

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis performansi OFDMA pada bab ini dilakukan berdasarkan pada teori dan persamaan yang telah dijelaskan pada Bab II yang meliputi daya pada penerima optik, *link margin*, SNR, efisiensi *bandwidth* dan BER sistem dengan menggunakan teknik modulasi QPSK. Variabel bebas yang digunakan dalam skripsi ini adalah jarak antara pemancar dan penerima optik yang dihitung mulai 0,5 sampai 5 km dengan dua intensitas sinyal yang berbeda yaitu dengan nilai 0,5 dan 1,0. Hasil analisis disimulasikan menggunakan Matlab 7.0.4.

Untuk mempermudah perhitungan, dengan mengabaikan rugi-rugi optik maka untuk mempermudah proses analisis dan perhitungan digunakan beberapa data sekunder seperti yang ditunjukkan dalam **Tabel 4.1**. Selain itu model sistem yang digunakan pada skripsi ini telah ditunjukkan dalam **Gambar 2.20**.

Tabel 4.1 Spesifikasi sistem FSO

Parameter	Definisi	Nilai
λ	Panjang gelombang	1550 nm
P_t	Daya pancar rata-rata	80 mW = 19,0309 dBm
d_2	<i>Receive aperture</i> diameter	20 cm
θ	Sudut divergensi	2 mrad
T	Temperatur	-40°C sampai 60°C
R_L	Resistansi beban	50 Ω
$\mathfrak{R} = \eta q/h\nu$	Responsivitas InGaAs APD	9 A/W

(Sumber: Ayman Mustafa, 2012)

Nilai link margin dipengaruhi oleh daya pancar, sensitifitas penerima dan rugi-rugi yang terjadi selama proses transmisi. Nilai sensitifitas receiver (S_r) yang baik untuk digunakan adalah sebesar 2 μ W atau -33,01 dBm (Abdul El-Naser dkk, 2009). Sehingga dengan menggunakan EDFA pada penerima dengan penguatan ideal sebesar 25 dB (Michel, 2001) yang meningkatkan sensitivitas penerima (Richard, 2006) maka nilai S_r menjadi -58,01 dBm. Diameter pemancar yang digunakan adalah 2,5 cm dan nilai redaman sistem yang meliputi rugi-rugi optik dan rugi-rugi *pointing* masing-masing diasumsikan 1 dB. Sedangkan faktor redaman FSO yang digunakan pada kondisi cuaca cerah sesuai yang disebutkan dalam ITU-R.1817 ditunjukkan dalam **Tabel 4.2**.



Tabel 4.2 Nilai faktor redaman atmosfer pada kondisi cuaca cerah

Visibilitas (km)	Faktor redaman atmosfer a (dB/km)
20	0,54
23	0,47
50	0,19

(Sumber: ITU-R P.1817:2007-2012)

Sesuai dengan standar LTE release 8 pada Bab II, maka teknik modulasi yang digunakan adalah QPSK dengan jumlah bit dalam 1 simbol adalah 2 bit. Kanal *bandwidth* yang digunakan adalah 20 MHz dengan jumlah subcarrier 1200 dan 2048 simbol FFT. Sehingga dengan mengasumsikan 11 simbol per 1 ms *subframedan* dengan faktor *cyclic prefix* 7,14% dapat dihitung nilai peak bit rate:

$$\text{Peak bit rate} = \frac{\text{bit/symbol}}{\text{Hz}} \times N \times \frac{\text{jumlah simbol persubframe}}{1 \text{ ms}} (1 - \alpha_{cp})$$

$$\text{Peak bit rate} = \frac{2}{\text{Hz}} \times 1200 \times \frac{11}{1 \text{ ms}} (1 - 0.0714) = 24,5150 \text{ Mbps}$$

4.1 Analisis *Link Margin* Teknologi *Free Space Optic*

Nilai *link margin* sistem dipengaruhi oleh rugi-rugi yang terjadi saat transmisi sinyal dan turbulensi atmosfer. Rugi-rugi yang terjadi dapat dihitung sebagai berikut.

- Rugi-rugi Atmosfer

Nilai redaman cuaca pada kondisi cuaca cerah dengan faktor atenuasi menurut ITU-R P.1817 dengan mengacu pada nilai redaman sebesar 0,19 dB/km saat kondisi cuaca cerah dengan visibilitas 50 km untuk jarak 5 km menggunakan rumus (2.8) adalah sebagai berikut.

$$L_{\text{clear_air}} = -a_{\text{clear_air}} \times L$$

$$L_{\text{clear_air}} = -0,19 \times 5$$

$$L_{\text{clear_air}} = -0,95 \text{ dB}$$

Dengan cara yang sama dapat dihitung besarnya daya terima untuk visibilitas 20 km ($a=0,54$ dB/km) dan visibilitas 23 km ($a =0,47$ dB/km).

- Rugi-rugi Geometrik

Rugi-rugi geometrik untuk jarak 5 km dihitung sebagai berikut ini.

$$L_{\text{Geo}}(\text{dB}) = 10 \log \left[\frac{d_2}{d_1 + 100\theta L} \right]^2$$

$$L_{\text{Geo}}(\text{dB}) = 10 \log \left[\frac{20}{2,5 + 100 \times 2 \times 5} \right]^2$$

$$L_{Geo}(\text{dB}) = 10 \log \left[\frac{20}{2,5 + 1000} \right]^2$$

$$L_{Geo}(\text{dB}) = 10 \log 0,0004 = -34,0011 \text{ dB}$$

Dengan cara yang sama dapat dihitung besarnya daya terima untuk jarak mulai 1 sampai 5 km.

