

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis performansi OFDMA yang dilakukan pada bab ini berdasarkan pada teori dan persamaan yang terdapat pada Bab II. Performansi OFDMA pada teknologi *radio over fiber* meliputi SNR, kapasitas kanal, *bit rate*, dan BER. Hasil analisis akan disimulasikan dengan menggunakan program Matlab 7.0.0.

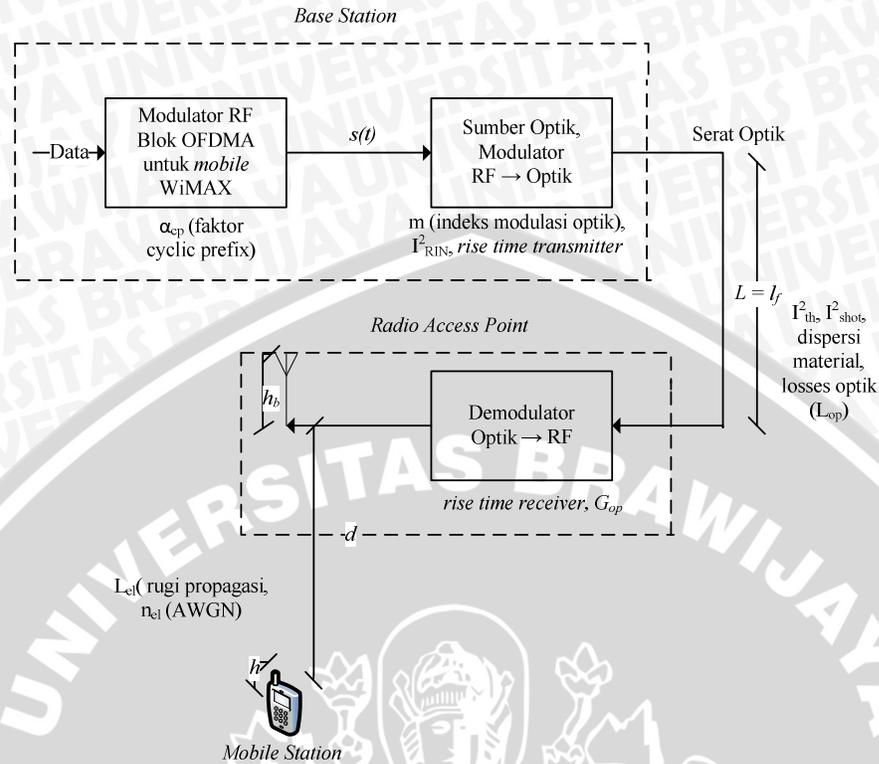
Performansi OFDMA pada teknologi *radio over fiber* yang dibahas dalam skripsi ini memiliki variabel bebas panjang serat optik, *bandwidth* sistem, serta panjang gelombang yang digunakan. Performansi yang diamati meliputi *signal-to-noise ratio* (SNR), kapasitas kanal, *bit rate*, dan *bit error rate* (BER) teknologi RoF yang menggunakan teknik *multiple access* OFDMA.

Kelebihan dari sistem transmisi *multicarrier* OFDMA adalah dapat mengefisienkan penggunaan *bandwidth*. Selain itu sistem OFDMA dapat menjaga setiap *subcarrier* yang satu dengan yang lain agar tetap *orthogonal* dan mencegah terjadinya interferensi (ISI dan ICI) pada sistem, dengan menggunakan *cyclic prefix* (CP). *Cyclic prefix* (CP) merupakan duplikat bagian akhir dari simbol OFDMA untuk menghilangkan *delay spread* yang terjadi antar data yang saling tumpang tindih. Berdasarkan aturan yang telah ditetapkan bahwa *delay spread* tidak boleh melebihi 10% dari panjang simbol OFDMA agar nilai BER tetap kecil yaitu bernilai 10^{-3} bahkan kurang. Dengan demikian interval CP harus lebih besar atau sama dengan *delay spread* maksimum ($T_{cp} \geq 2\tau$) agar orthogonalitas antar *subcarrier* tetap terjaga. Pada model OFDMA untuk standar IEEE 802.16, dinyatakan bahwa panjang symbol 102.9 μs dengan durasi symbol 91.4 μs , sehingga panjang CP yang digunakan untuk analisis skripsi ini adalah:

$$\alpha_{cp} = \frac{T_{cp}}{T_b} = \frac{(T_s - T_b)}{T_b} = \frac{(102.9 - 91.4)}{91.4} = \frac{1}{8} = 12.5 \%$$

CP yang digunakan adalah 1/8 (12.5%) dari durasi simbol OFDMA untuk menoleransi *delay spread* mencapai 11.4 μs , berdasarkan model OFDMA pada standar IEEE 802.16 [Chen, 2008].

Parameter yang digunakan untuk menganalisis performansi teknologi *radio over fiber* yang menggunakan sistem *mobile* WiMAX dengan penerapan OFDMA adalah menggunakan standar IEEE 802.16e. Untuk menganalisis performansi OFDMA pada *radio over fiber*, model sistem yang digunakan adalah:



Gambar 4.1 Model Sistem (*Downlink*)
(Sumber: Xavier Fernando, 2004)

Gambar 4.1 menggambarkan model sistem yang digunakan untuk analisis dalam skripsi ini. Performansi sistem dihitung di sisi *user* (*downlink*). Proses transmisi dari *central base station* menuju *radio access point* dihubungkan melalui serat optik. Rugi-rugi yang terjadi dalam serat optik diperlihatkan pada gambar. Rugi-rugi propagasi dan kanal *noise* AWGN terjadi ketika transmisi dilakukan dari *radio access point* ke *mobile station*. **Gambar 4.1** juga memperlihatkan beberapa variabel yang digunakan dalam perhitungan sistem.

4.1 Analisis *Signal to Noise Ratio* Teknologi *Radio over Fiber* dengan Penerapan OFDMA

Performansi OFDMA pada teknologi *Radio over Fiber* dengan parameter yang diamati adalah *signal to noise ratio* (SNR) akan dibahas pada sub bab ini.

Gambar 4.1. menyatakan bahwa $s(t)$ adalah sinyal keluaran dari BTS yang akan ditransmisikan melalui serat optik menuju *radio access point*, sedangkan $r(t)$ adalah sinyal yang diterima di sisi *user*. Proses transmisi sinyal $s(t)$ mengalami peredaman

akibat *noise* maupun *losses*, baik dalam saluran optik maupun saluran *wireless*, serta mengalami penguatan sebelum ditransmisikan kembali melalui *radio access point*.

