

**PENGARUH MODULASI MPPM PADA KANAL *NON-LINE OF SIGHT*
TERHADAP PERFORMA *VISIBLE LIGHT COMMUNICATION*
IMPACT OF MPPM MODULATION ON *NON-LINE OF SIGHT CHANNEL*
TO *VISIBLE LIGHT COMMUNICATION PERFORMANCE***

Harizan Farizi¹, Dr. Nachwan Mufti Adriansyah, S.T., M.T.², Brian Pamukti, S.T., M.T.³

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

¹harizanfarizi@student.telkomuniversity.ac.id

²nachwanma@telkomuniversity.ac.id ³brianp@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Teknologi *Visible Light Communication* (VLC) merupakan teknologi komunikasi yang menggunakan cahaya tampak sebagai media transmisi. Teknologi VLC sendiri sangat berpengaruh dalam dunia telekomunikasi. Dalam upaya meningkatkan performa dari VLC untuk pengimplementasiannya digunakan modulasi *Pulse Position Modulation* (PPM) dengan 3 level yaitu 2-PPM, 4-PPM, dan 8-PPM pada kanal *Non-Line Of Sight* (NLOS) berupa Reflector dan blockage di dalam ruangan 5x5x4 meter. Hasil simulasi dari penelitian ini adalah dengan menggunakan teknik modulasi PPM yang levelnya berubah-ubah adalah pada saat menggunakan 4-PPM dan 8-PPM nilai BER mengalami peningkatan pada setiap kanal sesuai acuan yaitu 10^{-3} . Nilai level pada PPM sangat berpengaruh pada setiap kanal, semakin besar nilai level PPM maka nilai *Bit Error Rate* (BER) akan semakin optimal.

Kata kunci: *Visible Light Communication, Non-Line of Sight, Reflector, Blockage, Bit Error Rate.*

Abstract

Visible Light Communication (VLC) technology is a communication technology that uses visible light as a transmission medium. VLC technology itself is very influential in the world of telecommunications. In an effort to improve the performance of VLC for its implementation, *Pulse Position Modulation* (PPM) modulation is used with 3 levels, namely 2-PPM, 4-PPM, and 8-PPM on *Non-Line of Sight* (NLOS) channels in the form of Reflector and blockage in a 5x5x4 room. meters. The simulation results of this study are to use PPM modulation techniques whose level changes are when using 4-PPM and 8-PPM BER values have increased in each channel according to the reference that is 10^{-3} . The level value on PPM is very influential on each channel, increasingly the greater the PPM level, the *Bit Error Rate* (BER) will be more optimal.

Keywords: *Visible Light Communication, Non-Line of Sight, Reflector, Blockage, Bit Error Rate*

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi pada era ini telah mengalami suatu pertumbuhan yang sangat pesat. Teknologi telekomunikasi yang cepat, efisien serta ramah lingkungan merupakan sesuatu hal yang diperlukan oleh masyarakat saat ini. Sarana telekomunikasi yang dibutuhkan harus mampu memenuhi kebutuhan untuk era ini maupun kebutuhan di masa yang akan datang. Jenis lain dari komunikasi nirkabel adalah komunikasi cahaya tampak. Cahaya tampak merupakan salah satu media transmisi nirkabel dimana cahaya tampak ini menjadi media perambatan dari suatu media transmisi. Teknologi yang menggunakan cahaya tampak sebagai media transmisi adalah *Visible Light Communication* (VLC) [1].

Pada penelitian [2], bahwa pengiriman teks, karakter, huruf, dan angka dapat dikirimkan dari *transmitter* menuju *receiver* dengan menggunakan cahaya LED, kondisi lingkungan gelap dan terang dapat mempengaruhi jarak *transmitter* ke *receiver*. Adanya sistem VLC juga dilatarbelakangi oleh penggunaan cahaya sebagai sumber dalam sistem komunikasi optik. Sistem VLC dapat menggantikan teknologi *wireless*. Sistem VLC saat ini juga memiliki banyak kanal diantaranya juga ada kanal NLOS, yang dimana berdasarkan penelitian tersebut, pada tugas akhir ini akan dilakukan analisa untuk melihat pengaruh modulasi pada kanal NLOS dalam performansi VLC.

