ANALISA PERFORMANSI SISTEM *VISIBLE LIGHT COMMUNICATION* (VLC) DENGAN 2X2 MIMO PADA KANAL *LINE OF SIGHT*

PERFORMANCE ANALYSIS OF VISIBLE LIGHT COMMUNICATION WITH 2X2 MIMO ON LINE OF SIGHT CHANNEL

Stefhani Lidya[1], Kris Sujatmoko[2], Harfan Hyan Ryanu[3]

[1,2,3] Universitas Telkom, Bandung
[1]stefhanilidya@student.telkomuniversity.ac.id, **[2]krissujatmoko@telkomuniversity.ac.id**, **[3]harfanhr@telkomuniversity.ac.id**

Abstrak

Komunikasi optik nirkabel dapat memenuhi kebutuhan fasilitas teknologi komunikasi seperti internet yang cepat. *Visible Light Communication* (VLC) adalah salah satu teknologi optik yang dikembangkan dengan tujuan membuat komunikasi lebih efektif dan efisien pada masa mendatang. *Light Emitting Diode* (LED) adalah salah satu jenis VLC, namun LED memiliki *bandwidth* yang terbatas, sedangkan data yang harus ditransmisikan cukup banyak sehingga digunakan *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) untuk mengatasinya. Pada penelitian ini dilakukan analisa penggunaan daya LED dan sudut *Full Width at Half Maximum* yang berbeda pada 2×2 MIMO di komunikasi berbasis *Visible Light Communication* dengan menggunakan 2 buah LED pada kondisi kanal *Line of Sight* (LOS) yang berada di koordinat titik (4, 2.5, 3) dan (1, 2.5, 3) dengan penerima berupa 2 buah PIN *photodiode* pada ruangan sebesar 5×5×3 meter^3. Kinerja sistem dievaluasi berdasarkan Distribusi Daya Terima, *Bit Error Rate* (BER) dan *Signal to Noise Ratio* (SNR) dengan modulasi *On-Off Keying Non-Return to Zero* (OOK-NRZ) dan *Return to Zero* (OOK-RZ). Berdasarkan simulasi dan analisis pada Tugas Akhir ini menunjukkan bahwa sistem dengan menggunakan sudut FWHM 30^o yang menghasilkan kualitas distribusi daya sebesar -9,998 dBm dengan nilai SNR sebesar 47,46 dB. Sedangkan penggunaan modulasi OOK-RZ menghasilkan nilai BER yang lebih baik dibandingkan OOK-NRZ.

Kata Kunci: ***BER, FWHM, MIMO, OOK-NRZ, OOK-RZ, SNR, VLC.***

Abstract

Wireless optical communication support the needs of communication technology facilities such as fast internet. Visible Light Communication (VLC) is an optical technology developed with the aim of making communication more effective and efficient in the future. Light Emitting Diode (LED) is one type of VLC, but LED has a limited bandwidth, while the data that must be transmitted is quite a lot so Multiple Input Multiple Output (MIMO) is used to overcome it. In this study, an analysis of the LED power usage and the different Full Width at Half Maximum angles at 2×2 MIMO in Visible Light Communication-based communication using 2 LEDs in the Line of Sight (LOS) channel conditions was carried out at the coordinates of the point (4, 2.5, 3) and (1, 2.5, 3) with the receiver in the form of 2 PIN photodiode in a room of 5×5×3 meters^3. System performance was evaluated based on Distribution of Receive Power, Bit Error Rate (BER) and Signal to Noise Ratio (SNR) with On-Off Keying Non-Return to Zero (OOK-NRZ) and Return to Zero (OOK-RZ) modulation. Based on the simulation and analysis in this final project, it shows that the system using the 30^o FWHM angle produced a power distribution quality of -9.998 dBm with an SNR value of 47.46 dB. While the use of OOK-RZ modulation produced a better BER value than OOK-NRZ.

Keywords: BER, FWHM, MIMO, OOK-NRZ, OOK-RZ, SNR, VLC.

1. Pendahuluan

Teknologi optik adalah teknologi transmisi yang menggunakan serat optik dalam mentransmisikan sebuah sinyal informasi dari satu titik ke titik yang lain atau dari sumber menuju penerima. Teknologi serat optik lebih unggul dikarenakan dapat mengirimkan informasi atau paket data berupa cahaya yang lebih

cepat dibanding kabel tembaga. Tetapi dibalik keunggulan tersebut, teknologi serat optik memiliki kekurangan, yaitu biaya pemasangan, perawatan dan perbaikan yang relatif mahal karena diperlukan alat khusus. Untuk mengatasi kekurangan serat optik, maka digunakan teknologi *Optical Wireless Communication (OWC).* Salah satu teknologi OWC yang marak dikembangkan adalah cahaya tampak atau *Visible Light Communication* (VLC).