Signal to noise ratio dihitung di sisi *receiver (user)* dengan pemodelan sistem berdasarkan propagasinya. SNR merupakan perbandingan antara daya sinyal yang diterima di sisi *user* dengan *noise* total yang dialami oleh sinyal. Sinyal $r(t)$ terdiri dari dua komponen, yaitu sinyal $s(t)$ dan *noise* total $n(t)$.

$$r(t) = D \cdot s(t) + n(t) \tag{4.1}$$

Fernando, 2004, menyatakan bahwa:

$$D = m I_D 10^{-L_{op}/10} \frac{G_{op}}{L_{wl}}$$

$$n(t) = \frac{n_{op}(t) G_{op}}{L_{wl}} + n_{wl}(t)$$

dengan:

m = indeks modulasi optik

I_D = arus yang terdeteksi oleh detector

G_{op} = gain optik pada *radio access point*

L_{el} = rugi-rugi *pathloss*

n_{op} = *noise* saluran optik, yang terdiri dari *thermal noise*, *shot noise*, serta *RIN*

n_{el} = *noise wireless* (AWGN)

Sehingga daya sinyal $r(t)$ juga terdiri dari daya sinyal dan daya *noise*, yaitu

$$E[r^2(t)] = E[r_s^2(t)] + E[r_n^2(t)] \tag{4.2}$$

Dari substitusi antara persamaan (4.1) dengan persamaan (4.2) didapatkan:

$$E[r_s^2(t)] = m^2 I_D^2 10^{-L_{op}/10} \left(\frac{G_{op}}{L_{el}}\right)^2 E[s^2(t)] \tag{4.3}$$

$$E[r_n^2(t)] = \left(\frac{G_{op}}{L_{el}}\right)^2 E[n_{op}^2(t)] + E[n_{el}^2(t)] \tag{4.4}$$

$$SNR = \frac{E[r_s^2(t)]}{E[r_n^2(t)]}$$

$$SNR = \frac{m^2 I_D^2 10^{-\frac{L_{op}}{10}} \left(\frac{G_{op}}{L_{el}}\right)^2 E[s^2(t)]}{\left(\frac{G_{op}}{L_{el}}\right)^2 E[n_{op}^2(t)] + E[n_{el}^2(t)]}$$

$$SNR = \frac{m^2 I_D^2 10^{-L_{op}/10} E[s^2(t)]}{E[n_{op}^2(t)] + \left(E[n_{el}^2(t)] \left(\frac{L_{el}}{G_{op}}\right)^2\right)} \tag{4.5}$$

$$SNR = \frac{m^2 I_D^2 10^{-2(n_{clc} + n_{sls} + \alpha L)/10} P_{RFIn}}{\left(\langle I_{shot}^2 \rangle + \langle I_{RIN}^2 \rangle + \langle I_{th}^2 \rangle\right) + \left(10^{-(10 \log_{10}(k T) + 10 \log_{10}(B) + NF)/10} \left(\frac{L_{el}}{G_{op}}\right)^2\right)}$$

Pada analisis *signal-to-noise ratio* akan digunakan spesifikasi *mobile* WiMAX pada

Tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1 Spesifikasi Mobile WiMax 802.16e

Parameter	Value
Frekuensi Operasi	2300 MHz
Duplex	TDD
Bandwidth kanal	5 MHz
Teknik modulasi	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Radius Cell	2 -5 kilometers
Tinggi <i>Base station</i>	32 meters
Tinggi <i>Mobile Terminal</i>	1,5 meters
BS Maximum Power Amplifier Power	35 dBm
BS Antenna Gain	16 dBi
MS Antenna Gain	0 dBi
Mobile Terminal Maximum PA power	23 dBm
Operating Temperature	0°C - 40°C

(Sumber : WiMAX Forum, 2006)

Selain spesifikasi *mobile* WiMAX, digunakan juga spesifikasi teknologi *radio over fiber* pada **Tabel 4.2** berikut:

Tabel 4.2 Spesifikasi Teknologi *Radio over Fiber*

Parameter	Nilai
Suhu Referensi (T)	300 K
Rise time transmitter ($\Delta\tau_{\text{source}}$)	16 psec
Rise time receiver ($\Delta\tau_{\text{receiver}}$)	24 psec
RIN (Relative Intensity Noise)	-155 dB/Hz
Panjang gelombang (λ)	$1 \text{ mm} \leq \lambda \leq 1.5 \text{ mm}$
Daya optik rata-rata (P_0)	$0.2 \text{ W} \leq P_0 \leq 0.597 \text{ W}$
Indeks modulasi optik (m)	$0.1 \leq m \leq 0.9$
Gain modulasi laser (G_m)	0.12 mW/mA
Responsivitas detektor (ρ)	0.75 mA/mW

(Sumber : Mohammed, et.al., Juli 2011)

Perhitungan *bandwidth* OFDMA pada *mobile* WiMAX dihitung dengan menggunakan teknik modulasi 64-QAM, jumlah *subcarrier* 512 dan *data rate* 9.5 Mbps pada kanal 5 MHz (WiMAX Forum, 2006).

Laju data tiap *subcarrier* dihitung dengan menggunakan persamaan (2.9):

$$R_{sub} = \frac{R_{tot}}{N}$$

$$R_{sub} = \frac{9.5 \text{ Mbps}}{512} = 0.0186 \text{ Mbps}$$

Durasi tiap *subcarrier* dihitung dengan persamaan (2.10), dengan nilai M pada 64-QAM adalah $2^6 = 64$.

$$T_{sub} = \frac{6}{R_{sub}}$$

$$T_{sub} = \frac{6}{0.0186 \times 10^6} = 323.3684 \mu\text{s}$$

Dibutuhkan *cyclic prefix* untuk mencegah terjadinya *inter-symbol interference* dan *inter-channel interference* pada *subcarrier-subcarrier* yang saling tumpang tindih.

Durasi CP sebesar 12,5% dari durasi *subcarrier*, sehingga :

$$T_{cp} = 0,125 \times T_{sub}$$

$$T_{cp} = 0,125 \times (323.3684 \times 10^{-6}) = 40.4211 \mu\text{s}$$

Sehingga durasi simbol OFDMA menjadi :

$$T_s = T_{sub} - T_{cp}$$

$$T_s = (323.3684 - 40.4211) \times 10^{-6} = 282.9474 \mu\text{s}$$

Bandwidth OFDMA pada *mobile* WiMAX dengan factor *cyclic prefix* 0.125 adalah:

$$B_{sistem} = \frac{2}{T_{sub}} + \frac{N-1}{(1-\alpha_{cp})T_{sub}}$$

$$B_{sistem} = \frac{2}{323.3684 \times 10^{-6}} + \frac{512-1}{(1-0,125)323.3684 \times 10^{-6}} = 1,8109 \text{ MHz}$$

Kanal noise yang digunakan dalam menghitung SNR terdiri dari kanal optik dan kanal *wireless*. Kanal *wireless* terdiri dari *noise* AWGN serta rugi-rugi propagasi ruang bebas. Rugi-rugi ruang bebas untuk frekuensi kerja 2300 MHz adalah:

$$L_{el} = A + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + s + \Delta PL_f + \Delta PL_h$$

$$L_{el} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi f d}{c} \right) + 10 \left(a - bh_b + \frac{c}{h_b} \right) \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + s + 6 \log_{10} \left(\frac{f}{2000} \right) - 10,8 \log_{10} \frac{h}{2}$$

$$L_{el} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi \times 2300 \times 10^6 \times 1000}{3 \times 10^8} \right) + 10 \left(4 - 0.0065 \times 32 + \frac{17.1}{32} \right) \log_{10} \left(\frac{1000}{100} \right) +$$

$$9.6 + 6 \log_{10} \left(\frac{2.3 \times 10^9}{2000} \right) - 10,8 \log_{10} \frac{1.5}{2}$$

$$L_{el} = 190.2536 \text{ dB}$$

Perhitungan *Noise* AWGN membutuhkan parameter OFDMA yang diaplikasikan pada *mobile* WiMAX, yaitu alokasi *bandwidth*. *Bandwidth* sistem adalah sebesar 1.8109 MHz. Sehingga, nilai *noise* AWGN dapat dihitung dengan:

$$[n_{el}^2(t)] = 10 \log_{10}(kT) + 10 \log_{10}(B) + NF$$

$$[n_{el}^2(t)] = 10 \log_{10}(1.38 \times 10^{-23} \times 300) + 10 \log_{10}(1.8109 \times 10^6) + 7$$

$$[n_{el}^2(t)] = -134.2511 \text{ dBm}$$

Nilai *noise* total yang terjadi pada kanal optik bergantung pada 3 jenis *noise*, yaitu *shot noise*, *thermal noise*, dan *relative intensity noise* (RIN).