2. Dasar Teori

2.1. Visible Light Communication

Visible Light Communication adalah salah satu jenis sistem komunikasi cahaya *unguided* dimana jenis cahaya yang digunakan adalah cahaya tampak. Cahaya tampak pada era ini tidak hanya menjadi suatu media dalam penerangan, tetapi saat ini juga dapat digunakan sebagai suatu media penyampaian informasi. Teknologi komunikasi yang sedang tren saat ini adalah teknologi

telekomunikasi yang menggunakan cahaya sebagai media transmisi. VLC masuk kedalam bagian dari OWC atau *Optical Wireless Communication*[1]. Teknologi VLC menggunakan spektrum cahaya dengan rentang panjang gelombang dari 380nm sampai 780nm dan rentang frekuensi dari 4.3×10^{14} Hz sampai 7.5×10^{14} Hz[2].

2.2. LED

Light Emitting Diode (LED) LED merupakan salah satu komponen elektronik yang dapat memancarkan cahaya apabila disambungkan dengan catu daya listrik[3].

2.3. Photodetector

Photodetector adalah salah satu *detector* yang digunakan untuk mendeteksi cahaya yang kemudian akan diubah menjadi energi listrik. Resistansi pada photodiode dapat berubah-ubah apabila terkena cahaya yang dikirim oleh *transmitter*. Resistansi Photodiode dipengaruhi pada intensitas cahaya yang diterimanya[5]. Material penyusun P-I-N terdiri dari bahan semikonduktor yang dapat meningkatkan responsivitas photodiode ketika menambahkan lapisan dielektrik anti-refleksi.

2.4. Kanal Transmisi

Kanal yang digunakan pada penelitian ini menggunakan kanal *Line of Sight* (LOS) dan *Non-Line of Sight*(NLOS), dimana kanal NLOS yang digunakan berupa *reflector* dan *blockage*.

2.4.1 Line Of Sight (LOS)

Kanal LOS memiliki tingkat kesalahan bit yang lebih rendah dan protokol yang tidak terlalu rumit, namun terbatas dalam segi mobilitas. parameter lambertian (m) yang mana memiliki hubungan dengan semi-angle dengan θ yang memiliki nilai sebesar 50. Dirumuskan dengan persamaan:

$$m = \frac{\log_{10}(2)}{\log_{10}(\cos \Phi_{1/2})} \quad (1)$$

Pada kanal LOS dapat dirumuskan oleh :

$$H = \frac{(m + 1) \cdot Ae \cdot \cos^{m+1}(\Phi)}{2 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (2)$$

dengan Ae adalah area *photodetector* pada penerima, d adalah jarak penerima terhadap pengirim. Φ adalah sudut propagasi dari pengirim dengan penerima. Untuk mendapatkan nilai daya terima dirumuskan oleh :

$$P_{rx} = P_{tot} \cdot H \cdot T_s \cdot G_{con} \quad (3)$$

dengan T_s merupakan penerima dengan filter *pass-band* optik transmisi, g adalah konsentrator *gain*, ψ_{con} merupakan *Field of view* (FOV).

2.4.2 Non-Line Of Sight (NLOS)

Kanal NLOS terjadi dalam sistem lingkungan indoor dan jauh lebih kompleks untuk diprediksi daripada LOS karena NLOS berkomunikasi dengan sinyal melalui sebuah *obstacle* [4]. Pada penelitian Tugas Akhir ini menggunakan *obstacle* berupa reflektor dan *blockage* dengan efek *shadow* di *photodetector* nya dan gelombang cahaya sampai ke tujuan secara maksimal. Berikut adalah persamaan untuk kanal *reflector* dan *blockage*:

$$H = \frac{(m+1) \cdot Ae \cdot \cos^{m+1}(\Phi)}{2 \cdot \pi \cdot d^2} \times O \quad (4)$$

dimana O adalah probabilitas blocking, dengan asumsi pengurangan daya bernilai 0.8 yang dimanana dari daya yang dikirim setelah terkena *blockage* daya akan diteruskan sebesar 80% ke *shadowing area* kemudian dilanjutkan ke *photodetector*. Berikut adalah rumus untuk *href* :

$$H = \frac{(m+1) \cdot Ae \cdot \cos^{m+1}(\Phi) \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}{2 \cdot \pi \cdot d_1^2 \cdot d_2^2} \quad (5)$$

dimana A sebagai area *photodetector* dan d_1 adalah jarak dari *transmitter* ke reflektor, d_2 jarak dari reflektor ke *receiver*. Untuk r adalah koefisien refleksi dan dA merupakan luas per *cell*.