VLC adalah teknologi yang menggunakan cahaya tampak berupa *Light Emitting Diode* (LED) sebagai pencahayaan dan komunikasi. VLC mudah digunakan karena tidak menggunakan daya yang besar dalam proses transmisinya [1]. LED digunakan karena memiliki daya pakai yang lama dan biaya serta energi yang digunakan relatif rendah [2]. LED memiliki kekurangan yaitu *bandwidth* modulasi yang terbatas [3], maka digunakan *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) dengan masing-masing dua pengirim dan penerima untuk menganalisis nilai *Bit Error Rate* (BER) pada kondisi panjang gelombang yang berbeda. Pada penelitian [3] telah dianalisa nilai BER pada 4x4 MIMO berbasis VLC dalam ruangan. Teknik MIMO dipilih agar dapat menganalisa kualitas dari *bit rate* yang digunakan pada VLC [4].

Dalam penelitian ini dirancang 2x2 MIMO VLC pada kanal *Line of Sight* pada sudut FWHM 30^o dan 60^o dengan dua buah pemancar dengan parameter panjang gelombang serta daya kirim yang berbeda dengan membandingkan penggunaan teknik modulasi On Off Keying Non-Return to Zero (OOK-NRZ) dan On Off Keying Return to Zero (OOK-RZ) dengan acuan nilai BER sebesar 10^{-3} pada masing-masing modulasi dan sudut.

2. Dasar Teori

2.1 *Visible Light Communication* (VLC)

Visible Light Communication atau VLC adalah sebuah penerapan sistem dari *optical wireless communication* (OWC) dengan rentang gelombang 390-700 nm [5]. VLC menggunakan pancaran cahaya tampak dari lampu sebagai sistem komunikasi. Pada sistem komunikasi VLC, terdapat pemancar atau pengirim dan penerima. Pemancar dapat berupa *Light Amplification by Stimulated Emmision of Radiation* (LASER) atau *Light Emitting Diode* (LED). Penerima dapat berupa *solar cell* atau *photodiode* [6].

VLC memiliki beberapa keunggulan, yaitu lebih ramah lingkungan, dapat mentransfer data komunikasi dengan kecepatan yang sangat tinggi, harga yang mudah dijangkau, efisiensi energi, LED diharap dapat menggantikan perangkat pencahayaan konvensional dan kemudahan dalam pengimplementasiannya karena menggunakan cahaya sebagai sumber yang mudah didapatkan dengan jumlah tidak terbatas pada banyak area seperti area lokal, WLAN, WPAN, dalam ruangan, bawah tanah bahkan dalam air dengan keamanan yang terjamin karena cahaya tidak mudah tersebar pada kondisi dalam ruangan ketika dihalangi oleh material seperti dinding. Dengan beberapa keunggulan tersebut, sistem ini diharapkan dapat mengatasi kekurangan dari sistem *Radio Frequency* (RF)[5].

2.2 *Light Emmitting Diode* (LED)

Light Emitting Diode atau LED adalah suatu perangkat semikonduktor yang dapat memancarkan warna dengan mengubah sinyal informasi yang awalnya analog menjadi cahaya yang kemudian ditransmisikan dan ditampilkan oleh LED jika dialiri oleh tegangan maju (*forward bias)*. LED berbentuk sebuah bohlam kecil dan menghasilkan cahaya ultraviolet. LED digunakan karena lebih tahan lama, berukuran kecil, biaya relatif murah dan hemat energi yang mencapai maksimal 90% dibandingkan lampu biasa. Jika dibandingkan dengan laser, LED dapat menggabungkan pencahayaan dan komunikasi di saat yang bersamaan. Warna dan panjang gelombang pada LED akan disesuaikan dengan energi *band-gap* dari p-n *junction.* Pada pengiriman sinyal informasi, sinyal berbentuk analog akan ditransmisikan melalui LED dengan data yang dikirimkan berupa cahaya yang kemudian akan diterima oleh *photodiode*. *Photodiode* akan mengubah cahaya yang diterima sebelumnya menjadi energi listrik

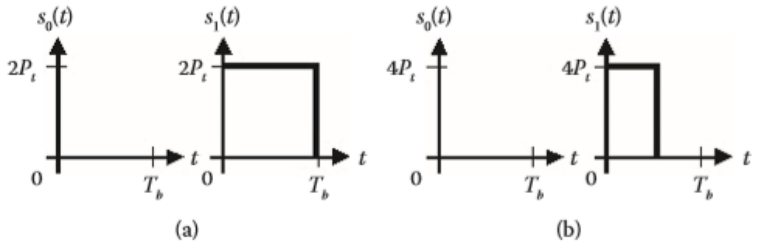
2.3 Kanal Transmisi

Kanal LOS adalah kanal yang tidak memiliki penghalang antara pengirim yaitu LED dan penerima berupa fotodetektor. Kanal LOS memiliki beberapa kelebihan dibanding kanal NLOS, antara lain adalah sinyal yang dipancarkan dapat mencapai fotodetektor secara langsung dan memiliki kekuatan pengiriman data yang baik [2], memiliki tingkat kesalahan bit yang rendah, tahan terhadap noise, keamanan dan *bandwidth* yang lebih tinggi, interferensi yang terjadi lebih sedikit dan penggunaan daya yang rendah.

