

PERFORMANSI PADA *VISIBLE LIGHT COMMUNICATION* MENGUNAKAN *RANDOM ORIENTATION*

PERFORMANCE OF *VISIBLE LIGHT COMMUNICATION* USING *RANDOM ORIENTATION*

Dirtrah Aisyah Rivinda ¹, Akhmad Hambali ², Brian Pamukti ³.

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

¹ditrah Rivinda@telkomuniversity.ac.id, ²Ahambali@telkomuniversity.co.id,

³brianp@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Teknologi komunikasi termasuk salah satu teknologi yang berkembang sangat pesat, salah satu dari teknologi komunikasi yang sedang berkembang yaitu *Visible Light Communication* (VLC). Teknologi ini semakin luas karena penggunaan lampu LED, serta berkembang pesat karena mengingat perlunya inovasi dalam system pengiriman informasi nirkabel. VLC memiliki keunggulan karena memiliki kecepatan serta kemudahan untuk diaplikasikan dan digunakan oleh masyarakat. Teknologi modulasi yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah *On Off Keying - Return to Non Return to Zero* (OOK-NRZ). Kedua modulasi tersebut dipilih karena memiliki kelebihan dalam kesederhanaan sistem namun memiliki kemampuan kecepatan pengiriman data yang rendah. Penelitian ini akan dilakukan dalam ruangan tertutup dengan banyak interferensi didalamnya dan berukuran 5x5x3 meter, dengan lampu LED berwarna putih dan memiliki daya sebesar 45 W, serta menggunakan kanal *Line of sight* (LOS) dan *Non line of sight* (NLOS). Hasil yang didapat dari Tugas Akhir ini yaitu ketika penggunaan *random orientation* yang dilakukan di ruangan, pengguna receiver dapat menggunakan device dalam posisi $0 < x < 45^\circ$ pada setiap titik yang terdapat di ruangan, dan ketika penggunaan kanal LOS dilakukan di daerah tepat berada dibawah lampu daerah yang tercover sangat bagus karena penggunaan kanal LOS tidak mendapatkan interferensi lain dari ruangan, sedangkan penggunaan kanal NLOS mendapatkan hasil sebaliknya.

Kata kunci : VLC, OOK-NRZ, Coverage Area, Random Orientation, BER.

Abstract

Traffic Engineering Communication technology is one of the technologies that have developed greatly rapidly, one of the developing communication technologies is Visible Light Communication (VLC). This technology is increasingly widespread because of the use of lights LED, as well as growing rapidly because of the need for innovation in the system wireless information delivery. VLC has the advantage of having speed as well as ease of application and use by the community. The modulation technology used in this Final Project is On Off Keying – Non Return to Zero (OOK-NRZ). Both of these modulations were chosen because they have advantages in the simplicity of the system but have low data transmission capability. This research will be carried out in a closed room with a lot of interference inside and measuring 5x5x3 meters, with white LED lights and has a power of 45 W, and using a Line of sight (LOS) and Non line of sight (NLOS) channel. The results obtained from this Final Project are when the use of random orientation is carried out in the room, the user (receiver) can use the device in the position from $0 < x < 45^\circ$ at any point in the room, and when the use of LOS channels is carried out, the area in the right under the lamp are covered really good because the use of LOS channels does not get other interference from the room, while the use of NLOS channels gets the opposite results.

Keywords : VLC, OOK-NRZ, Coverage Area, Random Orientation, BER.

