

ANALISIS PERFORMANSI FSO DENGAN TEKNIK OFDM PADA KANAL KIM DAN KRUSE MENGGUNAKAN MODULASI QPSK

PERFORMANCE ANALYSIS OF FSO WITH OFDM TECHNIQUE IN KIM AND KRUSE CHANNEL USING QPSK MODULATION

Rosyidah Marwa¹, Hurianti Vidyanyingtyas, S.T, M.T², M. Irfan Maulana, S.T, M.T³

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

¹rsydhm@student.telkomuniversity.ac.id, ²huriantividya@telkomuniversity.ac.id,

³muhammadirfanm@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Sistem *Optical Wireless Communication* (OWC) salah satu alternatif teknologi *indoor* dan *outdoor* yang tepat, dimana teknologi *Free Space Optics* (FSO) salah satu pengembangan teknologi komunikasi optik, praktiknya digabungkan dengan teknologi *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) memiliki keunggulan kecepatan data kirim dengan kapasitas *bandwidth* yang besar. Tugas Akhir ini melakukan simulasi dan analisis performansi sistem OFDM pada FSO menggunakan modulasi QPSK dengan kanal *Kim* dan *Kruse* pada pengaruh variasi panjang gelombang, daya kirim terhadap performansi sistem dikondisi *visibility* atmosfer serta jarak dari pengirim ke penerima dengan acuan *Bit Error Rate* (BER) $<10^{-4}$.

Hasil simulasi dan analisis didapatkan peningkatan panjang gelombang dari 850 nm sampai 1550 nm meningkatkan performansi sistem pada kanal *Kim* dikondisi *visibility* atmosfer 0.02 km dan *Kruse* 0.1 km. Peningkatan daya kirim 2 watt dapat menghasilkan peningkatan performansi sistem dikondisi *visibility* atmosfer 0.02 km. Peningkatan panjang gelombang dapat menambah jarak pada kanal *Kim* di *clear air* 0.43 km, *light fog* 0.53 km, *dense fog* 0,02 km dan *Kruse* di *clear air* 0.38 km, *light fog* 0.47 km, namun dikondisi *dense fog* tidak memenuhi standar BER, hanya panjang gelombang 1550 nm yang memenuhi standar BER. Penambahan nilai FFT dapat memperbanyak jumlah *subcarrier* sehingga performansi sistem meningkat dan mengurangi *bit error* sehingga nilai BERnya semakin kecil.

Kata Kunci : FSO, OFDM, QPSK, BER, *Kim*, *Kruse*

Abstract

The *Optical Wireless Communication* (OWC) system is an alternative for *indoor* and *outdoor* technology, where *Free Space Optics* (FSO) technology is one of the developments in optical communication technology, in practice combined with *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) technology has the advantage of data speeds with large bandwidth capacity. This final project simulation and analysis of OFDM performance system at FSO using QPSK modulation with *Kim* and *Kruse* channels on the effect of wavelength variations, transmitted power on performance system in atmospheric visibility conditions and distance from transmitter to receiver with reference to *Bit Error Rate* (BER) $<10^{-4}$.

The results obtained an increasing of wavelength from 850 nm to 1550 nm to increase the performance system in *Kim* channel is 0.02 km and 0.1 km in *Kruse* at atmospheric visibility conditions. An increasing transmitted power 2 watts can result increasing performance system at atmospheric visibility condition by 0.02 km. The increase in wavelength can increase the distance to the *Kim* channel at *clear air* 0.43 km, *light fog* 0.53 km, *dense fog* 0.02 km and *Kruse* at *clear air* 0.38 km, *light fog* 0.47 km, but in conditions *dense fog* doesn't reach BER standards, only 1550 nm reach BER standards. The increasing of FFT value can increase the number of *subcarriers* so that system performance increases and reduces *bit error* so that the BER value is getting lower.

Keywords: FSO, OFDM, QPSK, BER, *Kim*, *Kruse*

1. Pendahuluan

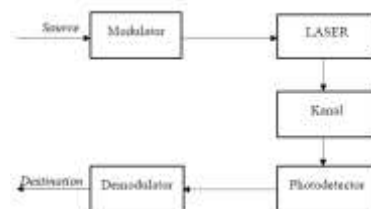
Free Space Optic (FSO) merupakan salah satu teknologi yang dikembangkan dari OWC, merupakan teknologi yang mempunyai kecepatan data yang tinggi dalam media *wireless*, sering kali digunakan sebagai alternatif jaringan kabel serat yang efisien. Dalam pengaplikasiannya dikomunikasi optik, teknologi FSO dapat dikembangkan dengan *Multiplexing Division Frequency Orthogonal* (OFDM) yang merupakan teknik *multiplexing* yang mengkodekan beberapa frekuensi *subcarrier* yang ada menjadi beberapa *subchannel* yang kemudian data tiap *subchannel* yang saling tegak lurus atau *orthogonal*, untuk ditransmisikan secara simultan. Teknik OFDM menghasilkan intensitas sinyal bernilai kompleks dan bersifat *bipolar*, sinyal dimodulasi oleh frekuensi optik *carrier* yang menghasilkan nilai positif (*unipolar*) dan *real* namun intensitas sifat cahaya tidak bisa *negative* maka digunakan *Asymmetrically Clipped Optical OFDM* (ACO-OFDM).

Tugas Akhir ini melakukan simulasi dan analisis Performansi FSO Dengan Teknik OFDM Pada Kanal Kim Dan Kruse Menggunakan Modulasi QPSK untuk mengetahui pengaruh performansi transmisi data yang diterima dengan kualitas *Bit Error Rate* (BER) sebagai parameter untuk kinerja performansi sistem yang digunakan.