- Rugi-rugi sintilasi

Rugi-rugi sintilasi disebabkan oleh variasi suhu pada atmosfer yang menghasilkan indeks bias fluktuasi (C_n^2). Nilai C_n^2 yang digunakan adalah $2 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ yaitu pada kondisi turbulensi terburuk dan nilai $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{1550 \times 10^{-9}} = 4.0516 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$. Sehingga nilai variansi sintilasi untuk jarak 5 km dapat dihitung sebagai berikut

$$\sigma_x^2 = 1,23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$$

$$\sigma_x^2 = 1,23 \times 2 \times 10^{-13} \times (4.0516 \times 10^6)^{7/6} (5 \times 10^3)^{11/6}$$

$$\sigma_x^2 = 76,0815 \text{ dB}^2$$

$$\sigma_x = -8,7225 \text{ dB}$$

sehingga nilai losses akibat sintilasi sebesar

$$L_{sint} = 2 \times \sigma_x = 2 \times -8,7225 = -17,445 \text{ dB}$$

Dari perhitungan rugi-rugi transmisi yang telah dilakukan dan dengan mengasumsikan rugi-rugi sistem yang terdiri dari rugi-rugi optik dan pointing masing-masing bernilai 1 dB, maka nilai link margin untuk jarak 5 km pada visibilitas 50 km dengan rugi-rugi sistem meliputi rugi-rugi optik dan rugi-rugi pointing dihitung sebagai berikut.

$$M_{link} = P_t - S_r + L_{sistem} + L_{Geo} + L_{clear\ air} + L_x$$

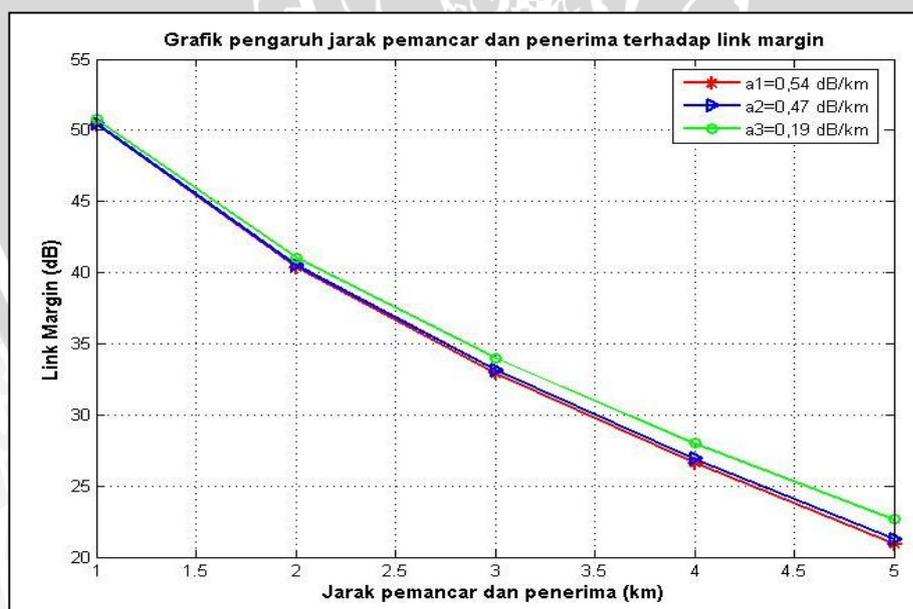
$$M_{link} = 19,0309 + 58,01 - 1 - 1 - 34,0011 - 0,95 - 17,445$$

$$M_{link} = 22,6449 \text{ dB}$$

Dari hasil perhitungan menggunakan rumus diatas maka untuk jarak 1 sampai 5 km dan visibilitas 20 km, 23 km serta 50 km diperoleh hasil seperti **Tabel 4.3** dan **Gambar 4.1** berikut ini.

Tabel 4.3. Nilai *Link Margin* Sistem untuk Beberapa Kondisi Vilibilitas Pada Cuaca Cerah

L (km)/ V (km)	Parameter						
	P_t (dBm)	S_r (dBm)	L_{Geo} (dB)	$L_{clear\ air}$ (dB)	L_x (dB)	L_{sistem} (dB)	M_{link} (dB)
1/20	19,0309	-58,01	-20,1079	-0,19	-3,9898	-2	50,4032
1/23	19,0309	-58,01	-20,1079	-0,47	-3,9898	-2	50,4731
1/50	19,0309	-58,01	-20,1079	-0,54	-3,9898	-2	50,7532
2/20	19,0309	-58,01	-26,0747	-0,38	7,5317	-2	40,3545
2/23	19,0309	-58,01	-26,0747	-0,94	7,5317	-2	40,4945
2/50	19,0309	-58,01	-26,0747	-1,08	7,5317	-2	41,0545
3/20	19,0309	-58,01	-29,5785	-0,57	10,9222	-2	32,9201
3/23	19,0309	-58,01	-29,5785	-1,41	10,9222	-2	33,1302
3/50	19,0309	-58,01	-29,5785	-1,62	10,9222	-2	33,9702
4/20	19,0309	-58,01	-32,0683	-0,76	14,2179	-2	26,6028
4/23	19,0309	-58,01	-32,0683	-1,88	14,2179	-2	26,8828
4/50	19,0309	-58,01	-32,0683	2,16	14,2179	-2	28,0028
5/20	19,0309	-58,01	-34,0011	-0,95	17,4449	-2	20,8948
5/23	19,0309	-58,01	-34,0011	-2,35	17,4449	-2	21,2449
5/50	19,0309	-58,01	-34,0011	-2,70	17,4449	-2	22,6448

**Gambar 4.1.** Grafik Pengaruh Jarak Terhadap *Link Margin* untuk Beberapa Kondisi Vilibilitas Pada Cuaca Cerah

Dari hasil perhitungan dan analisis seperti yang terlihat dalam **Tabel 4.3** dan **Gambar 4.1** dapat diketahui bahwa pada visibilitas 50 km dan jarak 1 km mempunyai *link margin* sebesar 50,7532 dB sedangkan pada jarak 5 km daya yang diterima penerima optik sebesar 22,6448dB, hal ini karena nilai *link margin* sistem dipengaruhi oleh besarnya rugi-rugi yang terjadi saat pentransmisian sinyal optik di atmosfer yang meliputi rugi-rugi geometrik, rugi-rugi sistem yang meliputi rugi optik dan rugi pointing, rugi-rugi atmosfer,serta rugi-rugi sintilasi yang tetap ada dalam kondisi cuaca cerah.