Shot noise merupakan rugi-rugi yang terjadi akibat adanya adanya foton yang bergerak, nilainya dihitung melalui persamaan (2.3).

$$\langle I_{shot}^2 \rangle = 2qI_D B$$

I_D adalah arus yang terdeteksi oleh *receiver*, besarnya ditentukan oleh daya masukan RF, daya rata-rata laser, serta sensitivitas detektor, yaitu:

$$I_D = \Re P(t)$$

$$I_D = \Re [1 + ms(t)] P_0$$

$$s(t) = \sqrt{2 P_{RF,in}}$$

Untuk $P_0 = 0.5 \text{ W}$, $m = 0.5$, $\Re = 0.75 \text{ mA/mW}$, dan $P_{RF,in} = 35 \text{ dBm}$, maka:

$$I_D = 0.75 \left[1 + 0.5 \sqrt{2 \times \left(10^{\frac{35}{10}} / 1000 \right)} \right] 0.5$$

$$I_D = 0.8465 \text{ A}$$

Bandwidth yang digunakan dalam analisis SNR adalah *bandwidth* sinyal RF, yaitu *bandwidth* OFDMA pada *mobile* WiMAX sebesar 5 MHz. Untuk panjang serat optik 10 km, maka:

$$\langle I_{shot}^2 \rangle = 2qI_D B$$

$$\langle I_{shot}^2 \rangle = 2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 0.8465 \times 1.8109 \times 10^6$$

$$\langle I_{shot}^2 \rangle = 4.905 \times 10^{-13} \text{ (A}^2\text{)}$$

Thermal noise merupakan rugi-rugi yang terjadi akibat munculnya panas di dalam saluran, nilainya dihitung melalui persamaan (2.4). Untuk panjang serat optik 10 km, maka:

$$\langle I_{th}^2 \rangle = \frac{4kTB}{R_L}$$

$$\langle I_{th}^2 \rangle = \frac{4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300 \times 1.8109 \times 10^6}{50}$$

$$\langle I_{th}^2 \rangle = 5.9977 \times 10^{-16} \text{ (A}^2\text{)}$$

RIN merupakan rugi-rugi yang diakibatkan ketidaklinieran laser, nilainya dihitung melalui persamaan (2.1). Untuk koefisien RIN = -155 dB/Hz, dan panjang serat optik 10 km, maka:

$$\langle I_{RIN}^2 \rangle = \sqrt{P_{RIN} \times I_D^2 \times B}$$

$$P_{RIN} \text{ (A}^2\text{/Hz)} = 10^{\frac{P_{RIN} \text{ (dB}^2\text{/Hz)}}{10}}$$

$$P_{RIN} \text{ (A}^2\text{/Hz)} = 10^{\frac{-155}{10}} = 3.1623 \times 10^{-16}$$

$$\langle I_{RIN}^2 \rangle = \sqrt{3.1623 \times 10^{-16} \times 0.8465^2 \times 1.8109 \times 10^6}$$

$$\langle I_{RIN}^2 \rangle = 2.026 \times 10^{-5} \text{ (A}^2\text{)}$$

Total *noise* dalam saluran optik adalah:

$$[n_{op}^2(t)] = \langle I_{shot}^2 \rangle + \langle I_{RIN}^2 \rangle + \langle I_{th}^2 \rangle$$

$$[n_{op}^2(t)] = 4.905 \times 10^{-13} + 5.9977 \times 10^{-16} + 2.026 \times 10^{-5}$$

$$[n_{op}^2(t)] = 2.026 \times 10^{-5} \text{ A}^2$$

Selain *noise* tersebut, terdapat rugi-rugi optik di sepanjang saluran transmisi. Rugi-rugi optik dinyatakan dengan (2.2):

$$L_{op} = 2(n_c l_c + n_s l_s + \alpha L)$$

Jumlah konektor untuk saluran tanpa penguat adalah 2, dengan koefisien rugi-rugi konektornya adalah 0.5 dB, sedangkan jumlah sambungan ditentukan dengan:

$$n_s = \frac{\text{panjang saluran}}{\text{panjang kabel tiap rol}} - 1$$

Untuk panjang kabel tiap rol = 5 km, maka jumlah sambungan untuk panjang saluran 10 km adalah 1 buah. Koefisien rugi-rugi sambungan adalah 0.5 dB. Koefisien redaman bergantung pada panjang gelombang yang digunakan. Untuk $\lambda = 1550$ nm, $\alpha = 0.2$ dB/km sedangkan untuk $\lambda = 1310$ nm, $\alpha = 0.5$ dB/km

Untuk $\lambda = 1310$ nm dan panjang saluran optik 10 km nilai *losses* optiknya adalah:

$$L_{op} = 2(1 \times 0.5 + 2 \times 0.25 + 0.5 \times 10)$$

$$L_{op} = 12 \text{ dB}$$

Nilai SNR dapat dihitung melalui persamaan (2.19), yaitu

$$SNR = \frac{m^2 I_D^2 P_{RF, in} 10^{(-L_{op}/10)}}{[n_{op}^2(t)] + \left(10^{(n_{el}^2(t)/10)} x \left(\frac{10^{(L_{el})/10}}{10^{(G_{op})/10}} \right)^2 \right)}$$

$$SNR = \frac{0.5^2 x 0.8465^2 x 3.162 x 10^{-\left(\frac{12}{10}\right)}}{2.026 x 10^{-5} + \left(10^{(-134.2511)/10} x \left(\frac{10^{-\frac{190.2536}{10}}}{\frac{20}{10^{10}}} \right)^2 \right)}$$