2.5. Modulasi M-PPM

Modulasi *Multi-level Pulse Position Modulation* (M-PPM) adalah sebuah modulasi yang terdapat perubahan pulsa dari sebuah sumber cahaya[4]. Pada VLC sendiri memiliki sebuah artian perubahan pulsa yang terdapat pada LED atau LASER yang dimana dalam sekali pulsa terdapat lebih dari satu informasi. Modulasi PPM memiliki efisiensi daya yang baik dibandingkan dengan

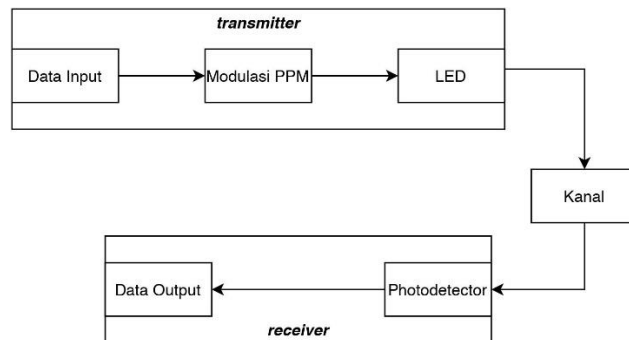
teknik modulasi On-Off Keying karena memiliki level yang bisa berubah-ubah untuk meningkatkan performa VLC yang dimana notasinya adalah:

$$L = 2^M, \tag{6}$$

dimana L adalah level atau pulsa yang memiliki daya konstan yang bisa berubah-ubah, M adalah resolusi bit berupa bilangan bulat. Teknik modulasi PPM memiliki kekurangan pada bandwidth dan kompleksitas yang lebih. Pada teknik modulasi PPM juga diperlukan sinkronisasi untuk mendemodulasi sinyal. Dalam penelitian ini, level yang digunakan dalam teknik modulasi PPM adalah 2-PPM, 4-PPM, dan 8-PPM.

3. Perancangan dan Simulasi Sistem

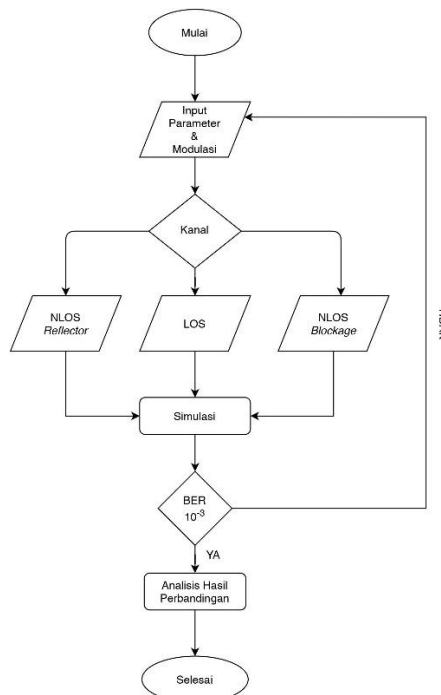
3.1. Blok Diagram Sistem



Gambar 1. Blok diagram sistem.

Terlihat pada Gambar 2 menunjukkan bahwa blok diagram VLC yang berawal dari transmitter yang memiliki fungsi sebagai sumber informasi yang akan ditransmisikan berupa sinyal dalam bentuk cahaya. Selanjutnya akan dilakukan modulasi pada modulator yang berfungsi untuk mengubah sinyal info menjadi sinyal pembawa yang berupa sinyal elektrik. Teknik modulasi ini menggunakan modulasi MPPM berupa 4-PPM dan 8-PPM, kemudian sinyal elektrik tersebut dikirimkan ke LED sehingga LED dapat mentransmisikan cahaya melalui kanal *Non Line of Sight* (NLOS) ke photodetector. Photodetector berfungsi untuk mengubah cahaya menjadi sinyal elektrik yang kemudian dilanjutkan ke demodulator untuk demodulasi yang berfungsi merubah sinyal pembawa menjadi sinyal info. Data yang diterima di receiver akan dihitung SNR dan BER.

3.2. Diagram Alir Sistem



Gambar 2. Daigram alir sistem.

Tugas Akhir ini melakukan pengujian sistem VLC terhadap pengaruh dari modulasi PPM

dengan 3 level berbeda untuk melihat kenaikan performansi pada sistem VLC di kanal LOS dan NLOS.