2. Dasar Teori

2.1 FSO

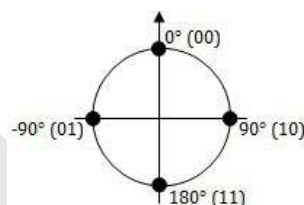
Teknologi *Free Space Optic* (FSO) merupakan pengembangan teknologi komunikasi *fiber optic*. Dalam komunikasi FSO proses pertukaran informasi dapat dilakukan tanpa kanal fisik, sehingga FSO bersifat *direct* atau *Line of Sight* (LOS). FSO mampu memberikan layanan berupa teks, suara, dan video [1]. Dalam sebuah sistem kerja FSO memiliki tiga bagian utama yaitu bagian pertama adalah transmitter yang terdiri dari modulator dan sumber cahaya berupa LASER, bagian kedua yaitu medium kanal berupa ruang bebas/atmosfir dan bagian ketiga adalah receiver yang berupa *photodetector* dan demodulator.



Gambar 2.1 Blok diagram FSO [1]

2.2 QPSK

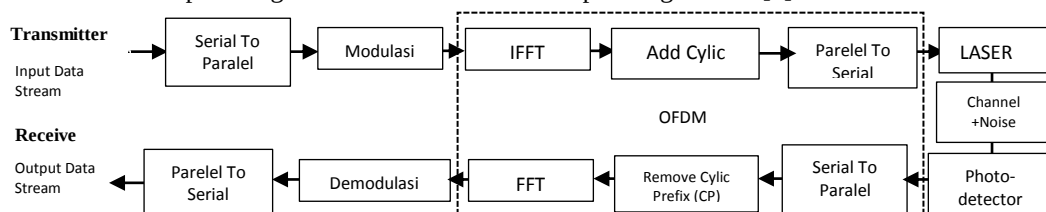
Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) merupakan teknik modulasi yang dikembangkan dari BPSK. Dibedakan dari sisi fasanya yaitu berbeda 90° dan setiap bit akan ditransmisikan 2 bit selama satu interval sinyal [2].



Gambar 2.2 Konstelasi sinyal untuk QPSK [2]

2.3 OFDM

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) merupakan teknik *multiplexing* yang mengkodekan beberapa frekuensi *subcarrier* yang ada menjadi beberapa *subchannel* yang kemudian data tiap *subchannel* yang saling tegak lurus atau *orthogonal*, untuk ditransmisikan secara simultan. OFDM membagi aliran data rate tinggi menjadi aliran data rate yang rendah, yang kemudian dikirimkan secara bersamaan pada beberapa *subcarrier*. *Subcarrier* tersebut dihasilkan menggunakan *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) pada pemancar dan *Fast Fourier Transform* (FFT) pada penerima untuk mendapatkan kembali data, bahkan bila spektral *subcarrier* saling tumpang tindih (*overlapping*), informasi secara sempurna dapat diterima tanpa interferensi antar *subcarrier* dan dapat menghemat *bandwidth* kanal sampai dengan 50% [3].



Gambar 2.3 Blok diagram OFDM [3]

Kemampuan teknik OFDM untuk mengatasi *delay spread*, *multipath Inter-Symbol Interference* (ISI), dan *Inter-Carrier Interference* (ICI) merupakan cara yang efektif untuk memperoleh *throughput* yang tinggi. Sinyal informasi yang dikirim dengan menggunakan *multicarrier* pada OFDM juga membuat performansi sistem lebih tahan terhadap *noise* dan interferensi.

2.3.1 ACO OFDM

Dalam OFDM konvensional, sinyal yang ditransmisikan bersifat bipolar dan kompleks, sedangkan pada sistem OWC sinyal bipolar tidak dapat ditransmisikan, karena intensitas nilai cahaya tidak bisa negatif atau *unipolar* [4]. Sistem *Asymmetrically Clipped Optical OFDM* (ACO-OFDM), sinyal *asymmetrical* sebelum dan sesudah dipotong saat 0 sehingga yang ditransmisikan hanya bagian positifnya saja.

2.4 LASER

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER), merupakan perangkat yang memancarkan cahaya dimana berkas cahayanya memiliki satu karakteristik atau monokromatik. Cahaya yang dipancarkan juga koheren atau memiliki fasa dan arah yang sama sehingga pancarannya juga kecil dan sangat terfokus [5].

2.5 Kanal Atmosfir

2.5.1 Visibility

Visibility atmosfer adalah ukuran yang berguna untuk memprediksi kondisi lingkungan atmosfer, terdapat dua model kanal yang dapat menghitung besar redaman atmosfer menggunakan *visibility* yaitu kanal model *Kim* dan model *Kruse*. Persamaan dasar untuk menghitung besarnya redaman atmosfer adalah sebagai berikut [6],

$$A = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (2.1)$$

V adalah *visibility* dalam km, λ adalah panjang gelombang dalam nm, q adalah ukuran partikel di atmosfer, A adalah redaman atmosfer dalam dB/km, dan 550 merupakan standar acuan rentang panjang gelombang dalam optik dalam satuan nm.