$$SNR = \frac{3.574 x 10^{-2}}{2.026 x 10^{-5}} = 17.64 x 10^2$$

$$SNR (dB) = 10 \log_{10}(10.61 x 10^2) = 32.465 dB$$

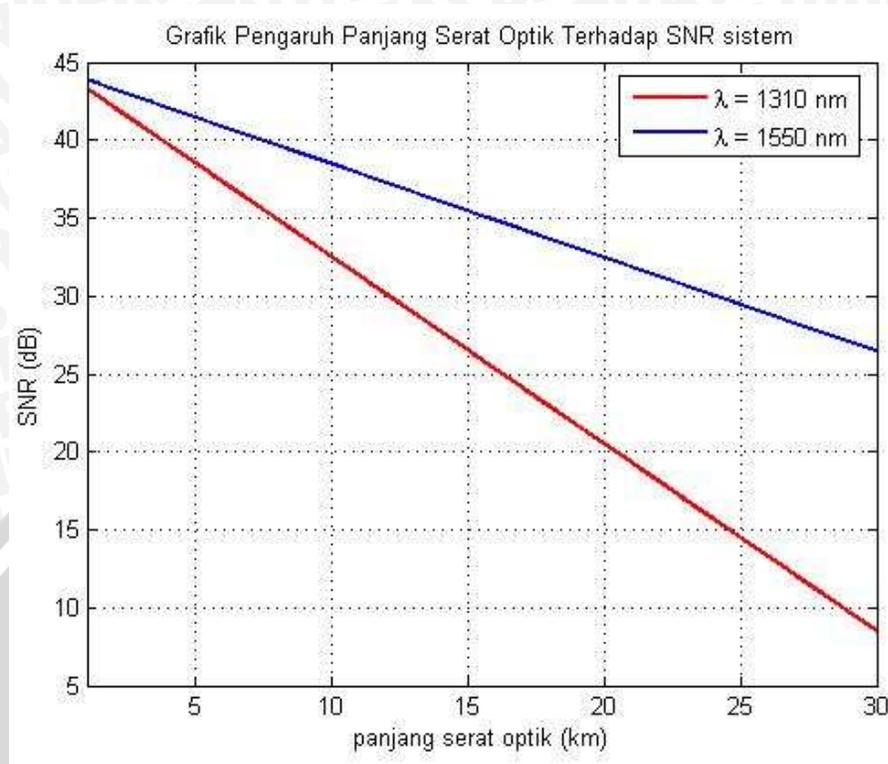
Perhitungan SNR untuk panjang saluran optik ditentukan dengan cara yang sama.

Hasil perhitungan disajikan dalam **Tabel 4.3**.

Tabel 4.3 Hasil Analisis SNR

Panjang serat optik (km)	SNR _{sistem} (dB)	
	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
1	42.4658	43.0658
5	38.4658	41.4658
10	32.4658	38.4658
15	26.4658	35.4658
20	20.4658	32.4658
25	14.4658	29.4658
30	8.465801	26.4658

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2012)



Gambar 4.2 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik Dengan SNR_{sistem}
(Sumber: Hasil Perhitungan, 2012)

Gambar 4.2 memperlihatkan bahwa pada panjang gelombang 1310 nm, dengan panjang serat optik 1 km nilai SNR_{sistem} adalah 42.4658 dB, sedangkan untuk panjang serat optik 30 km, nilai SNR_{sistem} adalah 8.465801 dB, sehingga untuk transmisi dengan panjang gelombang yang sama, semakin panjang serat optik yang digunakan, nilai SNR_{sistem} akan semakin kecil, karena *losses* yang terjadi dalam proses transmisi semakin besar. Panjang serat optik berbanding lurus dengan nilai *losses* optik sebagaimana terlihat pada persamaan (2.2).

Pada panjang serat optik 30 km, nilai SNR_{sistem} untuk panjang gelombang 1310 nm adalah 8.465801 dB sedangkan untuk panjang gelombang 1550 nm nilai SNR_{sistem} adalah 26.4658 dB. Hal ini menyatakan bahwa pada panjang serat optik yang sama, nilai SNR_{sistem} untuk panjang gelombang 1310 nm lebih kecil jika dibandingkan dengan panjang gelombang 1550 nm karena nilai L_{op} yang dihasilkan panjang gelombang 1310 nm lebih kecil jika dibandingkan dengan L_{op} untuk panjang gelombang 1550 nm. Hal ini sesuai dengan persamaan matematis rugi-rugi optik L_{op} di mana nilai koefisien redaman untuk panjang gelombang 1550 nm adalah 0.2 dB/km lebih kecil dibandingkan koefisien redaman untuk untuk panjang gelombang 1310 nm yaitu 0.5 dB/km

Nilai SNR_{sistem} tertinggi untuk sistem dalam skripsi ini adalah 43.0658 dB yang terjadi ketika panjang serat optik 1 km dengan panjang gelombang 1550 nm. Sedangkan nilai SNR_{sistem} terendah adalah 8.465801 dB yang terjadi ketika panjang serat optik 30 km dengan panjang gelombang 1310 nm.

4.2 Analisis Kapasitas Kanal Saluran Serat Optik Teknologi *Radio over Fiber* dengan Penerapan OFDMA

Perhitungan analisis kapasitas kanal sistem menggunakan teorema Shannon yang terdapat pada persamaan (2.21). Untuk memperoleh kapasitas kanal sistem maka dibutuhkan parameter SNR_{sistem} yang terdapat pada **Tabel 4.3**, serta *bandwidth* sinyal pada saluran optik. Nilai *bandwidth* sinyal dalam saluran optik, untuk panjang serat optik 10 km dan panjang gelombang 1310 nm ditentukan dengan:

$$\Delta\tau_{mat} = D_m \times \Delta\lambda \times L$$

$$\Delta\tau_{mat} = 14 \times 0.1 \times 10 = 14$$

$$\Delta\tau_{sistem} = \sqrt{(\Delta\tau_{sumber})^2 + (\Delta\tau_{receiver})^2 + (\Delta\tau_{mat})^2}$$

$$\Delta\tau_{sistem} = \sqrt{(16)^2 + (25)^2 + (14)^2} = 32.82 \text{ psec}$$

$$BW_{sig} = \frac{0.44}{\Delta\tau_{sistem} \times L}$$

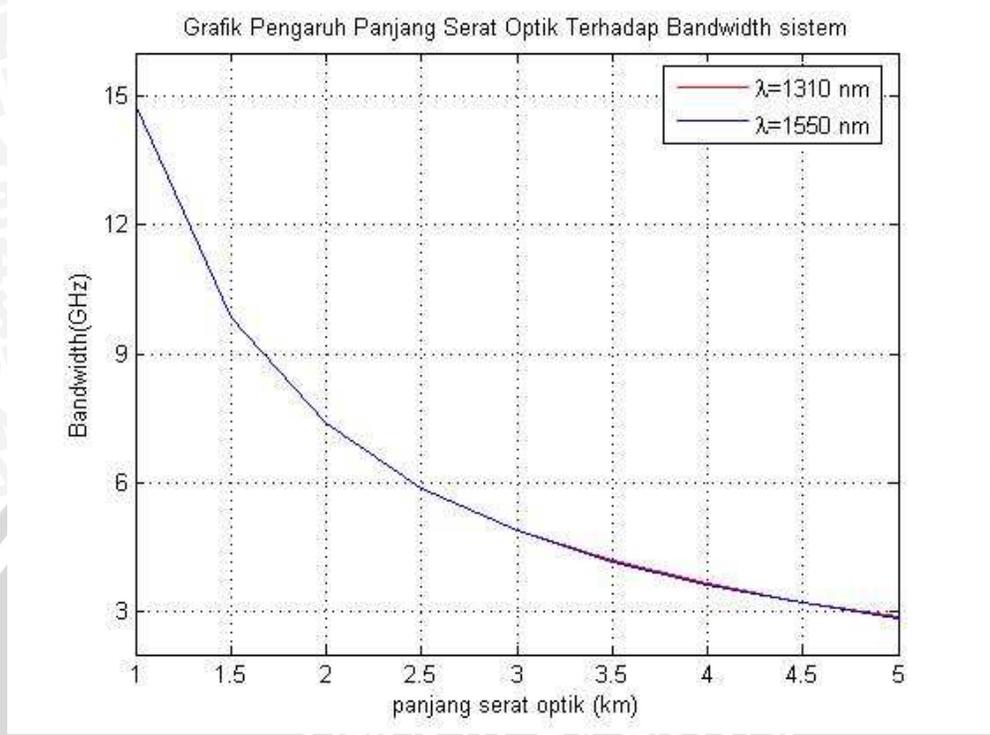
$$BW_{sig} = \frac{0.44}{32.82 \times 10} = 1.34 \text{ GHz}$$