2.4 Teknik Modulasi *On Off Keying*

Modulasi OOK atau *On-Off Keying* adalah jenis modulasi yang banyak digunakan dan merupakan bentuk paling sederhana dari penerapan modulasi pada VLC yang menggunakan *intensity modulation and*

direct detection (IM/DD), hal ini dikarenakan mudahnya penerapan, data yang digunakan lebih efisien, dan sebagian besar VLC telah memiliki SNR yang lebih tinggi dengan *bandwidth* sistem yang rendah sehingga hal ini menyebabkan OOK-NRZ (*Non-Return to Zero*) lebih banyak dipilih [5]. Ada dua kondisi pada modulasi OOK, yaitu biner 0 yang merepresentasikan kondisi tidak adanya pulsa optik yang sampai pada penerima (*on*) dan biner 1 yang merepresentasikan kondisi pulsa optik yang dikirim telah memenuhi sebagian (RZ) atau seluruh (NRZ) durasi bit (*off*).



Gambar 1. (a) Bentuk gelombang OOK-NRZ, (b) Bentuk gelombang OOK-RZ dengan $\gamma = 0.5$[4].

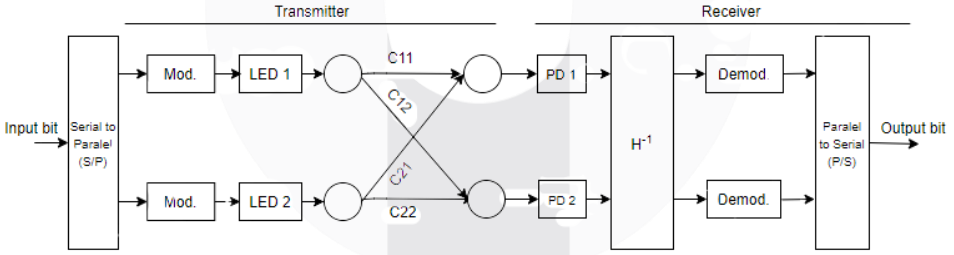
2.5 Bit rate

Bit *rate* merupakan jumlah data yang diproses dalam satuan waktu tertentu. Bit *rate* berfungsi untuk mengetahui jika terjadi kesalahan atau *error* dalam suatu data. Kondisi banyaknya *error* pada data dalam waktu tertentu disebut dengan bit *error rate* (BER). Nilai bit *rate* umumnya menggunakan satuan *kilobyte per second* (Kbps) atau *megabyte per second* (Mbps). Pada beberapa kondisi, kecepatan transmisi data tidak dapat diubah karena bergantung pada nilai bandwidth, tetapi hal ini dapat diatasi dengan mengatur perangkat *output* [7]. Bit *rate* menunjukkan kualitas data yang dikirimkan dan diterima. Semakin tinggi nilai bit *rate*, maka semakin baik dan jelas kualitas data tersebut.

2.6 *Multiple Input Multiple Output* (MIMO)

Multiple input multiple output atau MIMO adalah sebuah teknologi pengiriman tanpa kabel dengan menggunakan lebih dari satu pemancar dan satu penerima, biasanya ditulis dengan MIMO A × B, dimana A merupakan jumlah pemancar dan B merupakan jumlah penerima. MIMO digunakan untuk mengirimkan data dengan rentang yang lebih besar pada waktu yang sama tanpa melakukan peningkatan *bandwidth*.

3. Pemodelan Sistem

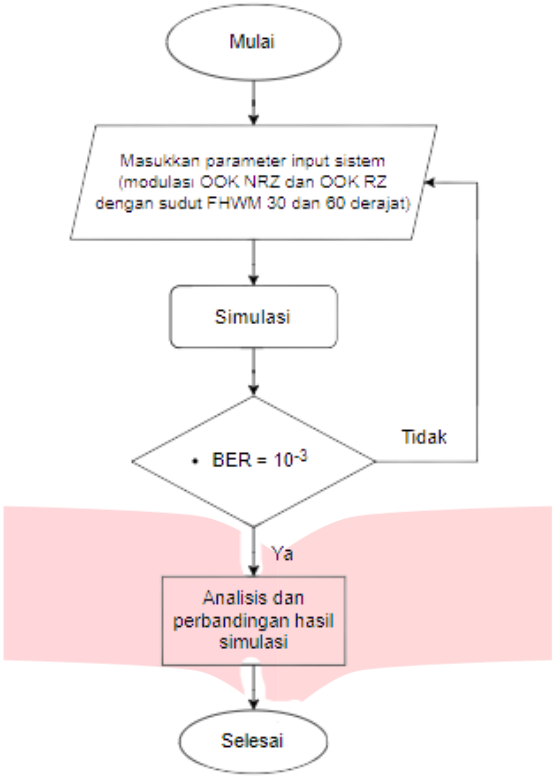


Gambar 2. Blok diagram 2x2 MIMO.

