

ANALISIS PERFORMANSI OFDM-FSO PADA KANAL KIM DAN KRUSE MENGUNAKAN MODULASI 16-QAM

PERFORMANCE ANALYSIS OF OFDM-FSO ON KIM AND KRUSE CHANNEL USING 16-QAM MODULATION

Dwiky Nugraha Bagus Mahardika¹, Hurianti Vidyningtyas², M. Irfan Maulana³

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

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

³muhammadirfanm@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Tugas Akhir ini bertujuan untuk menganalisa performansi sistem FSO yang telah dikombinasikan dengan OFDM dan diharapkan dengan penggunaan OFDM, performansi FSO dapat lebih optimal saat cuaca dalam kondisi *fog* dengan memperhatikan besaran nilai daya kirim laser dan jumlah *subcarrier* yang berbeda. Pemodelan sistem OFDM-FSO dan *attenuasi fog* yang akurat diharapkan dapat membantu operator telekomunikasi untuk merencanakan jaringan mereka dengan tepat di masa mendatang. Pada Tugas Akhir ini, OFDM-FSO disimulasikan menggunakan modulasi 16-QAM pada tiga jenis *wavelength* yaitu 850 nm, 1310 nm, 1550 nm dengan variasi jarak dari *transmitter* menuju *receiver* sejauh 0.5 km - 5 km dengan rentang per 0.1 km. Hasil Tugas Akhir ini didapatkan bahwa nilai BER yang optimal didapatkan pada saat menggunakan daya kirim sebesar 5 W, *wavelength* 1550 nm, dan *subcarrier* sebesar 512. Daya kirim laser dan jumlah *subcarrier* yang tinggi dapat meningkatkan jarak *link* menjadi semakin jauh. Hal ini disebabkan karena semakin besar daya kirim laser yang dipancarkan, maka *photodetector* dapat menangkap laser tersebut dengan lebih baik sehingga jarak *link* yang ditempuh juga dapat semakin jauh dan dengan menggunakan jumlah *subcarrier* yang besar maka akan mengurangi *subcarrier spacing* dan meningkatkan waktu simbol.

Kata kunci: FSO, OFDM, Fog, Kanal Kim dan Kruse.

Abstract

This final project aims to analyze the performance of the FSO system that has been combined with OFDM and it is hoped that with the use of OFDM the performance of the FSO can be more optimal when the weather is in fog conditions by taking into account the value of laser delivery power and the number of different subcarriers. The OFDM-FSO system modeling and accurate fog attenuation is expected to help telecom operators to properly engineer their networks in the future. In this final project, OFDM-FSO is simulated using 16-QAM modulation at three types of wavelengths, namely 850 nm, 1310 nm, 1550 nm with variations in the distance from the transmitter to the receiver as far as 0.5 km - 5 km with a range every 0.1 km. The results of this final project indicate that the Laser transmit power and a high number of subcarriers can increase the distance the link becomes even further. This is because the greater the sending power of the laser emitted, the photodetector can better capture the laser so that the link distance traveled can also be further away and by using a large number of subcarriers it will reduce subcarrier spacing and increase symbol time.

Keywords: FSO, OFDM, Fog, Kim and Kruse Channel.

1. Pendahuluan

Spektrum frekuensi radio dan fiber optik merupakan suatu teknologi komunikasi yang saat ini masih mendominasi. Akan tetapi, spektrum frekuensi radio merupakan sumber daya alam terbatas yang dikuasai oleh negara. Begitu juga dengan penggunaan kabel fiber optik yang dalam instalasinya memerlukan perizinan terhadap pemerintah terkait lahan. Di sisi lain, OWC mendapatkan perhatian yang meningkat dalam beberapa tahun terakhir karena kemampuan OWC menawarkan transmisi data *rate* tinggi dalam jarak pendek dan dapat memecahkan masalah *lastmile bottleneck*. Keuntungan dari sistem OWC adalah bebas dari regulasi lisensi spektrum, namun kinerja sistem OWC sangat bergantung pada kondisi atmosfer [1]. FSO dan VLC merupakan penerapan dari OWC.

FSO adalah teknologi baru yang menjanjikan untuk mengatasi *last-mile bandwidth bottleneck*. Namun, FSO dipengaruhi oleh *fog* yang dapat sangat mengurangi keandalan FSO. Memprediksi redaman kabut akan membantu untuk mendesain jaringan FSO yang lebih baik yang mengarah pada peningkatan keandalan sistemnya [2]. FSO mentransmisikan sinyal dari *transmitter* menuju *receiver* secara *direct* atau LoS. Prinsip kerja dari FSO yaitu *transmitter* akan merubah sinyal elektrik menjadi sinyal cahaya yang selanjutnya ditransmisikan melalui udara menggunakan Laser. Setelah itu, *receiver* akan menangkap sinyal tersebut dan merubah kembali sinyal cahaya menjadi sinyal elektrik menggunakan *photodetector* [3].

