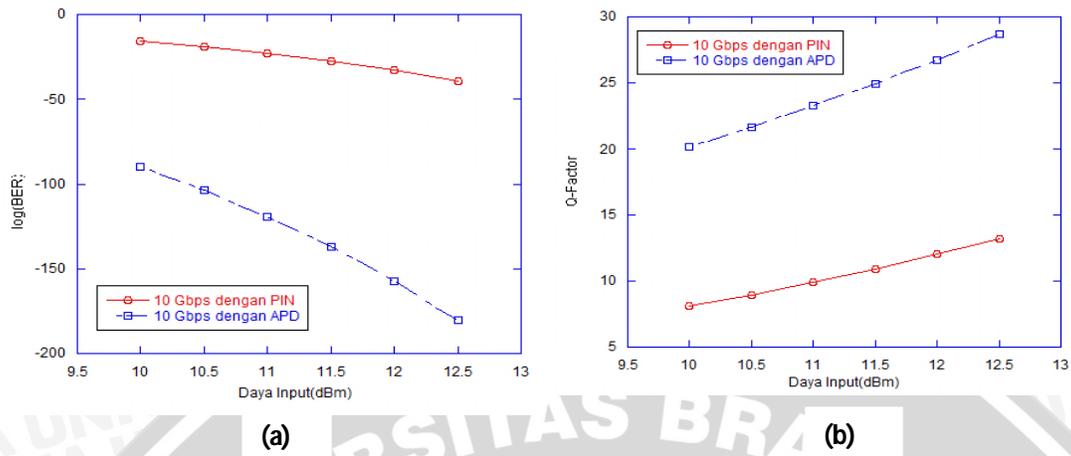


Gambar 4.24 Perbandingan performansi PIN dan APD saat variasi daya Input pada bit rate 2.5 Gbps pada 1550 nm dilihat dari a) log(BER) dan b) Q-factor

Pada grafik 4.24-4.26 (a) dan (b) ditunjukkan bahwa penggunaan Fotodetektor jenis APD memiliki performansi yang jauh lebih baik daripada PIN pada semua bit rate. Karena pada APD terdapat gain internal. Sehingga saat kondisi hujan lebat APD dapat melewati partikel hujan dan mengurangi terjadinya scattering dan absorpsi.

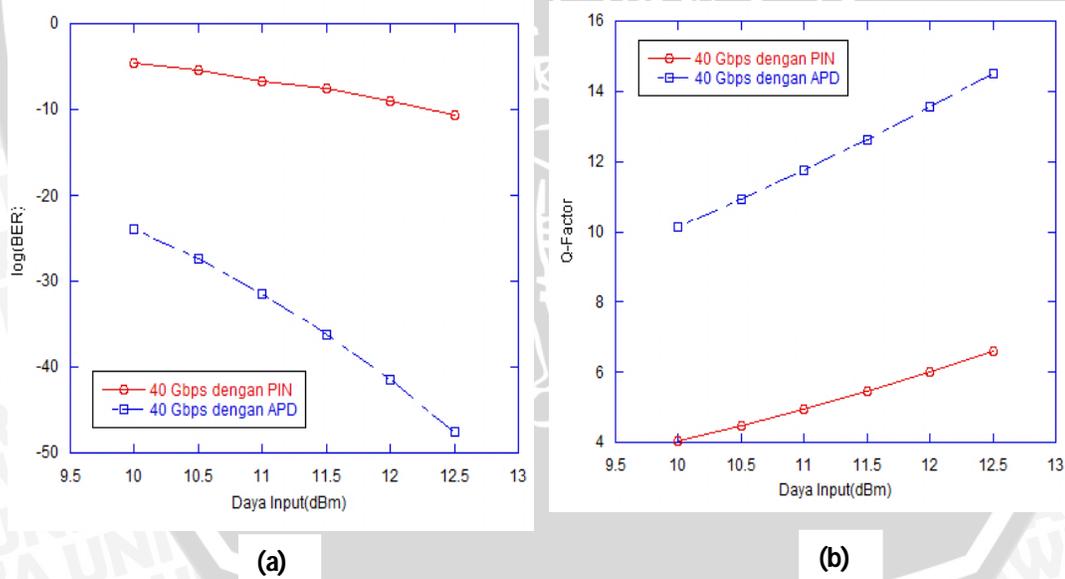
Gain internal tersebut akan menguatkan sinyal arus photo primer yang masuk, sehingga akan menambah kesensitivitasan dari APD. Hal ini menyebabkan meskipun dengan daya yang relative rendah APD dapat menangkap sinyal informasi dengan lebih optimum

b) Bit rate 10 Gbps



Gambar 4.25 Perbandingan performansi PIN dan APD saat variasi daya Input pada bit rate 10 Gbps pada 1550 nm dilihat dari a) log(BER) dan b) Q-factor

c) Bit rate 40 Gbps



Gambar 4.26 Perbandingan performansi PIN dan APD saat variasi daya Input pada bit rate 40 Gbps pada 1550 nm dilihat dari a) log(BER) dan b) Q-factor

Semua detektor membutuhkan arus minimum tertentu untuk beroperasi secara handal. Arus tersebut perlu diubah menjadi daya minimum yang dibutuhkan sesuai

dengan $P_{in} = I_p/R$. Detektor dengan responsivitas (R) yang besar membutuhkan daya yang lebih rendah. Pada *bit rate* 2.5 Gbps dengan PIN dihasilkan nilai BER 7.849 x 10⁻¹⁵⁵ dan *Q-factor* 26.4513 sedangkan dengan menggunakan APD menghasilkan BER 6.4707x 10⁻³⁰¹ dan *Q-factor* 37.055 pada daya input yang sama yaitu 12.5 dBm. Pada *bit rate* 10 Gbps dengan PIN menghasilkan BER 2.6939 x 10⁻⁹⁰ dan *Q-factor* 13.2355, sedangkan dengan APD menghasilkan BER 5.06 x 10⁻¹⁸¹ dan *Q-factor* 28.6588. Pada *bit rate* 40 Gbps dengan PIN menghasilkan BER 1.88 x 10⁻¹¹ dan *Q-factor* 6.61061, sedangkan dengan menggunakan APD menghasilkan BER 3.53x 10⁻⁴⁸ dan *Q-factor* 14.5232. Responsivitas fotodetektor meningkat seiring dengan bertambahnya panjang gelombang karena photon akan bertambah banyak dengan daya yang sama. APD memberikan nilai R yang lebih besar karena didesain untuk menyediakan penguatan arus internal seperti pada tabung *multiplier* (Agrawal, 2002:175



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

[HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN]