2.5.2 Kim dan Kruse

Visibility adalah jarak pandang atau ukuran jarak (dalam km) dimana suatu benda atau cahaya bisa terlihat dengan jelas dengan jarak 550 nm sebagai acuan rentang panjang gelombang (dalam nm) di optik [7]. Kondisi cuaca yang berbeda dapat ditentukan berdasarkan nilai rentang visibilitasnya. Adapun nilai parameter *Visibility* pada setiap kondisi atmosfer yang ditunjukkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Parameter redaman dan nilai *visibility* [5]

Kondisi Atmosfir	Visibility (m)
Dense Fog	50 (0.05 km)
Thick Fog	200 (0.20 km)
Moderate Fog	500 (0.50 km)
Light Fog	770 (0.77 km)
Very Light Fog	1000 (1.00 km)
Light mist	2000 (2.00 km)
Clear Air	20000 (20.00 km)

Pada model *Kim* memperhitungkan kondisi kabut pada parameter *visibility* dengan nilai dibawah 0.5 km. Sehingga dapat digunakan untuk kondisi berembun atau *visibility* yang rendah karena lebih spesifik [7]. Persamaan untuk kanal model *Kim*,

$$q = \begin{cases} 1.6 & V \geq 50 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} \leq V \leq 50 \text{ km} \\ 0,16V + 0,34 & 1 \text{ km} \leq V \leq 6 \text{ km} \\ V - 0.5 & 0.5 \text{ km} \leq V < 1 \text{ km} \\ 0 & V < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (2.2)$$

Model Kruse, mempertimbangkan kondisi efek partikel yang ada di atmosfer pada panjang gelombang lebih dari 550 nm. Model Kruse dikembangkan untuk kondisi partikel kabut asap (*haze*), dimana ukuran partikel yang lebih besar tidak secara langsung dipertimbangkan, sehingga validitas hasil perhitungan kurang baik untuk *visibility* dibawah 1 km [7]. Persamaan untuk kanal model Kruse,

$$q = \begin{cases} 1.6 & V \geq 50 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} \leq V \leq 50 \text{ km} \\ 0.585V^{1/3} & V < 6 \text{ km} \end{cases} \quad (2.3)$$

2.6 Photodetector

Photodetector merupakan alat pendeteksi bersifat sensitif terhadap cahaya, dalam komunikasi optik terdapat dua jenis *photodetector* utama, yaitu PIN dan APD. Pada APD dapat dirumuskan [7],

$$M = \frac{I_M}{I_P} \quad (2.4)$$

M adalah *Gain*, I_M adalah nilai rata-rata total arus output yang dimultiplikasi, dan I_P adalah arus foton yang tidak dimultiplikasi [7],

$$I_P = R_0 P_r \quad (2.5)$$

Untuk mengetahui gain pada APD, digunakan persamaan sebagai berikut [5],

$$M_{opt}^{x+2} = \frac{\frac{4K_b T}{R_l}}{x \cdot q(I_P + I_D)} \quad (2.6)$$

M adalah gain, x merupakan indeks *excess noise*, K_b merupakan konstanta Boltzman (1.38×10^{-23} J/K), T adalah suhu dalam Kelvin, q adalah muatan elektron (1.6×10^{-19} J), I_P adalah arus primer dan I_D adalah *dark current* pada *photodetector*, dan R_l adalah resistansi beban dalam ohm. M yang telah dioptimasi mengakibatkan perlu penyesuaian *dark current* yang terdapat dalam *photodetector* APD, sehingga *dark current* [8],

$$I_{DM} = \sqrt{2qI_D(M_{opt})^2 B} \quad (2.7)$$

responsivitas dari APD *photodetector* yang dapat ditentukan dengan persamaan berikut,

$$R_{APD} = R_0 M_{opt} \quad (2.8)$$

Maka nilai I_P untuk APD *photodetector* dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut,

$$I_P = P_r R_{APD} M_{opt} \quad (2.9)$$

2.7 Parameter Performansi Sistem

2.7.1 BER

Bit Error Rate (BER) adalah persentase jumlah bit yang diterima dari aliran data melalui saluran komunikasi yang telah berubah karena noise, gangguan distorsi, maupun kesalahan bit sinkronisasi, dimana semakin dekat receiver dengan sumber cahaya, maka BER atau tingkat kesalahan bit akan semakin kecil, sehingga data yang diterima semakin kecil kemungkinan terjadi error dan sebaliknya jika menjauhi dari sumber cahaya maka data yang akan diterima semakin besar kemungkinan terjadi kesalahan (error) yang banyak. Nilai BER dapat diukur dengan persamaan [8],

$$BER = \frac{\text{bit error}}{\text{jumlah bit kirim}} \quad (2.10)$$

Rumus BER yang digunakan pada modulasi QPSK [2],

$$BER = \text{erfc}(\sqrt{SNR}) \quad (2.11)$$

2.7.2 SNR

Signal to Noise Ratio (SNR) bertujuan untuk mengetahui kualitas sinyal informasi yang diterima di *photodetector*. Semakin besar nilai SNR maka dapat dipastikan kualitas sinyal yang diterima semakin baik [8].

$$SNR = \frac{I_P^2}{2qB_w(I_P + I_D)M^x + 4K_bTB_wF_nM^2M^x/R_L} \quad (2.12)$$

M sebagai faktor multiplikasi pada *photodetector* APD, B_w adalah bandwidth, I_D adalah *dark current*, T adalah temperature di *photodetector*, K_b adalah konstanta boltzman, R_L adalah resistansi *photodetector*, F_n sebagai *excess figure* dan I_p adalah arus foto tanpa multiplikasi.

