

**PERFORMANSI TEKNIK MODULASI U-OFDM DENGAN ORIENTASI
PENERIMA UNTUK TEKNOLOGI VLC (VISIBLE LIGHT
COMMUNICATION) PADA RUANGAN TERTUTUP**

**EVALUATION OF U-OFDM MODULATION TECHNIQUE WITH
RECIPIENT ORIENTATION FOR VLC (VISIBLE LIGHT
COMMUNICATION) TECHNOLOGY IN CLOSED ROOM**

Dwi Surya Darmawan¹, Akhmad Hambali², Brian Pamukti³

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

¹dwisuryad@gmail.com ²ahambali@telkomuniversity.ac.id ³brianp@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Kemajuan teknologi informasi yang pesat mengakibatkan kebutuhan dalam layanan transmisi menjadi semakin berkembang pula, sehingga dibutuhkan teknologi baru dibidang media transmisi. Salah satu inovasi terbaru dalam media transmisi adalah cahaya, cahaya diharapkan dapat menjadi alternatif sebagai teknologi baru dalam transmisi data yang lebih efisien. Mekanisme komunikasi dengan cahaya sekarang ini disebut *Visible Light Communication (VLC)*. VLC merupakan transmisi data yang menggunakan sumber cahaya dalam hal ini adalah *Light Emitting Diode (LED)* yang mana dalam prosesnya menumpangkan transmisi data pada sumber cahaya tersebut dengan kecepatan tinggi dan kemudian diolah oleh teknik modulasi dan ditangkap oleh fotodiode.

Teknik *multiplexing* yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah *Unipolar OFDM (U-OFDM)*. Teknik *multiplexing* tersebut dipilih karena teknik teknik *multiplexing optical OFDM* memiliki efisiensi daya yang cukup baik terhadap teknologi VLC. Terkait dengan karakteristik dari kanal yang digunakan, pada Tugas Akhir ini dibahas perbandingan pengaruh jarak transmisi, pengaruh sudut, *coverage area* dan performansi *Bit Error Rate (BER)* dari masing-masing kanal yang nantinya dianalisis dari hasil luas *coverage area* yang dihasilkan.

Hasil yang didapat dari parameter yang telah ditentukan bahwa Teknik *multiplexing U-OFDM* pada kanal *Non-Line of Sight (NLOS)* dapat bekerja hampir menyamai kondisi *Line of Sight (LOS)*. Nilai *Bit Error Rate (BER)* dan *coverage area* yang dihasilkan cukup baik karena memiliki perbedaan sebesar 6.56% pada kedua kanal sehingga teknik modulasi U-OFDM di usulkan untuk penggunaan teknologi VLC.

Kata kunci: VLC, LED, U-OFDM, BER, NLOS, LOS .

Abstract

The rapid advancement of information technology has resulted in the need for transmission services to develop as well, so new technologies are needed in the field of transmission media. One of the latest innovations in the transmission media is light, light is expected to be an alternative as a new technology in more efficient data transmission. The mechanism of communication with light is now called Visible Light Communication (VLC). VLC is a data transmission that uses a light source in this case is a Light Emitting Diode (LED) which in the process of superimposing data transmission at the light source at high speed and then processed by modulation techniques and captured by the photodiode.

The multiplexing technique used in this Final Project is Unipolar OFDM (U-OFDM). The multiplexing technique was chosen because the optical OFDM multiplexing technique has a fairly good power efficiency to VLC technology. Related to the characteristics of the channels used, this Final Project discusses the comparison of the influence of the transmission distance, the influence of the angle, the coverage area and the performance of the Error Error Rate (BER) of each channel which will be analyzed from the resulting area of the coverage area.

The results obtained from parameters that have been determined that multiplexing techniques U-OFDM on Non-Line of Sight (NLOS) channels can work almost equal to the Line of Sight (LOS) condition. The value of the Bit Error Rate (BER) and the resulting coverage area is quite good because it has a difference of 6.56% on the two channels so that the U-OFDM modulation technique is proposed for the use of VLC technology.

Key words : VLC, LED, U-OFDM, BER, NLOS, LOS.