Nilai *bandwidth* sinyal untuk berbagai panjang serat optik serta panjang gelombang yang digunakan ditampilkan pada **Tabel 4.4**

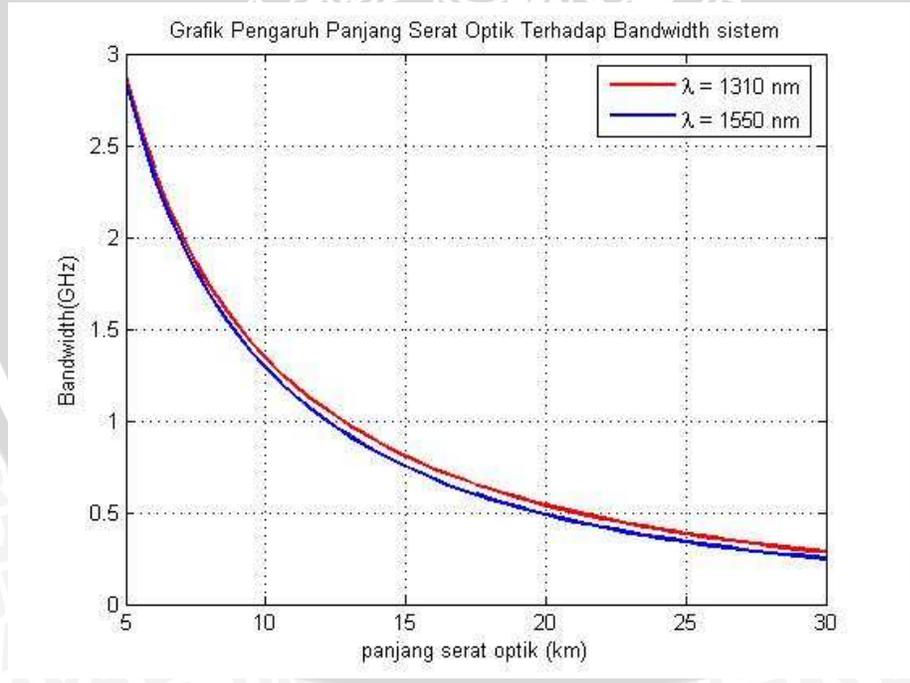
Tabel 4.4 Hasil Analisis *Bandwidth* Kanal Optik

Panjang serat optik (km)	Bandwidth (GHz)	
	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
1	14.8075143	14.7997223
5	2.885634	2.850226
10	1.340741	1.286352
15	0.806762	0.749615
20	0.539157	0.487447
25	0.383516	0.339515
30	0.28518	0.248552

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2012)



(a)



(b)

Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap *Bandwidth* Sistem untuk (a) L = 1-5 km (b) L = 5-30 km (Sumber: Hasil Perhitungan, 2012)

Bandwidth sistem pada panjang gelombang 1310 nm lebih besar dibandingkan dengan *bandwidth* sistem pada panjang gelombang 1550 nm, karena pada panjang gelombang 1550 nm, koefisien dispersi materialnya adalah 17 ps/nm.km, lebih besar dibandingkan dengan koefisien dispersi material untuk panjang gelombang 1310 nm yaitu 14 ps/nm.km. Sedangkan untuk panjang gelombang yang sama, semakin besar panjang serat optik yang digunakan, *bandwidth* sistem semakin kecil.

Sehingga kapasitas kanal sistem untuk panjang gelombang 1310 nm dengan $SNR_{sistem} = 32.4658$ dB adalah sebagai berikut :

$$C = BW_{sig} \log_2(1 + SNR_{sistem})$$

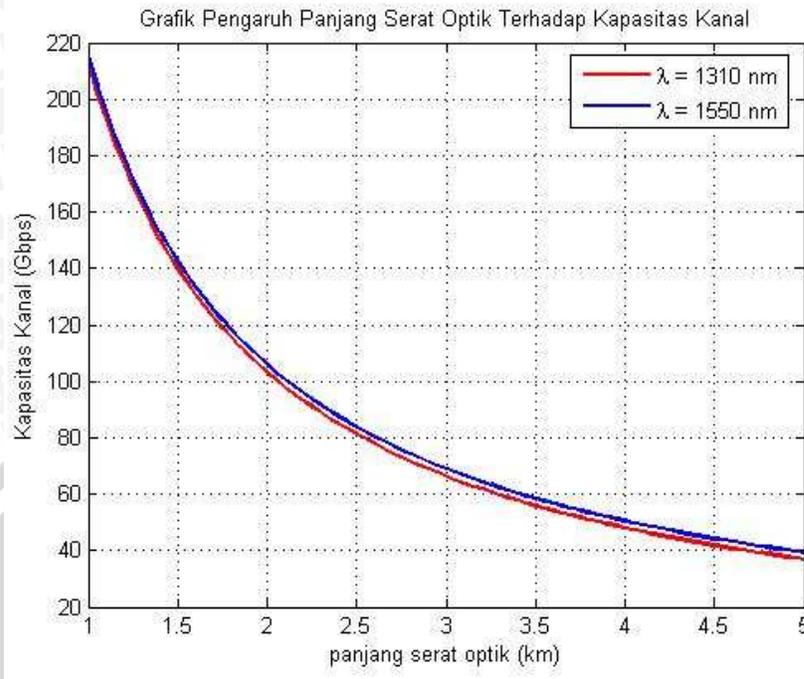
$$C = 1.34 \log_2(1 + 10^{3.24658}) = 14.46 \text{ Gbps}$$

Dengan menggunakan cara yang sama, dapat diperoleh nilai kapasitas kanal sistem untuk panjang gelombang 1550 nm dengan panjang serat optik yang berbeda-beda. Hasil analisis tersebut ditunjukkan pada **Tabel 4.5**. Sedangkan hubungan kapasitas kanal sistem terhadap panjang serat optik ditampilkan pada **Gambar 4.4**