1. Pendahuluan

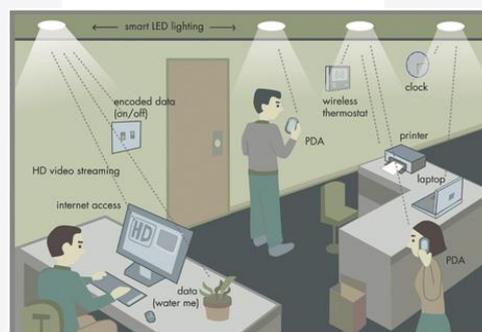
Visible Light Communication (VLC) merupakan teknologi saat ini yang sedang dikembangkan dimana informasi dikirim melalui media cahaya tampak (LED). VLC memiliki fungsi asli dari pencahayaan dikombinasikan dengan penciptaan, sistem komunikasi optik nirkabel. Keunggulan dari VLC adalah tidak mungkin terjadi interferensi oleh komunikasi radio maupun gelombang elektromagnetik. Di era teknologi yang sangat canggih seperti sekarang, teknologi nirkabel semakin banyak berkembang di berbagai banyak bidang. Salah satu sistem teknologi nirkabel yang telah ada,

yaitu gelombang radio. Gelombang radio masih menjadi pilihan utama bagi setiap orang untuk membawa sinyal informasi. Penggunaan serat optik saat ini telah digunakan dimana-mana karena keunggulannya dalam kecepatan paket data. Namun, dibalik berbagai kelebihannya, terdapat pula kekurangan dari kabel serat optik ini, yaitu pemasangan dan biaya perawatan memiliki harga yang relatif tinggi, dan tidak bisa dipasang di area yang memiliki belokan yang tajam, karena di dalam kabel optik menggunakan cahaya sebagai penghantar sinyal, jika kabel ditekuk maka cahaya akan bocor dan akan mengalir ke tekukan tersebut. *Light Emitting Diode* (LED) telah memiliki peran besar di pasar aplikasi pencahayaan *indoor* dan *outdoor*. LED merupakan teknologi pencahayaan yang menawarkan sejumlah keuntungan penting berkenaan dengan teknologi pencahayaan lainnya, seperti peningkatan efisiensi, kecerahan tinggi, pemilihan warna tanpa secara signifikan mengorbankan efisiensi dan sebagainya. Ciri khas lain dari LED berkaitan dengan lebih dari teknologi pencahayaan klasik adalah *bandwidth* yang lebih besar. Pada penelitian sebelumnya [1] [2], melakukan penelitian tentang pengaruh modulasi terhadap nilai *Bit Error Rate* (BER) dengan menggunakan kanal *Line of Sight* (LOS) dan modulasi *On-off-keying* (OOK), serta penelitian selanjutnya meneliti tentang *receiver orientation* dengan kanal LOS pada ruangan *indoor* dan tanpa interferensi dari benda lain. Sedangkan pada Tugas Akhir ini akan melakukan penelitian tentang bagaimana pengaruh sinyal yang terjadi pada *Visible light communication* menggunakan modulasi OOK serta kanal LOS dan NLOS diruangan *indoor* yang memiliki banyak interferensi di ruangan tersebut, untuk mengembangkan hal tersebut pada Tugas Akhir ini dilakukan analisis dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB mengenai Pengaruh *random orientation* sudut Penerima pada LED dalam *Visible Light Communication*.

2. Dasar Teori

2.1 Visible Light Communication

Visible Light Communication (komunikasi cahaya tampak) adalah salah satu jenis sistem komunikasi cahaya *unguided* dimana jenis cahaya yang digunakan adalah cahaya tampak. Cahaya tampak sendiri merupakan jenis cahaya yang bisa dilihat secara kasat mata yang memiliki panjang gelombang pada rentang 380-750 nm dan rentang frekuensi 430-750 THz seperti terlihat pada spektrum frekuensi cahaya pada Gambar 2.1. Saat ini, pengembangan VLC lebih banyak difokuskan untuk aplikasi *indoor* yang diadaptasi dari sistem komunikasi inframerah konvensional [3]. VLC memiliki konfigurasi secara umum yang mirip dengan komunikasi inframerah.



Gambar 2.1. Skema *Visible Light Communication* [4].