1. Pendahuluan

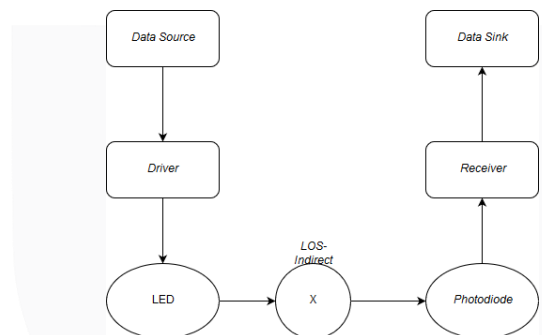
Semakin pesatnya perkembangan teknologi informasi mengakibatkan kebutuhan akan layanan transmisi menjadi semakin berkembang juga, sehingga dibutuhkan teknologi baru dibidang media transmisi. Salah satu inovasinya adalah cahaya, cahaya diharapkan dapat menjadi alternatif sebagai teknologi baru dalam transmisi data yang lebih efisien. Mekanisme komunikasi dengan cahaya sekarang ini sering disebut Visible Light Communication (VLC). VLC merupakan transmisi data yang menggunakan sumber cahaya dalam hal ini adalah *Light Emitting Diode* (LED) yang mana dalam prosesnya menumpangkan transmisi data pada sumber cahaya tersebut dengan kecepatan tinggi dan kemudian ditangkap oleh fotodioda [1].

Sistem VLC biasanya digunakan dalam suatu ruangan indoor, sehingga interferensi dari berbagai cahaya bisa diminimalisir. Teknologi ini memanfaatkan cahaya tampak, cahaya ini telah di modulasi dengan sinyal informasi yang kemudian disalurkan pada LED sebagai *transmitter*. LED dipilih karena telah banyak digunakan untuk kehidupan sehari-hari dan lebih aman terhadap tubuh manusia dibandingkan dengan sinar *Ultra Violet*, sinar *Gamma*, dan sinar *Infrared* [2]. Konsep dari teknologi VLC ini sebenarnya sangat mudah, transmisi dari sisi *transmitter* menggunakan lampu LED dan pada sisi *receiver* akan digunakan suatu fotodetektor untuk menangkap cahaya yang telah dimodulasi.

2. Dasar Teori

2.1. Visible Light Communication (VLC)

VLC merupakan sebuah terobosan baru pada teknologi dibidang komunikasi data. VLC adalah bagian dari *Optical Wireless Communication* (OWC) yang merupakan teknologi komunikasi optik yang memungkinkan pengiriman data tanpa menggunakan kabel. Teknologi ini menggunakan cahaya sebagai media transmisinya, cahaya tersebut didapatkan melalui pancaran lampu LED sebagai sumbernya yang digunakan untuk mengirimkan data dari *transmitter* menuju *receiver* [2].



Gambar 1. Blok Diagram VLC

2.1.1 Light Emitting Diode (LED)

LED menawarkan banyak manfaat dibandingkan lampu *neon* dan lampu pijar seperti efisiensi, desain yang fleksibel, masa pakai yang lebih lama dan peningkatan kinerja spektrum. LED memancarkan cahaya ketika tingkat energi berubah dalam dioda semikonduktor. Perubahan energi ini menghasilkan foton, beberapa di antaranya dipancarkan sebagai cahaya. Panjang gelombang cahaya yang dipancarkan bergantung pada perbedaan tingkat energi dan jenis bahan semikonduktor yang digunakan untuk membentuk *chip* LED [3].

2.1.2 Fotodetektor

Fotodioda merupakan sebuah media penerima dalam sistem komunikasi optik yang mengubah energi cahaya menjadi energi listrik. Dalam sistem komunikasi optik, umumnya ada 2 jenis fotodioda yang digunakan yaitu PIN fotodioda dan *Avalanche* fotodioda (APD).

2.1.3 Jarak Propagasi

Jarak propagasi merupakan jarak antara transmitter dengan receiver.

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

dengan X_r dan X_t merupakan koordinat *receiver* dan *transmitter* pada sumbu X, Y_r dan Y_t merupakan koordinat *receiver* dan *transmitter* pada sumbu Y, dan Z_r dan Z_t merupakan koordinat *receiver* dan *transmitter* pada sumbu Z [4].