Permintaan *bandwidth* yang tinggi di jaringan area metropolitan (MAN) dan persyaratan untuk layanan yang fleksibel dan hemat biaya menyebabkan ketidakseimbangan yang dikenal sebagai *lastmile bottleneck*. FSO dianggap dapat memberikan solusi yang layak pada masalah *lastmile bottleneck*, karena memiliki properti sebagai berikut [4]:

1. *Directivity* tinggi dari sinar optik yang memberikan efisiensi daya tinggi dan isolasi spasial dari *interferer* potensial lainnya.
2. Spektrum pada FSO tidak memiliki lisensi.
3. *Large-Fractional Bandwidth* ditambah dengan penguatan optik tinggi yang berkekuatan sedang memungkinkan transmisi data *rate* sangat tinggi.
4. Komunikasi serat optik menggunakan IM/DD yang komponennya tersedia secara luas.
5. FSO relatif mudah untuk dipasang dan mudah diakses.

Pada prakteknya, teknologi FSO ini dapat dikombinasikan menggunakan OFDM. OFDM adalah teknik modulasi atau multiplexing yang populer untuk komunikasi nirkabel *broadband* yang kuat untuk *multipath fading* dan *frequency selective fading*. Menggabungkan OFDM dengan FSO, memunculkan FSO berbasis OFDM yang akan memanfaatkan keunggulan keduanya menjadi kandidat yang baik untuk solusi *last-mile bandwidth bottleneck* untuk konektivitas *broadband* dengan kecepatan data berkecepatan tinggi [5].

2. Konsep Dasar

A. ACO-OFDM-FSO

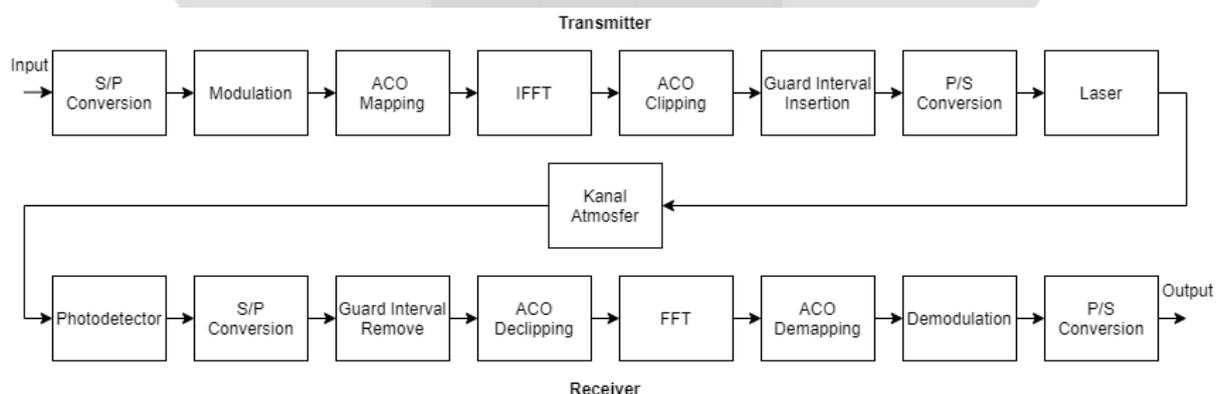
OFDM adalah sejenis transmisi *multicarrier* di mana aliran data *rate* tinggi dibagi menjadi aliran dengan data *rate* rendah dan kemudian ditransmisikan secara bersamaan melalui beberapa *subcarrier*. *Subcarrier* itu sendiri dimodulasi dengan menggunakan PSK atau QAM dan kemudian dibawa pada *high frequency carrier* [6].

OFDM banyak digunakan dalam sistem komunikasi *broadband* kabel dan nirkabel karena ketahanannya terhadap ISI yang disebabkan oleh saluran dispersif. OFDM kini semakin dianggap sebagai teknik modulasi untuk sistem optik, karena memiliki efisiensi daya optik yang lebih baik daripada skema modulasi konvensional seperti OOK dan modulasi PPM [7].

Dalam OFDM konvensional, sinyal yang ditransmisikan adalah bipolar dan kompleks, tetapi sinyal bipolar tidak dapat ditransmisikan dalam OWC, karena intensitas cahaya tidak boleh negatif. Terdapat beberapa jenis OFDM yang dapat digunakan pada sistem OWC yaitu ACO-OFDM, DCO-OFDM. Dalam ACO-OFDM, sinyal yang ditransmisikan diubah menjadi unipolar, dengan cara memotong sinyal asli bernilai negatif dan merubahnya menjadi nilai 0 (tanpa menambahkan arus DC) dan setelah itu sinyal OFDM dapat dikirimkan [7], [8]. Desain sistem dari ACO-OFDM untuk diaplikasikan pada FSO dapat dilihat pada gambar 2.1.