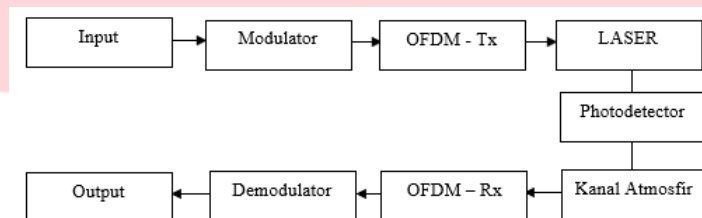
$$P_r = P_t \tau_t \tau_r \frac{D^2}{\theta^2 L^2} \left(10^{\frac{-AL}{10}} \right) \quad (2.13)$$

P_t adalah daya kirim (Watt), τ_t adalah efisiensi pengirim, τ_r adalah efisiensi penerima, D adalah diameter menerima, θ adalah sudut divergensi pengirim, L adalah jarak dari pengirim ke penerima, dan A adalah redaman atmosfer.

3. Perancangan Sistem

3.1 Desain Sistem

Dalam Tugas Akhir ini, perancangan sistem OFDM-FSO ditunjukkan pada Gambar berikut.



Gambar 3.1 Desain perancangan sistem

Sinyal input berupa sinyal informasi berbentuk serial yang berisikan data akan dikirimkan dalam bentuk paralel. Setiap data paralel merupakan satu simbol untuk masing-masing *subcarrier*. Di sisi *transmitter* sinyal input akan ditransmisikan dengan modulasi yang nantinya akan memetakan setiap bit ke domain kompleks sesuai dengan konstelasi modulasi yang digunakan. Pada Tugas Akhir ini menggunakan QPSK. Sinyal input akan diteruskan menuju OFDM berfungsi untuk meminimalisir tingkat ISI dan ICI. Kemudian akan diteruskan ke laser sebagai media penghantar sinyal output. Laser memancarkan cahaya, hal ini berfungsi sebagai proses transmisi. Pada Tugas akhir ini bersifat *Line of Sight* (LOS), sehingga sinyal listrik selanjutnya dirubah kedalam bentuk cahaya yang akan dipancarkan dengan udara sebagai media rambatnya, dimana telah mengandung sinyal informasi yang sudah termodulasi dari blok *transmitter*. Cahaya tersebut di pancarkan oleh laser ke atmosfer menuju penerima. Kanal atmosfer yang digunakan sebagai medium transmisi yaitu kanal *Kim* dan *Kruse*. Dalam proses pentransmisi informasi ke udara akan terjadi banyak kendala karena berada di atmosfer yang mempengaruhi nilai BER, SNR, dan daya yang diterima. Pada Tugas Akhir ini menggunakan APD *Photodetector*, karena lebih baik dalam pengiriman jarak jauh. Cahaya yang telah ditangkap tersebut akan dikonversikan menjadi sinyal listrik. Proses konversi sinyal listrik dari bentuk paralel ke bentuk serial akan dilakukan oleh demodulator sebelum diteruskan ke penerima. Berfungsi untuk menyaring kembali sinyal sehingga tidak terdapat *noise*.

3.2 Diagram alir

Diagram alir pada skenario simulasi yang dilakukan pada Tugas Akhir sebagai berikut.



Gambar 3.2 Flowchart Sistem

Pada Gambar 3.2 menjelaskan alur tahapan dalam pengerjaan Tugas Akhir. Langkah pertama dengan menentukan penginputan parameter yang akan diukur. Langkah kedua mendesain sistem untuk mendapatkan nilai redaman *fog* dengan persamaan yang disesuaikan pada dasar teori. Langkah ketiga menentukan operasi simulasi sistem untuk dilakukan pengujian pada sistem yang dirancang, simulasi dilakukan dengan software MATLAB untuk mendapatkan nilai BER, jika tidak tercapai nilai BER sesuai yang ditentukan, maka dilakukan desain sistem ulang. Tahap terakhir menganalisa hasil simulasi yang didapat dari sistem yang dibuat.

3.3 Parameter Performansi Sistem

Pada penelitian ini menggunakan parameter sebagai berikut:

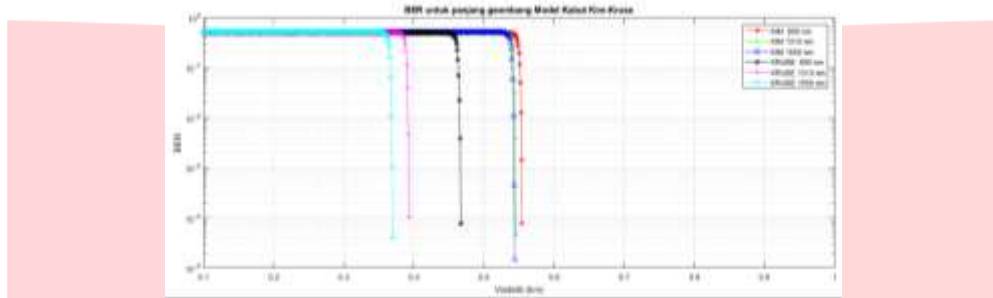
Tabel 3.3 Design Parameter Analisis Performansi

Parameter	Keterangan	Nilai
M	Indeks modulasi	QPSK
λ	Panjang Gelombang	850, 1310, 1550 (nm)
Rb	Bit rate	100 Mbps
Bw	Bandwidth	1.5 Ghz
RL	Hambatan atau Resistansi Beban	50 ohm
D	Diameter Penerima	10 cm
θ	Sudut Divergensi	1×10^{-3} Radian
τ_t	Efisiensi Pengirim	0,75
τ_r	Efisiensi Penerima	0,75
Ro	Responsivitas Photodetector APD	0,75
Mo	Gain Awal	1
Kb	Konstanta Boltzman	$1,38 \times 10^{-23}$ J/K
T	Suhu	298 Kelvin
x	Excess Noise	0,7
q	Muatan Elektron	$1,6 \times 10^{-19}$ Joule
Id	Dark Current	1×10^{-9} Ampere
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform	512
CP	Cyclic Prefix	64

4. Hasil Simulasi dan Analisis

4.1 Skenario I

Pengujian pertama kanal *Kim* dengan variasi panjang gelombang 850 nm, 1310 nm dan 1550 nm. Pengukuran kualitas BER terhadap perubahan *visibility* 0.1 - 1 km dengan rentang di tiap 0.01 km. Parameter jarak transmitter ke receiver 5 km dan daya kirim 1 watt, sesuai gambar 4.1.