Rugi-rugi geometrik terjadi akibat penyimpangan *beam* optik yang akan bertambah besar jika jarak antara pemancar dan penerima semakin besar pula, hal ini akan menyebabkan jumlah *beam* optik yang ditangkap lensa penerima akan semakin sedikit. Selain itu rugi-rugi atmosfer yang disebabkan oleh penyerapan *aerosol* juga dipengaruhi oleh jarak antara pemancar dan penerima. Semakin jauh jarak pemancar dan penerima optik maka penyerapan sinyal optik oleh atmosfer akan semakin besar pula.

Rugi-rugi sintilasi juga mempengaruhi besarnya *link margin* sistem FSO. Walaupun sistem dalam kondisi cuaca cerah, sintilasi yang disebabkan oleh perubahan suhu tidak dapat dihindarkan, sehingga hal ini dapat menyebabkan fluktuasi indeks bias partikel yang ada di udara. Nilai rugi akibat sintilasi dapat dihitung dengan dua kali variansinya. Sedangkan nilai variansi ini berbanding lurus dengan jarak pemancar dan penerima optik. Sehingga dari beberapa faktor rugi-rugi yang mempengaruhi ini maka dapat dilihat pada grafik **Gambar 4.1** bahwa pada visibilitas yang sama semakin jauh jarak pemancar dan penerima, maka nilai *link margin* akan berkurang.

Pada kondisi cuaca cerah terdapat beberapa nilai visibilitas yang berbeda. Semakin jauh visibilitas memiliki koefisien redaman atmosfer yang semakin kecil, sehingga nilai rugi-rugi yang terjadi juga semakin kecil pula. Pada **Gambar 4.1** dapat dilihat bahwa untuk jarak 1 km nilai pada visibilitas 50 km nilai *link margin* sistem sebesar 50,7532 dB, dan pada visibilitas 20 km nilainya adalah 50,4032 dB. Sehingga secara keseluruhan visibilitas 50 km dengan koefisien redaman 19 dB/km mempunyai nilai *link margin* lebih besar daripada kondisi visibilitas yang lainnya. *Link margin* terbesar dengan daya pancar rata-rata sebesar 80 mW adalah pada saat visibilitas 50 km dengan jarak 1 km yaitu senilai 50,7532 dB.

4.2 Daya Terima Sistem *Free Space Optic*

Pada proses transmisi FSO dalam kondisi cuaca cerah juga dipengaruhi oleh turbulensi atmosfer seperti sintilasi sehingga dapat mengakibatkan fluktuasi pada sinyal terima yang berpengaruh pada kualitas data yang diterima. Nilai parameter pengaruh *scattering* untuk turbulensi lemah α dan turbulensi kuat β untuk jarak 5 km dengan nilai

d sebesar $d = \sqrt{\frac{kd_2^2}{4L}} = \sqrt{\frac{4.0516 \times 10^6 \times (0,2)^2}{4 \times 5 \times 10^3}} = 2,8466$ adalah sebagai berikut:

$$\alpha = \left[\exp \left(\frac{0,49\sigma_x^2}{(1 + 0,18d^2 + 0,56\sigma_x^{12/5})^{7/6}} \right) - 1 \right]^{-1}$$

$$\alpha = \left[\exp \left(\frac{0,49 \times 76,0815}{(1 + 0,18 \times (2,8466)^2 + 0,56 \times (8,7225)^{12/5})^{7/6}} \right) - 1 \right]^{-1}$$

$$\alpha = 5,5489$$

Dan nilai β dapat dihitung sebagai

$$\beta = \left[\exp \left(\frac{0,51\sigma_x^2(1 + 0,69\sigma_x^{12/5})^{-5/6}}{(1 + 0,9d^2 + 0,62d^2\sigma_x^{12/5})^{5/6}} \right) - 1 \right]^{-1}$$

$$\beta = \left[\exp \left(\frac{0,51 \times 76,0815(1 + 0,69 \times 8,7225^{12/5})^{-5/6}}{(1 + 0,9 \times (2,8466)^2 + 0,62(2,8466)^2 \times (8,7225)^{12/5})^{5/6}} \right) - 1 \right]^{-1}$$

$$\beta = 2,7162$$

Maka fluktuasi sinyal terima yang terinduksi *fading* akibat sintilasi pada jarak 5km dengan visibilitas 50 km dan intensitas sinyal $I = 0,5$ yang terjadi dimodelkan dalam fungsi distribusi probabilitas *Gamma-Gamma*- γ dan dapat dihitung sebagai berikut

$$X = f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I)$$

$$X = f(0,5) = \frac{2(5,5489 \times 2,7162)^{\frac{5,5489+2,7162}{2}}}{\Gamma(5,5489)\Gamma(2,7162)} \times 0,5^{\frac{5,5489+2,7162}{2}-1}$$

$$\times K_{5,5489-2,7162}(2\sqrt{5,5489 \times 2,7162} \times 0,5)$$

$$X = f(0,5) = 0,7991$$

Daya terima sistem yang sudah dipengaruhi rugi-rugi *link* dan turbulensi atmosfer dapat dideskripsikan dengan

$$P_r = P_t L_{atm} L_\alpha X + n_{FSO}(t)$$

L_{atm} dan L_α adalah rugi-rugi yang terjadi pada sistem FSO yang dalam skripsi ini meliputi rugi-rugi pada atmosfer, rugi-rugi geometrik dan rugi-rugi sistem. X merupakan nilai fluktuasi sinyal terimayangdimodelkan dalam fungsi distribusi probabilitas γ - γ . Karakteristik AWGN yang terjadi pada link *free space* ($n_{FSO}(t)$) adalah *background radiation noise*, akan tetapi *noise* ini akan dihilangkan pada sisi penerima (Ayman, 2012), sehingga pada skripsi ini nilainya diabaikan dan *noise* yang diperhitungkan adalah *noise* yang ada pada *photodetector* yang akan dibahas pada sub bahasan selanjutnya.