Sistem VLC dimodelkan dengan menggunakan metode 2x2 MIMO seperti pada Gambar 2. Pada blok *transmitter*, akan dimasukkan sejumlah bit acak yang kemudian akan diteruskan agar menghasilkan cahaya menuju dua buah LED yang telah diatur dengan memiliki panjang gelombang yang berbeda. Sinyal cahaya yang dipancarkan dan mengandung informasi bit akan diterima oleh blok *receiver* melalui permukaan fotodioda, kemudian akan terjadi perubahan cahaya menjadi sinyal digital. Hasil bit acak yang dikirim akan dibandingkan dengan nilai BER pada penerima setelah melalui metode 2x2 MIMO.

3.1 Diagram Alir Sistem

Gambar 3 memaparkan alur dari rancangan sistem. Pada sistem, dimasukkan parameter awal berupa kanal yang digunakan yaitu dua pengirim dan dua penerima, bit *rate* sebesar 1 Gbps, dan sudut sebesar 30° dan 60°. Pada bagian *receiver* diatur nilai responsivitas dan ukuran ruangan 5 x 5 x 3 m^3. Setelah parameter ditentukan, nilai bit acak dimasukkan dengan menggunakan jenis modulasi pertama yaitu OOK-NRZ. Jika diperoleh nilai bit keluaran yang berbeda dengan bit masukan, maka akan dilakukan simulasi dengan menggunakan modulasi kedua yaitu OOK-RZ dan kemudian akan dihitung nilai BER dan SNR.



Gambar 3. Diagram alir sistem.

3.2 Spesifikasi Sistem

3.2.1 *Transmitter*

Transmitter merupakan bagian sistem komunikasi yang mengirimkan sinyal informasi melalui kanal. Pada penelitian ini digunakan *transmitter* berupa 2 buah LED. 1 buah LED berwarna kuning sebagai *transmitter* 1 dengan daya sebesar 3,84 Watt yang diletakkan pada posisi (4, 2.5, 3) dan 1 buah LED berwarna merah sebagai *transmitter* 2 dengan daya sebesar 3,648 Watt pada posisi (1, 2.5, 3).

3.2.2 Kanal

Kanal yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis kanal LOS. Dengan menggunakan kanal LOS maka tidak terdapat *obstacle* dan interferensi dari cahaya lain yang dapat mengganggu proses pentransmisian data. Pada penelitian dengan menggunakan MIMO, maka kanal akan diproses dalam bentuk matriks h_{ij} dimana i merupakan jumlah *transmitter* dan j merupakan jumlah *receiver* yang digunakan.

3.2.3 *Receiver*

Receiver berfungsi untuk menerima sinyal informasi yang dikirimkan oleh *transmitter*. Pada penelitian ini jenis *photodetector* yang digunakan adalah jenis N-*Type silicon Positive-Intrinsic Negative* (PIN) *photodiode* dengan tipe C30810 yang memiliki luas deteksi sebesar 1 cm^2, *field of view* (FOV) sebesar 70^o, dan responsivitas sebesar 0,6 A/W.

3.3 Parameter Pengujian

Pada penelitian ini diuji daya terima dari masing-masing kanal pada *receiver*, *Signal to Noise Ratio* (SNR), *Bit Error Rate* (BER) dengan nilai acuan ideal 10^{-3} serta faktor kualitas pengiriman informasi.

3.3.1 Jarak dan Sudut Pancar

Jarak antara *receiver* dan *transmitter* memiliki pengaruh terhadap daya yang akan diterima. Semakin dekat jarak *receiver* dan *transmitter*, maka akan semakin besar daya yang diterima. Jarak diperoleh melalui persamaan (3.1) dan besar sudut yang terbentuk antara *transmitter* dan *receiver* pada persamaan (3.2) berikut. Nilai sudut pancar akan digunakan untuk mencari nilai parameter Lambertian melalui persamaan (3.3).

$$d = \sqrt{(Xr-Xt)^2+(Yr-Yt)^2+h^2} \quad (3.1)$$

$$\phi = \arccos \frac{h}{d} \quad (3.2)$$

$$m = \frac{-\log 10\,(2)}{\log 10\,(\cos(\phi_{1/2}))} \quad (3.3)$$

dimana nilai Xr dan Xt yaitu koordinat *transmitter* dan *receiver* pada sumbu x, nilai Yr dan Yt yaitu koordinat *transmitter* dan *receiver* pada sumbu y, dan h merupakan jarak dari posisi *receiver* ke langit ruangan dan $\phi_{1/2}$ merupakan nilai dari *full width at half maximum* (FWHM).