2.1.4 Kanal

Kanal yang digunakan pada penelitian ini adalah kanal *Line of Sight* (LOS) dan *Non-Line of Sight* (NLOS). Kanal ini berada diantara *transmitter* dan *receiver*. LOS merupakan suatu kondisi dimana distribusi cahaya bersifat langsung atau tidak ada benda / partikel lain yang menghalangi *transmitter* dengan *receiver*. Kanal LOS terdiri dari 2 jenis yaitu *direct* LOS (dLOS) dan *non-direct* LOS (ndLOS). NLOS adalah suatu kondisi dimana antara pemancar LED dan pengguna (UE) terdapat penghalang sinyal seperti lemari, cermin, meja, dan kursi. Kondisi ini mengakibatkan sinyal yang dikirim oleh pemancar mengalami pantulan, difraksi atau *scattering*, sehingga sinyal tersebut memiliki lebih dari satu jalur dari pemancar ke penerima. NLOS merupakan nilai *random* yang di *input* sesuai dengan dimensi vektor.

Pada VLC, permodelan kanal cahaya tampak dapat menggunakan *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) dengan persamaan [5]:

$$Y_{(t)} = R \cdot X_{(t)} * H_{(t)} + N_{(t)}, \quad (2)$$

dengan R adalah Responsivitas *Photodetector* (A/W), H(t) merupakan kanal LOS yang digunakan, N(t) merepresentasikan AWGN. Sudut yang terbentuk antara *transmitter* didapatkan dari persamaan [5]:

$$\theta = \arccos\left(\frac{h}{d}\right), \quad (3)$$

dengan h merupakan tinggi *receiver* dari permukaan tanah dan d adalah jarak propagasi. Distribusi cahaya pada sistem VLC yang dibuat diasumsikan bahwa cahaya LED terdistribusi secara lambertian, yang didefinisikan pada persamaan [5]

$$m_l = \frac{-\log_{10}(2)}{\log_{10}(\cos \theta)}, \quad (4)$$

dengan q adalah *Full Width at Half Maximum* (FWHM) atau sudut pembukaan *transmitter*. Kemudian Kanal LOS dirumuskan dengan persamaan [5]:

$$H = \frac{(m+1) \cdot A \cdot \cos^{(m+1)}\phi}{2 \cdot \pi \cdot d^2}, \quad (5)$$

dengan q adalah *Full Width at Half Maximum* (FWHM) atau sudut pembukaan *transmitter*. Kemudian Kanal NLOS dirumuskan dengan persamaan [5]:

$$H = \Gamma \frac{(m+1) \cdot A \cdot \cos^{(m+1)}\phi}{(2 \cdot \pi \cdot d^2)}, \quad (6)$$

dengan A adalah luas area photodetector, d adalah jarak propagasi antara *transmitter* dan *receiver*, Γ merupakan nilai *random* mengikuti *gaussian* dan ϕ adalah sudut penerimaan *receiver* terhadap garis normal. Kemudian Daya terima pada sistem VLC ini dapat dilihat pada persamaan [5]:

$$P_{rx} = P_{tot} \cdot H, \quad (7)$$

2.2. Parameter Performansi Sistem

Signal to Noise Ratio (SNR) merupakan perbandingan antara kuat sinyal dengan kekuatan noise. Nilai SNR digunakan untuk menunjukkan kualitas kanal. Semakin besar nilai SNR, semakin tinggi kualitas kanal tersebut.

$$SNR = \frac{(P_{rx} \cdot R)^2}{2 \cdot q \cdot (I_p + I_d) \cdot B \cdot M^2 \cdot F(M) + 2 \cdot q \cdot I_L \cdot B + \frac{4 \cdot k_b \cdot T \cdot B}{R}}, \quad (8)$$

