

ANALISIS SISTEM *VISIBLE LIGHTS COMMUNICATION* DENGAN BANYAK TRANSMITTER

ANALYSIS *VISIBLE LIGHTS COMMUNICATIONS* SYSTEM WITH MULTIPLE TRANSMITTER

Pradana Indra Muhamad¹, Akhmad Hambali, S.T.,MT. ², Hurianti Vidyaningtyas, S.T., M.T.³

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

¹pradanaim@student.telkomuniversity.ac.id,

²akhmadhambali@telkomuniversity.ac.id,³huriantividya@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Dewasa ini penggunaan lampu *Light Emitting Diode* (LED) semakin meningkat, teknologi ini memiliki berbagai macam kelebihan seperti tidak menimbulkan panas, memiliki jangka waktu penggunaan lebih lama dan penggunaan energi yang lebih hemat. Selain sebagai media penerangan lampu LED ternyata juga dapat dimanfaatkan sebagai media transmisi data. Teknologi ini merupakan suatu alternative yang dapat melayani kebutuhan data yang semakin meningkat, dimana di saat alokasi spektrum frekuensi radio yang sudah sangat padat digunakan.

Pada Tugas Akhir ini akan dilakukan penelitian terhadap pengaruh banyaknya transmitter pada teknologi *Visible Light Communicaton* (VLC). Penelitian ini didasari oleh pentingnya penggunaan jumlah transmitter yang sesuai kebutuhan. Pembahasan Tugas Akhir ini adalah perbandingan data *receive* dari jumlah transmitter terhadap BER dan mengacu pada *coverage area* yang dihasilkan. Jumlah transmitter yang digunakan adalah 2 lampu, 3 lampu, dan 4 lampu menggunakan modulasi DCO_OFDM. Terkait dengan jumlah transmitter yang akan dipakai, Tugas Akhir ini akan membahas *coverage area*, dan *Bit Error Rate* dari masing-masing jumlah transmitter yang dianalisis.

Setelah dilakukan simulasi dan analisis pada Tugas Akhir ini, dapat disimpulkan bahwa jumlah transmitter yang menjadi usulan terbaik untuk digunakan dalam teknologi VLC diruangan tertutup yang menggunakan modulasi DCO-ODM adalah sejumlah 4 buah transmitter. Menggunakan 4 buah transmitter akan membuat *Coverage Area* semakin luas yaitu 25m². Perbandingan antara jumlah transmitter tersebut disajikan di dalam Tugas Akhir ini. Hasil dalam Tugas Akhir ini diharapkan dapat menjadi rujukan dalam pengembangan teknologi VLC untuk masa yang akan datang.

Kata Kunci : VLC, BER, DCO-OFDM, Multi-Transmitter, 2 Lampu, 3 Lampu, 4 Lampu.

Abstract

Nowadays the use of Light Emitting Diode (LED) lamps is increasing, this technology has various advantages such as not causing heat, has a longer usage period and uses energy more efficiently. Aside from being, the LED lighting illumination turns out to also be able to be used as data transmission media. This technology is an alternative that can serve the ever increasing data needs, when the radio frequency spectrum allocation is already very dense used.

In this final project, research will be carried out on the influence of the number of transmitters on Visible Light Communicaton (VLC) technology. This research is based on the importance of using the appropriate number of transmitters. This Final Project Discussion is a comparison of receive data from the number of transmitters to BER and refers to the resulting coverage area. The number of transmitters used is 2 lights, 3 lights, and 4 lights using DCO_OFDM modulation. Regarding the number of transmitters that will be used, this Final Task will discuss the coverage area, and the Bit Error Rate of each number of transmitters analyzed.

After simulating and analyzing this Final Project, it can be concluded that the number of transmitters that are the best proposals for use in closed-room VLC technology using DCO-ODM modulation are 4 transmitters. Using 4 transmitters will make the Coverage Area wider, that is, 25m². Comparison between the number of transmitters is presented in this Final Project. The results in this Final Project are expected to be a reference in the development of VLC technology for the future.

Keywords: VLC, BER, DCO-OFDM, Multi-Transmitter, 2 Lamps, 3 Lamps, 4 Lamps.

1. Pendahuluan

Visible Lights Communications (VLC) belakangan ini telah berkembang menjadi teknologi komunikasi jangka pendek yang baru. VLC membawa banyak keuntungan dibandingkan dengan *Radio Frequency* (RF) seperti pembiayaan yang minim, tahan terhadap interferensi elektromagnetik, dan tingkat keamanan yang tinggi [1].