B. Kanal Kim dan Kruse

Partikel *fog* terdiri dari tetesan air yang sangat halus atau es, atau kombinasi dari keduanya di dekat permukaan bumi [9]. Partikel-partikel ini menyebarkan cahaya dan karenanya mengurangi *visibility*. *fog* digambarkan dengan *visibility* kurang dari 1 km dan kelembaban relatif yang mencapai tingkat kejenuhan (100%) [9], [10], [11]. *fog* dijelaskan oleh beberapa parameter seperti distribusi ukuran partikel, LWC, suhu, dan kelembaban [12]. Parameter



Gambar 1 : Desain sistem ACO-OFDM-FSO

International Visibility Code					
Atmospheric Conditions	Weather Constituents (mm/h)		Visibility (m)	Attenuation (dB/km)	
Dense fog			50	315	
Thick fog			200	75	
Moderate fog			500	28.9	
Light fog	Snow	Storm	100	770	18.3
Very light fog				1000	13.8
		Strong rain	25	1900	6.9
Light mist				2000	6.6
		Average rain	12.5	2800	4.6
Very light mist				4000	3.1
		Light rain	2.5	5900	2
				10,000	1.1
Clear air	Drizzle		0.25	18,100	0.6
				20,000	0.54
Very clear air				23,000	0.47
				50,000	0.19

Gambar 2 : International visibility code [17]

terpenting adalah partikel distribusi ukuran yang digunakan untuk dimodelkan dalam literatur dengan distribusi γ yang dimodifikasi [11]. Karakteristik *fog* dapat bervariasi dari satu peristiwa *fog* ke *fog* lainnya atau bahkan selama *fog* yang peristiwanya sama. Itu tergantung pada beberapa faktor seperti musim, lokasi, siklus hidup, dan lain-lain [11], [13]. Karena itu, untuk mengetahui parameter *fog*, terutama distribusi ukuran partikel, penting untuk dijelaskan setiap komponennya. Secara umum, ukuran partikel *fog* sebanding dengan *wavelength* sinyal FSO, oleh karena itu hal ini menyebabkan redaman yang besar untuk *link* FSO. Atenuasi mencapai 480 dB/km pada *dense fog* dan 130 dB/km dalam *light fog* [9], [11]. Saat konsentrasi *fog* meningkat di udara, maka *visibility* jelas menurun.

Dalam FSO, *wavelength* sinyal dipilih untuk beroperasi pada pita serapan rendah. Oleh karena itu, kontribusi penyerapan terhadap koefisien atenuasi total menjadi sangat kecil jika dibandingkan efek hamburan [14]. Maka, mempelajari hamburan partikel *fog* penting untuk memprediksi atenuasi untuk perencanaan dan pemasangan jaringan nirkabel.

Visibility didefinisikan sebagai jarak ke suatu objek di mana perbedaan gambar turun ke persentase tertentu dari apa yang akan terjadi jika objek itu berada di dekatnya [9], [15]. Perbedaan gambar itu turun menjadi 2% dan 5% dianggap dalam definisi *visibility*. *Visibility* diukur pada 550 nm yang mewakili intensitas maksimum spektrum matahari. Untuk definisi 5% *visibility* dan sinar pada 550 nm, hukum Beer-Lambert dapat digunakan untuk redaman spesifik sebagai [13]

$$A = 10 \log(e) \frac{-\ln(0.05)}{V} = \frac{13}{V}, \text{ dB/km} \quad (1)$$

dimana V adalah *visibility* dalam kilometer. Untuk definisi *visibility* 2%, 17 digunakan sebagai pengganti 13 dalam persamaan 1 [16]. Berdasarkan penelitian ini, beberapa model telah diusulkan untuk memprediksi redaman *fog* untuk semua *wavelength* cahaya. Berikut ini, penulis meninjau model utama yang dilaporkan dalam literatur.

Gambar 2 menunjukkan *International Visibility Code*. *Visibility* merupakan jarak pandang dimana suatu benda maupun cahaya dapat terlihat dengan jelas. *Visibility* ini dapat digunakan untuk mengukur besarnya redaman yang ada pada atmosfer. Terdapat dua kanal yang digunakan untuk mengetahui besarnya redaman atmosfer menggunakan *visibility*, yaitu model kanal Kim dan kanal Kruse.

C. Model Kruse

Berawal dari persamaan 1, Kruse menyarankan modifikasi sedemikian rupa sehingga partikel berpengaruh pada panjang gelombang selain 550 nm disertakan. Model Kruse (sejak 1962) telah banyak digunakan oleh banyak orang sebagai model unik yang memprediksi atenuasi dari data *visibility* [18]. Redaman menurut model Kruse diberikan oleh [19]

$$A = \frac{13}{V} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q}, \text{ dB/km} \quad (2)$$

di mana V adalah *visibility* dalam km, dan λ adalah panjang gelombang dalam μm . Model tersebut memperkirakan atenuasi pada pita IR yang terlihat dan dekat [18]. Koefisien q yang bergantung pada distribusi ukuran partikel, ditentukan dari data eksperimen [13], [14], [19] dan ditentukan sebagai berikut:

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

Model Kruse awalnya diusulkan untuk partikel *fog* yang terdiri dari aerosol kecil yang memiliki ukuran partikel yang lebih kecil dari *wavelength* pada pita tampak dan IR. Karenanya, *fog* redup itu memiliki ukuran partikel yang lebih besar tidak secara langsung dipertimbangkan dalam model ini [14], [16], [20], [21]. Model kanal Kruse mengarah ketidakpastian tentang *visibility* untuk jarak pandang kurang dari 1 km.