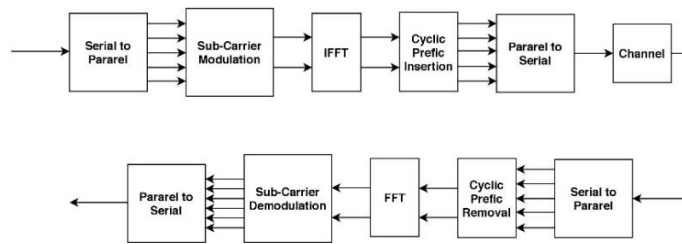
q merupakan muatan elektron yang bernilai $1.602 \times 10^{-19}C$, ID arus bulk dark primer, B lebar pita, M faktor multiplikasi serta F(M) sebagai noise figure. Pada PIN photodiode, M dan F(M) bernilai 1. Bit Error Rate (BER) didefinisikan sebagai jumlah terjadinya error tiap jumlah bit data yang terkirim pada suatu sistem digital. BER U-OFDM yang dinyatakan pada persamaan berikut

$$BER_{U-OFDM} = BER_{QAM} \cdot (SNR) \quad (9)$$

2.3. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

OFDM adalah sebuah teknik transmisi yang menggunakan beberapa buah frekuensi (*multicarrier*) yang saling tegak lurus (*orthogonal*). Masing-masing *subcarrier* tersebut dimodulasikan dengan teknik modulasi konvensional pada rasio simbol yang rendah [6], dengan maksud mereduksi laju waktu simbol agar mencapai kehandalan melawan pantulan panjang dalam kanal radio lintasan jamak, bahkan bila spektral sub-carrier saling tumpah tindih, informasi secara sempurna masih dapat diterima dengan baik tanpa ada interferensi antara *sub-*

carrier, sehingga secara keseluruhan (dalam satu simbol) dapat digunakan lebar pita yang lebih kecil.

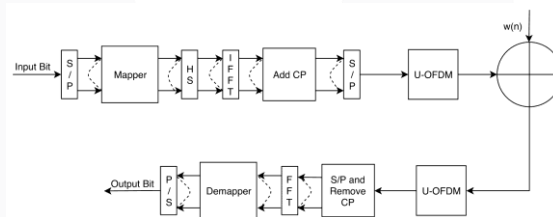


Gambar 2. Blok Diagram OFDM

2.3.1. Unipolar OFDM

Sinyal yang ditransmisikan dalam teknik U-OFDM adalah sinyal unipolar dan real. Ada beberapa hal yang membuat sinyal yang ditransmisikan berbentuk unipolar dan real. Nilai *real* didapatkan dari proses *Hermitian Symmetry* yang bertujuan untuk membatasi *input* IFFT agar membentuk gelombang *output* bernilai real. Dengan penggunaan *Hermitian Symmetry* akan menggangdakan ukuran IFFT yang diperlukan untuk sejumlah *subcarrier*. Hasil output IFFT menjadi sinyal dengan urutan waktu antisimetris [7].

Setelah memastikan output dari IFFT bernilai *real*, selanjutnya adalah membuat sinyal menjadi unipolar. Sinyal unipolar pada U-OFDM didapatkan dari penggunaan algoritma *Negative Mirror Image* (NMI). Perubahan sinyal bipolar yang semula berbentuk bipolar. Kemudian dengan algoritma NMI sinyal negatif dicerminkan kedalam bentuk positif. Setelah didapatkan sinyal unipolar, kemudian sinyal yang semula bernilai positif dikelompokkan kedalam 1 blok positif, dan sinyal yang semula ber nilai negatif dikelompokkan kedalam 1 blok negatif untuk ditransmisikan dalam sistem VLC.

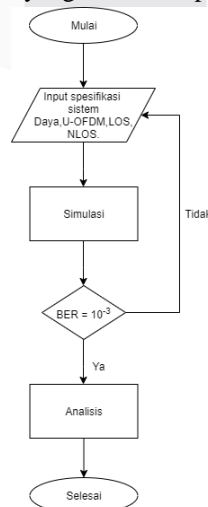


Gambar 3. Blok Diagram U-OFDM

3. Perancangan dan Realisasi Sistem

3.1 Diagram Alir Sistem

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



Gambar 4. Diagram Alir Perancangan Sistem.

