

ANALISIS PERFORMANSI MIMO SPATIAL DIVERISTY PADA KOMUNIKASI *FREE SPACE OPTIC* DALAM KONDISI CUACA BURUK

Performance Analysis of MIMO Spatial Diveristy on Free Space optic Communication in Bad Weather Condition

Boby Samuel Aritonang¹, Sugito,S.Si, M.T², Desti Madya Saputri, S.T., M.T³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom Bandung

¹bobysamuel123@gmail.com ³destimadvasaputri@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

FSO konvensional mengadopsi prinsip teknik SISO (Single Input Single Output) dimana satu transmitter hanya untuk satu receiver saja. Penelitian dalam tugas akhir ini akan mencoba untuk menerapkan teknik MIMO spatial diversity pada sistem FSO guna meningkatkan kinerjanya dalam kondisi cuaca sangat ekstrim.

Dari hasil simulasi performansi, sistem SISO tidak mampu mendapatkan nilai BER $< 1 \times 10^{-9}$ bahkan jika laser memancarkan daya hingga sebesar 5W. Pada MIMO 2x2 diperoleh Pt sebesar 90 mW, MIMO 2x3 sebesar 70 mW, MIMO 2x4 sebesar 70 mW, MIMO 3x2 sebesar 30 mW, MIMO 3x3 sebesar 30, MIMO 3x4 sebesar 20 mW, MIMO 4x2 sebesar 20 mW, MIMO 4x3 sebesar 10 mW dan MIMO 4x4 sebesar 8 mW. Nilai Pt efektif tersebut adalah daya yang harus dipancarkan setiap laser untuk mencapai BER $< 1 \times 10^{-9}$. Konsumsi daya paling kecil adalah pada sistem MIMO 4x4 yaitu 32 mW. Nilai Pt hasil simulasi ini hanya berlaku untuk jarak transeiver sejauh 1 km. Penambahan jarak antar transeiver mungkin akan membuat nilai Pt lebih besar.

Kata kunci : Free Space Optic, MIMO, Spatial Diversity, BER

Abstract

The conventional FSO adopts the principle of SISO (Single Input Single Output) technique where one transmitter is for one receiver only. Research in this final project will try to apply MIMO spatial diversity technique to FSO system to improve its performance in bad weather conditions.

From the performance simulation results, the SISO system is unable to get the value of BER $< 1 \times 10^{-9}$ even if the laser emits power up to 5W. In MIMO 2x2 obtained Pt of 90 mW, MIMO 2x3 of 70 mW, MIMO 2x4 of 70 mW, MIMO 3x2 of 30 mW, MIMO 3x3 of 30, MIMO 3x4 by 20 mW, MIMO 4x2 by 20 mW, MIMO 4x3 by 10 mW and 4x4 MIMO of 8 mW. The effective Pt value is the power that each laser must emit to reach BER $< 1 \times 10^{-9}$. The smallest power consumption is on the 4x4 MIMO system which is 32 mW. Those Pt value is only valid for transeiver distance as far as 1 km. Increasing the distance between the transeiver will probably make the value Pt larger..

Keyword : PAPR, PTS, SLM

1. Pendahuluan

Sistem kerja FSO adalah Line of Sight (LOS), bersifat full duplex dan menggunakan atmosfer sebagai media propagasinya. Beberapa penelitian telah dilakukan guna meningkatkan performansi FSO. Seperti penggunaan APD MIMO pada receiver oleh Neda C. [3] yang menghasilkan peningkatan kinerja 12 dB, kemudian teknik spasial filter[4], dan masih banyak lagi.

FSO konvensional menggunakan teknik Single Input Single Output (SISO) dan Single Input Multiple Output (SIMO). Pada jurnal ini akan digunakan teknik Multiple Input Multiple Output (MIMO) *spatial diversity*. Implementasi metode MIMO ke dalam sistem FSO diharapkan mampu untuk memitigasi besarnya redaman dan sintilasi yang terjadi akibat cuaca buruk. Parameter performansi sistem yang diuji adalah BER dan Q-factor.

2. Dasar Teori

2.1 Free Space Optic (FSO)

Free Space Optic Communication (FSOC) merupakan sebuah teknologi komunikasi *fixed wireless* yang menggunakan frekuensi optik (193,2 – 350 THz) sebagai *carrier*. FSO bekerja dalam kondisi *Line of Sight* (LOS) dan jarak komunikasi optimum yang relatif pendek untuk kebutuhan terrestrial. Melihat potensi kinerja FSO yang relatif andal jika dibandingkan teknologi *wireless* lain dalam kecepatan transmisinya, peneliti memaksimalkan potensi tersebut dengan menerapkannya pada komunikasi terrestrial. Prinsip kerja FSO secara sederhana merupakan gabungan dari sistem komunikasi serat optik dan *wireless*.

2.2 LASER

Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiaton*) merupakan perangkat optoelektronik yang memancarkan cahaya monokromatik dan koheren serta memiliki *linewidth* yang sangat sempit. Monokromatik berarti semua berkas cahaya (photon) yang dipancarkan oleh sebuah laser memiliki satu karakteristik panjang gelombang yang sama sedangkan koheren berarti semua berkas cahaya yang dipancarkan tersebut merambat pada satu arah dengan satu fasa yang sama. Beberapa jenis laser yang umum dipakai dalam telekomunikasi adalah *Solid State Laser*, Gas Laser dan Semikonduktor Laser.