2.2 Non Line of Sight

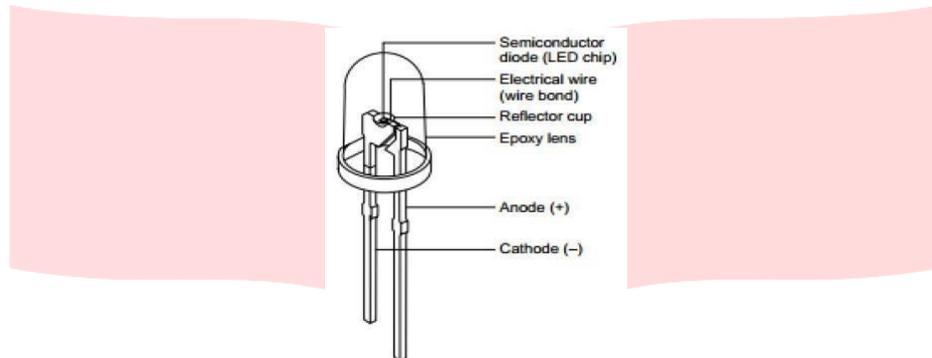
Kondisi NLOS adalah kondisi dimana antara pemancar (Node-B) dan pengguna (UE) terdapat penghalang sinyal seperti rumah, pohon dan gedung. Kondisi ini menyebabkan sinyal yang dikirim oleh pemancar mengalami pantulan, difraksi atau scattering, sehingga sinyal tersebut memiliki lebih dari satu jalur dari pemancar ke penerima.

2.3 Line of Sight

Line Of Sight (LOS) adalah suatu kondisi dimana distribusi cahaya bersifat langsung atau tidak ada benda atau partikel lain yang menghalangi *transmitter* dengan *receiver*. LOS merupakan jalur tidak terhalang dari komunikasi antara pemancar dan penerima, merupakan kondisi dimana sudut yang terbentuk antara LED dan fotodetektor adalah 0 atau fotodetektor berada tepat dibawah lampu LED. *Transmitter* mengarahkan sinar cahaya ke arah penerima secara langsung [4], LOS memiliki jumlah kesalahan bit yang sedikit, karena tidak terdapat obstacle di dalam ruangan.

2.4 Light Emitting Diode (LED)

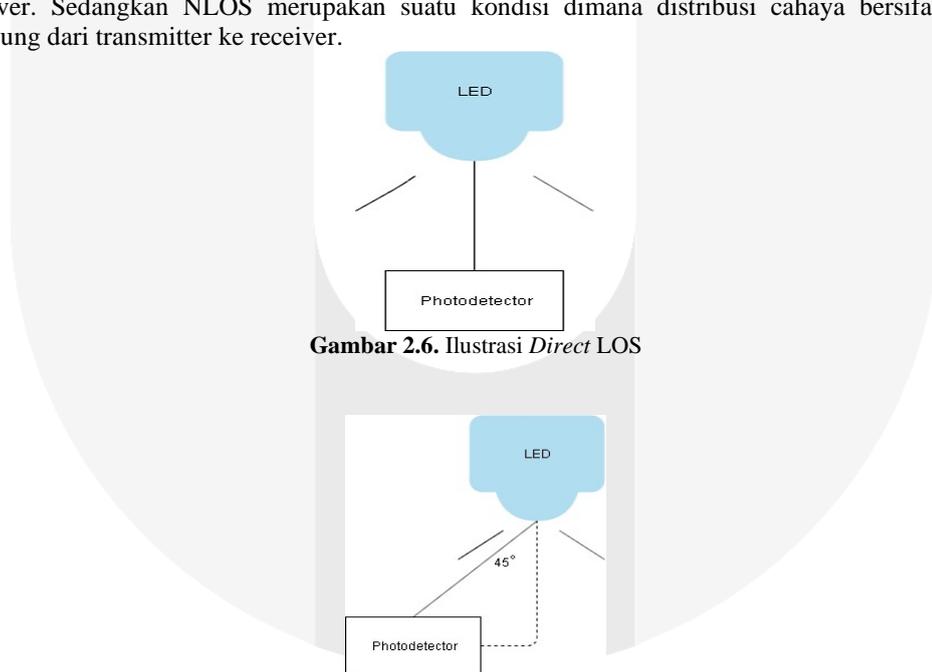
LED adalah perangkat semikonduktor yang memancarkan cahaya tampak ketika melewati arus listrik. Lampu tidak sangat cerah, tetapi dalam banyak LED itu monokromatik, terjadi pada panjang gelombang tunggal. Output dari LED dapat berkisar dari merah (pada panjang gelombang sekitar 700 nanometer) ke biru-violet (sekitar 400 nanometer). LED atau IRED memiliki paket transparan, memungkinkan terlihat atau energi IR melewatinya. Juga, LED atau IRED memiliki luas PN-junction besar yang bentuknya disesuaikan dengan aplikasi.