Pada Gambar 4 menunjukkan tahapan tahapan yang dilakukan dalam pengerjaan pada penulisan Tugas Akhir ini. Langkah pertama yaitu dengan menentukan model sistem yang dirancang pada penelitian ini. Langkah kedua yaitu menginput parameter daya total ≤ 5 watt dengan volume ruangan $5 \times 5 \times 3$ meter, memakai modulasi 4-QAM, memiliki koordinat LED $(0,0,3)$ serta menggunakan dua buah kanal yang berda yaitu LOS dan NLOS. Langkah ketiga yaitu memasukan model sistem yang akan dirancang meliputi sistem VLC dan sistem U-OFDM. Langkah keempat yaitu dengan melakukan simulasi sistem dengan menggunakan *Software* aplikasi, simulasi yang dilakukan dengan memodelkan parameter yang telah ditentukan kedalam *syntax program*. Pada penelitian ini parameter kualitas yang ditargetkan tercapai untuk sistem dikatakan baik apabila pada pengiriman bit-bit informasi, tingkat kesalahan penerjemahan bit atau BER sebesar 10^{-3} berjumlah sedikit. Setelah melakukan simulasi selanjutnya dapat dilakukan analisis dengan parameter terkait.

3.3 Parameter Performansi Sistem

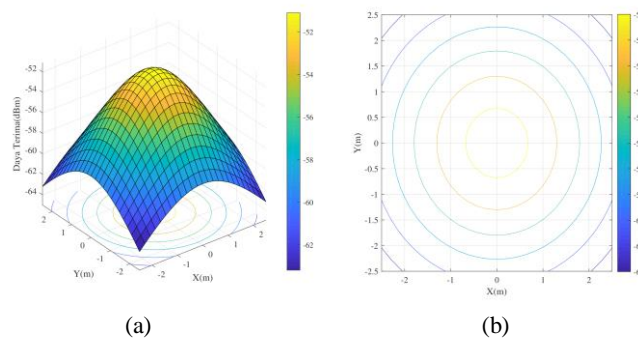
Pada perancangan sistem VLC yang terdapat dalam Tugas Akhri ini menggunakan spesifikasi yang beragam dari masing-masing komponen untuk melihat pengaruh dari Teknik Modulasi yang digunakan serta perubahan Kanal yang digunakan.

Tabel 1. Parameter Simulasi.

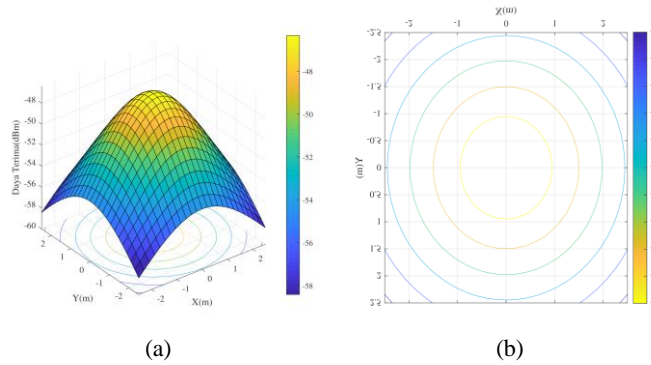
Parameter	Keterangan
Dimensi Ruangan	5x5x3 meter
Jenis Pemancar	Lampu LED
Jumlah pemancar	1 Buah
Daya Input	1 Watt, 3 Watt
Penempatan Sumber Cahaya	Di pusat ruangan
Responsivitas Photodetector	0.55 A/W
FOV	70
Teknik Modulasi	U-OFDM
Kanal	LOS, NLOS
Jumlah Simbol FFT	128
Jumlah Cyclic Prefix	16
Jumlah Subcarrier	64
Modulasi	4-QAM

4. Pengujian dan Analisis Sistem

Pengujian kinerja sistem VLC dapat dilihat pada Gambar 4, dengan hasil dalam bentuk tampilan distribusi cahaya yang terjadi di dalam ruangan dengan luas $5\text{m} \times 5\text{m} \times 3\text{m}$, dimana terdapat satu buah lampu LED dengan daya 1 Watt dan 3 Watt yang diletakan pada tengah ruangan dan menggunakan kanal LOS dan NLOS.