Kanal hij diperoleh dengan i sebagai jumlah transmitter dan j sebagai jumlah receiver melalui persamaan (3.4) dan (3.5) sehingga membentuk kanal matriks MIMO pada persamaan (3.6) berikut

$$R_0(\phi) = \frac{(m+1)}{2.\pi}.\cos^{(m)}(\phi) \quad (3.4)$$

$$h_{ij} = \begin{cases} \Sigma \frac{A_{pd\text{-}rj}}{d_{ij}^2} \cdot R0(\phi)\cdot\cos(\beta ij) & \text{For } 0 \le \beta ij \le \beta c \\ 0 & \text{For } \beta ij > \beta c \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \ddots & h_{2N} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ h_{A1} & h_{A2} & \cdots & h_{AN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_A \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Nilai $A_{pd\text{-}rj}$ adalah luas area receiver, d merupakan jarak dari transmitter menuju receiver, βij merupakan sudut yang terbentuk antara transmitter dan receiver, βc adalah field of view (FOV) pada fotodetektor. Nilai $R_0(\phi)$ merupakan nilai dari persamaan yang melibatkan parameter Lambertian (m) dan sudut *pancar* (ϕ). Nilai y sebagai vektor kanal dari sinyal yang diterima, x sebagai vektor dari sinyal yang dikirim, dan n sebagai *noise* pada *receiver*.

3.3.2 *Signal to Noise Ratio*

Signal to noise ratio (SNR) adalah perbandingan daya sinyal dengan daya *noise.* Tingkat bit *error* yaitu 10^{-9} sampai 10^{-12} tergantung pada *signal to noise ratio*. SNR pada sistem VLC tergolong rendah akibat *bandwidth* modulasi yang terbatas, oleh karena itu digunakan teknik MIMO yang menawarkan ketersediaan sejumlah besar kanal SNR dengan *bandwidth* yang rendah untuk mempercepat pengiriman data [8].

$$SNR = \frac{(P_{RX} \times R)^2}{2\times q\times(I_P+I_D)\times B\times M^2\times F(M) + 2\times I_I\times B + \frac{4\times Kb\times T\times B}{RL}} \quad (3.7)$$

$$SNR_{db} = 10 \log SNR \quad (3.8)$$

dimana P_{RX} adalah daya terima dan R adalah responsivitas pada *receiver*. I_P merupakan arus primer, I_D merupakan arus bulk yang bernilai 0, B merupakan *bandwidth*, q merupakan muatan elektron bernilai 1.602 x 10^{-19} C, M merupakan faktor multiplikasi dan F(M) merupakan *noise figure*, I_I merupakan arus *dark surface leakage* bernilai 0, Kb merupakan konstanta Boltzman yang bernilai 1.38 x 10^{-23} J/K, T merupakan suhu fotodetektor yaitu 300° K, dan R_L sebagai nilai dari resistansi dalam satuan Ω.

3.3.3 *Bit Error Rate*

Bit error rate atau BER adalah kondisi yang menggambarkan sejumlah *error* pada saat mentransmisikan sinyal digital yang dinyatakan dalam sejumlah pulsa yaitu satu dan nol dalam waktu tertentu. BER pada komunikasi optik berkisar antara 10^{-9} sampai 10^{-12}. BER pada modulasi OOK-NRZ dan OOK-RZ dapat dihitung pada rumus berikut

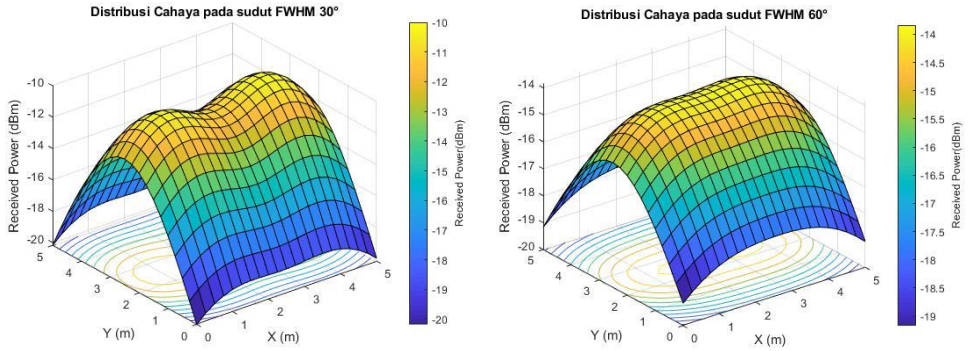
$$BER_{OOK\text{-}NRZ} = \text{erfc}\left(\frac{SNR}{2\sqrt{2}}\right) \quad (3.9)$$

$$BER_{OOK\text{-}RZ} = \frac{1}{2} \times \text{erfc}\left(\frac{1}{2}\sqrt{SNR}\right) \quad (3.10)$$