Gambar 2.5. Sketsa fisik LED [7].

2.6 Kanal di VLC

Kanal menggambarkan ruang antara *transmitter* dan *receiver*. kanal digunakan untuk mengirimkan sinyal pembawa dari *transmitter* dan *receiver*, kemampuan kanal untuk mengirimkan sinyal dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya atenuasi, interferensi, dan *noise*. ada 2 jenis kanal yang terdapat dalam sistem VLC yaitu *single channel* VLC yang menggunakan sebuah LED *single colour*, sebuah fotodetektor, dan *multi channel* VLC yang menggunakan sebuah *multi colour* LED pada bagian *transmitter* dan beberapa fotodetektor dengan tingkat sensitivitas yang berbeda sesuai dengan warna dari *transmitter*. LOS merupakan suatu kondisi dimana distribusi cahaya bersifat langsung atau tidak ada benda atau partikel lain yang menghalangi transmitter dengan receiver. Sedangkan NLOS merupakan suatu kondisi dimana distribusi cahaya bersifat tidak langsung dari transmitter ke receiver.



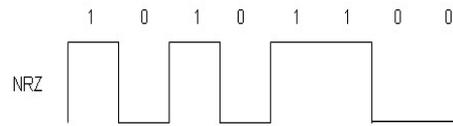
Gambar 2.6. Ilustrasi *Direct* LOS

Gambar 2.6. Ilustrasi *Non-Direct* LOS

2.7 Teknik modulasi On-Off Keying

Teknik modulasi On-Off Keying (OOK) masuk kedalam modulasi ASK, dan merupakan modulasi yang paling sederhana. Modulasi OOK sering diterapkan untuk skema optical digital transmission karena kesederhanaannya. Skema kerja dari modulasi OOK dianalogikan sama seperti sebuah saklar, dimana hanya ada dua kondisi, yaitu *on* dan *off*. Bit 1 mewakili dari pulsa optik yang

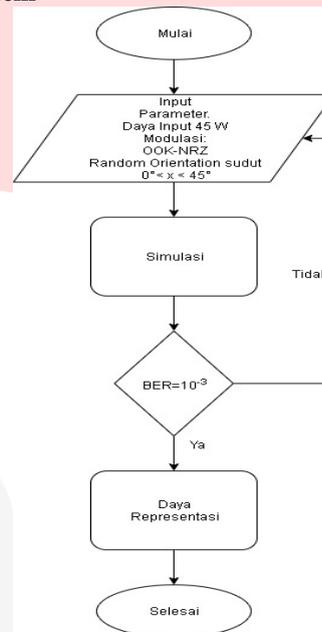
menempati keseluruhan atau sebagian dari durasi bit, sedangkan bit 0 mewakili dari tidak ada atau hilangnya pulsa optik [9].



Gambar 2.7. Sinyal NRZ [9].

3. Perancangan Sistem

3.1 Diagram Alur Simulasi Sistem



Gambar 3.1. Perancangan Sistem.