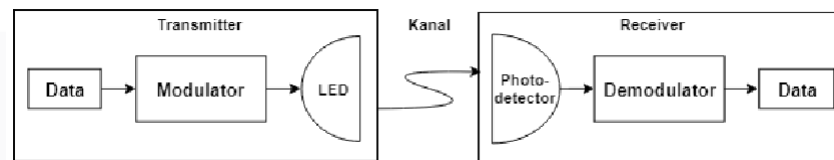
Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) belakangan ini menjadi teknik transmisi yang banyak digunakan untuk teknologi VLC. *OFDM* mempunyai banyak kelebihan dibandingkan dengan teknik modulasi *single carrier*. Keuntungan utama pada *OFDM* adalah mencegah atau mengurangi *intersymbol Interference (ISI)*. *OFDM* memungkinkan untuk dapat meningkatkan *data rate*. Sistem *OFDM* juga membuat bentuk *transciever* menjadi lebih simpel dengan menerapkan algoritma *FFT* dan *inverse FFT (IFFT)* [5].

Pada Tugas Akhir ini dibuat analisis perbandingan *coverage area* dan BER antara penggunaan 2 lampu, 3 lampu, dan 4 lampu.

2. Konsep Dasar

2.1 VLC

Visible Light Communication masuk kedalam bagian dari *OWC* atau *Optical Wireless Communication*. *OWC* merupakan suatu sistem komunikasi tanpa kabel dengan memanfaatkan cahaya sebagai media transmisinya. Teknologi VLC menggunakan spektrum cahaya dengan rentang panjang gelombang dari 350nm sampai 850nm dan rentang frekuensi dari 4.3×10^{14} Hz sampai 7.5×10^{14} Hz[1]. Lampu LED atau *Light Emitting Diode* digunakan di dalam teknologi VLC sebagai sumber cahaya untuk mengirimkan data dari *Transmitter* ke *Receiver*. Tiga bagian utama dalam prinsip komunikasi yang terdapat dalam sistem VLC yaitu LED yang dilengkapi oleh unit pengolahan sinyal sebagai pemancar, kanal transmisi yaitu udara, dan pada sisi penerima terdapat penangkap sinyal cahaya yaitu *photodetector*. Gambar 1 menunjukkan blok diagram sistem kerja VLC. Sinyal listrik masuk ke dalam sistem mapper, kemudian sinyal yang telah di-mapping masuk ke LED dengan membawa sinyal informasi sekaligus menghasilkan cahaya, dan sinyal ditransmisikan melalui kanal.



Gambar 1 Blok Diagram VLC.

Cahaya yang mengandung sinyal melewati kanal kemudian diterima oleh *photodetector* dan diubah kembali menjadi listrik, yang mana energi listrik tersebut akan didemapper sehingga sinyal informasi yang dikirim dan diterima yang sampai di *receiver* sama[1].

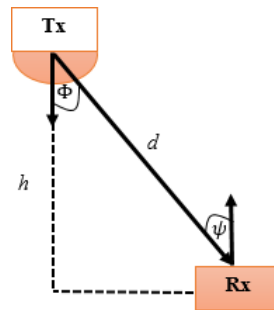
2.1.1 LED

Light-Emitting Diode (LED) adalah komponen elektronika yang dapat memancarkan cahaya monokromatik ketika diberikan tegangan maju atau *forward bias*. LED merupakan komponen elektronika yang terbuat dari bahan semikonduktor. Warna cahaya yang dipancarkan oleh LED bergantung pada jenis bahan semikonduktor yang digunakan. LED juga memancarkan sinar inframerah yang tidak dapat dilihat oleh mata manusia [1].

Cahaya yang tampak pada LED merupakan hasil kombinasi panjang-panjang gelombang yang berbeda dari energi yang dapat terlihat, mata bereaksi melihat pada panjang-panjang gelombang energi elektromagnetik dalam daerah antara radiasi ultraviolet dan infra merah. Cahaya terbentuk dari hasil pergerakan elektron pada sebuah atom.

2.1.2 Kanal Transmisi (LOS)

Kanal LOS atau *Line Of Sight* adalah suatu kondisi dimana distribusi cahaya bersifat langsung atau tidak ada *obstacle* antara *Transmitter* dengan *Receiver*. Kanal LOS terdiri dari 2 jenis yaitu *direct LOS (dLOS)* dan *non-direct LOS (ndLOS)*. *Direct LOS* adalah kondisi dimana sudut yang terbentuk antara LED dan *Photodetector* adalah 0° atau dengan kata lain *Photodetector* tepat berada di bawah lampu LED[2]. Model propagasi kanal LOS direpresentasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kanal LOS Propagasi.

Nilai besar jarak *transmitter* terhadap *receiver* dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

$$d = \sqrt{((X_r) - (X_t))^2 + ((Y_r) - (Y_t))^2 + h^2} \quad (1)$$

Dengan h merupakan tinggi antar lampu dengan *photodetector* di posisi awal, X_r dan X_t merupakan koordinat *receiver* dan *transmitter* pada sumbu x . Sedangkan Y_r dan Y_t merupakan koordinat *receiver* dan *transmitter* pada sumbu y . Untuk menentukan besar sudut perpindahan *receiver*, diperoleh dari rumus berikut.