4. Hasil dan Analisis

4.1 Analisis Distribusi Daya Terima

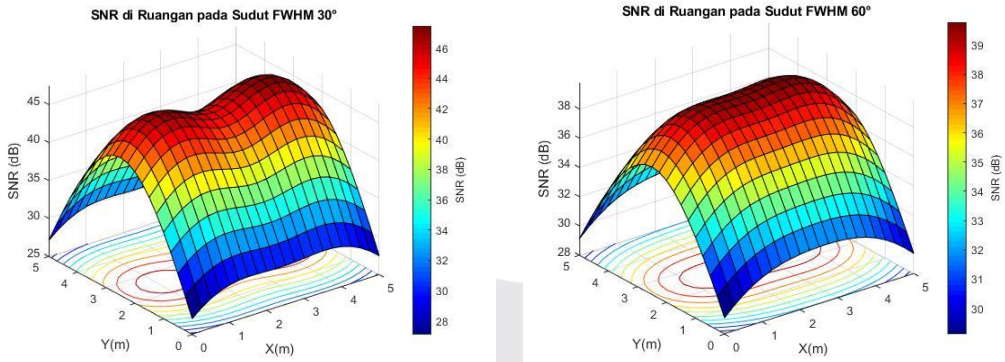
Pada skenario pertama dan kedua dimasukkan sejumlah informasi berupa bit acak pada sudut FWHM sebesar 30º dan 60º dengan *bit rate* 1 Gbps melalui kanal, yaitu 1 buah LED kuning yang memiliki daya kirim sebesar 3,84 Watt dan 1 buah LED merah dengan daya kirim sebesar 3,684 Watt untuk memperoleh distribusi daya terima pada *receiver*.



Gambar 4.1 Distribusi daya terima sudut FWHM sebesar 30º dan 60º.

Pada Gambar 4.1 di atas dihasilkan daya *output* maksimal sebesar -9,998 dBm pada sudut FWHM sebesar 30º dan -13,839 dBm pada sudut FWHM 60º. Warna kuning pada gambar merepresentasikan daya *output* maksimal yang dapat diterima oleh *receiver*, sedangkan warna biru gelap merepresentasikan daya *output* minimal yang diterima *receiver*. Semakin cerah warna grafik distribusi cahaya, maka semakin besar daya yang dapat diterima oleh *receiver*.

4.2 Analisis SNR pada Sudut FWHM 30° dan 60°



Gambar 4.2 SNR pada sudut FWHM sebesar 30 º dan 60º.

Pada skenario I dan II dilakukan analisis distribusi SNR yang diperoleh pada kondisi ruangan berukuran 5x5x3 meter. Pada skenario ini disimulasikan penggunaan sudut FWHM sebesar 30º dan 60º. Sumbu X dan sumbu Y sebagai ilustrasi ukuran ruangan yang digunakan, sedangkan sumbu Z merepresentasikan nilai distribusi SNR yang diperoleh. Sudut FWHM yang dikonfigurasi sebesar 30º menghasilkan SNR maksimum sebesar 47,46 dB dan SNR yang dihasilkan sudut FWHM 60º sebesar 39,78 dB.

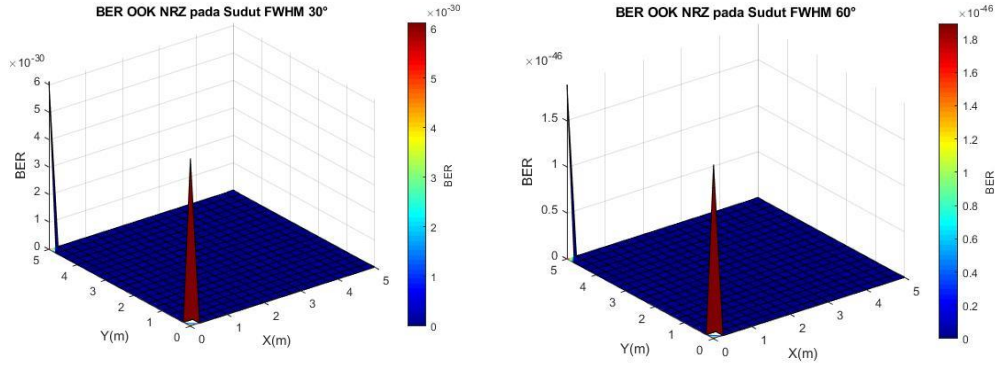
4.3 Analisis BER pada Sudut FWHM 30° dan 60°

Pada bagian ini ditampilkan hasil BER terhadap SNR pada simulasi sistem sudut FWHM 30º dan 60º menggunakan dua jenis modulasi, yaitu modulasi OOK-NRZ dan modulasi OOK-RZ.