Gambar 3.1 menjelaskan tentang alur penelitian dalam proses tugas akhir ini. Langkah pertama yang dilakukan adalah memasukkan parameter *input* sistem VLC dan teknik modulasi OOK-RZ. Setelah melakukan *input* parameter, kemudian memasukkan daya *input* yang digunakan untuk LED sebesar 45 W. Kemudian dilakukan simulasi, apakah mendapatkan nilai BER 10^{-3} pada jarak propagasi terjauh. Jika sudah mendapatkan BER 10^{-3} pada jarak propagasi terjauh kemudian dilakukan pengujian parameter performansi untuk sistem VLC, seperti *coverage area*, performansi BER, daya terima dan jarak propagasi. Setelah semua simulasi sudah dilakukan dan pengujian parameter performansi sudah dilakukan, kemudian dilakukan analisis dari hasil simulasi

3.2 Skenario Simulasi

Tugas akhir ini memiliki 2 skenario simulasi sebagai berikut.

3.2.1 Skenario I *Random Orientation Sudut Penerima*

Tugas Akhir ini memiliki skenario *random orientation* sudut penerima yaitu sebagai berikut. Skenario ini bertujuan untuk mencari jarak propogasi dan daya terima sesuai dengan orientasi sudut penerima, yang pada akhirnya dari skenario tersebut juga dapat melihat hasil BER yang dihasilkan. Penelitian ini, dilakukan didalam ruangan dengan skema ruangan sebesar 5x5x3 m dan menggunakan satu buah lampu dengan posisi lampu yang tepat berada di tengah ruangan. Ilustrasi dibawah menunjukkan pengiriman informasi dari sisi *transmitter* menuju sisi *receiver* dengan menggunakan kanal. Kanal yang digunakan pada peneltian adalah menggunakan kanal LOS dan NLOS. Pada skenario ini random orientation sudut penerima yang digunakan sebesar 25°.

3.2.2 Skenario II Performansi BER

Dalam simulasi penelitian, penulis mencari cakupan komunikasi cahaya tampak dengan ruangan sebesar 5x5x3 meter menggunakan modulasi OOK-RZ, dan OOKNRZ dengan penambahan random orientation. Dengan menggunakan parameter pengujian berupa, jarak receiver dari transmitter, jarak receiver dari reflektor dan BER. Untuk menentukan coverage area yang akan dihasilkan dari simulasi, terlebih dahulu melakukan perhitungan perancangan sistem yang akan dibuat. Berikut tahapan perancangan:

1. Menghitung jarak propagasi antara transmitter dengan receiver yang didapatkan dari persamaan (2.6)

$$d = \sqrt{(XR - XT)^2 + (YR - YT)^2 + (ZR - ZT)^2}$$

$$d = \sqrt{(2.5 - 0)^2 + (2.5 - 0)^2 + (0.85 - 3)^2}$$

$$d = 4.13793 \text{ m}$$

2. Menghitung sudut yang dibentuk antara transmitter dengan receiver yang didapatkan dari persamaan (2.2)

$$\varphi = \arccos\left(\frac{h}{d}\right)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{2.15}{4.13793}\right)$$

$$\varphi = 59.01^\circ$$

3. Menghitung nilai daya terima (P_{rx}) dengan daya input 45 W Rumus Lambertian didapatkan dari persamaan (2.3)

$$m = \frac{-\log_{10}(2)}{\log_{10}(\cos(70^\circ))}$$

$$m = 0.64605$$

Rumus kanal didapatkan dari persamaan (2.4)

$$H = NLOS \frac{(0.64605 + 1) \cdot (1^{-4}) \cdot \frac{h^{(m+1)}}{d^1}}{\log_{10}(\cos(70^\circ))}$$

$$H = NLOS 5.20776x10^{-7}$$

Rumus daya terima didapatkan dari persamaan (2.5)

$$P_{rx}(W) = 5.5,20776x10^{-7}$$

$$P_{rx}(W) = 2.60388x10^{-6}$$

4. Nilai SNR didapatkan dari persamaan (2.7)

$$SNR = \frac{((2,60388x10^{-6})x0,55)^2}{2,1,6x10^{-19} \cdot ((2,60388x10^{-6})x0,55)2x10^9 \cdot 1,1 + 0 + \left(\frac{4,1,38x10^{-23}}{100}\right)}$$

$$SNR = 4,96403x10^3$$

$$SNR_{dB} = 10\log_{10}(4,96403 \cdot 10^3) = 36,95834397$$

5. Mendapatkan nilai Q -Factor dari persamaan (2.9)

$$Q = \left(\frac{10^{\frac{4,96403x10^3}{10}}}{2}\right)$$

$$Q = 6,3152$$

Mendapatkan nilai *Bit Error Rate* (BER) dengan modulasi OOK-RZ (2.8)