D. Model Kim

Sebuah studi *visibility* model Kruse oleh Kim menyarankan perubahan model ini untuk parameter *visibility* kurang dari 500 m [14]. Berdasarkan perhitungan teori Mie, model Kim yang diusulkan (2001) menganggap redaman *fog* untuk $V < 500\text{m}$ sebagai panjang gelombang independen. Menurut penelitian ini, koefisien asli q dalam model Kruse dimodifikasi sebagai

$$q = \begin{cases} 1.6, & V < 50\text{km} \\ 1.3, & 6\text{km} < V < 50\text{km} \\ 0.16V + 0.34, & 1\text{km} < V < 6\text{km} \\ V - 0.5, & 0.5\text{km} < V < 1\text{km} \\ 0, & V < 0.5\text{km} \end{cases} \quad (4)$$

E. Power Receiver

Power Receiver adalah daya sinyal yang diterima di *receiver* oleh *photodetector*. Selain redaman sinyal oleh *fog*, sistem komunikasi FSO dipengaruhi oleh turbulensi memudar dan kehilangan geometris, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Efek turbulensi saluran pada sinyal FSO dalam cuaca *fog* lemah, namun dapat diabaikan. Menurut [22] dan [23], saluran *fog* dan turbulensi tidak berkorelasi. Kemungkinan terjadinya turbulensi selama peristiwa kabut rendah terutama di bawah peristiwa kabut tebal. Oleh karena itu, dalam Tugas Akhir ini, penulis mengabaikan efek kanal turbulensi.

Sinyal daya optik yang diterima di depan *photodetector* diberikan oleh [24], [25]

$$P_r = P_t \left(\frac{D_2}{(D_1 + \theta_t L)} \right)^2 \tau_t 10^{(-AL/10)} \tau_r \quad (5)$$

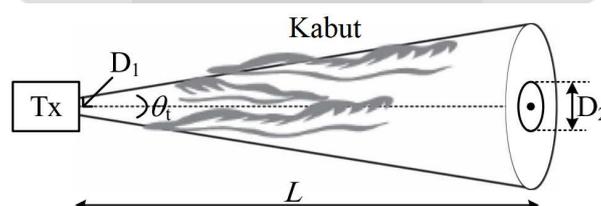
di mana P_t adalah daya yang ditransmisikan, D_1 dan D_2 adalah diameter bukaan *transmitter* dan *receiver*, θ_t adalah sudut divergensi *transmitter* penuh, L adalah panjang tautan, τ_t adalah efisiensi optik *transmitter*, τ_r adalah efisiensi optik *receiver*, dan A adalah faktor atenuasi atmosfer di dB/km.

F. Signal to Noise Ratio

SNR merupakan nilai yang menunjukkan berapa banyak *noise* yang mengganggu sinyal yang ditransmisikan. Nilai SNR digunakan untuk menunjukkan kualitas SNR. Terdapat perbedaan pada persamaan SNR PIN dan APD. SNR dari PIN *photodetector* diberikan oleh [26]

$$\gamma_{\text{PIN}} = \frac{I_p^2}{2eB (I_p + I_D) + 4KTBF_n/R_L} \quad (6)$$

dimana suku pertama dalam penyebut mewakili suara tembakan, dan suku kedua mewakili kebisingan termal. Untuk APD *photodetector*, SNR diberikan oleh



Gambar 3 : Kehilangan saluran dalam sistem komunikasi FSO.

$$\gamma_{\text{APD}} = \frac{M^2 I_p^2}{2eB(I_p + I_D) M^{(2+x)} + 4KTBF_n/R_L} \quad (7)$$

dengan M adalah faktor perkalian longsor rata-rata dan M^x adalah faktor kebisingan berlebih. Parameter gangguan pada persamaan 6 dan 7 didefinisikan sebagai: I_D adalah arus gelap, e adalah muatan elektron, B adalah bandwidth listrik pasca deteksi, T adalah suhu absolut, K adalah konstanta Boltzmann, R_L adalah resistor beban, dan F_n adalah noise figure. Arus foto keluaran karena daya optik insiden diberikan sebagai

$$I_p = RP_r \quad (8)$$

dimana R adalah *responsivity photodetector* dalam A/W . Pertimbangan penting dalam pemodelan kanal saluran FSO adalah *bandwidth* saluran koherensi yang didefinisikan sebagai kebalikan dari saluran *delay spread* [27]. Padahal saat kondisi cuaca cerah, saluran FSO memiliki *delay spread* yang dapat diabaikan, tetapi saat kondisi cuaca kabut, awan sedang, dan hujan berpotensi menghasilkan pelebaran pulsa optik yang dapat menghasilkan ISI dan menurunkan kinerja sistem FSO [27].

G. Bit Error Rate

BER merupakan nilai yang menunjukkan perbandingan dari bit yang *error* dengan bit yang dikirimkan dalam satu kali pengiriman pada sistem transmisi. Standar nilai BER yang digunakan pada sistem komunikasi optik yaitu 10^{-9} . Persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung BER yaitu sebagai berikut [28]

$$BER = \frac{B_E}{B_T} \quad (9)$$

dimana B_E adalah jumlah bit yang *error* dan B_T adalah jumlah bit yang terkirim.