$$\phi = \arccos \frac{d}{h} \quad (2)$$

Parameter Lambertian (m) memiliki hubungan dengan *semi-angle* setengah daya atau biasa disebut dengan FWHM dirumuskan sebagai berikut

$$m = \frac{-\log_{10}(2)}{\log_{10}(\cos\theta)} \quad (3)$$

Dengan θ adalah FWHM yang nilainya sebesar 50° Kanal LOS dirumuskan oleh

$$H = \frac{(m+1).A.\cos^{(m+1)}\phi}{2.\pi.d^2} \quad (4)$$

Dengan A adalah area *photodetector* pada *receiver*, d adalah jarak *receiver* terhadap *transmitter*. ϕ adalah sudut terhadap *transmitter*. Daya yang kemudian akan diterima oleh *receiver* dirumuskan sebagai berikut.

$$P_{rx} = P_{tot} \cdot H \cdot G_{con} \quad (5)$$

Dengan P_{tot} adalah keseluruhan daya dari lampu LED yang memiliki nilai 7 Watt. H merupakan kanal LOS sesuai persamaan (4). G_{con} merupakan *Gain* dari *concentrator*. Bila tidak ada penambahan *Concentrator*, maka G_{con} dianggap bernilai 1

2.1.3 Parameter Performansi Sistem

Signal to Noise Ratio (SNR) merupakan parameter yang sangat harus diperhatikan. SNR digunakan untuk menunjukkan banyak noise mengganggu sinyal yang ditransmisikan. SNR dengan kata lain berfungsi untuk membandingkan daya sinyal yang diinginkan terhadap background noise. Untuk menghitung SNR, dapat didapatkan dari arus *photodetector* dikalikan dengan faktor multiplikasi, dibagi dengan jumlah dari arus *noise* termal, arus *dark bulk*, arus *dark surface leakage*, dan arus *noise* kuantum, itu semua akan digabung dan hasilnya dapat dirumuskan sebagai berikut[4]

$$SNR = \frac{(P_{rx} \cdot R)^2}{2.q.(I_p + I_D).B.M^2.F(M) + 2.q.I_L.B + \frac{4.K_B.T.B}{R_L}} \quad (6)$$

Bit Error Rate merupakan jumlah bit yang diterima dari aliran data melalui saluran komunikasi yang telah berubah-ubah dikarenakan *noise*, gangguan distorsi, maupun kesalahan bit sinkronasi. BER pada DCO-OFDM dinyatakan dalam persamaan berikut[4].

$$BER = erfc(\sqrt{SNR}) \tag{7}$$

Pada sistem VLC, tingkat kualitas BER dapat dikatakan sudah baik belum ditetapkan secara global besaran nilainya, sehingga pada tugas akhir ini tingkat kualitas BER yang dipakai adalah sebagai berikut

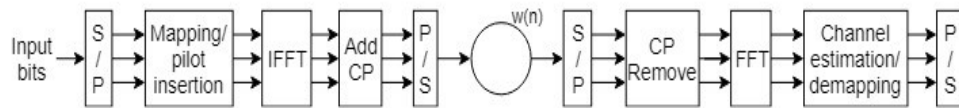
$$BER = 10^{-3} \tag{8}$$

2.1.4 Photodetector

Photodetector merupakan sebuah alat yang digunakan untuk mendeteksi sinyal cahaya yang kemudian nantinya diubah menjadi sinyal listrik. Pada dasarnya, photodetector yang digunakan dalam sistem komunikasi optik ada 2 yaitu PIN diode dan APD. PIN dioda pada dasarnya tersusun dari kutub Positif dan kutub negatif yang dipisahkan oleh daerah intrinsik. Saat diberikan tegangan mundur atau *reverse bias* pada PIN dioda, daerah intrinsik akan mengalami penyempitan. Semakin besar tegangan yang masuk kedalam PIN dioda, semakin kecil daerah intrinsiknya. Untuk mengubah energi foton menjadi arus listrik, maka energi foton harus lebih besar dari energi band-gap yang berasal dari material semikonduktor[3].

2.2 OFDM

OFDM merupakan teknik modulasi yang diterapkan kepada sinyal yang telah termodulasi, sebagai modulasi tingkat kedua. Cara kerja teknik ini yaitu dengan membagi data secara paralel pada sejumlah subkanal pita sempit, lalu tiap data pada subkanal tersebut dimodulasikan dengan sub frekuensi pembawa yang saling *orthogonal* (tegak lurus), setelah itu ditransmisikan secara bersama-sama.



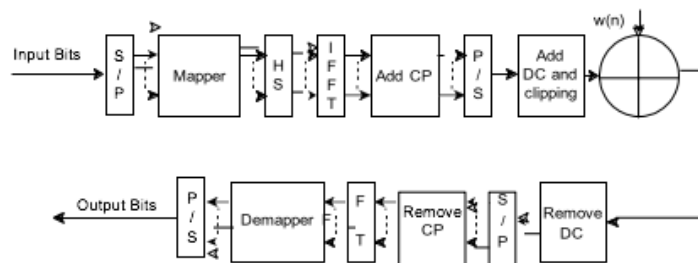
Gambar 3. Blok Diagram OFDM [5].