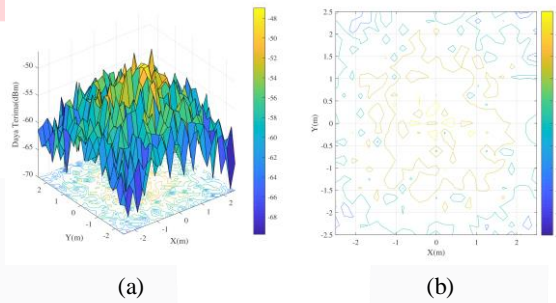


Gambar 5. Distribusi cahaya LED Daya 1 Watt (a) tampak samping (b) tampak atas.

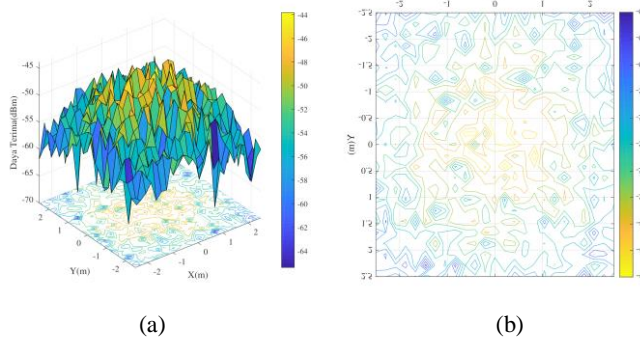


Gambar 6. Distribusi cahaya LED Daya 3 Watt (a) tampak samping (b) tampak atas.

Gambar 5 menunjukkan representasi dari distribusi cahaya LED dengan daya input 1 W sedangkan Gambar 6 merupakan representasi distribusi cahaya LED dengan daya input 3 W pada kondisi kanal LOS. Ketika menggunakan daya sebesar 1 W dan 3 W didapatkan hasil yang berbeda. Saat daya input 1 W didapatkan daya output maksimal sebesar -21.1148 dBm dan daya output minimal sebesar -33.18758 dBm sedangkan saat daya input 3 W didapatkan daya output maksimal sebesar -16.3434 dBm dan daya output minimal sebesar -28.4193 dBm.



Gambar 7. Distribusi cahaya LED Daya 1 Watt (a) tampak samping (b) tampak atas.

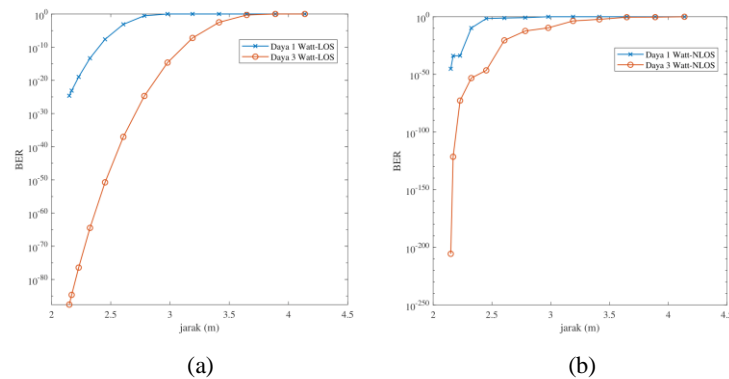


Gambar 8. Distribusi cahaya LED Daya 3 Watt (a) tampak samping (b) tampak atas.

Gambar 7 menunjukkan representasi dari distribusi cahaya LED dengan daya input 1 W sedangkan Gambar 8 merupakan representasi distribusi cahaya LED dengan daya input 3W pada kondisi kanal NLOS. Ketika menggunakan daya sebesar 1 W dan 3 W didapatkan hasil yang berbeda. Saat daya input 1 W didapatkan daya output maksimal sebesar -18.0410 dBm dan daya output minimal sebesar -39.7469 dBm sedangkan saat daya input 3 W didapatkan daya output maksimal sebesar -10.9487 dBm dan daya output minimal sebesar -34.9757 dBm.

4.1 Analisis perbandingan BER terhadap Jarak

Pada skenario ini dilakukan pengujian pada kanal LOS dan NLOS dari teknik modulasi U-OFDM. Parameter pengujian yang digunakan dalam skenario I adalah performansi BER terhadap jarak transmisi data.