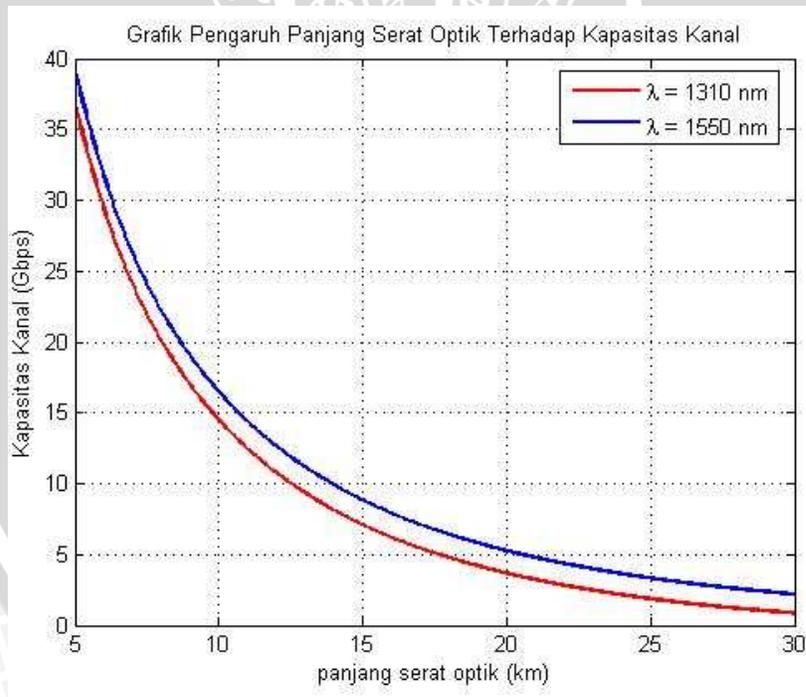
Tabel 4.5 Hasil Analisis Kapasitas Kanal

Panjang serat optik (km)	Kapasitas Kanal (Gbps)	
	$\lambda = 1310$ nm	$\lambda = 1550$ nm
1	208.8883515	211.7280905
5	36.87339975	39.26112981
10	14.46085883	16.43734723
15	7.09547622	8.831886242
20	3.672467117	5.257465456
25	1.86240249	3.323834924
30	0.8567678	2.186013791

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2012)



(a)



(b)

Gambar 4.4 Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap Kapasitas Kanal Sistem untuk (a) $L = 1-5$ km (b) $L = 5-30$ km (Sumber : Hasil Perhitungan, 2012)

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa nilai kapasitas kanal berubah secara logaritmik terhadap perubahan panjang serat optik yang digunakan karena SNR_{sistem} berubah secara logaritmik terhadap panjang serat optik, sesuai dengan persamaan (2.19). Kapasitas kanal sistem untuk panjang serat optik 1 km dengan panjang gelombang 1310 nm adalah 208.89 Gbps sedangkan untuk panjang serat optik 30 km adalah 0.86 Gbps. Semakin besar panjang serat optik yang digunakan, kapasitas kanal sistem semakin kecil, karena nilai SNR_{sistem} serta *bandwidth* untuk serat optik yang lebih panjang juga semakin kecil. Sedangkan kapasitas kanal untuk panjang serat optik 30 km, dengan panjang gelombang 1310 nm adalah 0.86 Gbps sedangkan panjang gelombang 1550 nm 2.186 Gbps. Untuk panjang serat optik yang sama, panjang gelombang 1310 nm memiliki kapasitas kanal yang lebih besar dibandingkan dengan panjang gelombang 1550 nm, perbedaan nilai ini disebabkan perbedaan nilai SNR_{sistem} dan *bandwidth*. Untuk panjang gelombang 1310 nm, SNR_{sistem} lebih kecil, akibat dari koefisien redaman optik yang lebih besar, tetapi *bandwidth* sistem lebih besar karena koefisien dispersi panjang gelombang 1310 nm lebih kecil.

Nilai kapasitas kanal tertinggi adalah 211.73 Gbps dengan panjang serat optik 1 km dan panjang gelombang 1550 nm, sedangkan nilai kapasitas kanal terendah adalah 0.86 Gbps dengan panjang serat optik 30 km dan panjang gelombang 1310 nm.

4.3 Analisis *Bit Rate* Melalui Kanal Optik Untuk Teknologi *Radio over Fiber* dengan Penerapan OFDMA

Bit rate mobile WiMAX yang menggunakan OFDMA telah ditetapkan oleh WiMAX Forum, tetapi untuk penerapan *mobile* WiMAX dengan basis OFDMA pada *radio over fiber*, belum ada perhitungan *bit rate* dalam saluran optiknya.

Perhitungan *bit rate* dihitung dengan persamaan (2.23), sehingga untuk panjang gelombang 1310 nm dan panjang serat optik 10 km didapatkan:

$$\Delta\tau_{mat} = D_m \times \Delta\lambda \times L$$

$$\Delta\tau_{mat} = 14 \times 0.1 \times 10 = 14$$

$$\Delta\tau_{sistem} = \sqrt{(\Delta\tau_{sumber})^2 + (\Delta\tau_{receiver})^2 + (\Delta\tau_{mat})^2}$$

$$\Delta\tau_{sistem} = \sqrt{(16)^2 + (25)^2 + (14)^2} = 32.82 \text{ psec}$$

$$B_{R(NRZ)} = \frac{0.7}{\Delta\tau_{sistem}}$$

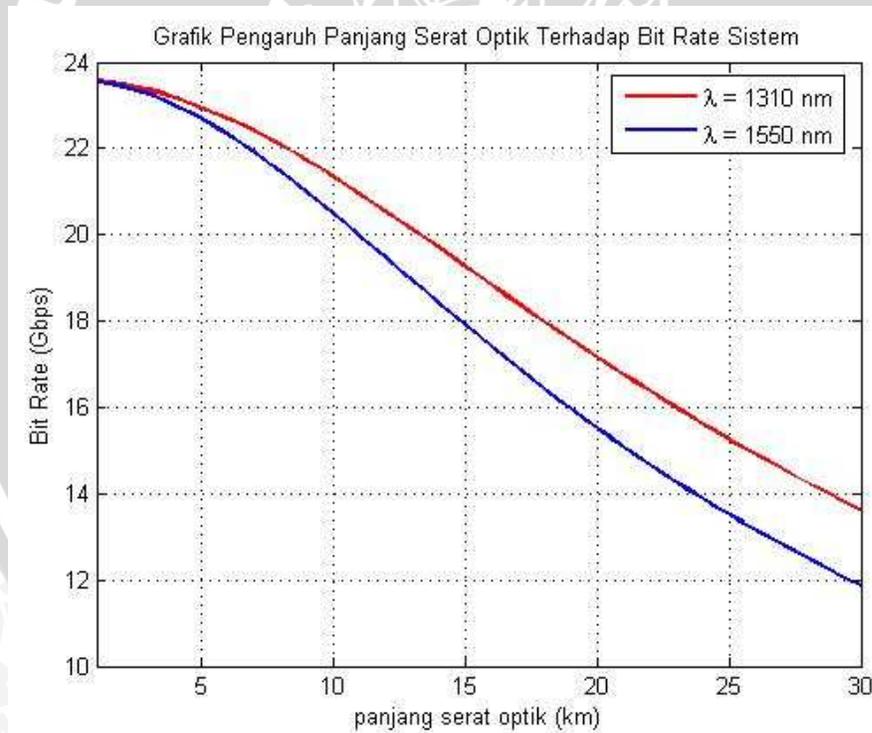
$$B_{R(NRZ)} = \frac{0.7}{32.82} = 21.33 \text{ Gbps}$$