Rugi-rugi total sistem pada jarak 5 km yang terjadi dihitung dengan

$$L_\alpha = L_{geo} + L_{opt} + L_{point} = -34,0011 + (-1) + (-1) = -36,0011 \text{ dB}$$

Dan rugi-rugi atmosfer total yang terjadi sebesar

$$L_{atm} = L_{atmo} + L_{sint} = -0,95 + -17,4449 = 18,395 \text{ dB}$$

Sehingga nilai daya penerima pada jarak 5 km dengan visibilitas 50 km dan intensitas fluktuasi 0,5 dapat dihitung sebagai berikut.

$$P_r = P_t L_{atm} L_\alpha X$$

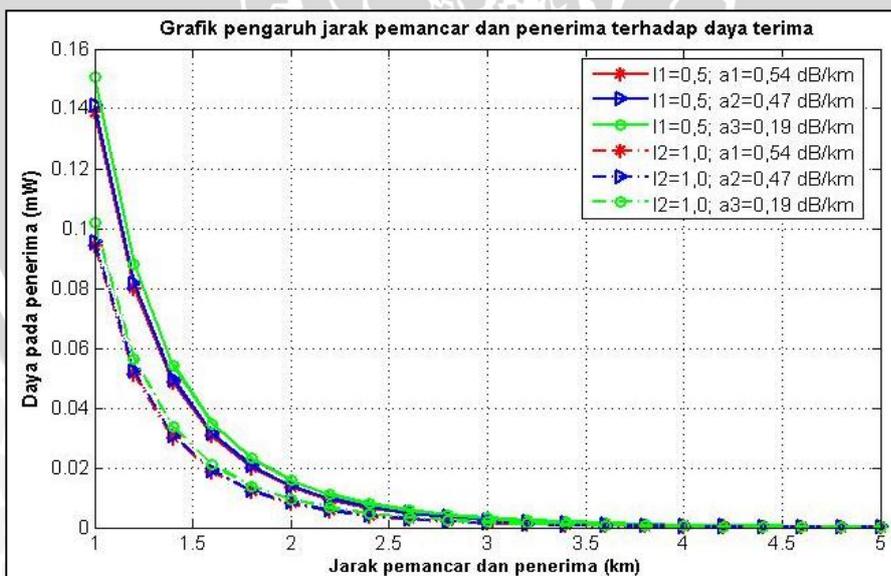
$$P_r = 80 \times 10^{-\frac{18,395}{10}} \times 10^{-\frac{36,0011}{10}} \times 0,7991$$

$$P_r = 0,0002 \text{ mW}$$

Dengan cara yang sama, besarnya daya yang diterima detektor optik untuk jarak 1 km sampai 5 km pada visibilitas 20 km, 23 km, dan 50 km dengan intensitas sinyal 0,5 dan 1 ditunjukkan pada **Tabel 4.4** dan **Gambar 4.2**.

Tabel 4.4. Nilai Daya Terima pada Jarak 1 sampai 5 km untuk Beberapa Kondisi Visibilitas dan Intensitas Sinyal pada Cuaca Cerah

Jarak (km)/ Visibilitas (km)	Parameter			
	$I = 0,5$		$I = 1$	
	P_r (mW)	P_r (dBm)	P_r (mW)	P_r (dBm)
1/20	$1,3881 \times 10^{-1}$	-8.5758	$9,4078 \times 10^{-2}$	-10.2651
1/23	$1,4107 \times 10^{-1}$	-8.5058	$9,5606 \times 10^{-2}$	-10.1951
1/50	$1,5046 \times 10^{-1}$	-8.2258	$1,0197 \times 10^{-1}$	-9.9151
2/20	$1,3435 \times 10^{-2}$	-18.7174	$8,0070 \times 10^{-3}$	-20.9653
2/23	$1,3876 \times 10^{-2}$	-18.5774	$8,2693 \times 10^{-3}$	-20.8252
2/50	$1,5785 \times 10^{-2}$	-18.0174	$9,4074 \times 10^{-3}$	-20.2653
3/20	$2,4400 \times 10^{-3}$	-26.1261	$1,4725 \times 10^{-3}$	-28.3194
3/23	$2,5609 \times 10^{-3}$	-25.9161	$1,5454 \times 10^{-3}$	-28.1094
3/50	$3,1073 \times 10^{-3}$	-25.0761	$1,8752 \times 10^{-3}$	-27.2694
4/20	$5,7392 \times 10^{-4}$	-32.4115	$3,5598 \times 10^{-4}$	-34.4857
4/23	$6,1214 \times 10^{-4}$	-32.1315	$3,7969 \times 10^{-4}$	-34.2057
4/50	$7,9222 \times 10^{-4}$	-31.0115	$4,9139 \times 10^{-4}$	-33.0857
5/20	$1,5527 \times 10^{-4}$	-38.0892	$9,8842 \times 10^{-5}$	-40.0505
5/23	$1,6829 \times 10^{-4}$	-37.7392	$1,0713 \times 10^{-4}$	-39.7005
5/50	$2,3231 \times 10^{-4}$	-36.3392	$1,4789 \times 10^{-4}$	-38.3006



Gambar 4.2. Grafik Pengaruh Jarak terhadap Daya Terima Sistem untuk Beberapa Kondisi Visibilitas dan Intensitas Sinyal pada Cuaca Cerah

Gambar 4.2 menunjukkan grafik hubungan daya terima sistem terhadap jarak pemancar dan penerima optik. pada visibilitas 20 km jarak 1 km dan intensitas sinyal sebesar 0,5, mempunyai daya terima sebesar 0,13881 mW atau -8.5758 dBm sedangkan

pada jarak 5 km daya yang diterima penerimasebesar $2,3231 \times 10^{-4}$ mW atau -36.3392dBm. Nilai daya terima sistem FSO dipengaruhi oleh rugi-rugi yang terjadi pada sistem FSO. Rugi-rugi yang dihitung meliputi rugi-rugi sistem, rugi geometrik, rugi atmosfer serta rugi sintilasi. Rugi-rugi geometrik, rugi atmosfer dan rugi sintilasi berbanding lurus dengan jarak pemancar dan penerima optik, sehingga untuk jarak yang semakin jauh maka rugi-rugi yang terjadi akibat penyimpangan beam, penyerapan *aerosol* dan *fading* sinyal akibat sintilasi akan semakin besar pula. Hal ini akan menyebabkan sinyal yang diterima akan semakin lemah.