3.3. Desain Pengujian VLC

Pada simulasi sistem Tugas Akhir ini, memfokuskan pada spesifikasi LED, modulasi, *photodetector* dan kanal transmisi yang digunakan.

3.3.1 Spesifikasi LED

LED yang digunakan pada tugas akhir ini menggunakan 1 buah LED dengan daya total sebesar 2 Watt. Lampu LED tersebut diletakkan ditengah atas ruangan dengan koordinat (0,0,4).

3.3.2 Kanal Transmisi

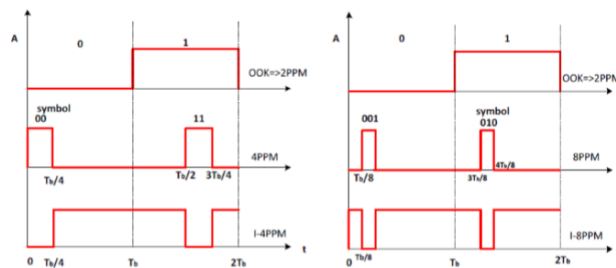
Kanal yang digunakan ialah menggunakan kanal LOS dan NLOS yang berarti ada kondisi dimana ada cahaya yang langsung sampai ke *photodetector* dan ada yang harus melewati *obstacle* pada kanal NLOS.

3.3.3 Spesifikasi Photodetector

Photodetector yang digunakan berjenis N-Type silicon PIN *Photodetector*. Tipe *photodetector* ini memiliki luas permukaan sebesar 1 cm^2 , memiliki *Field of View* (FOV) sebesar 70° dan memiliki responsivitas 0.55 A/W.

3.3.4 Modulasi M-PPM

Modulasi *Multi-level Pulse Position Modulation* (M-PPM) adalah sebuah modulasi yang terdapat perubahan pulsa dari sebuah sumber cahaya.



Gambar 3. Modulasi PPM.

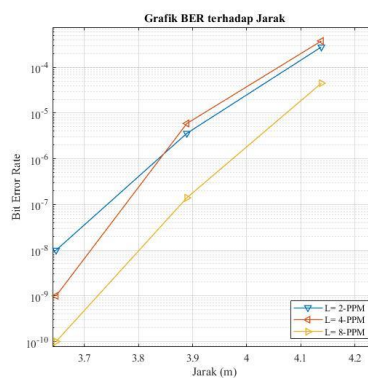
4. Hasil dan Analisis

Pada bab ini membahas tentang hasil simulasi dan analisis. Dimulai dari proses memasuka parameter yang sebelumnya sudah ditentukan. Hasil simulasi tersebut menggunakan ruangan seluas $5 \times 5 \times 4$ meter. Dengan skenario pertama dilakukan untuk membandingkan level dalam modulasi PPM pada kanal LOS, skenario dua memiliki level modulasi yang sama dengan penambahan *reflector* dan skenario tiga memiliki level modulasi yang sama dengan penambahan *blockage*.

4.1. Analisis Hasil Simulasi BER terhadap jarak

4.1.1 Analisis BER terhadap jarak pada kanal LOS

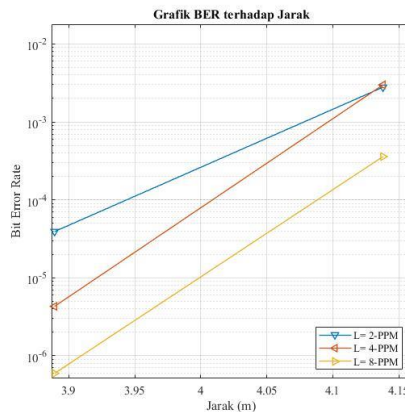
Analisis ini bertujuan untuk dapat memberikan informasi skema modulasi yang baik digunakan dalam sistem VLC terhadap jarak. Data yang digunakan adalah jarak yang terdekat dan terjauh.



Gambar 4. Grafik BER terhadap jarak pada kanal LOS dengan menggunakan modulasi 2-PPM, 4-PPM, dan 8-PPM.