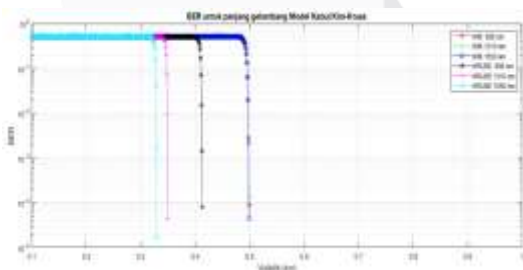


Gambar 4.1 Grafik BER Perubahan Panjang Gelombang pada model *Kim* dan *Kruse*

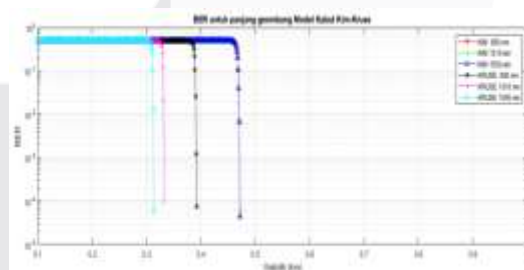
Pengujian simulasi ini menunjukkan bahwa kanal *Kim* mendapatkan *visibility* performansi sistem terbaik pada 0,54 km di panjang gelombang 1550 nm, sedangkan kanal *Kruse* menghasilkan *visibility* performansi sistem pada 0,37 km di panjang gelombang 1550 nm, artinya dalam jarak transmisi 5 km dan panjang gelombang 1550 nm, pada model *Kim* data yang dikirim dapat diterima dengan baik di *visibility* ≥ 0.54 km pada kriteria kondisi atmosfer antara *moderate fog* (0.5 km) dan *light fog* (0.77 km), sedangkan pada kondisi *visibility* < 0.54 km data yang diterima akan terjadi *error* pada kriteria kondisi atmosfer *dense fog* (0.05 km) sampai *moderate fog* (0.5 km). Sedangkan pada model *Kruse* dalam jarak transmisi 5 km dan panjang gelombang 1550 nm, data yang dikirim dapat diterima dengan baik di *visibility* ≥ 0.37 km pada kriteria kondisi atmosfer antara *thick fog* (0.2 km) dan *moderate fog* (0.5 km), sedangkan pada kondisi *visibility* < 0.37 km data yang diterima akan terjadi *error* pada kriteria kondisi atmosfer *dense fog* (0.05 km) sampai *thick fog* (0.2 km). Dengan demikian semakin lebar panjang gelombang mengakibatkan kepadatan ukuran partikel di atmosfer semakin kecil sehingga redaman yang dihasilkan menurun dan kondisi *visibility* atmosfer yang didapat lebih kecil, sehingga dapat menghasilkan sistem performansi yang baik dalam kondisi atmosfer yang mempunyai ukuran partikel yang lebih padat.

4.2 Skenario II

Pengujian kedua kanal *Kim* di panjang gelombang 850 nm, 1310 nm, dan 1550 nm. Kualitas BER terhadap perubahan daya kirim 3 dan 5 watt pada *visibility* 0.1 - 1 km dengan rentang di tiap 0.001 km. Parameter jarak transmitter ke receiver yaitu 5 km, sesuai dengan gambar 4.2 dan 4.3.



Gambar 4.2 Grafik BER pada model *Kim* dan *Kruse* dengan daya 3 watt

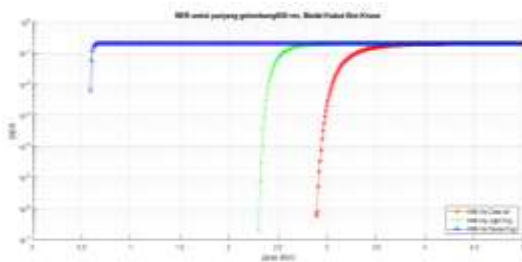


Gambar 4.3 Grafik BER pada model *Kim* dan *Kruse* dengan daya 5 watt

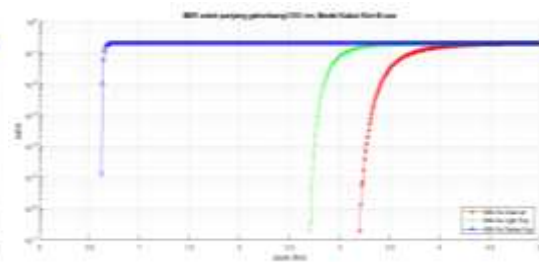
Hasil simulasi menunjukkan bahwa perubahan daya pada kanal *Kim* dan *Kruse* di semua variasi panjang gelombang pada daya 3 dan 5 watt, dimana dengan meningkatkan daya sebesar 2 watt dapat menghasilkan performansi sistem dengan baik pada kondisi *visibility* atmosfer meningkat sebesar 0.02 km, artinya data yang dikirim dapat diterima dengan baik pada kondisi *visibility* atmosfer yang mempunyai ukuran partikel lebih padat.