3. Simulasi

A. Skenario Pengujian

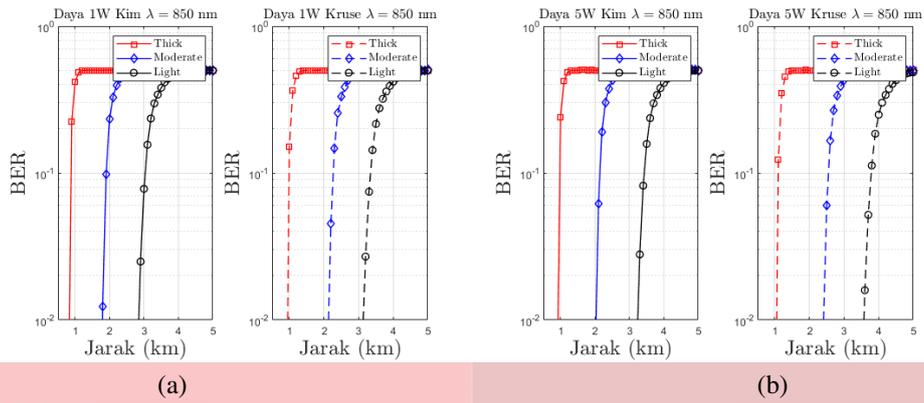
1. Pada Skenario I, dilakukan simulasi menggunakan tiga *wavelength* yang berbeda yaitu sebesar 850 nm , 1310 nm , dan 1550 nm . Daya kirim yang digunakan sebesar 1 W dan 5 W , *subcarrier* yang digunakan sebesar 256, redaman pada kanal dihitung menggunakan model Kim dan Kruse saat cuaca dalam kondisi *thick fog*, *moderate fog*, dan *light fog* dengan variasi jarak $0.5 \text{ km} - 5 \text{ km}$ dengan rentang per 1 km .
2. Pada Skenario II, dilakukan simulasi menggunakan tiga *wavelength* yang berbeda yaitu sebesar 850 nm , 1310 nm , dan 1550 nm . Daya kirim yang digunakan sebesar 1 W , *subcarrier* yang digunakan sebesar 128 dan 256, redaman pada kanal dihitung menggunakan model Kim dan Kruse saat cuaca dalam kondisi *thick fog*, *moderate fog*, dan *light fog* dengan variasi jarak $0.5 \text{ km} - 5 \text{ km}$ dengan rentang per 1 km .

B. Parameter Pengujian

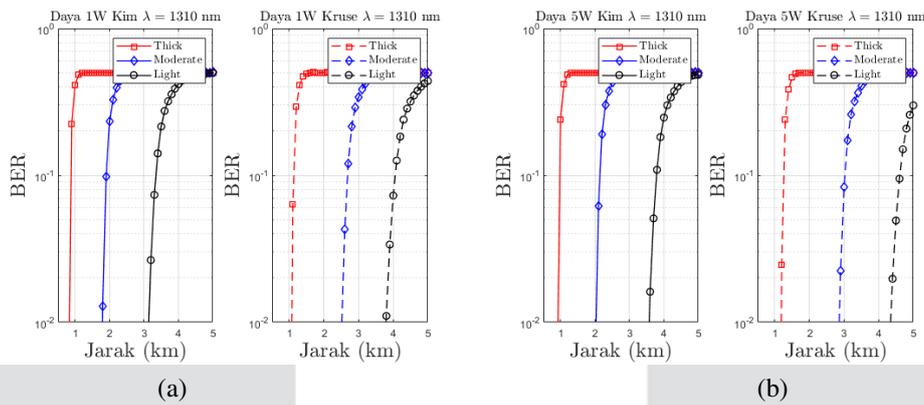
Pada penelitian ini, ditetapkan parameter pengujian sebagai berikut:

	Parameter	Simbol	Nilai
Transmitter	<i>Wavelength</i>	λ	$850 \text{ nm}, 1310 \text{ nm}, 1550 \text{ nm}$
	Efisiensi optik transmitter	τ_t	0.75
	Diameter aperture transmitter	D_t	8 cm
	Sudut beam divergence angle	θ	$2 \times 10^{-3} \text{ rad}$
Receiver	Efisiensi optik receiver	τ_r	0.75
	Diameter aperture receiver	D_r	20 cm
	Muatan elektron	e	$1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
	Resistansi	R_L	1000 ohm
	Konstanta boltzman	K	$1.38 \times 10^{-23} \text{ J.k}$
	Temperature	T	298 K
	APD dark current	I_D	10 nA
	Responsivity	R	0.75 A/W
	Electrical bandwith	B	2.1 GHz
	Noise figure	F_n	1
	Avalanche multiplication factor	M	40
	Excess avalanche noise factor	M^x	$40^{0.7}$