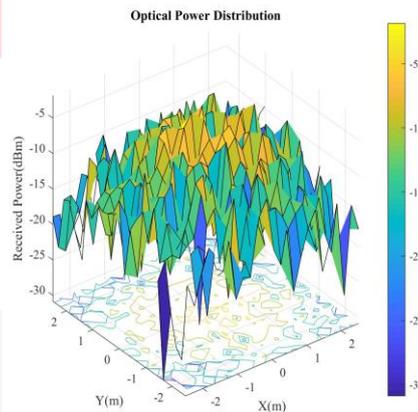
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{6,3152}{\sqrt{2}}\right) = 0$$

4. Hasil Simulasi dan Analisis

Pada bab ini membahas hasil dan analisis yang diperoleh dari proses pengujian. Setelah dilakukan perancangan dan simulasi sistem VLC pada rumusan masalah tugas akhir ini, disajikan hasil simulasi yang telah dibuat sesuai dengan spesifikasi yang sudah ditentukan. Hasil dari simulasi yang dilakukan kemudian dianalisis dengan menggunakan parameter-parameter berikut. simulasi sesuai dengan parameter yang sudah ditentukan.

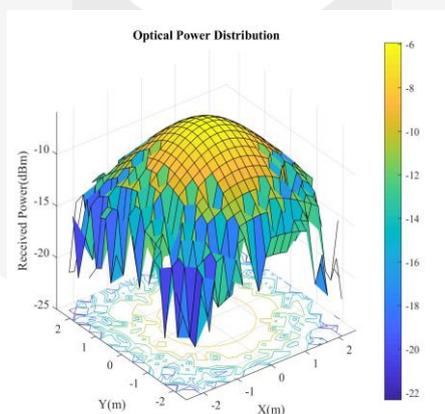
4.1 Hasil simulasi Pengujian distribusi cahaya LED

Pada pengujian terhadap skenario dilakukan terlebih dahulu simulasi distribusi daya dengan menggunakan daya input sebesar 45 W pada ruangan yang berukuran 5x5x3 meter. Pada simulasi ini diasumsikan bahwa pada ruangan tersebut terdapat interferensi dari benda-benda yang terdapat didalam ruangan, dimana lampu LED diletakkan di atas pusat ruangan. Kemudian tinggi *receiver* diletakkan pada ketinggian 0.85 meter dari permukaan tanah. Pada Gambar 4.1 menunjukkan grafik dari distribusi daya LED dengan daya input sebesar 45 W.



Gambar 4.1. Distribusi cahaya LED menggunakan kanal NLOS pada *Random Orientation*

Pada saat LED diberikan daya input sebesar 45 W dengan menggunakan kanal NLOS, didapatkan daya yang terdistribusi tertinggi sebesar -0,7616 dBm atau 0,83915 mW. Nilai yang mendapatkan daya terbaik berada pada jarak 2,1999 m. Hal ini terjadi karena semakin dekat jarak maka akan semakin kecil kemungkinan bit error yang terjadi dan begitu pula sebaliknya, semakin jauh jarak *receiver* terhadap transmitter maka akan semakin besar kemungkinan terjadi *bit error*. Pada Gambar 4.1 ditunjukkan dengan warna kuning yang menggambarkan daya *output* maksimal yang dapat ditangkap oleh *receiver*, bagian yang berwarna lebih terang adalah bagian dengan distribusi cahaya yang besar, apabila warna berubah menjadi warna gelap maka bagian tersebut memiliki distribusi cahaya yang kecil.