4.3 Skenario III

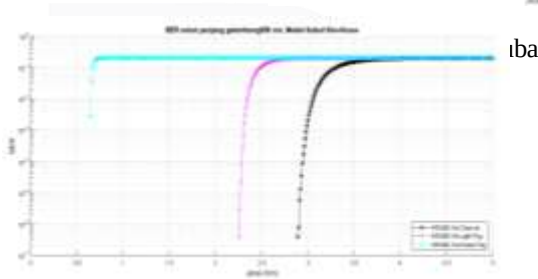
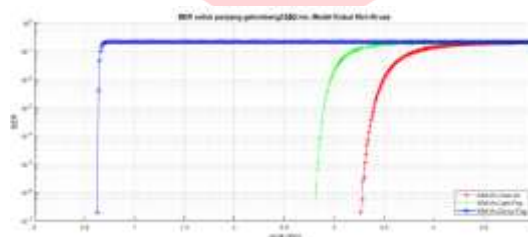
Pengujian ketiga menganalisa BER terhadap perubahan jarak 0 - 5 km dengan rentang 0,01 km. Hal ini dilakukan untuk melihat pengaruh jarak pada performansi BER dengan 3 kondisi atmosfer *Dense Fog*, *Light Fog*, dan *Clear Air* dengan parameter daya kirim 1 watt, sesuai pada gambar 4.4 sampai 4.9.



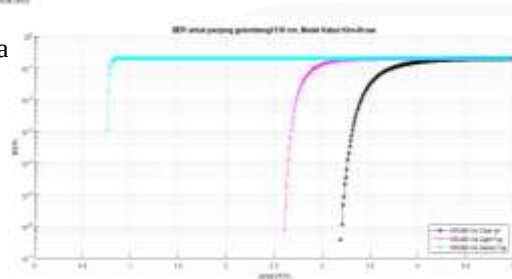
Gambar 4.4 Grafik BER Perubahan Jarak pada 850 nm kanal Kim.



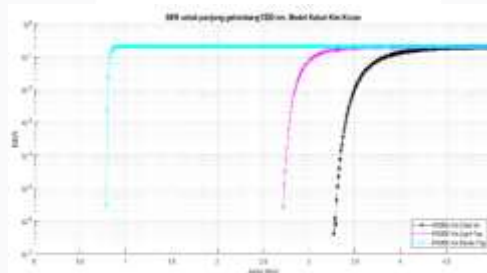
Gambar 4.5 Grafik BER Perubahan Jarak pada 1310 nm kanal Kim.



Gambar 4.7 Grafik BER Perubahan Jarak pada 850 nm kanal Kruse.



Gambar 4.8 Grafik BER Perubahan Jarak pada 1310 nm kanal Kruse.



Gambar 4.9 Grafik BER Perubahan Jarak pada 1550 nm kanal Kruse.

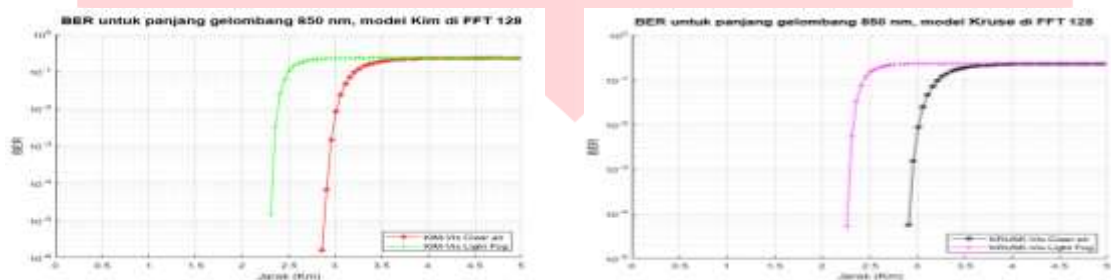
Hasil simulasi didapatkan pada kanal Kim kondisi *Clear Air* peningkatan panjang gelombang 850 nm ke 1310 nm dapat menambah jarak transmisi sebesar 0.35 km, peningkatan panjang gelombang 1310 nm ke 1550 nm dapat menambah jarak transmisi sebesar 0.08 km dan pada kanal Kruse peningkatan panjang gelombang 850 nm ke 1310 nm dapat menambah jarak transmisi sebesar 0.3 km, peningkatan panjang gelombang 1310 nm ke 1550 nm dapat menambah jarak transmisi sebesar 0.08 km. Pada kanal Kim kondisi *Light Fog* peningkatan panjang gelombang 850 nm ke 1310 nm dapat menambah jarak transmisi sebesar 0.34 km, peningkatan panjang gelombang 1310 nm ke 1550 nm dapat menambah jarak transmisi sebesar 0.19 km dan pada kanal Kruse peningkatan panjang gelombang 850 nm ke 1310 nm dapat menambah jarak transmisi sebesar 0.36

km, peningkatan panjang gelombang 1310 nm ke 1550 nm dapat menambah jarak transmisi sebesar 0.11 km. Pada kanal *Kim* kondisi *Dense Fog* peningkatan panjang gelombang 1310 nm ke 1550 nm dapat menambah jarak transmisi sebesar 0.02 km, sedangkan pada kanal *Kruse* hanya di panjang gelombang 1550 nm mengalami peningkatan kualitas BER.