Pada Berdasarkan Gambar 4. menunjukkan grafik perbandingan BER terhadap jarak yang dihasilkan oleh modulasi 2-PPM, 4-PPM dan 8-PPM. Hubungan antara BER dan jarak tersebut adalah berbanding lurus, yang dimana semakin jauh jarak akan berpengaruh pada nilai BER dari modulasi 2-PPM, 4PPM, 8-PPM menjadi semakin menjauhi nilai BER acuan. Dengan menggunakan modulasi 2-PPM, 4-PPM, dan 8-PPM mendapatkan BER sebesar 0 dicapai pada jarak terdekat dari transmitter sebesar 2.15 m. Untuk jarak terjauh sebesar 4.137934267, pada modulasi 2-PPM mencapai nilai BER 2.797×10^{-4} , modulasi 4-PPM mencapai nilai BER 3.791×10^{-4} , dan modulasi 8-PPM mencapai nilai BER 4×10^{-5} . Hasil analisis BER terhadap jarak yang terlihat bahwa semakin jauh jarak maka nilai BER semakin jelek, namun pada kanal LOS, BER dengan jarak terjauh pada masing-masing modulasi mencapai nilai acuan minimal 10^{-3} .

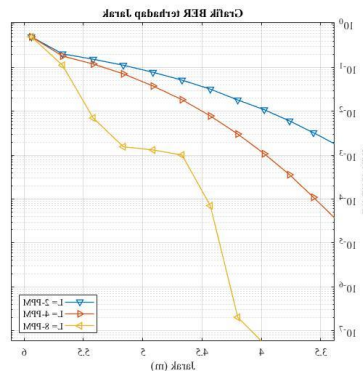
4.1.2 Analisis BER terhadap jarak pada kanal NLOS Blockage



Gambar 5. Grafik BER terhadap jarak pada kanal NLOS Blockage dengan menggunakan modulasi 2-PPM, 4-PPM, dan 8-PPM..

Pada Berdasarkan Gambar 4. menunjukkan grafik perbandingan BER terhadap jarak yang dihasilkan oleh modulasi 2-PPM, 4-PPM dan 8-PPM. Hubungan antara BER dan jarak tersebut adalah berbanding lurus, yang dimana semakin jauh jarak akan berpengaruh pada nilai BER dari modulasi 2-PPM, 4PPM, 8-PPM menjadi semakin menjauhi nilai BER acuan. Dengan menggunakan modulasi 2-PPM, 4-PPM, dan 8-PPM mendapatkan BER sebesar 0 dicapai pada jarak terdekat dari transmitter sebesar 2.15 m. Untuk jarak terjauh sebesar 4.137934267, pada modulasi 2-PPM mencapai nilai BER 2.786×10^{-3} , modulasi 4-PPM mencapai nilai BER 2.986×10^{-3} , dan modulasi 8-PPM mencapai nilai BER 3.586×10^{-4} . Hasil analisis BER terhadap jarak yang terlihat bahwa semakin jauh jarak maka nilai BER semakin jelek, namun pada kanal NLOS Blockage, BER dengan jarak terjauh pada masing-masing modulasi mencapai nilai acuan minimal 10^{-3} .

4.1.3 Analisis BER terhadap jarak pada kanal NLOS Reflector



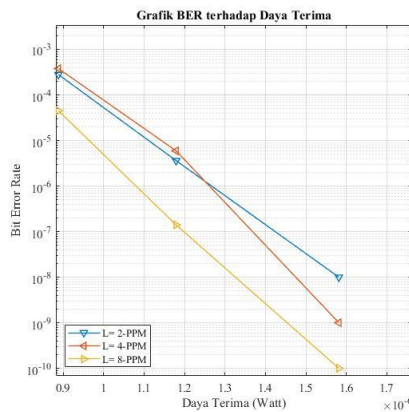
Gambar 6. Grafik BER terhadap jarak pada kanal NLOS Reflector dengan menggunakan modulasi 2-PPM, 4-PPM, dan 8-PPM..

Pada Berdasarkan Gambar 6. menunjukkan grafik perbandingan BER terhadap jarak yang dihasilkan oleh modulasi 2-PPM, 4-PPM dan 8-PPM. Hubungan antara BER dan jarak tersebut adalah berbanding lurus, yang dimana semakin jauh jarak akan berpengaruh pada nilai BER dari modulasi 2-PPM, 4PPM, 8-PPM menjadi semakin menjauhi nilai BER acuan. Dengan menggunakan modulasi 2-PPM mendapatkan BER sebesar 9.44×10^{-4} , modulasi 4-PPM dan 8-PPM mendapatkan nilai BER sebesar 0 dicapai pada jarak terdekat dari reflector ke receiver sebesar 3.201562119 m. Untuk jarak terjauh sebesar 5.937171044 m, pada modulasi 2-PPM, modulasi 4-PPM, dan modulasi 8-PPM mencapai nilai BER 0.5. Hasil analisis BER terhadap jarak yang terlihat bahwa semakin jauh jarak antara reflector dan receiver akan mempengaruhi nilai BER yang akan semakin buruk juga dan dapat dilihat dari angka-angka tersebut. Modulasi yang baik untuk digunakan pada kanal reflector adalah 8-PPM.