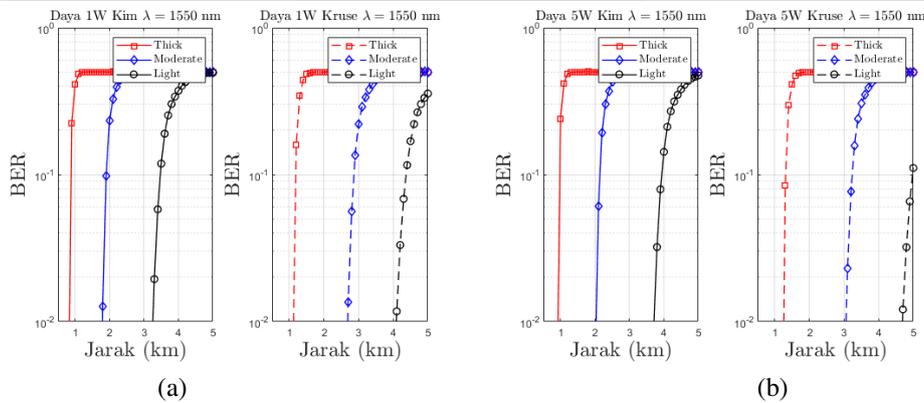
Gambar 4 : Parameter Pengujian



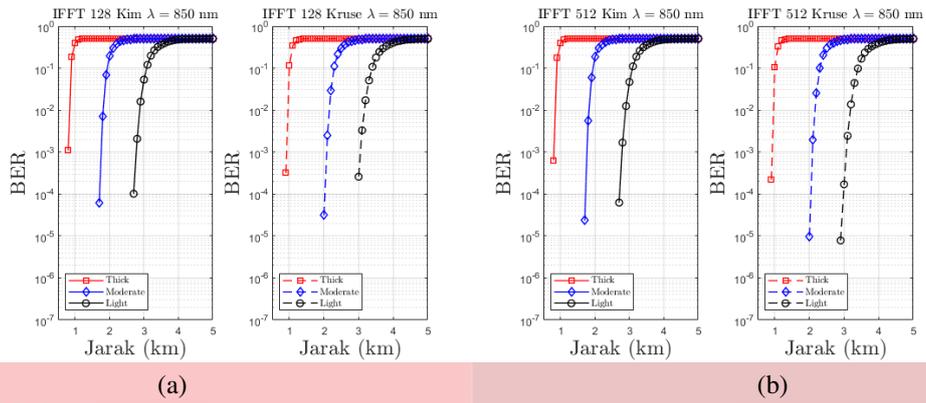
Gambar 5 : Pengujian *wavelength* 850 nm terhadap BER. (a) Daya kirim 1 W. (b) Daya kirim 5 W



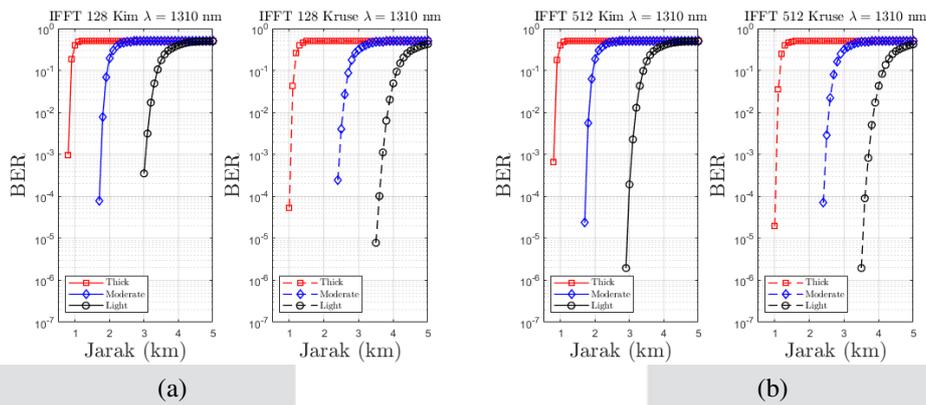
Gambar 6 : Pengujian *wavelength* 1310 nm terhadap BER. (a) Daya kirim 1 W. (b) Daya kirim 5 W



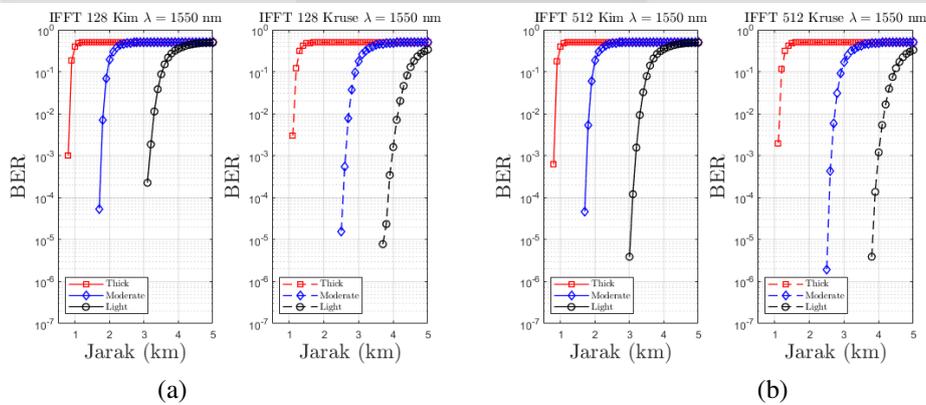
Gambar 7 : Pengujian *wavelength* 1550 nm terhadap BER. (a) Daya kirim 1 W. (b) Daya kirim 5 W



Gambar 8 : Pengujian *wavelength* 850 nm terhadap BER. (a) Subcarrier 128. (b) Subcarrier 512



Gambar 9 : Pengujian *wavelength* 1310 nm terhadap BER. (a) Subcarrier 128. (b) Subcarrier 512



Gambar 10 : Pengujian *wavelength* 1550 nm terhadap BER. (a) Subcarrier 128. (b) Subcarrier 512

4. Analisa Pengujian Skenario I

A. Wavelength 850 nm

Pada Gambar 5 (a) dan 5 (b) menunjukkan bahwa percobaan dengan menggunakan *wavelength* 850 nm dapat meningkatkan performansi OFDM-FSO pada model kanal Kim dan Kruse saat menggunakan daya 5 W daripada menggunakan daya sebesar 1 W. Dimana pada saat menggunakan daya kirim sebesar 5 W maka jarak *link* menjadi semakin jauh. Hal ini disebabkan karena semakin besar daya kirim laser yang dipancarkan, maka *photodetector* dapat menangkap laser tersebut dengan lebih baik sehingga jarak *link* yang ditempuh juga dapat semakin jauh.