2.3 Jenis Redaman Pada Atmosfer

Kondisi atmosfer sangat berpengaruh pada performansi FSO. Atmosfer akan berinteraksi dengan partikel – partikel cahaya karena komposisi atmosfer yang dalam kondisi normalpun terdiri dari berbagai jenis molekul yang berbeda dan partikel bersuspensi kecil yang disebut aerosol[6]. Interaksi cahaya dengan atmosfer ini akan menimbulkan berbagai fenomena seperti sintilasi (*optical turbulence*), *scattering* dan *absorbition*. Karakteristik atmosfer yang berubah secara acak, seperti temperatur udara, tekanan udara, arah angin, tingkat kelembaban udara, dan curah hujan mengakibatkan redaman yang cukup besar untuk komunikasi FSO[4].

2.3.1. Redaman Atmosfer

Penyebab terjadi redaman atmosfer adalah absorpsi. Absorpsi pada FSO menyebabkan daya pada cahaya yang ditembakkan oleh laser berkurang secara bertahap sehingga berpengaruh langsung terhadap kinerja sistem. Untuk menghitung besar redaman atmosfer, digunakan variabel *visibility*. *Visibility* adalah jarak sebuah objek pada saat kekontrasan gambar berkurang 2% dari nilai aslinya yang dihitung dengan panjang gelombang 550 nm dengan mempertimbangkan intensitas maksimum spektrum matahari[3]. Persamaan redaman atmosfer untuk model Kim dan Kruse adalah sebagai berikut[6]:

$$\gamma_{atm} = \frac{3,192}{v} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (1)$$

2.3.2. Redaman Geometri

Redaman geometri merupakan redaman yang terjadi akibat pelebaran berkas cahaya pada sisi receiver. Pelebaran berkas cahaya ini akan membuat *photodetector* hanya akan menerima sedikit atau sebagian daya. Semakin jauh jarak antar transceiver, semakin besar pula pelebaran berkas cahayanya. Nilai redaman geometri untuk komunikasi *wireless* optik yang diatur dalam ITU-R P.1814 adalah sebagai berikut[5]:

$$\gamma_{geo} = 10 \log \left(\frac{S_d}{S_{capture}} \right) \quad (2)$$

Dimana $S_{capture}$ adalah luas permukaan PD, dan S_d adalah luas *optical beam* pada jarak d dan didapatkan dengan persamaan berikut:

$$S_d = \frac{\pi}{4} (d\theta)^2 \quad (3)$$

2.3.3. Redaman Hujan

Air merupakan faktor dominan yang memberikan redaman pada komunikasi *wireless*[8]. Jika hujan turun pada jalur komunikasi FSO, cahaya akan menabrak partikel air dan pasti terjadi *scattering*. *Scattering* adalah peristiwa hamburan cahaya ke segala arah karena bertabrakan dengan partikel berukuran kecil. Persamaan untuk menghitung besar redaman hujan yang diatur dalam ITU-R P.1814 adalah sebagai berikut:

$$\gamma_{rain} = k R^{ar} \quad (4)$$

2.3.4. Redaman Scintilasi

Besarnya nilai scintilasi tersebut bergantung pada parameter struktur indeks bias (C_n^2). Dimana C_n^2 sangat sulit diukur dan fluktuatif karena dipengaruhi oleh temperatur udara, kecepatan dan arah angin, ketinggian, kelembaban, tekanan udara dan lain sebagainya[9]. Untuk komunikasi FSO terrestrial dengan propagasi horizontal variasi nilai parameter struktur indeks bias C_n^2 bisa dianggap konstan untuk tiap titik propagasi[11][13]. Perumusan oleh Rytov tidak memperhitungkan luas permukaan *photodetector* dan dianggap paling mudah untuk memodelkan indeks scintilasi[10]:

$$\sigma_i^2 = 1,23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (5)$$

Dimana C_n^2 adalah parameter struktur indeks bias, L adalah jarak antar transceiver dan $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Untuk menghitung redaman akibat scintilasi digunakan persamaan[10]:

$$\gamma_{scin} = 2 \sqrt{\sigma_i^2} \quad (6)$$

2.3.5. Gamma – Gamma Fading Channel

Pada komunikasi FSO terdapat beberapa model kanal yang biasa digunakan yaitu, distribusi Gamma Gamma, Lognormal, Negatif exponential, dan distribusi K[13]. Distribusi Gamma Gamma digunakan untuk memodelkan atmosfer dalam kondisi turbulensi rendah hingga sangat tinggi serta memperhitungkan scintilasi sehingga dianggap paling mendekati kondisi asli atmosfer. Oleh karena itu pada PDF Gamma Gamma terdapat perkalian 2 fungsi gamma yang masing – masing merepresentasikan turbulensi rendah dan tinggi [13]. *Probability Distribution Function* (PDF) untuk distribusi Gamma Gamma adalah[13]:

$$P(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I) \tag{7}$$

$$\alpha = \frac{1}{\exp\left(\frac{0,49 \sigma_i^2}{(1+1,11\sigma_i^{12/5})^{5/6}}\right)} - 1 \tag{8}$$

$$\beta = \frac{1}{\exp\left(\frac{0,51 \sigma_i^2}{(1+0,69\sigma_i^{12/5})^{5/6}}\right)} - 1 \tag{9}$$