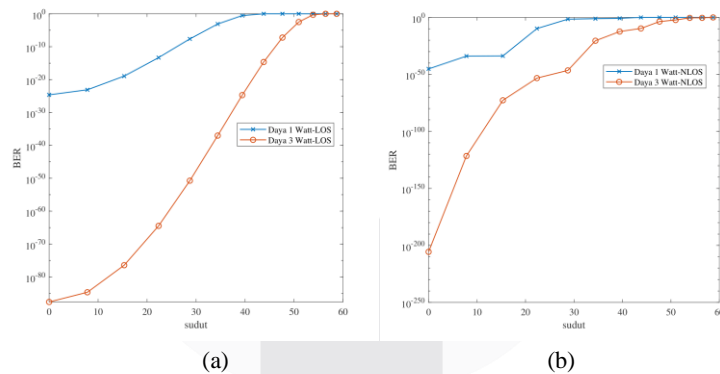


Gambar 9. Perbandingan dua daya input terhadap jarak transmisi (a) kanal LOS (b) kanal NLOS.

Gambar 9 menunjukkan perbandingan nilai BER terhadap jarak transmisi dari teknik modulasi U-OFDM pada kanal LOS dan NLOS. Dari data yang didapatkan maka dapat digambarkan seperti pada grafik diatas. Jarak maksimal yang dihasilkan agar mendapatkan nilai BER yang ideal dari daya 1 W sejauh 2.63 m dan daya 3 W sejauh 3.42 m pada kondisi kanal LOS, Lalu pada kondisi NLOS jarak maksimal terjadi secara acak atau *random*.

4.2 Analisis perbandingan BER terhadap Sudut

Pada skenario selanjutnya dilakukan pengujian pada kanal LOS dan NLOS dari teknik multiplexing U-OFDM. Parameter pengujian yang digunakan dalam skenario ini adalah performansi BER terhadap sudut.

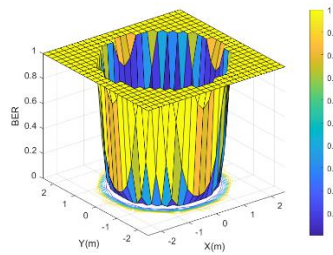


Gambar 10. Perbandingan dua daya input terhadap sudut (a) kanal LOS (b) kanal NLOS.

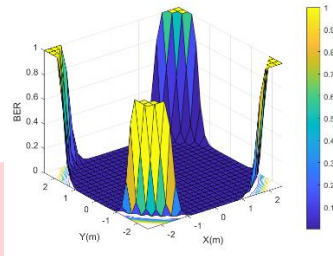
Gambar 10 menunjukkan perbandingan nilai BER terhadap sudut penerima dari teknik modulasi U-OFDM pada kanal LOS dan NLOS. Dari data yang didapatkan maka dapat digambarkan dari grafik diatas. Sudut maksimal yang dihasilkan agar mendapatkan nilai BER yang ideal dari daya 1 W adalah 32.2° dan daya 3 W adalah 51.13° pada kondisi kanal LOS, Lalu pada kondisi NLOS sudut penerima terjadi secara acak.

4.3 Hasil simulasi penggunaan U-OFDM pada kanal LOS

Pada skenario selanjutnya membahas luas cakupan dari sistem VLC dengan teknik modulasi U-OFDM pada kanal LOS. Analisis dilakukan dengan menggunakan daya 1 W dan 3 W.



Gambar 11. Luas cakupan U-OFDM pada kanal LOS daya 1 W.

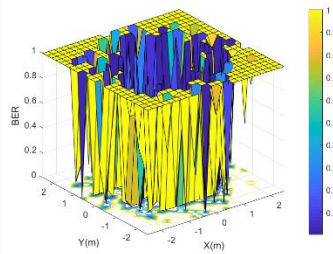


Gambar 12. Luas cakupan U-OFDM pada kanal LOS daya 3W.

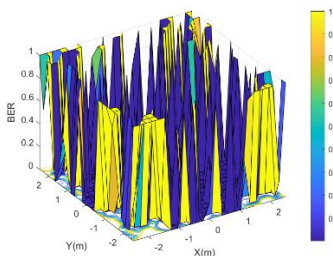
Gambar 11 dan 12 menunjukkan hasil nilai luas cakupan BER dari teknik *multiplexing* U-OFDM dengan daya input sebesar 1W dan 3W pada ruangan berukuran 5x5 meter. Dari data yang didapat luas cakupan yang didapat pada daya 1 W sebesar $7.08 m^2$ dan pada daya 3 W sebesar $20.68 m^2$.