B. Wavelength 1310 nm

Pada Gambar 6 (a) dan 6 (b) menunjukkan bahwa percobaan dengan menggunakan *wavelength* 1310 nm dapat meningkatkan performansi OFDM-FSO pada model kanal Kim dan Kruse saat menggunakan daya 5 W daripada menggunakan daya sebesar 1 W. Dimana pada saat menggunakan daya kirim sebesar 5 W maka jarak *link* menjadi semakin jauh. Hal ini disebabkan karena semakin besar daya kirim laser yang dipancarkan, maka *photodetector* dapat menangkap laser tersebut dengan lebih baik sehingga jarak *link* yang ditempuh juga dapat semakin jauh.

C. Wavelength 1550 nm

Pada Gambar 7 (a) dan 7 (b) menunjukkan bahwa percobaan dengan menggunakan *wavelength* 1550 nm dapat meningkatkan performansi OFDM-FSO pada model kanal Kim dan Kruse saat menggunakan daya 5 W daripada menggunakan daya sebesar 1 W. Dimana pada saat menggunakan daya kirim sebesar 5 W maka jarak *link* menjadi semakin jauh. Hal ini disebabkan karena semakin besar daya kirim laser yang dipancarkan, maka *photodetector* dapat menangkap laser tersebut dengan lebih baik sehingga jarak *link* yang ditempuh juga dapat semakin jauh.

5. Analisa Pengujian Skenario II

A. Wavelength 850 nm

Pada Gambar 8 (a) dan 8 (b) menunjukkan bahwa dengan menggunakan *subcarrier* sebesar 512 dapat meningkatkan performansi OFDM-FSO pada *wavelength* 850 nm, daripada menggunakan *subcarrier* sebesar 128. Dimana saat menggunakan *subcarrier* sebesar 512 maka jarak yang ditempuh dapat meningkat. Hal ini disebabkan karena dengan menggunakanh ukuran *subcarrier* yang besar akan mengurangi *subcarrier spacing* dan meningkatkan waktu simbol.

B. Wavelength 1310 nm

Pada Gambar 9 (a) dan 9 (b) menunjukkan bahwa dengan menggunakan *subcarrier* sebesar 512 dapat meningkatkan performansi OFDM-FSO pada *wavelength* 1310 nm, daripada menggunakan *subcarrier* sebesar 128. Dimana saat menggunakan *subcarrier* sebesar 512 maka jarak yang ditempuh dapat meningkat. Hal ini disebabkan karena dengan menggunakanh ukuran *subcarrier* yang besar akan mengurangi *subcarrier spacing* dan meningkatkan waktu simbol.

C. Wavelength 1550 nm

Pada Gambar 10 (a) dan 10 (b) menunjukkan bahwa dengan menggunakan *subcarrier* sebesar 512 dapat meningkatkan performansi OFDM-FSO pada *wavelength* 1550 nm, daripada menggunakan *subcarrier* sebesar 128. Dimana saat menggunakan *subcarrier* sebesar 512 maka jarak yang ditempuh dapat meningkat. Hal ini disebabkan karena dengan menggunakanh ukuran *subcarrier* yang besar akan mengurangi *subcarrier spacing* dan meningkatkan waktu simbol.

6. Kesimpulan

Kondisi *fog* sangat mempengaruhi performansi BER, karena semakin kecil nilai *visibility* maka nilai BER semakin besar diakibatkan intensitas *fog* yang mengganggu pengiriman cahaya laser. Perbedaan besar daya kirim laser dapat mempengaruhi performansi pada sistem OFDM-FSO ini. Ketika ingin memperjauh jarak *link*, maka dapat menggunakan daya kirim yang lebih besar. Hal ini disebabkan karena semakin besar daya kirim laser yang dipancarkan, maka *photodetector* dapat menangkap laser tersebut dengan lebih baik sehingga jarak *link* yang ditempuh juga dapat semakin jauh. Perbedaan besar *subcarrier* dapat mempengaruhi performansi pada sistem OFDM-FSO ini. Ketika ingin memperjauh jarak *link*, maka dapat menggunakan *subcarrier* yang lebih besar. Hal ini disebabkan karena dengan menggunakan ukuran *subcarrier* yang besar maka akan mengurangi *subcarrier spacing* dan meningkatkan waktu simbol. Model kanal Kruse memperoleh hasil jarak yang lebih baik daripada model kanal Kim. Tetapi, bukan berarti model kanal Kim lebih buruk. Hal ini disebabkan karena model kanal Kim mempunyai parameter koefisien q yang lebih detail untuk jarak $< 1\text{km}$.