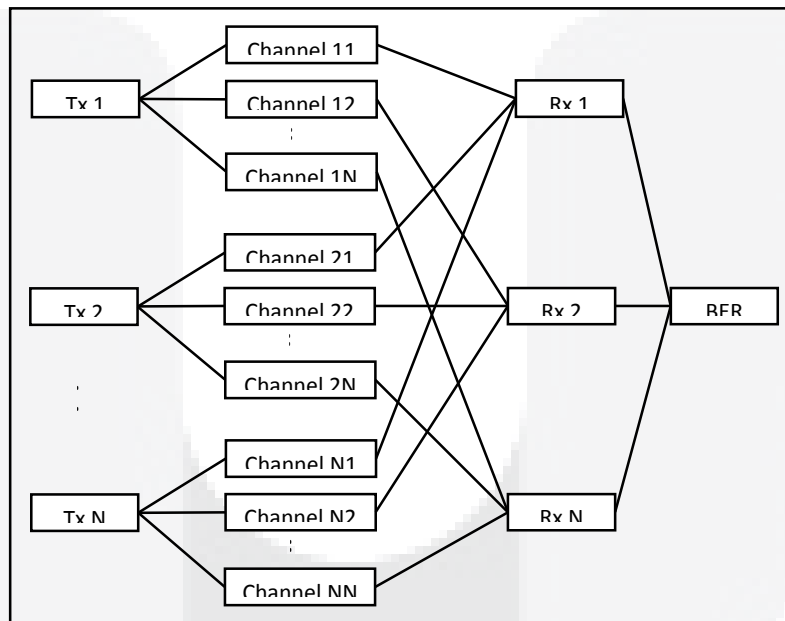
2.4 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Sistem transmisi FSO pada umumnya masih mengadopsi sistem Single Input Single Output (SISO). Ketika dihadapkan dengan sebuah kondisi dimana redaman atmosfer yang terjadi sangat besar, beberapa upaya dilakukan untuk meningkatkan kinerja sistem. Salah satunya adalah dengan mengaplikasikan sistem MIMO pada FSO. Tujuan utama sistem MIMO adalah untuk memitigasi fading pada kanal *wireless*. MIMO FSO bekerja dengan menggunakan N buah laser dan M buah *photodetector* dimana nilai N dan M lebih besar dari 1. Karena proyeksi *beam* dari satu laser sangat sempit dan harus menutupi semua lensa pada *photodetector*, oleh karena itu permukaan lensa *photodetector* pada FSO biasanya dirancang sangat berdekatan satu dengan yang lainnya