Prinsip utama dari OFDM adalah pembagian kecepatan tinggi aliran data ke dalam sejumlah aliran data kecepatan rendah kemudian dikirimkan secara simultan melalui suatu *subcarrier*. Sistem OFDM sederhana ditunjukkan pada Gambar 3.

2.2.1 DCO-OFDM

Sinyal OFDM tradisional yang banyak diterapkan pada sistem *Radio Frequency* (RF) adalah kompleks dan bipolar. Karena dalam *intensity modulated/direct detection* (IM/DD) sistem nirkabel optik, sinyal *bipolar* tidak bisa diproses dan intensitas cahaya tidak dapat bernilai negatif, maka pensinyalan untuk sistem VLC haruslah *real* dan *unipolar* [4]. Oleh karena itu, sinyal OFDM tradisional dimodifikasi supaya sinyal informasi tetap dapat dikirim dan dapat sampai di *receiver* dengan utuh.

DCO-OFDM adalah salah satu cara untuk memastikan bahwa tidak ada sinyal negatif yang masuk ke dalam LED. Dalam DCO-OFDM diperlukan *Hermitian symmetry* agar semua sinyal yang keluar dari IFFT bernilai real. Kemudian DC Bias ditambahkan untuk menghilangkan sinyal yang bernilai negatif. Namun untuk mendapatkan DC bias yang optimal tergantung pada jumlah subcarrier. Untuk konstelasi yang lebih besar seperti 256-QAM, DC bias harus lebih tinggi agar bisa mendapatkan sinyal DCO-OFDM yang tidak perlu dipotong.

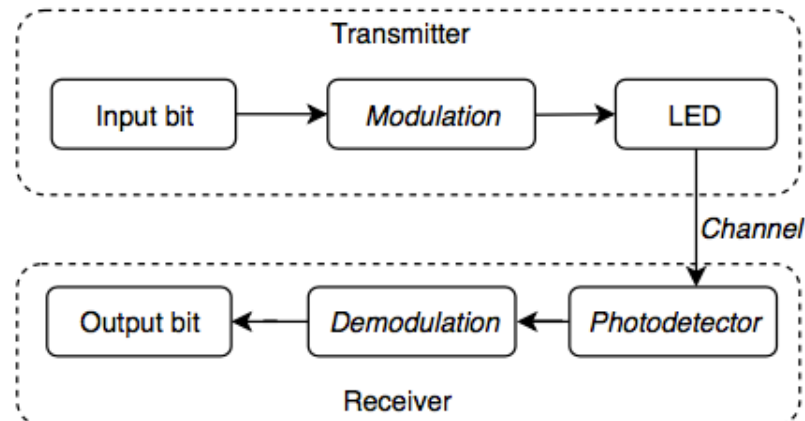


Gambar 4. Blok Diagram DCO-OFDM [5].

3. Perancangan Sistem

3.1 Design Sistem

Pada tugas akhir ini, terdapat sebuah perancangan sistem untuk menganalisis dalam penambahan *transmitter* di titik sudut yang berbeda dalam ruangan tertutup pada teknologi VLC. Dengan menggunakan kanal LOS, percobaan akan menggunakan 2 lampu, 3 lampu, dan 4 lampu. Tugas akhir ini menggunakan ruangan tertutup dengan ukuran 5x5x3 meter dan memasang *transmitter* di langit-langit ruangan. Kordinat tengah dari dasar ruangan adalah (0,0,0). Adapun perancangan sistem tersebut adalah sebagai berikut:

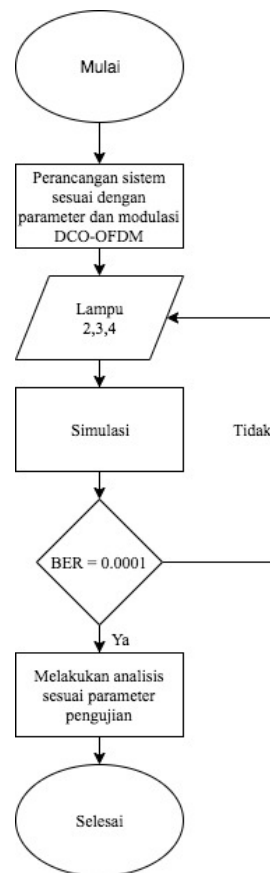


Gambar 3.1 Perancangan sistem.

Pada Gambar 3.1 di atas menjelaskan mengenai perancangan sistem pada tugas akhir ini.