Reference

- [1] M. Z. Hassan, X. Song, and J. Cheng, "Subcarrier intensity modulated wireless optical communications with rectangular qam," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 6, no. 4, 2012.
- [2] M. A. Esmail, H. Fathallah, and M. Alouini, "Outdoor fso communications under fog: Attenuation modeling and performance evaluation," *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 1–22, 2016.
- [3] D. S. K. Neha, "Free space optical communication: A review," *International Journal of Electronics, Eletrical and Computational System*, vol. 5, no. 9, 2016.
- [4] W. Shieh and I. Djordjevic, *OFDM for optical communications*. Academic Press, 2009.
- [5] N. S. Singh and G. Singh, "Performance analysis of ofdm-fso system using bpsk, qpsk and 8-psk modulation techniques," *International Journal of Computer Applications*, vol. 66, 2013.
- [6] S. K. R, S. K. R, and J. Thomas, "Ofdm in free space optical communication system," *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering (IJIRCCE)*, vol. 3, 2015.
- [7] S. D. Dissanayake and J. Armstrong, "Comparison of aco-ofdm, dco-ofdm and ado-ofdm in im/dd systems," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 7, pp. 1063–1072, 2013.
- [8] J. Armstrong and B. J. Schmidt, "Comparison of asymmetrically clipped optical ofdm and dc-biased optical ofdm in awgn," *IEEE Communications Letters*, vol. 12, no. 5, pp. 343–345, 2008.
- [9] C. C. R. N. F. N. M. S. Awan, E. Leitgeb and M. Khan, "Attenuation analysis for optical wire- less link measurements under moderate continental fog conditions at milan and graz," in *Proc. IEEE 68th Veh. Technol. Conf.*, Calgary, BC, Canada, September 2008, pp. 1–5.
- [10] M. G. et al., "Measurement of light attenuation in dense fog conditions for fso applications," in *Proc. SPIE At- mos. Opt. Model., Meas., Simul.*, vol. 5891, August 2005, pp. 175–186.
- [11] H. S. et al., "Measured and predicted light attenuation in dense coastal upslope fog at 650, 850, and 950 nm for free-space optics applications," *Opt. Eng.*, vol. 47, no. 3, March 2008.
- [12] S. S. M. M. F. F. N. M. S. Khan, M. S. Awan and E. Leitgeb, "Probabilistic model for free- space optical links under continental fog conditions," *Radioeng.*, vol. 19, no. 3, pp. 460–465, September 2010.
- [13] M. A. Naboulsi, "Fog attenuation prediction for optical and infrared waves," *Opt. Eng.*, vol. 43, no. 2, pp. 319–329, February 2004.
- [14] B. M. I. I. Kim and E. J. Korevaar, "Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications," in *Proc. SPIE Opt. Wireless Commun. III*, vol. 4214, February 2001, pp. 26–37.
- [15] E. L. V. K. F. Nadeem, T. Javornik and G. Kandus, "Continental fog attenuation empirical relationship from measured visibility data," *Radioeng.*, vol. 19, no. 4, pp. 596–600, December 2010.
- [16] M. W. K. Fischer and E. Eisenberg, "Optical attenuation in fog at a wavelength of 1.55 micrometers," *Atmos. Res.*, vol. 87, no. 3/4, pp. 252–258, March 2008.
- [17] W. Popoola and S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*, Second Edition, 05 2019.
- [18] M. Grabner and V. Kvicera, "The wavelength dependent model of extinction in fog and haze for free space optical communication," *Opt. Exp.*, vol. 19, no. 4, pp. 3379–3386, March 2011.
- [19] L. D. M. P. W. Kruse and R. B. McQuistan, *Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission and Detection*. New York, NY, USA: Wiley, 1962.
- [20] J. P. O. F. H. L. M. M. Ijaz, Z. Ghassemlooy and E. Bentley, "Modeling of fog and smoke attenuation in free space optical communications link under controlled laboratory conditions," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 31, no. 11, pp. 1720–1726, June 2013.
- [21] J. R. R. M. Pierce and E. C. Eisenberg, "Optical attenuation in fog and clouds," in *roc. SPIE Opt. Wireless Commun. IV*, Loughborough, U.K., November 2001, pp. 58–71.

- [22] A. A. Farid and S. Hranilovic, "Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 25, no. 7, pp. 1702–1710, July 2007.
- [23] M. Grabner and V. Kvicera, "Multiple scattering in rain and fog on free-space optical links," *J. Lightw. Technol.*, vol. 32, no. 3, pp. 513–520, July 2014.
- [24] P. Majumdar and J. Ricklin, *Free-Space Laser Communications: Principles and Advances*. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2010.
- [25] J. S. S. Bloom, E. Korevaar and H. Willebrand, "Understanding the performance of free-space optics [invited]," *J. Opt. Netw.*, vol. 2, no. 6, pp. 178–200, July 2003.
- [26] J. M. Senior, *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. London, U.K.: Prentice-Hall, 1992.
- [27] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on free space optical communication: A communication theory perspective," *IEEE Commun. Surveys Tut.*, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258, 4th Quart. 2014.
- [28] T. Y. Elganimi, "Studying the ber performance, power-and bandwidth-efficiency for fso communication systems under various modulation schemes," in *2013 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)*. IEEE, 2013, pp. 1–6.