Sintilasi yang disebabkan oleh perubahan suhu atmosfer menyebabkan perubahan indeks bias partikel atmosfer tidak seragam sehingga dapat menyebabkan *fading* pada sinyal dan mengakibatkan fluktuasi pada sinyal terima. Fluktuasi sinyal ini dapat dimodelkan dalam fungsi distribusi probabilitas *Gamma-Gamma* (*Gamma-Gamma* PDF) sebagai fungsi intensitas sinyal. Pada jarak 1 km dan visibilitas 20 km, untuk intensitas sinyal 0,5, daya pada penerima adalah senilai -8.5758 dBm, sedangkan untuk intensitas sinyal sama dengan 1,0, daya pada penerima bernilai -10.2651 dBm. Sehingga dapat diketahui bahwa intensitas sangat berpengaruh terhadap daya terima. Dengan menggunakan *Gamma-Gamma* PDF semakin besar intensitas sinyal maka daya yang diterima sistem akan semakin kecil.

Pada jarak 5 km dan intensitas sinyalsebesar 0,5, untuk visilitas 20 km daya terima bernilai $1,5527 \times 10^{-4}$ mW (-38.0892 dBm) dan untuk visibilitas sejauh 50 km daya terima yang ditangkap penerima sebesar $2,3231 \times 10^{-4}$ mW (-36.3392 dBm) sehingga dapat terlihat bahwa semakin jauh visibilitas maka daya terima akan semakin besar pula. Hal ini disebabkan oleh nilai koefisien redaman atmosfer yang semakin besar untuk nilai visibilitas yang semakin dekat karena kondisi cuaca akan semakin buruk sehingga rugi-rugi akibat penyerapan sinyal optik oleh atmosfer akan semakin besar pula.

Daya terima terbesar adalah pada visibilitas 50 km untuk jarak pemancar dan penerima sejauh 1 km dengan intensitas sinyal $I=0,5$ yaitu sebesar 0,13881 mW atau -8,5758 dBm.

4.3 Analisis *Signal to Noise Ratio* (SNR) Sistem *Free Space Optic* dengan Penerapan OFDMA

Sinyal yang sampai ke penerima optik mempunyai daya yang lebih kecil dari sinyal yang dipancarkan karena mengalami beberapa redaman pada jalur transmisi yang disebabkan rugi-rugi geometrik, rugi *pointing* dan rugi-rugi atmosfer pada cuaca cerah

yang disebabkan penyerapan *aerosol*. *Signal to Noise Ratio* (SNR) dihitung pada sisi penerima optik yaitu merupakan perbandingan arus sinyal terima (i_s) dengan *noise* yang terjadi. Sumber *noise* utama yang dimodelkan dalam AWGN adalah *noise* pada proses deteksi yang disebabkan oleh *shot noise* $\langle i_{SN}^2 \rangle_{APD}$, dan *thermal noise* atau *Johnson noise* $\langle i_{JN}^2 \rangle$. Besarnya arus sinyal terima terima sistem FSO pada visibilitas 50 km dan jarak 5 km dengan $I = 0,5$ dapat dihitung dengan persamaan:

$$i_s = \Re P_R$$

$$i_s = 9 \times 2,3231 \times 10^{-4} \times 10^{-3}$$

$$i_s = 2,0907 \times 10^{-6} \text{ A}$$

Perhitungan *bandwidth* OFDMA pada dihitung dengan menggunakan teknik modulasi QPSK, dengan jumlah *subcarrier* 1200 dan data rate 24,5150 Mbps pada kanal 20 Mhz.. Besar laju data masing-masing *subcarrier* dapat dihitung menggunakan persamaan (2.13)

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

$$R_{sub} = \frac{24,5150 \text{ Mbps}}{1200} = 0,0204 \text{ Mbps}$$

Durasi tiap *subcarrier* dihitung dengan persamaan (2.14), dengan nilai M adalah 2^2 .

$$T_{sub} = \frac{\log_2 M}{R_{sub}}$$

$$T_{sub} = \frac{\log_2 2^2}{0,0204 \times 10^6} = 98,0392 \mu\text{s}$$

Bandwidth OFDMA dengan faktor *cyclic prefix* 0,0714 adalah:

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

$$B_{sistem} = \frac{2}{98,0392 \times 10^{-6}} + \frac{1200-1}{(1-0,0714)98,0392 \times 10^{-6}}$$

$$B_{sistem} = 13,191 \text{ Mhz}$$

Perhitungan *noise* AWGN yang meliputi *shot noise* dan *noise thermal* membutuhkan parameter OFDMA yaitu alokasi *bandwidth*. *Bandwidth* sistem sebesar 16,111 Mhz, sehingga nilai *shot noise* dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\langle i_{SN}^2 \rangle_{APD} = 2qi_sB$$

$$\langle i_{SN}^2 \rangle_{APD} = 2 \times 1,6 \times 10^{-19} \times 2,0907 \times 10^{-6} \times 13,9191 \times 10^6$$

$$\langle i_{SN}^2 \rangle_{APD} = 8,8251 \times 10^{-18} \text{ A}^2$$

Thermal noise atau *Johnson noise* terjadi karena pergolakan elektron pada komponen elektronik sisi penerima. Dengan menggunakan suhu referensi sebesar 27°C atau 300 K maka nilai *noise thermal* dapat dihitung sebagai berikut:

$$\langle i_{JN}^2 \rangle = \frac{4kTB}{R_L}$$

$$\langle i_{JN}^2 \rangle = \frac{4 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 300 \times 13,9191 \times 10^6}{50}$$

$$\langle i_{JN}^2 \rangle = 4,6100 \times 10^{-15} \text{A}^2$$

Sehingga nilai SNR untuk jarak km pada visibilitas sejauh 50 km dan faktor sintilasi 0,5 dapat dihitung dengan persamaan (2.22):

$$SNR_{FSO} = \frac{(\mathcal{R}P_R)^2}{2qi_s B + 4kTB/R_L}$$

$$SNR_{FSO} = \frac{(2,0907 \times 10^{-6})^2}{8,8251 \times 10^{-18} + 4,6100 \times 10^{-15}}$$