3. PEMBAHASAN

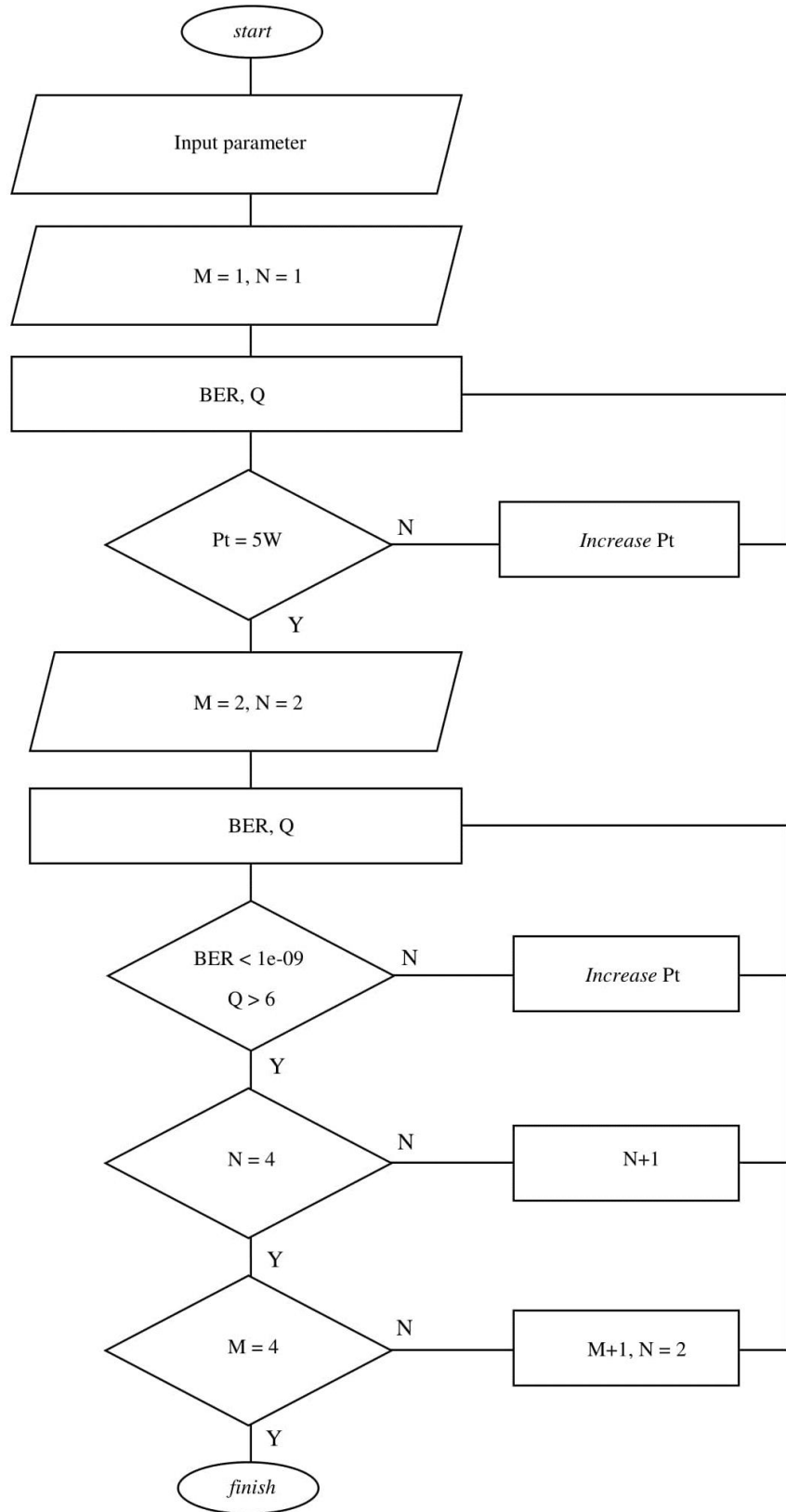
3.1 Pemodelan Sistem

Berikut ini adalah pemodelan sistem yang disimulasikan



Gambar 1. Model Sistem MIMO FSO

3.2. Diagram Alur Perancangan



Gambar 2. Diagram alur perancangan MIMO

3.2. Parameter Simulasi

Tabel 1 Parameter Simulasi FSO

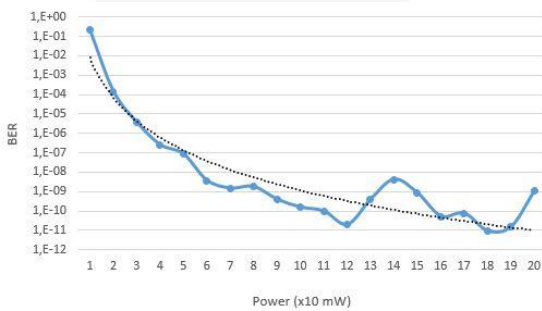
Parameter	Nilai	Unit
λ	1550	nm
Curah hujan	120	mm/hr
Beam divergence (θ)	2	Mrad
Visibility	2000	m
Jarak (d)	1000	m
Responsivity APD	9	A/W
C_n^2	10^{-13}	$m^{-2/3}$
Bit Rate	1	GHz
Diameter laser	5	cm
Diameter photodetector	20	cm
Modulasi	OOK	

4. Analisis Data Hasil Pengujian Sistem

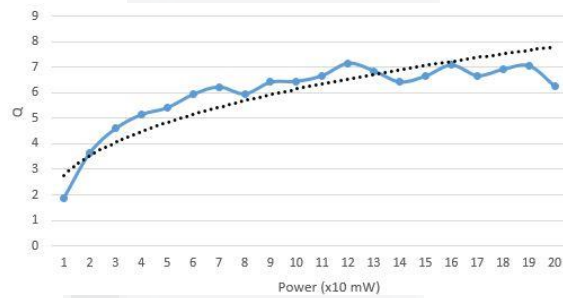
4.1 Analisis BER dan Q-Factor

4.1.1. SISO

Daya laser diset dari 100 mW sampai 5W dengan nilai increment 100 mW, sehingga terdapat 50 titik pengamatan. Nilai BER dan Q dihitung untuk setiap titik pengamatan.



Gambar 3. BER Terhadap Pt pada SISO

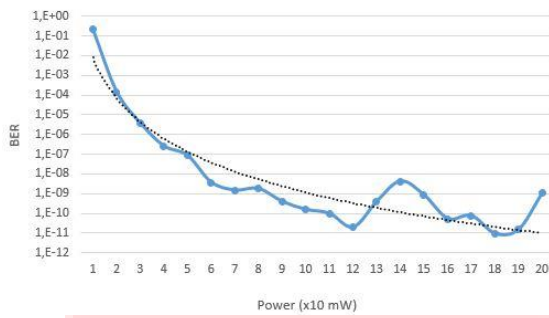


Gambar 4. Q Terhadap Pt pada SISO

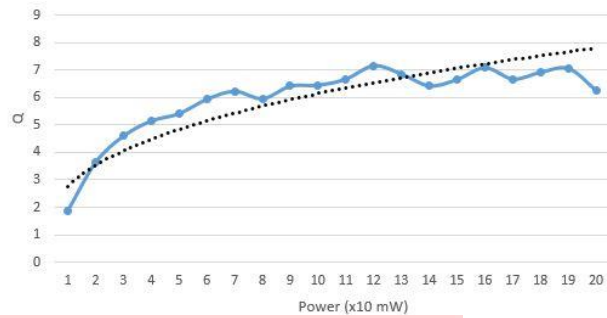
Pada gambar 3 dan 4 dapat dilihat bahwa perubahan power transmit (Pt) akan mempengaruhi nilai BER dan Q. Semakin besar Pt maka trend BER dan Q akan cenderung naik. Hubungan Pt tidak linier dengan BER dan Q karena model kanal yang digunakan adalah Gamma-gamma fading channel. Adanya peristiwa turbulensi atmosfer yang besar yang dirumuskan ke dalam dua fungsi gamma tersebut membuat nilai BER dan Q menjadi sangat fluktuatif.

Menurut Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) Bandung, daya maksimum yang boleh dipancarkan oleh satu laser untuk komunikasi terrestrial adalah 5W. Berdasarkan kedua gambar diatas dapat dilihat bahkan dalam kondisi Pt maksimum nilai BER dan Q pada SISO masih jauh dari standar yang diperlukan. Oleh karena itu SISO tidak mungkin dilakukan dalam kondisi ini.

4.1.2. MIMO 2x2



Gambar 5. BER Terhadap Pt pada MIMO 2x2



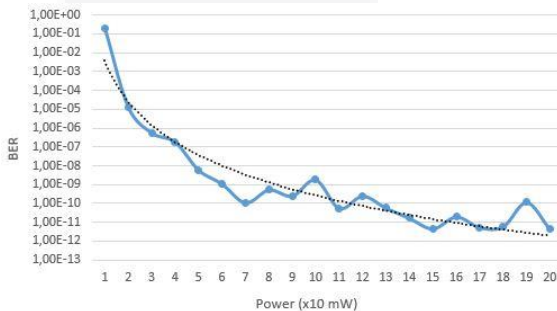
Gambar 6. Q Terhadap Pt pada MIMO 2x2

Tabel 2. Pt efektif untuk MIMO 2x2

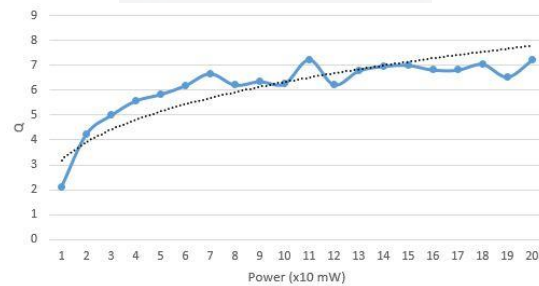
Pt Efektif (mW)	iterations	BER	Q	Average BER	Average Q
90	1	1,44x10 ⁻⁰⁹	5,89094	3,85x10 ⁻¹⁰	6,416838
	2	7,03x10 ⁻¹¹	6,38081		
	3	3,91x10 ⁻¹¹	6,47448		
	4	1,99x10 ⁻¹³	7,22485		
	5	3,70x10 ⁻¹⁰	6,11311		