Perhitungan ini juga dilakukan untuk panjang serat optik yang berbeda-beda dengan nilai panjang gelombang 1550 nm. Hasil analisisnya ditampilkan pada **Tabel 4.6**

Tabel 4.6 Hasil Analisis *Bit Rate*

Panjang serat optik (km)	<i>Bit Rate</i> (Gbps)	
	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
1	23.55741	23.54501
5	22.9539	22.67225
10	21.32997	20.46469
15	19.25229	17.88854
20	17.15501	15.50967
25	15.25348	13.50343
30	13.61085	11.8627

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2012)



Gambar 4.5 Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap *Bit Rate* Sistem (Sumber: Hasil Perhitungan, 2012)

Gambar 4.5 menunjukkan hubungan antara panjang serat optik yang digunakan dengan *bit rate* dalam kanal optik. Ketika sistem menggunakan panjang serat optik 5 km dengan panjang gelombang 1550 nm, nilai *bit rate* sistem 22.67 Gbps, sedangkan

untuk panjang serat optik 30 km, *bit rate* sistem bernilai 11.86 Gbps. Panjang serat optik berbanding terbalik dengan *bit rate* sistem dalam kanal optik, semakin besar panjang serat optik yang digunakan, semakin kecil *bit rate* sistem dalam saluran optik. Kondisi ini dikarenakan semakin besar panjang serat optik yang digunakan, nilai dispersi material sistem semakin besar, sehingga *bit rate* semakin kecil.

Untuk panjang gelombang 1310 nm dengan panjang serat optik 1 km memiliki *bit rate* 23.55 Gbps, sedangkan panjang gelombang 1550 nm memiliki *bit rate* 23.54 Gbps. Kondisi ini menyatakan bahwa untuk nilai panjang serat optik yang sama, panjang gelombang 1310 nm memiliki *bit rate* yang lebih tinggi daripada panjang gelombang 1550 nm, karena panjang gelombang 1310 nm memiliki nilai koefisien dispersi yang lebih kecil dibandingkan dengan koefisien dispersi pada panjang gelombang 1550 nm.

Nilai *bit rate* tertinggi adalah 23.55 Gbps dengan panjang serat optik 1 km dan panjang gelombang 1310 nm, sedangkan nilai kapasitas kanal terendah adalah 11.86 Gbps dengan panjang serat optik 30 km dan panjang gelombang 1550 nm.

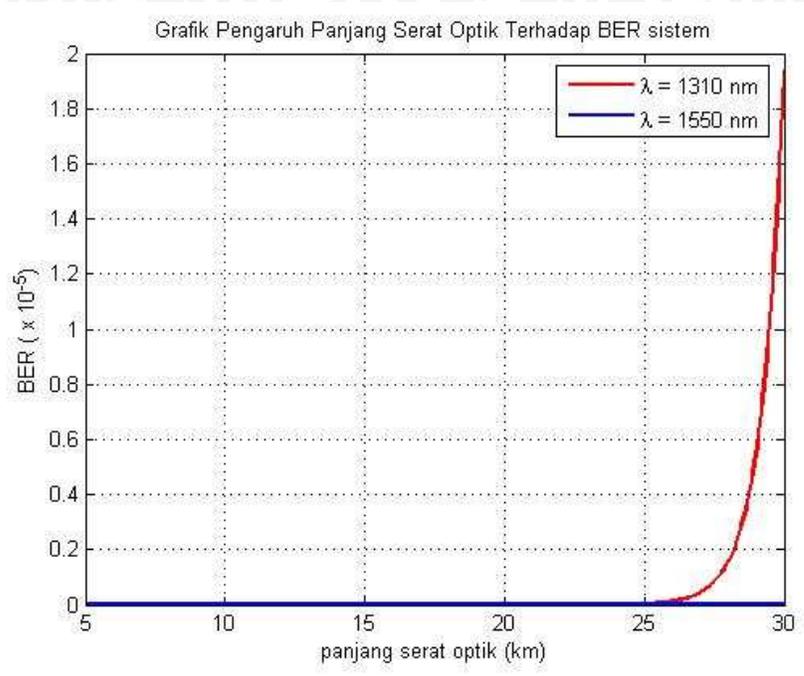
4.4 Analisis *Bit Error Rate* Teknologi *Radio over Fiber* dengan Penerapan OFDMA

Bit Error Rate (BER) merupakan perbandingan nilai bit yang salah saat proses transmisi, dihitung di sisi *receiver*. BER diharapkan memiliki nilai yang sekecil mungkin agar diperoleh kualitas sinyal yang baik. Oleh karena itu, BER sistem tergantung pada ukuran kualitas sinyal (SNR_{sistem}) yang diterima. Berdasarkan perhitungan terhadap SNR_{sistem} untuk panjang serat optik 10 km $SNR_{sistem} = 16.43$ dB, sehingga diperoleh BER sistem sesuai dengan persamaan (2.24) sebesar :

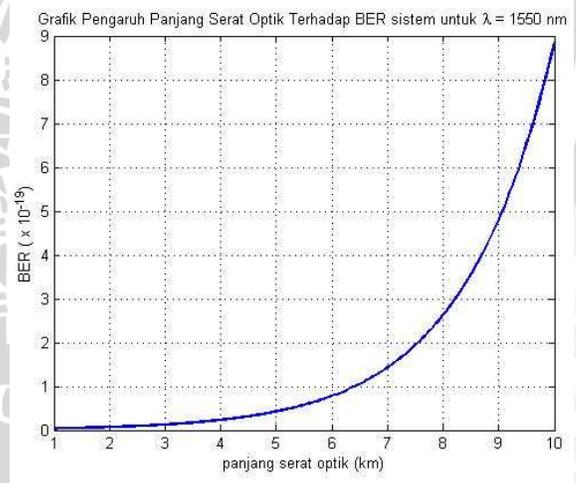
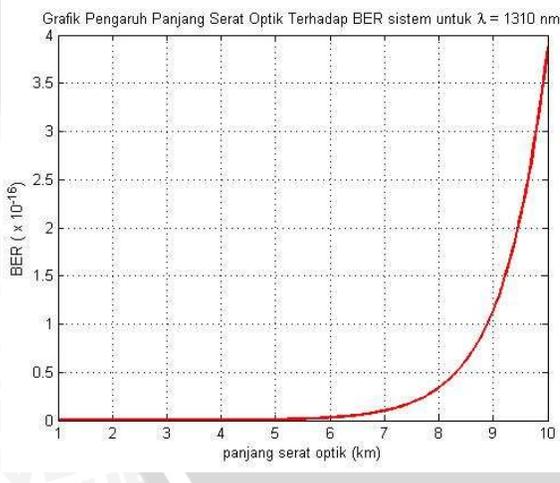
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{SNR_{sistem}}$$

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{16.43} = 4.16 \times 10^{-13}$$

Dengan menggunakan cara yang sama, dapat diperoleh nilai BER untuk panjang serat optik yang beragam serta untuk masing-masing panjang gelombang yang digunakan.. Hasil analisis tersebut ditunjukkan pada **Tabel 4.7**. Sedangkan hubungan BER sistem terhadap panjang serat optik ditampilkan pada **Gambar 4.6**.