4.3.1 Analisis BER dengan Modulasi OOK-NRZ

Gambar 4.3 merupakan hasil distribusi BER dalam bentuk tiga dimensi dengan menggunakan sudut FWHM sebesar 30º dan 60º. Pada gambar di bawah terdapat warna biru yang semakin gelap dan menunjukkan semakin kecilnya nilai BER yang dihasilkan dari simulasi atau semakin sedikitnya *error* yang terjadi selama proses pengiriman infomasi. Berdasarkan hasil distribusi tersebut, diperoleh nilai BER

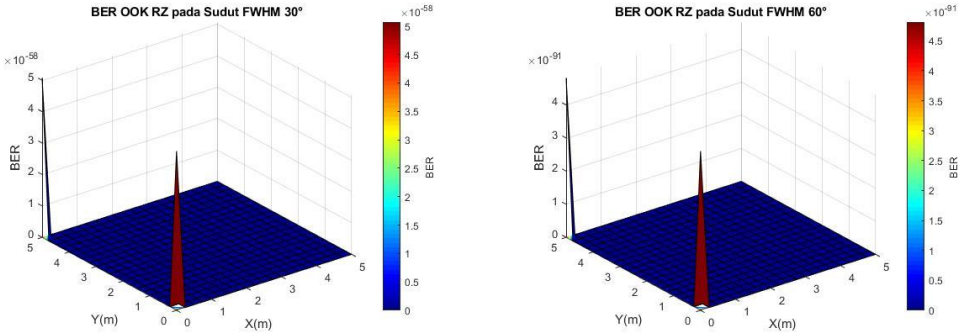
maksimum sebesar 6.116 x 10^{-30} pada sudut FWHM sebesar 30^o dan nilai BER maksimum sebesar 1,89 x 10^{-46} pada sudut FWHM 60^o.



Gambar 4.3 BER *coverage* OOK-NRZ pada sudut FWHM 30^o dan 60^o.

4.3.2 Analisis BER dengan Modulasi OOK-RZ

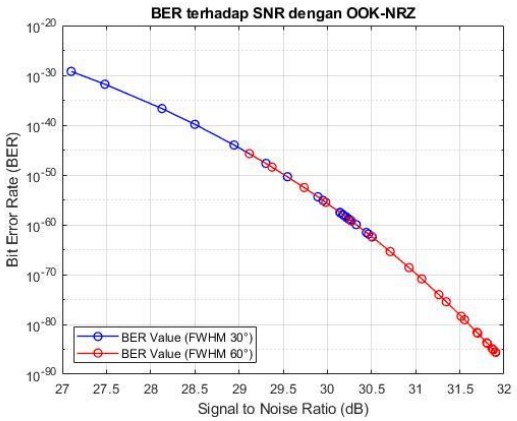
Gambar 4.4 merupakan hasil distribusi BER dalam bentuk tiga dimensi dengan menggunakan sudut FWHM sebesar 30 dan 60^o. Pada gambar di bawah terdapat warna biru yang semakin gelap dan menunjukkan semakin kecilnya nilai BER yang dihasilkan dari simulasi atau semakin sedikitnya *error* yang terjadi selama proses pengiriman infomasi. Berdasarkan hasil distribusi pada sudut 30^o, diperoleh nilai BER maksimum sebesar 5.07 x 10^{-58} dan pada sudut 60^o diperoleh nilai BER maksimum sebesar 4.81 x 10^{-91}.



Gambar 4.4 BER *coverage* OOK-RZ pada sudut FWHM 30^o dan 60^o.

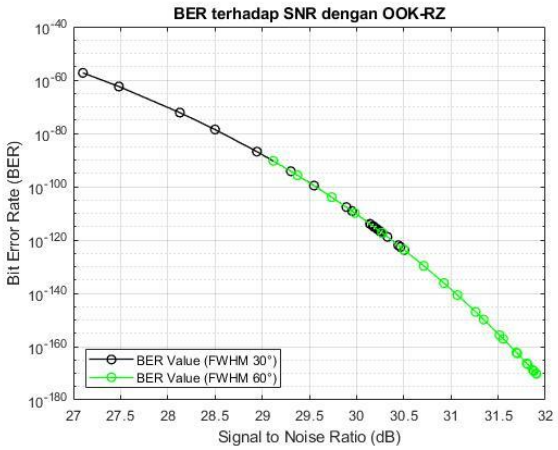
4.4 Perbandingan BER terhadap SNR

Pada Gambar 4.5 di bawah membandingkan nilai BER OOK-NRZ pada sudut FWHM 30^o dan 60^o. Grafik biru menunjukkan nilai BER yang semakin turun terhadap SNR yang meningkat pada sudut FWHM 30^o dengan nilai BER 6.116 x 10^{-30} pada SNR senilai 27,1 dB, sedangkan grafik merah menunjukkan nilai BER 1,89 x 10^{-46} yang semakin turun terhadap SNR yang meningkat pada sudut FWHM 60^o pada SNR bernilai 29,12 dB.