Pada gambar 5 dan 6 titik pengatan dilakukan mulai dari 10 hingga 200 mW. Dapat dilihat juga bahwa dalam rentang tersebut nilai BER dan Q sudah mulai cukup baik pada Pt = 90 mW. Ketika Pt diperbesar, trend BER menjadi cenderung lebih kecil dan Q menjadi cenderung lebih besar. Nilai BER rata – rata adalah 3,85x10⁻¹⁰ dan Q rata – rata adalah 6,416838

4.1.3. MIMO 2x3



Gambar 7. BER Terhadap Pt pada MIMO 2x3



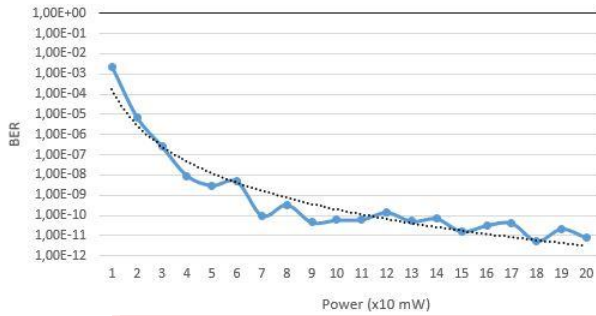
Gambar 8. Q Terhadap Pt pada MIMO 2x3

Tabel 3. Pt efektif untuk MIMO 2x3

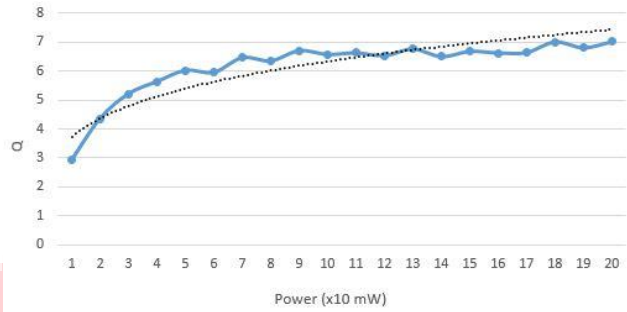
Pt Efektif (mW)	iterations	BER	Q	Average BER	Average Q
70	1	2,39 x10 ⁻¹²	6,8809	1,12 x10 ⁻¹⁰	6,674722
	2	3,57 x10 ⁻¹³	7,15505		
	3	4,50 x10 ⁻¹⁰	6,08827		
	4	1,66 x10 ⁻¹²	6,93188		
	5	1,06 x10 ⁻¹⁰	6,31751		

Pada gambar 4.5 dan 4.6 dapat dilihat nilai BER dan Q dalam rentang tersebut mulai membaik pada Pt = 70 mW. Nilai efektif Pt pada MIMO 2x3 lebih kecil dibanding MIMO 2x2 karena dalam kondisi kanal atmosfer yang sama, MIMO 2x3 memiliki jumlah photodetector lebih banyak daripada MIMO 2x2 sehingga redamannya menjadi lebih kecil. Trend BER cenderung semakin turun dan trend Q cenderung naik. Nilai BER rata – rata adalah 1,12 x10⁻¹⁰ dan Q rata – rata adalah 6,674722.

4.1.4. MIMO 2x4



Gambar 9. BER Terhadap Pt pada MIMO 2x4



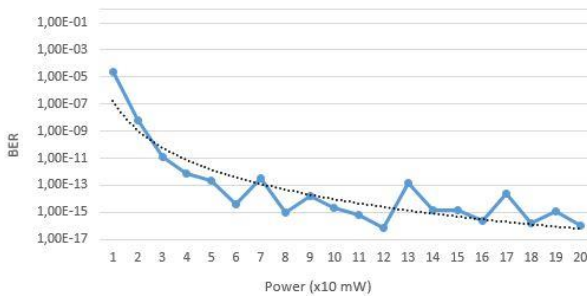
Gambar 10. Q Terhadap Pt pada MIMO 2x4

Tabel 4. Pt efektif pada MIMO 2x4

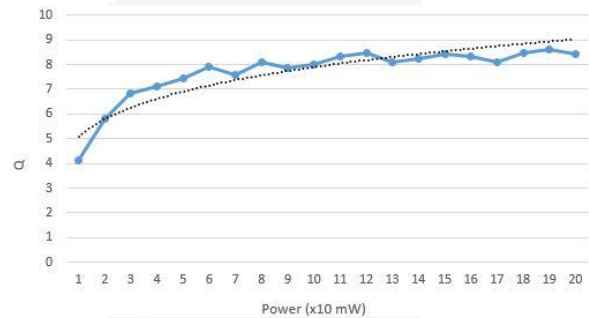
Pt Efektif (mW)	iterations	BER	Q	Average BER	Average Q
70	1	$3,35 \times 10^{-11}$	6,48588	$9,92 \times 10^{-11}$	6,461374
	2	$1,93 \times 10^{-11}$	6,56885		
	3	$1,48 \times 10^{-11}$	6,60946		
	4	$4,04 \times 10^{-10}$	6,10275		
	5	$2,50 \times 10^{-11}$	6,53993		

Pada gambar 9 dan 10 dapat dilihat nilai BER dan Q mulai membaik pada $P_t = 70$ mW. Nilai BER rata – rata adalah $9,29 \times 10^{-11}$ dan Q rata – rata adalah 6,461374. Trend BER cenderung naik dan Q cenderung turun.