4.2. Analisis Hasil Simulasi BER terhadap daya terima

Pada Analisis ini bertujuan untuk dapat memberikan informasi skema modulasi yang baik digunakan dalam sistem VLC terhadap daya terima. Data yang digunakan adalah daya terima yang terkecil dan terbesar.

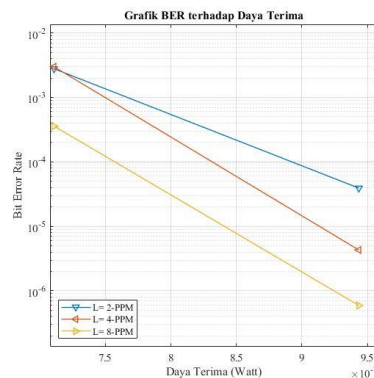
4.2.1 Analisis BER terhadap daya terima kanal LOS



Gambar 7. Grafik perbandingan BER pada kanal LOS terhadap daya terima dengan menggunakan modulasi 2-PPM, 4-PPM, dan 8-PPM.

Terlihat pada Gambar 4.4 Untuk memenuhi nilai BER 10^{-3} , menggunakan modulasi 2-PPM, 4-PPM, dan 8-PPM dapat tercapai saat daya terima sebesar 3.11×10^{-6} , Watt. Untuk mendapatkan nilai BER 0 pada modulasi 2-PPM, 4-PPM, dan 8-PPM terjadi pada saat daya terima sebesar 7.49×10^{-6} , Watt. Analisis perbandingan BER dengan daya terima adalah semakin besar nilai daya terima maka nilai BER yang dihasilkan semakin memenuhi atau semakin baik.

4.2.2. Analisis BER terhadap daya terima kanal NLOS *Blockage*

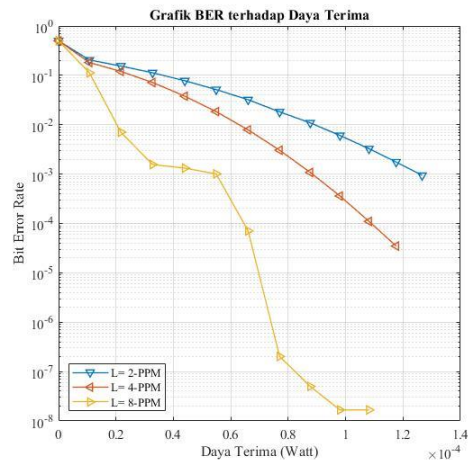


Gambar 8. Grafik perbandingan BER pada kanal LOS terhadap daya terima dengan menggunakan modulasi 2-PPM, 4-PPM, dan 8-PPM.

Terlihat pada Gambar 4.4 Untuk memenuhi nilai BER 10^{-3} , menggunakan modulasi 2-PPM, 4-PPM, dan 8-PPM dapat tercapai saat daya terima sebesar 2.49×10^{-6} Watt. Untuk mendapatkan nilai BER 0 pada modulasi 2-PPM, 4-PPM, dan 8-PPM terjadi pada saat daya terima

sebesar 4.43×10^{-6} Watt. Analisis perbandingan BER dengan daya terima adalah semakin besar nilai daya terima maka nilai BER yang dihasilkan semakin memenuhi atau semakin baik.

4.2.3 Analisis BER terhadap daya terima kanal NLOS Reflector



Gambar 9. Grafik perbandingan BER pada kanal NLOS Reflector terhadap daya terima dengan menggunakan modulasi 2-PPM, 4-PPM, dan 8-PPM.