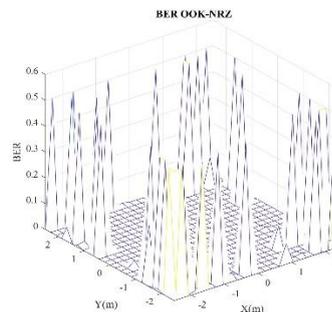


Gambar 4.2. Distribusi cahaya menggunakan kanal LOS pada *Random Orientation*

Kanal yang digunakan selanjutnya adalah kanal Line of Sight (LOS). Pada sub bab ini disajikan hasil dan analisis dari simulasi sistem VLC dengan menggunakan kanal LOS pada daya input LED sebesar 45 W yang menghasilkan daya distribusi tertinggi senilai -5,9340 dBm atau 0,25503 mW. Nilai yang mendapatkan daya terbaik berada pada jarak sejauh 2,1500 m. Pada jarak tersebut *bit error* yang terjadi sangat rendah dan terjadinya kerusakan data semakin kecil, tetapi jika nilai menjauhi nilai target maka besar kemungkinan akan terjadi *bit error* yang tinggi dan kerusakan pada data. Dapat dilihat dari Gambar 4.2 bahwa pada bagian yang berwarna lebih terang memiliki nilai tinggi yang berada tepat pada tengah ruangan dan memiliki *output* distribusi cahaya yang besar.

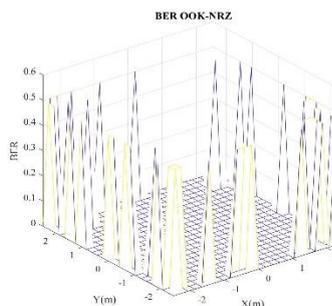
4.2 Hasil Simulasi dan Analisis penggunaan Teknik modulasi OOK-NRZ

Pada skenario I ditemukan beberapa hasil dari sistem VLC dengan teknik modulasi OOK-NRZ dengan menggunakan kanal NLOS dan LOS. Dari kedua teknik tersebut akan dilakukan analisis terhadap pengaruh yang dihasilkan. Parameter yang digunakan untuk menganalisis performa dari masing-masing teknik modulasi dilihat dari nilai BER pada tiap titik.



Gambar 4.3. BER OOK-NRZ menggunakan kanal NLOS dengan daya input 45 W

Pada Gambar 4.3 menunjukkan hasil dari nilai BER dengan menggunakan Teknik modulasi OOK-NRZ, dengan kanal NLOS yang memiliki daya input sebesar 45 W, dan menggunakan nilai bit rate sebesar 1 GB. Dari Gambar 4.3 menunjukkan bahwa daya 45 W sudah mendapatkan cakupan area yang maksimal. Untuk ruangan 5x5x3 meter daya telah mencakup seluruh ruangan. Pada modulasi OOK-NRZ, nilai BER yang memenuhi syarat dibawah 10^{-3} adalah sebanyak 554 titik dari 625 titik yang diamati. Maka dari itu coverage area dari sistem VLC dengan modulasi OOK-NRZ berdaya lampu LED 45 W adalah $554 \times 0,04 = 22,16 \text{ m}^2$.