4.1.5. MIMO 3x2



Gambar 11. BER Terhadap Pt pada MIMO 3x2



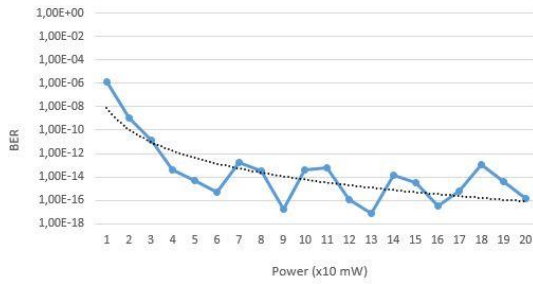
Gambar 12. Q Terhadap Pt pada MIMO 3x2

Tabel 5. Pt efektif pada MIMO 3x2

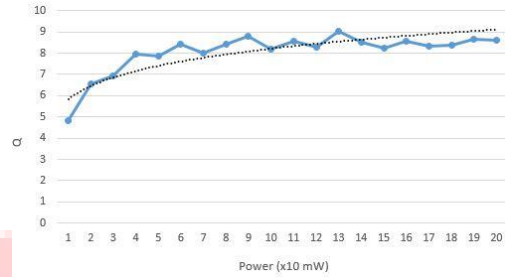
Pt Efektif (mW)	iterations	BER	Q	Average BER	Average Q
30	1	$1,61 \times 10^{-13}$	7,26608	$1,17 \times 10^{-11}$	6,841424
	2	$2,91 \times 10^{-11}$	6,52797		
	3	$2,49 \times 10^{-11}$	6,54972		
	4	$3,67 \times 10^{-12}$	6,82892		
	5	$8,90 \times 10^{-13}$	7,03443		

Pada gambar 11 dan 12 dapat dilihat Pt efektif pada $P_t = 30$ mW. Nilai BER rata – rata mencapai $1,17 \times 10^{-11}$ dan Q mencapai 6,841424. Trend BER cenderung turun dan Q cenderung naik ketika diberi penambahan Pt. Nilai Pt efektif pada MIMO 3x2 cukup jauh dibawah MIMO 2xN, karena penambahan satu buah laser pada sistem memberikan tambahan daya yang signifikan pada photodetector.

4.1.6. MIMO 3x3



Gambar 13. BER Terhadap Pt pada MIMO 3x3



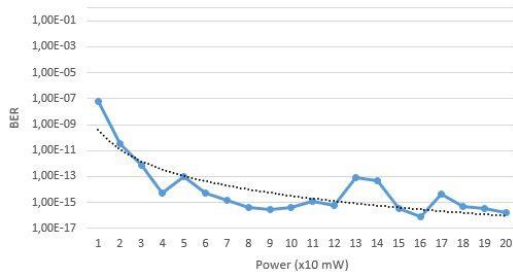
Gambar 14. Q Terhadap Pt pada MIMO 3x3

Tabel 6. Pt efektif pada MIMO 3x3

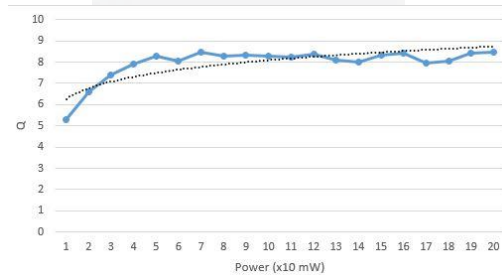
Pt Efektif (mW)	iterations	BER	Q	Average BER	Average Q
30	1	$5,69 \times 10^{-13}$	7,08267	$1,37 \times 10^{-11}$	6,941542
	2	$2,13 \times 10^{-12}$	6,90212		
	3	$6,49 \times 10^{-11}$	6,39527		
	4	$1,00 \times 10^{-12}$	7,00593		
	5	$9,55 \times 10^{-14}$	7,32172		

Pada gambar 13 dan 14 dapat dilihat Pt efektif pada Pt = 30 mW. Pt efektifnya sama dengan MIMO 3x2 tapi nilai BER terendah terdapat pada MIMO 3x3 yaitu $9,55 \times 10^{-14}$. Nilai BER rata – rata adalah $1,37 \times 10^{-11}$ dan Q rata – rata adalah 6,941542. Trend BER cenderung turun dan Q cenderung naik.

4.1.7. MIMO 3x4



Gambar 15. BER Terhadap Pt pada MIMO 3x4



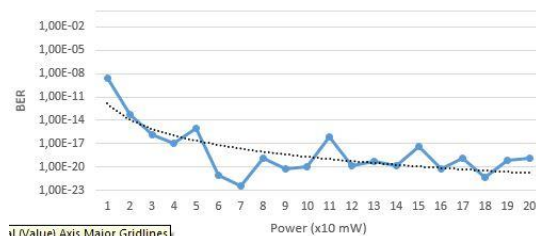
Gambar 16. Q Terhadap Pt pada MIMO 3x4

Tabel 7. Pt efektif pada MIMO 3x4

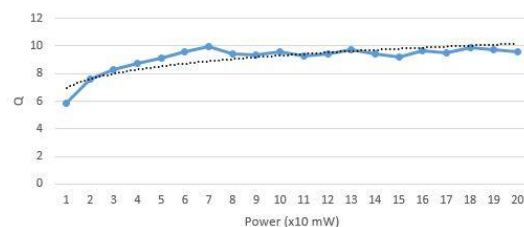
Pt Efektif (mW)	iterations	BER	Q	Average BER	Average Q
20	1	$7,39 \times 10^{-12}$	6,73276	$3,53 \times 10^{-11}$	6,602222
	2	$1,05 \times 10^{-10}$	6,33025		
	3	$5,06 \times 10^{-11}$	6,44113		
	4	$9,73 \times 10^{-12}$	6,68797		
	5	$3,97 \times 10^{-12}$	6,819		