1. **Input Bit**
Input Bit yang berada di dalam blok diagram VLC pada penelitian ini adalah proses masukan bit digital dengan kondisi 0 dan 1 yang membawa sinyal informasi data.
2. **Modulation**
Modulator merupakan tempat dimana proses modulasi berlangsung. Teknik modulasi yang digunakan dalam penelitian Tugas Akhir ini adalah modulasi multiplexing DCO-OFDM
3. **LED**
LED merupakan kepanjangan dari *Light Emitting Diode*, LED dalam tugas akhir ini digunakan untuk sumber cahaya untuk sistem VLC
4. **Kanal**
Kanal merupakan sebuah jalur yang digunakan dalam sebuah media komunikasi. Kanal yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah *Line Of Sight (LOS)*.
5. **Photodetector**
Photodetector merupakan sebuah perangkat yang digunakan untuk menerima sinyal optik kemudian diubah menjadi sinyal elektrik. Adapun *Photodetector* yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah jenis *Positive Intrinsic Negative (PIN)* dioda.
6. **Demodulation**
Demodulation merupakan sebuah blok dimana proses demodulasi berlangsung, atau dengan kata lain proses pemecahan data yang termodulasi kedalam bentuk semula.
7. **OutputBit**
Data yang sudah melalui beberapa proses yang ada di blok diagram VLC kemudian keluar menjadi *output bit* yang diharapkan bentuknya seperti semula.

3.2 Diagram Alir



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian Multiple Transmitter

Pada Gambar 3.2 menunjukkan langkah-langkah yang akan dilakukan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini. Langkah-langkah tersebut meliputi :

1. Menentukan parameter-parameter yang akan digunakan pada kedua sistem.
2. Parameter volume ruangan yang digunakan adalah dalam bentuk persegi panjang yang mempunyai ukuran 5m x 5m x 3m.
3. *Transmitter* diletakan di langit-langit ruangan.
4. Penambahan modulasi DCO-OFDM pada *Transmitter*. Setelah semua selesai, baru akan dilakukan simulasi dengan parameter yang harus dipenuhi.
5. Parameter yang harus dipenuhi antara lain adalah nilai BER yang sama dengan atau mendekati 10^{-3} . Apabila parameter tersebut sudah terpenuhi, selanjutnya adalah menganalisis hasil simulasi dengan melihat jumlah *Transmitter* terbaik pada sistem VLC tersebut.
6. Dimensi ruangan yang digunakan dalam simulasi ini adalah berukuran 5x5x3 meter dengan mengasumsikan ruangan kedap cahaya sehingga tidak ada interfensi antar cahaya yang dihasilkan oleh lampu dan dengan dari cahaya lain.
7. Design ruangan memakai kanal *Line of Sight* (LOS) antara *receiver* dan *transmitter*nya.
8. Spesifikasi lampu LED pada Tugas Akhir ini menggunakan lampu LED sejumlah 2 lampu, 3 lampu, dan 4 lampu berbeda dengan setiap percobaan simulasinya, dengan daya total keseluruhan 7 watt.
9. Spesifikasi *photodetector* yang digunakan adalah PIN. *Photodetector* ini dirancang untuk pengguna LED sebagai sumber cahayanya. *Photodetector* jenis ini memiliki nilai responsivitas sebesar 0,55 A/W. *Photodetector* yang digunakan mempunyai luas permukaan sebesar 1cm^2 dengan *Field of View* (FOV) sebesar 70° . FOV adalah cakupan area yang dapat ditangkap oleh *photodetector* secara optimal. Letak *photodetector* mempunyai titik koordinat yang berbeda-beda namun memiliki ketinggian yang sama yaitu 0.85 meter dari permukaan tanah.
10. Bitrate yang digunakan sebesar 1 Gbps dan Bandwith sebesar 1 GHz

3.3 Parameter Performansi Sistem

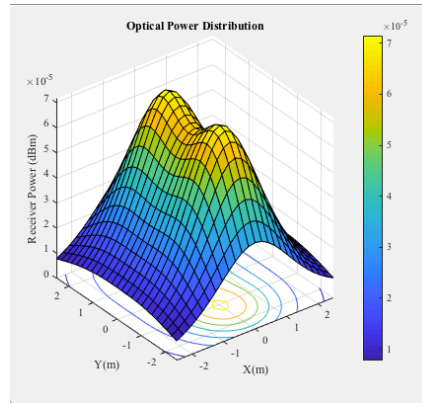
Tabel 3.1 Tabel Parameter Simulasi.

Parameter		Nilai
Ruangan	Ukuran	5x5x3 meter
<i>Source</i>	Jenis	Lampu LED
	Jumlah	2 (Dua), 3 (Tiga), dan 4 (Empat) Buah Lampu.
	Daya Total	7 Watt
	Lokasi	2 transmitter: (0,1.25,3)m; (0,-1.25,3)m
		3 transmitter: (-1.25,1.25,3)m; (-1.25,-1.25,3)m; (1.25,-1.25,3)m
		4 transmitter: (-1.25,1.25,3)m; (-1.25,-1.25,3)m; (1.25,-1.25,3)m; (1.25,1.25,3)m
Fotodioda	Area Detektor	1cm ²
Parameter		Nilai
	Fov	77°
	Responsivitas	0,85 A/W
Lain-lain	Bit Rate	1000 Mbps
	Jumlah Bit	10 ⁶ Bit
	SNR	1 sampai 6
	BER	10 ⁻³
	Q-Factor	4