$$SNR_{FSO} = \frac{4,3710 \times 10^{-12}}{4,6188 \times 10^{-15}}$$

$$SNR_{FSO} = 946,3497$$

$$SNR_{FSO-OFDMA} = (1 - \alpha_{cp}) SNR_{FSO}$$

$$SNR_{FSO-OFDMA} = (1 - 0,0714) 946,3497$$

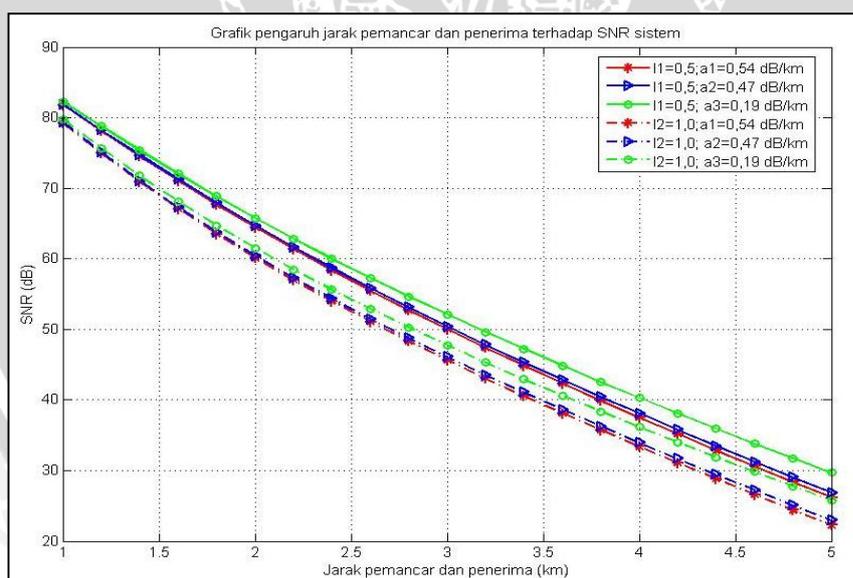
$$SNR_{FSO-OFDMA} = 878,7803$$

$$SNR_{FSO-OFDMA} (dB) = 10 \log(878,7803) = 29,6722 \text{ dB}$$

Dengan menggunakan cara yang sama, maka dapat dihitung nilai SNR untuk intensitas sinyal 0,5 dan 1,0 pada jarak 1 km sampai 5 km pada visibilitas sejauh 20 km, 23 km dan 50 km. Hasil perhitungan ditunjukkan pada **Tabel 4.5** dan **Gambar 4.3** sebagai berikut.

Tabel 4.5. Nilai SNR Sistem untuk Beberapa Kondisi Vilibilitas dan Intensitas Sinyal pada Cuaca Cerah

Jarak (km)/ Visibilitas (km)	SNR (dB)	
	$I = 0,5$	$I = 1$
1/20	81.7698	79.2331
1/23	81.8714	79.3415
1/50	82.2749	79.7721
2/20	64.4447	60.1366
2/23	64.7098	60.4073
2/50	65.7659	61.4874
3/20	50.0160	45.6653
3/23	50.4315	46.0826
3/50	52.0914	47.7504
4/20	37.5148	33.3746
4/23	38.0734	33.9337
4/50	40.3066	36.1695
5/20	26.1751	22.2546
5/23	26.8746	22.9543
5/50	29.6722	25.7527

**Gambar 4.3.** Grafik Pengaruh Jarak terhadap SNR Sistem untuk Beberapa Kondisi Vilibilitas dan Intensitas Sinyal pada Cuaca Cerah

Nilai SNR sistem dihitung dengan mempertimbangkan *noise* AWGN yang ada pada sisi penerima optik. **Gambar 4.3** memperlihatkan bahwa pada $I=0,5$ dengan jarak pemancar dan penerima 1 km pada visibilitas sejauh 50 km nilai SNR sistem adalah 82.2749 dB, sedangkan untuk jarak pemancar dan penerima 5 km nilai

SNR sistem adalah 29.6722 dB. Sehingga untuk transmisi dengan intensitas sinyal yang sama, semakin jauh jarak pemancar dan penerima, nilai SNR sistem akan semakin kecil. Hal ini karena daya yang diterima penerima optik semakin kecil untuk jarak pemancar dan penerima yang jauh. Dengan daya terima yang kecil maka nilai arus terima juga akan kecil sehingga menyebabkan nilai SNR sistem akan kecil pula.

Secara keseluruhan nilai SNR sistem untuk visibilitas 50 km lebih besar daripada visibilitas 20 km dan 23 km. Sehingga untuk intensitas sinyal dan jarak pemancar ke penerima yang sama, semakin besar nilai visibilitas, maka nilai SNR sistem akan semakin kecil. Hal ini sesuai dengan semakin besarnya koefisien redaman atmosfer ketika visibilitas semakin berkurang, seperti yang ditunjukkan dalam **Tabel 2.5**.

Pada jarak pemancar dan penerima 5 km pada visibilitas 50 km, nilai SNR sistem untuk intensitas sinyal $I = 0,5$ adalah 29.6722 dB dan untuk intensitas sinyal $I = 1,0$ nilai SNR sistem adalah 25.7527 dB. Hal ini menyatakan bahwa, pada jarak dan visibilitas yang sama, nilai SNR sistem untuk intensitas sinyal 1,0 lebih kecil dibandingkan dengan sistem dengan intensitas sinyal 1,0. Hal ini karena semakin tinggi intensitas sinyal maka nilai probabilitas sinyal terima yang dimodelkan dalam *Gamma-Gamma* PDF akan semakin kecil. Nilai SNR sistem tertinggi untuk sistem dalam skripsi ini 82.2749 dB yang terjadi ketika jarak pemancar dan penerima 1 km dengan $I = 0,5$, sedangkan nilai SNR sistem terendah adalah 26.1751 dB.