Pada gambar 15 dan 16 dapat dilihat Pt efektif berada pada Pt = 20 mW. Nilai BER rata – rata adalah $3,53 \times 10^{-11}$ dan Q rata – rata adalah 6,602222. Trend BER cenderung turun dan Q cenderung naik ketika diberi penambahan Pt.

4.1.8. MIMO 4x2



Gambar 17. BER Terhadap Pt pada MIMO 4x2



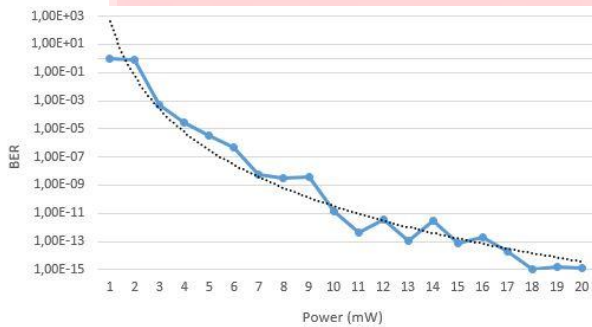
Gambar 18. Q Terhadap Pt pada MIMO 4x2

Tabel 7. Pt efektif pada MIMO 4x2

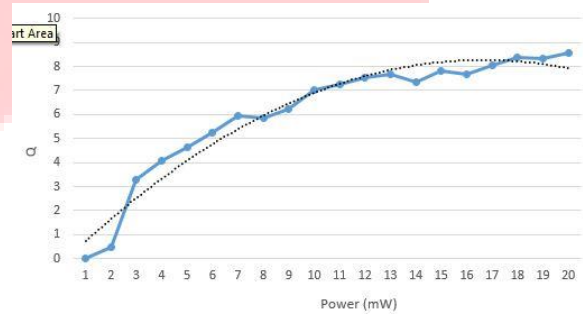
Pt Efektif (mW)	iterations	BER	Q	Average BER	Average Q
20	1	1.81×10^{-13}	7.245	5.92×10^{-14}	7.6276
	2	1.66×10^{-15}	7.85854		
	3	6.21×10^{-16}	7.98304		
	4	4.36×10^{-15}	7.73583		
	5	1.08×10^{-13}	7.31559		

Pada gambar 17 dan 18 dapat dilihat Pt efektif berada pada Pt = 20 mW. Nilai BER rata – rata adalah $5,29 \times 10^{-14}$ dan Q 7,6276. Trend BER cenderung turun dan Q cenderung naik ketika diberi penambahan Pt.

4.1.9. MIMO 4X3



Gambar 19. BER Terhadap Pt pada MIMO 4x3



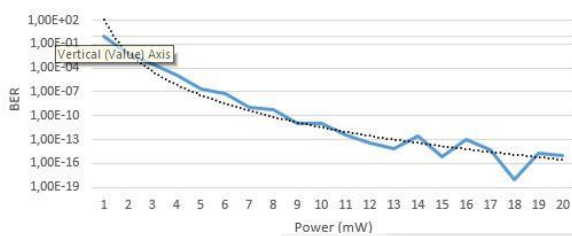
Gambar 20. Q Terhadap Pt pada MIMO 4x3

Tabel 8. Pt efektif pada MIMO 4x3

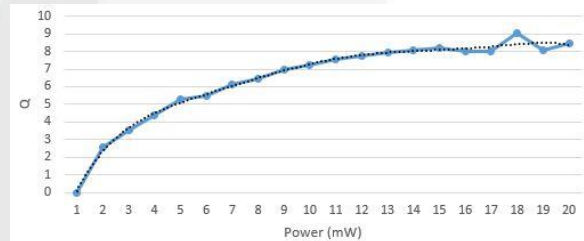
Pt Efektif (mW)	iterations	BER	Q	Average BER	Average Q
10	1	7.47×10^{-12}	6,73864	$1,27 \times 10^{-11}$	7,039162
	2	$6,07 \times 10^{-15}$	7,70702		
	3	$4,95 \times 10^{-11}$	6,4597		
	4	$6,34 \times 10^{-12}$	6,75473		
	5	$2,30 \times 10^{-14}$	7,53572		

Pada gambar 19 dan 20 dapat dilihat Pt efektif berada pada Pt = 10 mW. Trend BER cenderung turun dan Q cenderung naik ketika diberi penambahan Pt. Nilai rata - rata BER adalah $1,27 \times 10^{-11}$ dan nilai Q rata- rata adalah 7,039162.

4.1.10 MIMO 4x4



Gambar 21. BER Terhadap Pt pada MIMO 4x4



Gambar 22. Q Terhadap Pt pada MIMO 4x4

Tabel 9. Pt efektif pada MIMO 4x4

Pt Efektif (mW)	iterations	BER	Q	Average BER	Average Q
8	1	2.58×10^{-09}	5.82403	6.14×10^{-10}	6.426494
	2	4.83×10^{-12}	6.80393		
	3	4.43×10^{-10}	6.1175		
	4	3.82×10^{-11}	6.49584		
	5	2.58×10^{-12}	6.89117		

Pada gambar 4.19 dan 4.20 dapat dilihat P_t efektif pada $P_t = 8$ mW. Nilai BER terendah dari lima iterasi adalah $2,58 \times 10^{-12}$ dan nilai Q tertinggi adalah 6,89117. Nilai BER rata – rata adalah $1,06 \times 10^{-9}$ dan Q rata – rata adalah 6,426494.