4. Hasil Analisis dan Pengujian Sistem

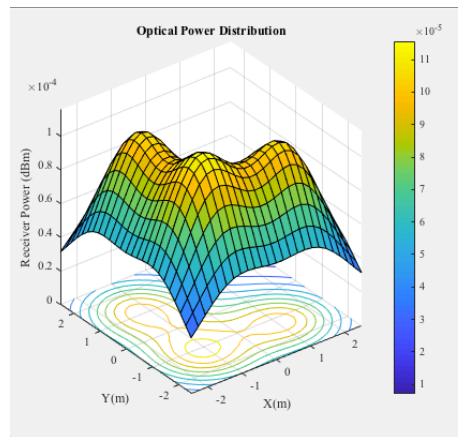
4.1 Hasil Simulasi Pengujian Distribusi Cahaya LED Dengan 2 Lampu, 3 Lampu, dan 4 Lampu

Langkah pertama sebelum melakukan pengujian scenario yang telah dibuat, dilakukan terlebih dahulu simulasi distribusi cahaya LED dengan menggunakan daya input total 7 Watt untuk ruangan 5x5x3 Meter. Pada simulasi ini diasumsikan ruangan kosong berbentuk kubus dimana lampu LED diletakan di atas ruangan, Pada gambar 4.1 menunjukkan grafik dari dsitribusi cahaya LED menggunakan 2 lampu dan dengan daya total 7 Watt.



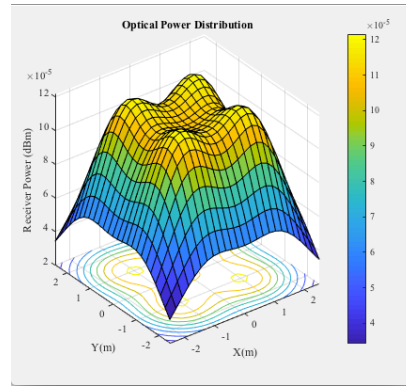
Gambar 4.1 Distribusi cahaya LED 2 Lampu dengan daya total 7 Watt.

Pada saat kedua LED mempunyai daya total 7 Watt, dia menghasilkan daya output maksimal sebesar 7.1529×10^{-3} watt pada tengah ruangan atau di koordinat (0,0) dan daya output minimal sebesar 7.775×10^{-4} watt di koordinat (-2,2). Warna kuning pada Gambar 4.1 menggambarkan daya output maksimal yang dapat ditangkap oleh *receiver* dan warna biru untuk daya *output* minimal. Setiap kotak mepresentasikan nilai distribusi daya yang diterima oleh receiver.



Gambar 4.2 Distribusi cahaya LED 3 Lampu dengan daya total 7 Watt

Pada saat ketiga LED dinyalakan secara bersamaan dengan dan dengan daya total 7 Watt, sistem tersebut menghasilkan daya output maksimal sebesar 8.09764×10^{-3} watt pada koordinat (-1,-1) dan daya output minimal sebesar 4.9477×10^{-4} watt di koordinat (2,2). Warna kuning pada Gambar 4.2 menggambarkan daya output maksimal yang dapat ditangkap oleh *receiver* dan warna biru untuk daya *output* minimal. Setiap kotak mepresentasikan nilai distribusi daya yang diterima oleh receiver.



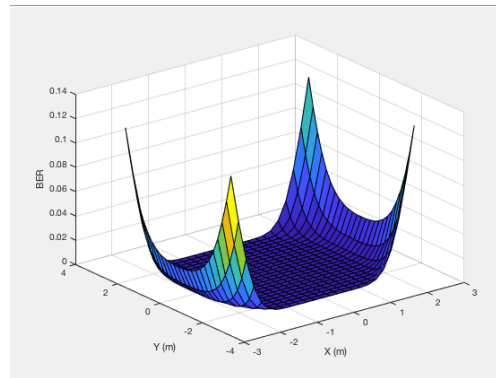
Gambar 4.3 Distribusi cahaya LED 4 Lampu dengan daya total 7 Watt.

Pada saat penambahan LED dari 3 buah menjadi 4 buah, sistem mempunyai daya total 7 Watt, dia menghasilkan daya output maksimal sebesar 8.51×10^{-3} watt pada koordinat masing-masing di $(-1,-1)$, $(1,-1)$, $(1,1)$, dan $(-1,1)$ dan daya output minimal sebesar 2.938×10^{-3} watt pada koordinat masing-masing di $(-2,2)$, $(2,-2)$, $(2,2)$, $(-2,2)$. Warna kuning pada Gambar 4.3 menggambarkan daya output maksimal yang dapat ditangkap oleh *receiver* dan warna biru untuk daya *output* minimal. Setiap kotak merepresentasikan nilai distribusi daya yang diterima oleh receiver.

Dari ketiga simulasi tersebut, dapat dilihat pengaruh terhadap penurunan daya yang dipengaruhi oleh redaman terhadap jarak, dan penambahan transmitter membuat daya yang diterima oleh receiver juga berubah. Setelah didapat output dari masing-masing titik, langkah selanjutnya adalah menganalisis terhadap pengaruh Teknik modulasi DCO-OFDM pada sistem VLC dengan banyak transmitter.