4.4 Analisis Kapasitas Sistem *Free Space Optic* dengan Penerapan OFDMA

Perhitungan analisis kapasitas sistem menggunakan teorema Shannon per satuan frekuensi yang terdapat pada persamaan (2.24). Untuk memperoleh kapasitas sistem maka dibutuhkan parameter SNR sistem yang terdapat pada Tabel 4.5. Kapasitas sistem untuk visibilitas 50 km pada jarak pemancar dan penerima sejauh 5 km untuk $I = 0,5$ dapat dihitung sebagai berikut.

$$C = \log_2(1 + SNR_{FSO-OFDMA})$$

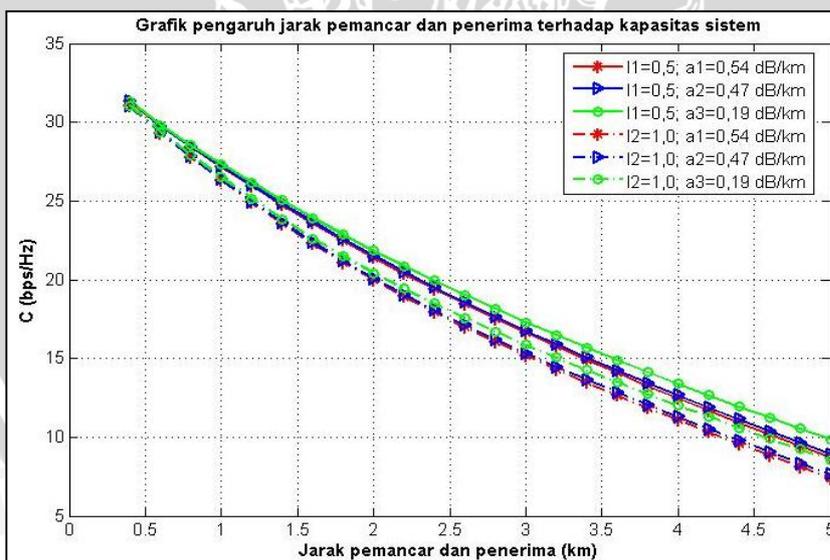
$$C = \log_2(1 + 29,6722)$$

$$C = 9,8584 \text{ bps/Hz}$$

Dengan cara yang sama dapat dihitung nilai kapasitas sistem untuk visibilitas 20 km, 23 km dan 50 km pada jarak 1 km sampai 5 km dengan hasil ditunjukkan pada **Tabel 4.6** dan **Gambar 4.4**.

Tabel 4.6. Nilai Kapasitas Sistem untuk Beberapa Kondisi Visibilitas dan Intensitas Sinyal pada Cuaca Cerah

Jarak (km)/ Visibilitas (km)	C (bps/Hz)	
	$I = 0,5$	$I = 1$
1/20	27.1633	26.3207
1/23	27.1971	26.3567
1/50	27.3311	26.4997
2/20	21.4081	19.9769
2/23	21.4961	20.0668
2/50	21.8470	20.4256
3/20	16.6150	15.1697
3/23	16.7530	15.3083
3/50	17.3044	15.8623
4/20	12.4624	11.0874
4/23	12.6479	11.2731
4/50	13.3897	12.0155
5/20	8.6987	7.4014
5/23	8.9305	7.6325
5/50	9.8584	8.5587



Gambar 4.4. Grafik Pengaruh Jarak Terhadap Kapasitas Sistem untuk Beberapa Kondisi Visibilitas dan Intensitas Sinyal pada Cuaca Cerah

Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa untuk visibilitas 50 km pada jarak 5 km, sistem dengan $I = 0,5$ mempunyai kapasitas sebesar 9.8584 bps/Hz dan untuk $I = 1,0$ adalah sebesar 8.5587 bps/Hz. Sehingga dapat dilihat bahwa untuk jarak dan visibilitas yang sama pada saat $I = 0,5$ sistem mempunyai kapasitas yang lebih besar daripada saat $I =$

1,0. Pada jarak 5 km dengan $I = 0,5$, nilai kapasitas visibilitas sejauh 20 km adalah 8.6987 bps/Hz, untuk visibilitas 23 km adalah 8.9305 bps/Hz dan untuk visibilitas 50 km adalah 9.8584 bps/Hz. Sedangkan untuk visibilitas 50 km dengan $I = 1,0$, pada jarak 1 km mempunyai kapasitas senilai 26.4997 bps/Hz dan pada jarak 5 km senilai 8.5587 bps/Hz. Hal ini dapat menyatakan bahwa untuk jarak dan intensitas sinyal yang sama, semakin jauh visibilitas maka kapasitas sistem akan semakin besar.

Sedangkan dengan nilai visibilitas dan intensitas sinyal yang sama, semakin jauh jarak pemancar dan penerima, maka nilai kapasitas sistem akan semakin kecil. Hal ini karena nilai SNR yang semakin kecil seiring dengan bertambahnya jarak dan berkurangnya visibilitas. Dengan jarak yang bertambah maka redaman atmosfer akibat penyimpangan beam optik dan fading akibat sintilasi akan bertambah pula. Nilai visibilitas berpengaruh pada koefisien redaman yang terjadi, dengan berkurangnya visibilitas akan menyebabkan bertambahnya redaman atmosfer akibat *aerosol* dan berkurangnya SNR sehingga akan mengurangi nilai kapasitas sistem. Nilai kapasitas sistem terbesar adalah sebesar 27.3311 bps/Hz yaitu pada visibilitas 50 km dengan intensitas sinyal 0,5 untuk jarak pemancar dan penerima sejauh 1 km.

4.5 Perhitungan BER sistem *Free Space Optic* dengan Penerapan OFDMA

Bit Error Rate (BER) merupakan perbandingan nilai bit salah dengan seluruh bit saat proses transmisi yang dihitung di sisi penerima. 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. Untuk menghitung nilai BER dibutuhkan nilai E_b/N_o yang merupakan perbandingan energi sinyal per bit terhadap *noise*. Nilai ini berkaitan dengan besarnya SNR sistem. Pada jarak 5 km dengan visibilitas 50 km dan $I = 0,5$ didapatkan nilai SNR sistem sebesar 31.8283dB. Maka nilai E_b/N_o adalah sebagai berikut.

$$\frac{E_b}{N_o} = SNR_{FSO-OFDMA} - 10 \text{ Log } \frac{B_{sistem}}{R_{tot}}$$

$$\frac{E_b}{N_o} = 29.6722 - 10 \text{ Log } \frac{13,191 \times 10^6}{24,5150 \times 10^6}$$

$$\frac{E_b}{N_o} = 29.6722 - (-2.6915) = 32.3637 \text{ dB}$$

BER sistem dengan menggunakan modulasi QPSK saat visibilitas 50 km pada jarak 5 km dan intensitas sinyal 0,5 maka BER sistem dapat dihitung sebagai berikut.