4.2. Trade Off Skenario MIMO

Tabel 11. Trade Off Skenario MIMO

MIMO Pair	Pt Efektif (mW)	Pt Total (mW)	Average BER	Average Q
22	90	180	$3,85 \times 10^{-10}$	6,416838
23	70	140	$1,12 \times 10^{-10}$	6,674722
24	70	140	$9,92 \times 10^{-11}$	6,461374
32	30	90	$1,17 \times 10^{-11}$	6,841424
33	30	90	$1,37 \times 10^{-11}$	6,941542
34	20	60	$3,53 \times 10^{-11}$	6,602222
42	20	80	$5,92 \times 10^{-14}$	7,6276
43	10	40	$1,27 \times 10^{-11}$	7,039162
44	8	32	$6,14 \times 10^{-10}$	6,426494

$$P_t \text{ total} = \text{Jumlah transmitter} \times P_t \text{ efektif} \quad (10)$$

Pada tabel 11 diperlihatkan bahwa penggunaan daya paling kecil untuk mencapai $BER < 1 \times 10^{-9}$ adalah 32 mW dengan menggunakan MIMO 4x4. Tetapi jika ditinjau dari besarnya biaya yang diperlukan untuk membangun perangkat FSO tersebut, MIMO 2x2 sudah cukup baik. Hasil kalkulasi pada subbab 3.4 menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah PD maka redaman total akan semakin kecil. Pada MIMO 3x2 dan 3x3, total daya yang dipancarkan sama tetapi BER rata-rata pada MIMO 3x3 justru lebih besar dari MIMO 3x2. Jika diperhatikan lebih dalam, dari lima iterasi yang dilakukan, BER terendah yang mampu dicapai MIMO 3x3 adalah $9,55 \times 10^{-14}$ sedangkan MIMO 3x2 adalah 1.61×10^{-13} .

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, redaman yang besar pada kondisi cuaca buruk bisa ditanggulangi dengan menggunakan MIMO spatial diversity. Penggunaan MIMO 4x4 dinilai paling baik dengan total daya yang dibutuhkan untuk mencapai BER 1×10^{-9} hanya 32 mW.

5.2 Saran

1. Mengurangi nilai increment untuk hasil BER dan Q yang lebih akurat
2. Menggunakan data rate yang lebih tinggi

DAFTAR REFERENSI

- [1] Zeinab, Jarir, (2009), “Mimo Free Space Optical Communications in Turbid and Turbulent Atmosphere”, Journal of Communications, Vol. 4, No. 8.
- [2] Juma'inah, Erfan, Onny, (2013), “Analysis Peerformansi Orthogonal Frequency Division Multiple Access (Ofdma)Sistem Free Space Optic (FSO) Dalam Kondisi Cuaca Cerah Menurut Standar ITU-R P.1817”, Indonesia, Universitas Brawijaya.
- [3] Neda,Stephen,Malte,(2008), “Performance Bounds for Free Space Optical MIMO System with APD Receiers in Atmospheric Turbulence”, IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 26, NO. 3.
- [4] Damayanti, Tri, (2012),”Teknik Spatial Filter pada Receiver Komunikasi Free Space Optics (FSO) Untuk Menekan Noise Akibat Sintilasi”, Indonesia, Universitas Indonesia.
- [5] ITU-R P.838-3,(2005),” Specific Attenuation Model For Rain For Use in Prediction Methods”.
- [6] Abd Ali, Mazin Ali, (2012), “Free Space Lasers Propagation at Different Weather Conditions”, Irak, Al- Mustansiriyah University, Vol. 23, No 2.
- [7] Nazmi, Mostafa, “ Performance Evaluation of FSO Link Under NRZ-RZ Line Codes, Different Weather Conditions and Receiver Types in the Precense of Pointing Errors”, The Open Electrical & Electronic Engineering Journal, 2012, 6, 28-35
- [8] ITU-R P.1814,(2007), “Prediction Methods Required For The Design of Terrestrial Free-Space Optical Links”.
- [9] Prima, Hani'ah,(2013),” Analisa Frekuensi Scaling pada Redaman Hujan Terhadap Propagasi Gelombang Milimeter”, Indonesia, Institut Teknologi Sepuluh November
- [10] Jan,stanislav,Petr, “Atmospheric Turbulence in Free Space Optics Channel”
- [11] Chaman,Ahmadi,Abedi,”The effect of Atmospheric Turbulence on the Performance of theFree Space Optical Communications”, UK
- [12] Thomas, Fredrick E.,(2003),” The Scintillation Index in Moderate to Strong Turbulence For The Gaussian Beam Wave Along A Slant Path”, USA, University of Central Florida.
- [13] Kaur, Miglani, Malhotra,(2016),”The Gamma-Gamma Channel Model - A Survey”, Indian Journal of Science and Technology, Vol 9(47), DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i47/106796
- [14] Nur,Ahmed,Wajdi, (2012) , “ Performance Analysis of A Free Space Optics Link With Multiple Transmitter/Receivers”, IJUM Engineering Journal, Vol. 13 No. 1.
- [15] Bijayananda,(2013),”Design and Study of High Bit Rate Free Space Optical Communication System Employing QPSK Modulation”, Int. J. Signal and Imaging Systems Engineering, Vol. 6, No. 1.