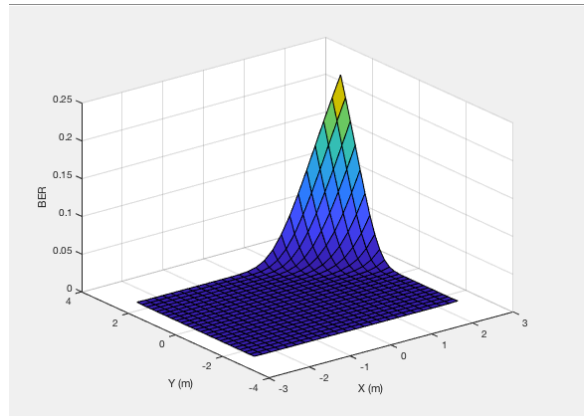
4.2 Hasil Simulasi dan Analisis Pengujian DCO-OFDM pada 2 Lampu, 3 Lampu, dan 4 Lampu.

Pada Skenario 2 membahas coverage area dari sistem VLC menggunakan Teknik modulasi DCO-OFDM dengan masing-masing 2 lampu, 3 lampu, dan 4 lampu. Analisis dilakukan dari hasil simulasi BER coverage 2 lampu.



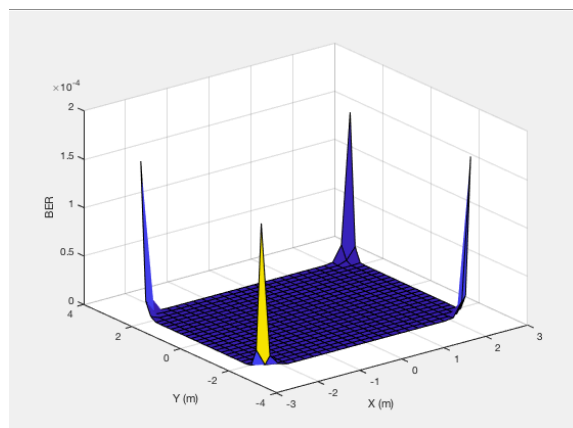
Gambar 4.4 Coverage Area BER dengan 2 Lampu

Pada gambar 4.4 menunjukkan hasil BER Coverage DCO-OFDM dengan daya input total 7 Watt. Jarak propagasi optimal yang didapat adalah ditengah ruangan sebesar 2.496 Meter dengan nilai BER 0. Pada gambar tersebut dapat dilihat nilai BER semakin buruk apabila receiver di letakan di setiap ujung ruangan. Pada koordinat $(-2,2)$ nilai BER adalah sebesar 0.12116127. Sedangkan jika receiver diletakan semakin mendekati tengah ruangan, BER nya akan semakin baik. Pada koordinat $(-1,2)$ nilai BER adalah 1.91×10^{-3} , Pada koordinat $(-1,2)$ nilai BER adalah 1.84×10^{-3} , Pada koordinat $(1,-2)$ nilai BER adalah 1.96×10^{-3} , lalu pada koordinat $(1,2)$ nilai BER adalah 1.91×10^{-3} . Gambar 4.4 menunjukkan bahwa dengan 2 lampu, sistem VLC belum mendapatkan cakupan area yang maksimal. Cakupan dengan warna biru tua menunjukan Luas Coverage area yang dihasilkan sebesar 20.44 m^2 . Hal itu disebabkan oleh adanya penurunan daya yang diakibatkan oleh redaman terhadap jarak sehingga menyebabkan nilai BER semakin meningkat. Jadi untuk cakupan yang maksimal, dilakukan penambahan lampu pada ruangan $5 \times 5 \times 3$ tersebut.



Gambar 4.5 Coverage Area BER dengan 3 Lampu

Pada Gambar 4.5 ditunjukkan Penambahan transmitter pada sistem VLC menjadi 3 lampu. Jarak propagasi yang dihasilkan adalah 2.5979 m dan dengan nilai BER sebesar 0. Gambar 4.5 juga menunjukkan dengan penambahan 3 lampu dengan daya total 7 watt, coverage area yang dihasilkan menjadi lebih luas. Sama seperti percobaan diatas, apabila receiver diletakan di tengah ruangan nilai BER akan menjadi sangat bagus dengan nilai 0. Sedangkan jika receiver diletakan di ujung ruangan yang tidak tercover oleh lampu yang ditunjukkan dengan warna kuning pada gambar dengan koordinat (2,2), nilai BER nya akan menyentuh nilai yang paling buruk dengan nilai sebesar 0.22862969. Lalu jika receiver diletakan di ujung ruangan yang lain yang ter-cover oleh lampu ditunjukkan dengan warna biru pada gambar dengan koordinat (-2,-2), (2,-2), dan (-2,2) nilai BERnya masing-masing akan sebesar 2.21×10^{-3} , 5.1×10^{-3} , dan 4.9×10^{-3} . Sistem tersebut belum bisa mencangkup keseluruhan ruangan. Coverage area yang dihasilkan dari simulasi tersebut adalah $22.8 m^2$.