$$BER_{sistem} = Q \left(\sqrt{2 \frac{E_b}{N_o}} \right)$$

Dengan $Q(z) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{2}}$ sehingga persamaan BER menjadi:

$$BER_{sistem} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{2 \frac{E_b}{N_o}}}{\sqrt{2}} \right)$$

$$BER_{sistem} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right)$$

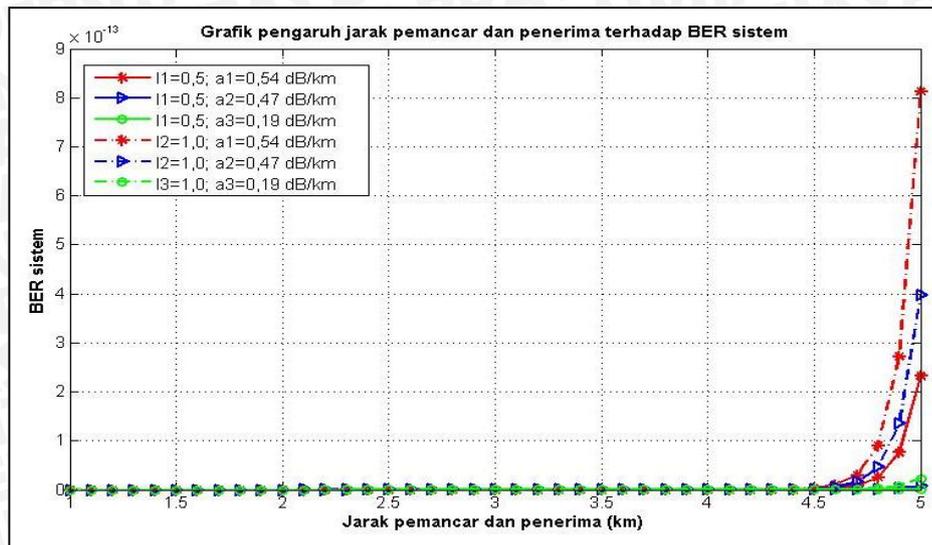
$$BER_{sistem} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{32.3637})$$

$$BER_{sistem} = 4.3002 \times 10^{-16}$$

Dengan cara yang sama dilakukan analisis BER untuk jarak sampai 4,5 km seperti yang ditunjukkan dalam **Tabel 4.7** dan **Gambar 4.5**.

Tabel 4.7. Nilai BER Sistem pada Beberapa Kondisi Visibilitas dan Intensitas Sinyal pada Cuaca Cerah

Jarak (km)/ Visibilitas (km)	BER sistem	
	$I = 0,5$	$I = 1$
1/20	9.5347×10^{-38}	8.1593×10^{-38}
1/23	5.7420×10^{-39}	7.3166×10^{-38}
1/50	3.8264×10^{-39}	4.7442×10^{-38}
2/20	3.5852×10^{-30}	1.8281×10^{-29}
2/23	1.8233×10^{-31}	1.3916×10^{-29}
2/50	6.2929×10^{-32}	4.6860×10^{-30}
3/20	7.4978×10^{-24}	4.0054×10^{-23}
3/23	3.2562×10^{-25}	2.6278×10^{-23}
3/50	6.0992×10^{-26}	4.8770×10^{-24}
4/20	2.3185×10^{-18}	1.0063×10^{-17}
4/23	8.6318×10^{-20}	5.7100×10^{-18}
4/50	9.0136×10^{-21}	5.9306×10^{-19}
5/20	2.3216×10^{-13}	8.1212×10^{-13}
5/23	7.3707×10^{-15}	3.9807×10^{-13}
5/50	4.3002×10^{-16}	2.3061×10^{-14}



Gambar 4.5. Grafik Pengaruh Jarak Pemancar dan Penerima terhadap BER Sistem pada Beberapa Kondisi Visibilitas dan Intensitas Sinyal pada Cuaca Cerah

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, untuk $I = 0,5$ dengan visibilitas 50 km pada jarak pemancar dan penerima sejauh 5 km, nilai BER sistem adalah 4.3002×10^{-16} sedangkan untuk $I = 1,0$ nilai BER sistem sebesar 2.3061×10^{-14} seperti yang terlihat pada **Tabel 4.7** dan **Gambar 4.5**. Hal ini disebabkan SNR sistem untuk $I = 0,5$ lebih tinggi.

Untuk jarak pemancar dan penerima dan visibilitas yang sama, nilai BER sistem dengan intensitas sinyal $I = 1,0$ lebih besar daripada $I=0,5$. Untuk visibilitas 50 km dengan $I = 0,5$ pada jarak pemancar dan penerima 1 km, nilai BER sistem adalah 3.8264×10^{-39} , sedangkan untuk jarak 5 km nilai BER sistem adalah 4.3002×10^{-16} . Dan untuk jarak 1 km pada $I = 0,5$ dengan visibilitas 50 km BER sistem bernilai 3.8264×10^{-39} , untuk visibilitas 23 km bernilai 5.7420×10^{-39} , dan untuk visibilitas 20 km bernilai 9.5347×10^{-38} . Hal ini menunjukkan bahwa nilai BER berbanding lurus dengan jarak pemancar ke penerima dan berbanding terbalik dengan visibilitas. Semakin jauh jarak pemancar dan penerima, maka nilai BER yang dihasilkan akan semakin besar, dan semakin jauh nilai visibilitas maka nilai BER akan semakin kecil karena nilai SNR yang terjadi semakin besar. Semakin besar SNR maka nilai E_b/N_0 akan semakin besar sehingga akan menyebabkan nilai BER sistem semakin kecil.

Nilai BER yang diharapkan adalah nilai BER yang kecil, karena hal ini berarti hanya sedikit kesalahan yang terjadi dalam transmisi, dengan kata lain data yang diterima semakin menyerupai data yang dikirimkan. Nilai BER terbaik adalah pada jarak 1 km pada saat intensitas sinyal $I = 0,5$ untuk visibilitas 50 km yaitu sebesar 3.8264×10^{-39} .