4.4 Hasil simulasi penggunaan U-OFDM pada kanal NLOS

Untuk skenario selanjutnya membahas juga luas cakupan dari sistem VLC dengan teknik modulasi U-OFDM namun menggunakan kanal NLOS. Analisis dilakukan dengan menggunakan daya 1 W dan 3 W.



Gambar 13. Luas cakupan U-OFDM pada kanal NLOS daya 1 W.



Gambar 14. Luas cakupan U-OFDM pada kanal NLOS daya 3 W.

Pada Gambar 13 dan Gambar 14 menunjukkan hasil nilai luas cakupan BER dari teknik *multiplexing* U-OFDM dengan daya input sebesar 1W dan 3W pada ruangan berukuran 5x5 meter

pada kanal NLOS. Dari data yang didapat luas cakupan yang didapat pada daya 1 W sebesar $6.92 m^2$ dan pada daya 3 W sebesar $17.56 m^2$.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari simulasi yang dilakukan pada sistem VLC menggunakan teknik modulasi U-OFDM pada kanal LOS dan NLOS, dapat disimpulkan secara umum bahwa sistem yang dirancang dapat bekerja dengan cukup baik.

1. Jarak maksimal yang dapat dicapai oleh penggunaan teknik modulasi UOFDM pada kanal LOS dengan daya 1 W adalah 2.63 m dan 3 W sebesar 3.42 m sedangkan dengan menggunakan kanal NLOS menghasilkan jarak maksimum terjadi secara acak atau *random*.
2. Nilai BER yang dihasilkan pada kanal LOS cenderung lebih teratur mengikuti besar kecilnya jarak penerima. Jarak penerima sangat mempengaruhi nilai BER yang dihasilkan. Semakin dekat jarak penerima dari pemancar maka semakin baik pula hasil BER yang didapat sedangkan pada kanal NLOS nilai BER yang dihasilkan cenderung tidak teratur atau acak. Jarak penerima tidak mempengaruhi nilai BER yang dihasilkan
3. Sudut penerima hanya berpengaruh terhadap kanal LOS, sedangkan pada kanal NLOS sudut penerima tidak terlalu mempengaruhi nilai BER yang dihasilkan.
4. Luas cakupan yang dihasilkan oleh penggunaan teknik modulasi U-OFDM pada kanal LOS dengan daya 1 W adalah $7.08 m^2$ dan pada 3 W adalah $20.68 m^2$. Kemudian saat menggunakan kanal NLOS dihasilkan luas cakupan pada 1 W sebesar $6.92 m^2$ dan pada 3 W sebesar $17.56 m^2$. Luas cakupan pada kanal NLOS cenderung lebih kecil dibandingkan kanal LOS. Hal ini disebabkan terjadinya beragam redaman seperti pantulan dan difraksi yang ada pada kanal NLOS.
5. Perbandingan luas cakupan terpantau tidak begitu jauh antara kanal LOS dan NLOS sehingga dapat disimpulkan bahwa Teknik Modulasi U-OFDM dapat bekerja dengan cukup baik di kanal yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. P. Palatty, Visible Light Communication. Alwin Poullose, 2017.
- [2] E. Julka and D. Kumar, "A review paper on li-fi technology," International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 6, no. 2, 2015.
- [3] R. v. Nee and R. Prasad, OFDM for wireless multimedia communications. Artech House, Inc., 2000.
- [4] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab R*. CRC press, 2019.
- [5] Z. Wang, Q. Wang, W. Huang, and Z. Xu, *Visible light communications: Modulation and signal processing*. John Wiley & Sons, 2017.
- [6] Y. G. Li and G. L. Stuber, Orthogonal frequency division multiplexing for wireless communications. Springer Science & Business Media, 2006.
- [7] Z. Wang, T. Mao, and Q. Wang, "Optical ofdm for visible light communications," in 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). IEEE, 2017, pp. 1190–1194.