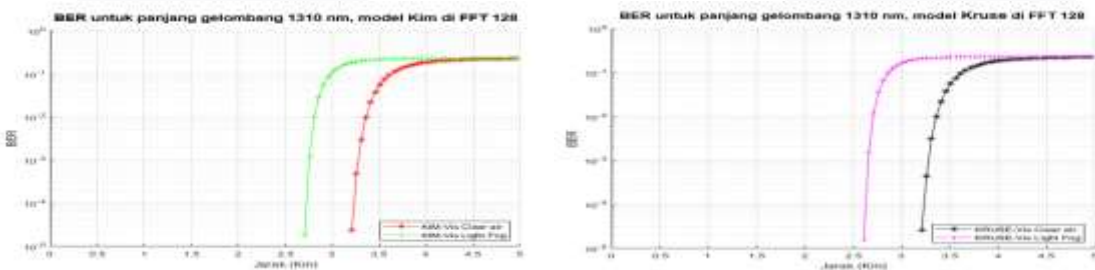
Dengan demikian panjang gelombang berpengaruh terhadap jarak transmisi dari pengirim ke penerima disetiap kondisi atmosfer, dimana semakin lebar panjang gelombang dapat meningkatkan jarak transmisi lebih jauh dengan kualitas BER yang baik.

4.4 Skenario IV

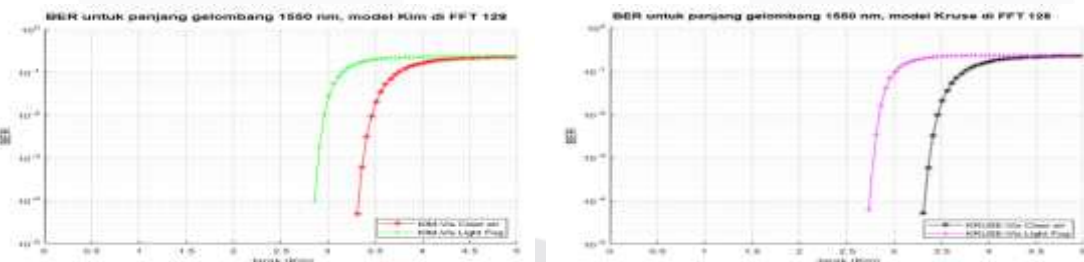
Pengujian keempat menganalisa BER terhadap jarak 5 km dengan rentang 0,05 km. Hal ini dilakukan untuk melihat pengaruh nilai IFFT pada performansi sistem OFDM dengan kondisi atmosfer *Light Fog* dan *Clear Air* dengan daya kirim 1 watt. Simulasi menggunakan software MATLAB untuk mengetahui nilai BER.



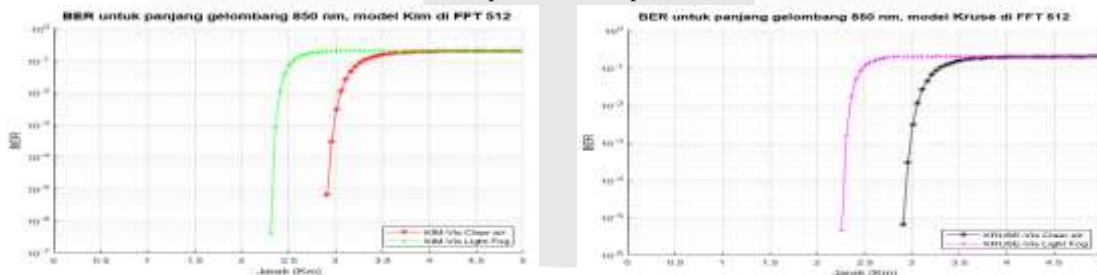
Gambar 4.10 Grafik BER-Jarak pada 850 nm pada FFT 128 di kanal Kim dan Kruse.



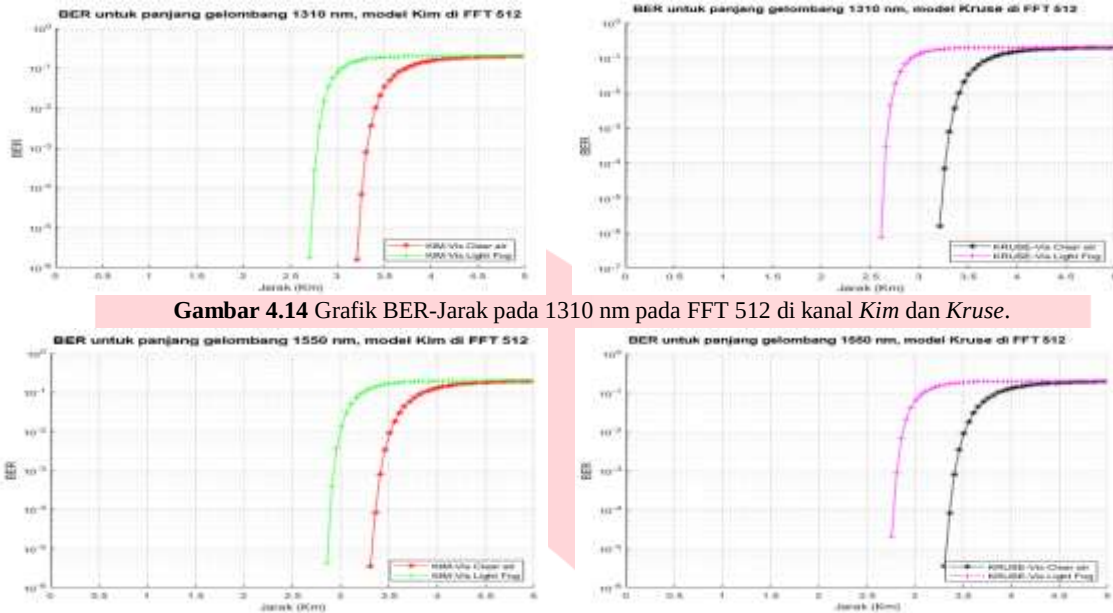
Gambar 4.11 Grafik BER-Jarak pada 1310 nm pada FFT 128 di kanal Kim dan Kruse.