Terlihat pada Gambar 9. Untuk memenuhi nilai BER 10^{-3} , menggunakan modulasi 2-PPM dapat tercapai saat daya terima sebesar 9.8×10^{-5} Watt, modulasi 4-PPM dapat tercapai pada saat daya terima sebesar 6.6×10^{-5} Watt, modulasi 8-PPM tercapai pada saat daya terima sebesar 2.17×10^{-5} Watt. Untuk mendapatkan nilai BER 0 pada modulasi 4-PPM dan 8-PPM terjadi pada saat daya terima sebesar 1.27×10^{-4} Watt. Analisis perbandingan BER dengan daya terima adalah semakin besar nilai daya terima maka nilai BER yang dihasilkan semakin memenuhi atau semakin baik namun untuk reflector modulasi yang paling baik untuk digunakan adalah modulasi 8-PPM karena dengan nilai daya terima yang kecil, 8-PPM dapat mencapai nilai minimal BER acuan 10^{-3} .

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari simulasi dan analisis simulasi yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut::

1. Peningkatan level pada modulasi PPM akan mempengaruhi nilai BER, sehingga semakin besar nilai level pada modulasi PPM akan mendapatkan nilai BER yang memenuhi. Hal ini dibuktikan bahwa pada setiap kanal saat menggunakan modulasi 2-PPM pada kanal LOS dan NLOS *blockage* mencapai BER 10^{-3} pada jarak terjauhnya sejauh 4.13 m, namun pada kanal NLOS *reflector* mencapai nilai BER 10^{-3} pada jarak 3.76 m. Modulasi 4-PPM pada kanal LOS dan NLOS *blockage* pun mencapai BER 10^{-3} pada jarak terjauhnya sejauh 4.13 m seperti 2-PPM, namun pada kanal NLOS *reflector* mencapai nilai BER 10^{-3} pada jarak 4.43 m. Modulasi 8-PPM mencapai nilai 10^{-3} pada kanal LOS dan NLOS *blockage* pada jarak terjauhnya sejauh 4.13 m seperti 2-PPM dan 4-PPM, pada kanal NLOS *reflector* mencapai nilai BER 10^{-3} pada jarak 5.41 m. Semakin jauh jarak antara receiver dengan LED atau receiver dengan reflector maka nilai BER akan semakin besar sehingga nilai BER tidak dapat memenuhi sistem.
2. Dari segi daya terima yang diterima oleh *receiver* nilai daya yang lebih rendah pada setiap kanal akan mempengaruhi untuk dapat memenuhi nilai BER acuan 10^{-3} . Hal ini dibuktikan bahwa dengan modulasi 2-PPM pada kanal LOS mendapatkan daya sebesar 3.11×10^{-6} Watt, sedangkan pada kanal NLOS *blockage* mendapat daya sebesar 2.49×10^{-6} Watt dan pada kanal NLOS *reflector* mendapat daya sebesar 9.8×10^{-5} Watt. Modulasi 4-PPM pada kanal LOS mendapatkan daya sebesar 1.705×10^{-5} Watt, sedangkan pada kanal NLOS *blockage* mendapat daya sebesar 7.11×10^{-7} Watt dan pada kanal NLOS *reflector* mendapat daya sebesar 6.68×10^{-5} Watt. Modulasi 8-PPM pada kanal LOS mendapatkan daya sebesar 3.11×10^{-6} Watt, sedangkan pada kanal NLOS *blockage* mendapat daya sebesar 2.49×10^{-6} Watt dan pada kanal NLOS *reflector* mendapat daya sebesar 2.17×10^{-5} Watt.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. DARLIS, A. R. DARLIS, and M. H. ABIBI, "Implementasi sistem penyiaran musik digital di kafe menggunakan visible light communication," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 5, no. 1, p. 60, 2017.
- [2] F. B. Aska, D. Darlis, and H. Hafidudin, "Implementasi visible light communication untuk pengiriman data digital," *eProceedings of Applied Science*, vol. 1, no. 1, 2015.
- [3] J. Lian, Z. Vatansever, M. Noshad, and M. Brandt-Pearce, "Indoor visible light communications, networking, and applications," *Journal of Physics: Photonics*, vol. 1, no. 1, p. 012001, 2019.
- [4] F. M. Alsalami, Z. Ahmad, S. Zvanovec, P. A. Haigh, O. C. Haas, and S. Rajbhandari, "Indoor intruder tracking using visible light communications," *Sensors*, vol. 19, no. 20, p. 4578, 2019.
- [5] C. He, T. Q. Wang, and J. Armstrong, "Performance of optical receivers using photodetectors with different fields of view in a mimo aco-ofdm system," *journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 23, pp. 4957–4967, 2015.