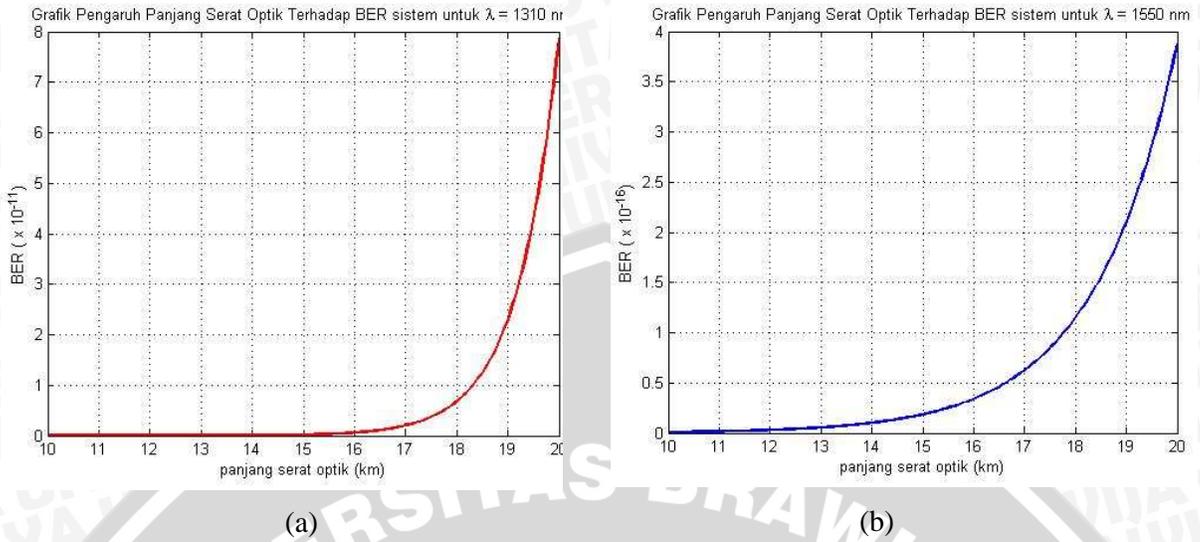
(b)
Gambar 4.6 Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap BER Sistem
 Untuk (a) $L = 1-5$ km (b) $5 - 30$ km
 (Sumber : Hasil Perhitungan, 2012)



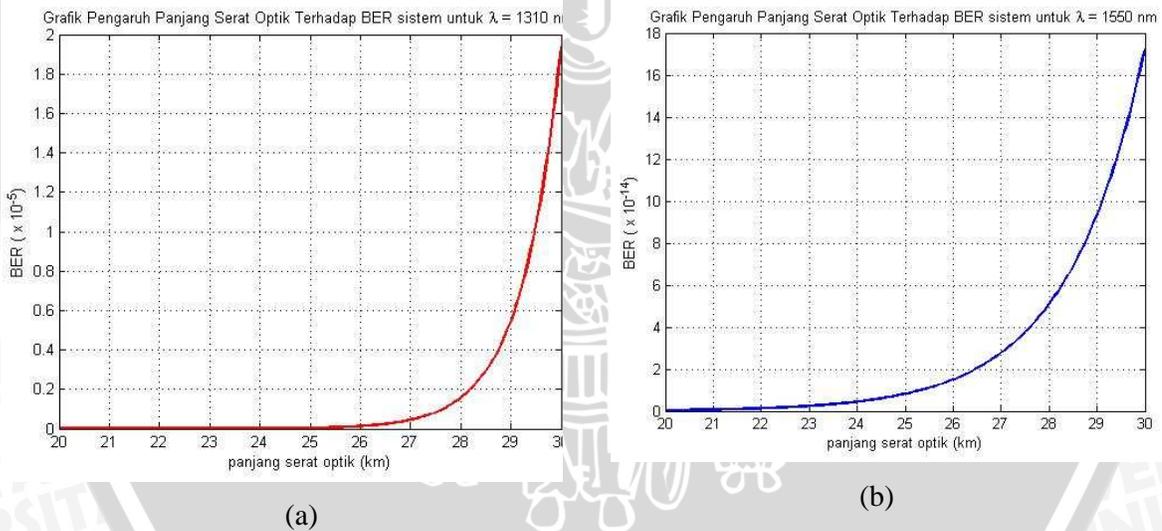
(a)

(b)

Gambar 4.7 Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap BER Sistem dengan panjang serat optik 1-10 km
 Untuk (a) $\lambda = 1310$ nm (b) $\lambda = 1550$ nm
 (Sumber : Hasil Perhitungan, 2012)



Gambar 4.8 Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap BER Sistem dengan panjang serat optik 10-20 km Untuk (a) $\lambda = 1310$ nm (b) $\lambda = 1550$ nm (Sumber : Hasil Perhitungan, 2012)



Gambar 4.9 Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap BER Sistem dengan panjang serat optik 20-30 km Untuk (a) $\lambda = 1310$ nm (b) $\lambda = 1550$ nm (Sumber : Hasil Perhitungan, 2012)

Untuk panjang gelombang 1310 nm dengan panjang serat optik 30 km, nilai BER_{sistem} adalah 1.936×10^{-05} , sedangkan untuk panjang gelombang 1550 nm nilai BER_{sistem} adalah 1.726×10^{-13} seperti terlihat pada **Tabel 4.7** dan **Gambar 4.6**. Untuk panjang serat optik yang sama, nilai BER panjang gelombang 1550 nm jauh lebih kecil

jika dibandingkan dengan BER untuk panjang gelombang 1310 nm. Hal ini disebabkan nilai SNR sistem panjang gelombang 1550 nm lebih tinggi.

Untuk panjang serat optik 5 km, dengan panjang gelombang 1310 nm, nilai BER_{sistem} adalah 8.844×10^{-18} , sedangkan untuk panjang serat optik 25 km nilai BER_{sistem} adalah 3.747×10^{-08} . Hal ini menyatakan bahwa nilai BER berbanding lurus dengan panjang serat optik. Semakin besar panjang serat optik yang digunakan, semakin besar BER yang dihasilkan.

Nilai BER yang diharapkan adalah nilai BER yang kecil, karena nilai BER yang kecil berarti hanya sedikit kesalahan yang terjadi dalam transmisi, dengan kata lain data yang diterima semakin menyerupai data yang dikirimkan. Nilai BER_{sistem} terbaik adalah 8.41×10^{-21} untuk panjang gelombang 1550 nm dan panjang serat optik 1 km, sedangkan nilai BER tertinggi untuk sistem ini adalah 1.936×10^{-05} . Nilai BER_{sistem} ini masih di bawah nilai BER maksimum untuk *mobile WiMAX* yaitu 10^{-3} maka nilai BER_{sistem} ini masih dapat ditoleransi.