Gambar 4.12 Grafik BER-Jarak pada 1550 nm pada FFT 128 di kanal Kim dan Kruse.



Gambar 4.13 Grafik BER-Jarak pada 850 nm pada FFT 512 di kanal Kim dan Kruse.



Gambar 4.14 Grafik BER-Jarak pada 1310 nm pada FFT 512 di kanal *Kim* dan *Kruse*.

Gambar 4.15 Grafik BER-Jarak pada 1550 nm pada FFT 512 di kanal *Kim* dan *Kruse*.

Hasil simulasi didapatkan pada kondisi atmosfer *clear air*, peningkatan nilai FFT 128 ke 512 pada kanal *Kim* dapat menambah jarak sebesar 0.02 – 0.07 km sedangkan pada kanal *Kruse* dapat menambah jarak sebesar 0.01 – 0.05 km. Lalu pada kondisi atmosfer *light fog*, peningkatan nilai FFT 128 ke 512 pada kanal *Kim* dapat menambah jarak sebesar 0.01 – 0.03 km sedangkan pada kanal *Kruse* dapat menambah jarak sebesar 0 – 0.02 km.

Dengan demikian, semakin tinggi nilai FFT artinya peningkatan jumlah simbol *subcarrier* OFDM, dimana simbol yang ditumpangkan lebih banyak jumlahnya dengan menjaga ke orthogonalitas dari *subcarrier* OFDM sehingga mengurangi *bit error* [9], namun penambahan dari FFT yang terlalu lebar membuat efisiensi performansi sistem kurang efektif, sehingga harus disesuaikan dalam pengaplikasiannya dan semakin lebar panjang gelombang untuk mencapai sisi *receiver* dapat menempuh jarak yang lebih jauh.

5. Kesimpulan

Dari simulasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin lebar panjang gelombang mengakibatkan kepadatan ukuran partikel di atmosfer semakin kecil sehingga redaman yang dihasilkan menurun dan dapat menghasilkan sistem performansi yang baik dalam kondisi atmosfer yang mempunyai ukuran partikel yang lebih padat.
2. Peningkatan daya 2 watt dapat menghasilkan sistem performansi dengan kondisi visibility atmosfer meningkat sebesar 0.02 km dengan kualitas BER yang baik, artinya peningkatan daya kirim data dapat diterima dengan baik pada kondisi visibility atmosfer yang mempunyai ukuran partikel lebih padat.
3. Panjang gelombang berpengaruh terhadap jarak transmisi dari pengirim ke penerima disetiap kondisi atmosfer (*clear air*, *light fog* dan *dense fog*) dapat meningkatkan jarak transmisi lebih jauh dengan kualitas BER yang baik.
4. Penambahan FFT 128 ke FFT 512 dapat memperbanyak jumlah *subcarrier* sehingga performansi sistem meningkat, sehingga dapat mengurangi bit error yang terjadi dengan nilai BERnya semakin kecil.
5. Pengujian pada kedua model kanal menunjukkan kanal *Kim* memiliki sistem performansi dengan kondisi visibility atmosfer lebih jauh daripada kanal *Kruse*, karena model *Kruse* diusulkan untuk kondisi asap (*haze*), yang memiliki efek redaman lebih rendah daripada kabut (*fog*). Hal ini dikarenakan ukuran partikel asap (*haze*) lebih kecil daripada partikel

kabut (*fog*). Oleh karena itu model persamaan *Kruse* memang dapat dikatakan lebih sensitif untuk kondisi kabut (*fog*).

Referensi

- [1] T. S. Hanzra, "Performance of Free Space Optical Communication System with BPSK and QPSK Modulation," *IOSR J. Electron. Commun. Eng.*, 2012, pp. vol.1, no. 3, pp.38-43.
- [2] F. Xiong, "Digital Modulation Techniques," *Artech House, Inc. Norwood, MA.*, vol. vol.02, 2006.
- [3] R. Prasad, "OFDM for Wireless Communications Systems," *Artech House*, pp. pp 11-12, 2004.
- [4] Z. H. Gebeyehu, "BER Performance of Stratified ACO-OFDM for Optical Wireless Communication Over Multipath Channel," in *Journal of Computer Networks and Communications*, 2018, pp. 1-14.
- [5] Z. Ghassemlooy, W. Popoola and S. Rajbhandar, *Optical Wireless Communications*, Taylor & Francis Group, LLC, 2013.
- [6] Marzin, Ali, A and Ali, "Performance Analysis of Fog Effect on Free Space Optical Communication System," *IOSR Journal of Applied Physics (IOSR-JAP)*, vol. volume 7, no. Issue 2 Ver.1, Maret-April 2015.
- [7] M. A. Esmail, H. Fathallah and M. S. Alouini, "Outdoor FSO Communications Under Fog: Attenuation Modeling and Performance Evaluation," *IEEE Photonics Journal*, vol. Volume 8, August 2016.
- [8] G. Keiser, *Optical Fiber Communication* 2nd Edition, McGraw-Hill, Inc, 1991.
- [9] B. Barua and S. Majumder, "Bit Error Rate Analysis of an OFDM Subcarrier Modulated FSO Link with Optical Intensity Modulation and a Direct Detection Receiver," *International Journal of Optic and Photonic Engineering*, Vols. Vol. 4 (ISSN: 2631-5092), no. 1.