Gambar 4.4. BER OOK-NRZ menggunakan kanal LOS dengan daya input 45 W

Pada Gambar 4.4 menunjukkan grafik nilai BER dengan menggunakan kanal LOS yang dibuat dengan lampu LED berdaya 45 W, dan menggunakan nilai bit rate senilai 1 GB. Dari Gambar 4.4 menunjukkan bahwa jika menggunakan kanal LOS nilai memiliki ketentuan yang tetap serta tidak berubah-ubah seperti ketika menggunakan kanal NLOS, hal tersebut diakibatkan karna kanal LOS tidak memiliki gangguan dan. Untuk ruangan 5x5x3 meter daya telah mencakup seluruh ruangan. Pada modulasi OOK-NRZ dengan menggunakan kanal LOS, nilai BER yang memenuhi syarat dibawah 10^{-3} adalah sebanyak 561 titik dari 625 titik yang diamati. Maka dari itu coverage area dari sistem VLC dengan modulasi OOK-NRZ berdaya LED 45 W adalah $561 \times 0,04 = 22,44 \text{ m}^2$. Dari kedua Gambar yang ditunjukkan dapat dilihat bahwa ketika penggunaan kanal NLOS nilai yang didapatkan senilai $22,16 \text{ m}^2$ sedangkan ketika menggunakan kanal LOS mendapatkan nilai $22,44 \text{ m}^2$, yang artinya ketika menggunakan kanal NLOS nilai mendapatkan kenaikan sebesar 1,2635%.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis penelitian sistem VLC dengan menggunakan teknik modulasi OOK-NRZ, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Percobaan yang dilakukan dengan kanal NLOS dan LOS menggunakan random orientation menghasilkan kesimpulan bahwa dengan menggunakan kanal LOS jarak maksimal bernilai 4,137934 m dan sudut orientasi $0 < x < 31^\circ$, untuk sudut orientasi maksimal 45° berada pada saat jarak 3,190306 meter. Sedangkan untuk penggunaan kanal NLOS ketika berada pada jarak maksimal yaitu 4,137934 m sudut orientasi $0 < x < 31^\circ$, dan untuk sudut orientasi maksimal 45° berada pada jarak 2,9783433 meter.
2. Daya terima yang dihasilkan ketika penggunaan kanal LOS dan NLOS dengan *random orientation* saat berada pada batas *threshold* 10^{-3} , mendapatkan hasil yaitu 0,037127 watt ketika menggunakan kanal LOS, dan 0,034366 watt ketika menggunakan kanal NLOS. Penggunaan kanal LOS mendapatkan daya terima lebih baik daripada kanal NLOS.
3. Jumlah cell yang terdapat dari hasil penggunaan kanal LOS dan NLOS, menemukan kesimpulan bahwa ketika penggunaan kanal LOS mendapatkan titik 561 dari 625 titik yang telah diamati dan bernilai $22,44 \text{ m}^2$ Sedangkan saat menggunakan kanal NLOS mendapatkan 554 titik dari 625 titik yang telah diamati dan bernilai $22,16 \text{ m}^2$.

Daftar Pustaka:

- [1] P. Kurniawan, K. Sujatmoko, and B. Pamukti, "Performance of ook-rz and nrz modulation techniques in various receiver positions for li-fi," in 2019 IEEE International Conference on Signals and Systems (ICSigSys). IEEE, 2019, pp. 173–177.
- [2] Y. S. Eroğlu, Y. Yapıcı, and I. Guvenc, "Impact of random receiver orientation on visible light communications channel," IEEE Transactions on Communications, vol. 67, no. 2, pp. 1313–1325, 2018.
- [3] A. Wijayanto, K. Sujatmoko, and B. Pamukti, "Pengaruh orientasi sudut penerima pada berbagai jumlah led dalam visible light communication," eProceedings of Engineering, vol. 6, no. 2, 2019.
- [4] A. Sharma, S. Bajaj, and S. Ahlawat, "Visible light communication," International Journal of Science and Research, vol. 4, no. 7, 2015.
- [5] K. Sindhubala and B. Vijayalakshmi, "Design and performance analysis of visible light communication system through simulation," in 2015 International Conference on Computing and Communications Technologies (ICCCT). IEEE, 2015, pp. 215–220.
- [6] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab R. CRC press, 2019.
- [7] S. Meshram and A. Wadhe, "Secure data transfer using visible light communication technique," International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering, vol. 3, no. 1, pp. 196–201, 2016.
- [8] Z. Wang, Q. Wang, W. Huang, and Z. Xu, Visible light communications: Modulation and signal processing. John Wiley & Sons, 2017.
- [9] A. R. Ndjongue, H. C. Ferreira, and T. M. Ngatched, "Visible light communications (vlc) technology," Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, pp. 1–15, 1.