Gambar 4.6 Coverage Area BER dengan 4 Lampu

Dapat dilihat pada gambar 4.6, penambahan transmitter dengan daya total 7 watt menjadi 4 lampu pada ruangan $5 \times 5 \times 3$ m menunjukkan bahwa sistem tersebut sudah bisa mencangkup keseluruhan ruangan dengan jarak propagasi yang dihasilkan adalah 2.783 m dan nilai BER yang dihasilkan adalah 0. Luas coverage yang dihasilkan adalah $25 m^2$. Nilai BER jika receiver diletakan di ujung-ujung terjauh ruangan dengan koordinat (2,-2) adalah 1.62×10^{-3} , dengan koordinat (2,2) adalah 1.51×10^{-3} , dengan koordinat (-2,-2) adalah 1.59×10^{-3} , lalu dengan terakhir dengan koordinat (-2,2) adalah sebesar 1.52×10^{-3} . Penambahan menjadi 4 transmitter menjadi cakupan yang paling maksimal. Hal tersebut dibuktikan dengan nilai BER $< 10^{-3}$ pada seluruh titik ruangan .

4.3 Rekapitulasi Data dan Analisis Hasil Simulasi

Tabel 1 Parameter Simulasi.

Jumlah Transmitter	Daya Total LED	Jarak propagasi optimum	BER pada jarak propagasi optimum	Luas Area cakupan	BER terburuk pada jarak terjauh coverage lampu
2	7 W	2.496 m	0	20.44 m ²	0.12116127
3	7 W	2.597 m	0	22.8 m ²	0.22862969
4	7 W	2.783 m	0	25 m ²	0.00016278

Simulasi percobaan sistem VLC menggunakan modulasi multiplexing DCO-OFDM yang menggunakan 2 transmitter, area cakupan yang dihasilkan adalah 20.44 m². Lalu saat ditambahkan menjadi 3 transmitter, area cakupan yang dihasilkan menjadi 22.8 m². Lalu pada percobaan simulasi terakhir yaitu penambahan transmisi menjadi 4 transmitter, area cakupan yang dihasilkan adalah sebesar 25 m². yang berarti dapat mencangkup luas seluruh area dalam ruangan.

Selain penambahan jumlah transmisi yang mempengaruhi performansi sistem, penggunaan Teknik modulasi DCO-OFDM juga membantu menghasilkan performansi yang lebih baik khususnya pada area cakupan yang dihasilkan. Performa yang baik tersebut disebabkan oleh penambahan jumlah transmisi yang berarti daya input akan ikut bertambah dan ditambah dengan tingkat efisiensi daya yang tinggi yang disebabkan oleh modulasi multiplexing DCO-OFDM.

5. Kesimpulan

1. Sistem VLC yang menggunakan Teknik modulasi multiplexing DCO-OFDM dengan menggunakan 2 transmitter lampu LED dengan daya total 7 watt masih belum mencangkup seluruh titik pada ruangan. Sedangkan untuk 3 transmitter lampu LED, masih belum juga mencangkup seluruh ruangan. Jumlah transmitter led rekomendasi yang ideal adalah 4 lampu LED.
2. Dengan menggunakan 2 transmitter dan menggunakan Teknik modulasi multiplexing DCO-OFDM mendapatkan luas area coverage sebesar 20.44 m². Kemudian saat ditambahkan transmitternya menjadi 3 buah lampu LED mendapatkan luas area coverage sebesar 22.8 m². Lalu saat penambahan transmitter menjadi 4 buah LED, luas area coverage menjadi sebesar 25 m².
3. Dengan menggunakan 2 transmitter dan menggunakan Teknik modulasi multiplexing DCO-OFDM, jarak propagasi optimal yang didapat adalah sebesar 2.49 m. Saat penambahan menjadi 3 transmitter, jarak propagasi optimalnya menjadi 2.59 m. Kemudian saat penambahan menjadi 4 transmitter, jarak propagasi optimalnya mencapai 2.79 m.
4. Teknik modulasi multiplexing DCO-OFDM memiliki power efficiency yang baik.
5. Pemakaian jumlah transmitter pada sistem VLC ini terkait dengan parameter performansi BER dan Luas coverage area adalah pemakaian dengan 4 buah transmitter.

6. Daftar Pustaka

- [1] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," *IEEE Trans. Consum. Eletron.*, vol. 50, no. 1, pp. 100–107, 2004.
- [2] Z. Ghassemlooy, S. Arnon, M. Uysal, Z. Xu, and J. Cheng, "Emerging optical wireless communications-advances and challenges," *IEEE journal on selected areas in communications*, vol. 33, no. 9, pp. 1738–1749, 2015.
- [3] D. Bykhovsky and S. Arnon, "Multiple access resource allocation in visible light communication systems," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 8, pp. 1594–1600, 2014.
- [4] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab*. CRC press, 2019.
- [5] A. Czylik, "Adaptive OFDM for wideband radio channels," no. 5, pp. 713–718, 2002.