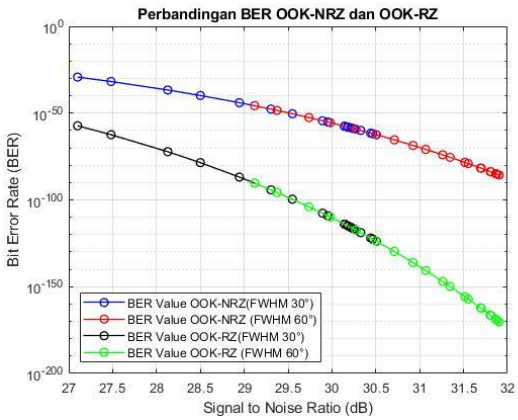
Gambar 4.5 Kurva perbandingan BER OOK-NRZ terhadap SNR.

Pada Gambar 4.6 di bawah membandingkan nilai BER OOK-RZ pada sudut FWHM 30º dan 60º. Grafik hitam menunjukkan nilai BER yang semakin turun terhadap SNR yang meningkat pada sudut FWHM 30º dengan nilai BER 5.07 x 10^{-58} pada SNR senilai 27,1 dB, sedangkan grafik hijau menunjukkan nilai BER 4,81 x 10^{-46} yang semakin turun terhadap SNR yang meningkat pada sudut FWHM 60º pada SNR bernilai 29,12 dB.



Gambar 4.6 Kurva perbandingan BER OOK-RZ terhadap SNR.

Pada Gambar 4.17 di bawah dibandingkan hasil simulasi BER OOK-NRZ dan OOK-RZ terhadap SNR pada sudut FWHM 30º dan 60º. Dapat disimpulkan bahwa semakin rendah nilai SNR, maka nilai BER akan semakin tinggi atau nilai *error* pada data yang dikirim semakin banyak.



Gambar 4.7 Kurva perbandingan BER OOK-NRZ dan OOK-RZ terhadap SNR

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis mengenai penggunaan 2x2 MIMO VLC dengan parameter *transmitter* yang berbeda pada VLC menggunakan kanal LOS, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil simulasi menggunakan dua buah *transmitter* berbeda parameter dan dua buah *receiver* atau 2×2 MIMO terhadap daya terima, SNR dan BER menunjukkan bahwa semakin dekat jarak *receiver* dan *transmitter*, maka pendistribusian daya terima yang diperoleh *receiver* dan nilai SNR semakin besar, sedangkan nilai BER semakin kecil atau jumlah data yang *error* semakin sedikit.
2. Pada sudut FWHM 30^o menghasilkan daya terima yang lebih baik dibandingkan penggunaan sudut FWHM 60^o yaitu sebesar -9,998 dBm dengan SNR sebesar 47,46 dB. Pengiriman menggunakan nilai sudut FWHM mempengaruhi distribusi daya terima dimana semakin kecil nilai sudut FWHM yang digunakan, maka semakin fokus persebaran daya pada titik tertentu. Hal ini berlaku sebaliknya.
3. Simulasi BER menggunakan teknik modulasi OOK-RZ pada sudut FWHM 30^o dan 60^o menghasilkan nilai BER lebih baik dibandingkan modulasi OOK-NRZ yaitu sebesar 5,07 x 10^{-58} dan 4,81 x 10^{-91}. Nilai dari daya terima dan SNR dari kedua sudut FWHM tidak berbeda jauh, tetapi untuk BER dengan modulasi berbeda terdapat perbedaan yang cukup signifikan.
4. Nilai dari SNR yang menunjukkan perbandingan sinyal terima terhadap *noise* berkaitan dengan nilai BER pada sistem dimana semakin besar nilai SNR maka semakin sedikit data pengiriman yang *error* ketika mencapai *receiver* dari pada sistem yang digunakan.

REFERENSI

[1] C.-W. Hsu, C.-W. Chow, I.-C. Lu, Y.-L. Liu, C.-H. Yeh, and Y. Liu, "High speed imaging 3× 3 MIMO phosphor white-light LED based visible light communication system," *IEEE Photonics J.*, vol. 8, no. 6, pp. 1–6, 2016.

[2] A. Kumar and S. K. Ghorai, "BER performance analysis of indoor MIMO-VLC system for multipath reflection," in *2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP)*, 2018, pp. 1–5.

[3] M. Kowalczyk, "2× 2 MIMO VLC Optical Transmission System Based on LEDs in a Double Role," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 130, no. 1, pp. 41–44, 2016.

[4] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®*. CRC press, 2019.

[5] L. U. Khan, *Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges*, vol. 3, no. 2. Elsevier, 2017.

[6] A. R. Darlis, L. Lidyawati, and D. Nataliana, "Implementasi Visible Light Communication (VLC) Pada Sistem Komunikasi," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 1, no. 1, p. 13, 2013.

[7] M. Kampmann and C. Plum, "Technique for controlling data packet transmission of variable bit rate data." Google Patents, May 17, 2016.

[8] L. Zeng *et al.*, "High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, no. 9, pp. 1654–1662, 2009.