

**SKEMA VARIABEL PULSE POSITION MODULATION (VPPM) PADA VISIBLE LIGHT COMMUNICATION (VLC) UNTUK MENGONTROL PEREDUPAN****VARIABLE PULSE POSITION MODULATION SCHEME IN VISIBLE LIGHT COMMUNICATION FOR DIMMING CONTROL****Putri Novianti<sup>1</sup>, Ir. Akhmad Hambali, M.T.<sup>2</sup>, M. Irfan Maulana ST., M.T.<sup>3</sup>**

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

<sup>1</sup>putrinoovianti@student.telkomuniversity.ac.id, <sup>2</sup>ahambali@telkomuniversity.ac.id,<sup>3</sup>muhammadirfanm@telkomuniversity.ac.id**Abstrak**

Visible light communication (VLC) merupakan komunikasi cahaya tampak yang mengacu pada komunikasi nirkabel optik jarak pendek yang menggunakan spektrum cahaya tampak sekitar 380 nm hingga 750 nm dan data-rate tinggi hingga 96 Mb/s. Pada Jurnal ini melakukan analisis *dimming control* menggunakan metode *Variable Pulse Position Modulation* (VPPM) pada sistem *Visible light communication* (VLC) dengan parameter-parameter yang telah ditentukan pada 2 skenario yaitu menggunakan 2 buah lampu LED dan 3 buah lampu LED dengan dimensi ruangan yang berukuran 4x4x3 meter. Kemudian dilakukan skenario simulasi dengan perangkat lunak dengan mengubah tingkat peredupan lampu menggunakan VPPM pada masing-masing skenario.

Hasil yang didapat dari simulasi Tugas Akhir ini yang menggunakan 2 skenario dengan perbandingan jumlah lampu LED yang berbeda. Dengan target nilai *Bit Error Rate* (BER) mencapai sebesar  $10^{-3}$ . Pada Tugas Akhir ini dilakukan simulasi menggunakan modulasi VPPM dengan mengontrol tingkat peredupan dengan variabel yang sudah ditentukan yaitu sebesar 10% sampai 50%. Kinerja terbaik pada tingkat peredupan sebesar 50% hal tersebut dikarenakan lebih banyak sinyal yang dialokasikan. Untuk mencapai BER  $10^{-3}$  dan fleksibilitas tingkat peredupan 10% hingga 50% jarak propagasi harus berada dalam kisaran sekitar 2.7 hingga 3.9 m.

**Kata Kunci:** *Visible light communication (VLC), Light Emitte Diode (LED), Variable Pulse Position Modulation (VPPM), dimming control, BER, SNR.*

**Abstract**

Visible light communication (VLC) is a visible light communication that refers to short-range optical wireless communication that uses a visible light spectrum of around 380 nm to 750 nm and a high data-rate of up to 96 Mb/s. This journal analyzes dimming control using the Variable Pulse Position Modulation (VPPM) method on a Visible light communication (VLC) system with parameters that have been determined in 2 scenarios, namely using 2 LED lights and 3 LED lights with room dimensions measuring 4x4x3 meters. Then a simulation scenario is carried out with the software by changing the dimming level of the lights using VPPM in each scenario.

The results obtained from this final project simulation using 2 scenarios with a comparison of the number of different LED lights. With a target value of Bit Error Rate (BER) reaching  $10^{-3}$ . In this final project, a simulation using VPPM modulation is carried out by controlling the dimming level with a predetermined variable, namely 10% to 50%. The best performance at a dimming level of 50% is because more signal is allocated. To achieve a BER of  $10^{-3}$  and a dimming rate flexibility of 10% to 50% the propagation distance should be in the range of about 2.7 to 3.9 m.

**Keywords :** *Visible light communication (VLC), Light Emitte Diode (LED), Variable Pulse Position Modulation (VPPM), dimming control, BER, SNR.*

**1. Pendahuluan**

*Visible light communication* (VLC) merupakan teknologi nirkabel yang telah menarik minat baru-baru ini di dunia akademis maupun industri. Menurut jurnal [2] *Visible light communication* (VLC) merupakan komunikasi cahaya tampak yang mengacu pada komunikasi nirkabel optik jarak pendek yang menggunakan spektrum cahaya tampak sekitar 380 nm hingga 750 nm dan data-rate tinggi hingga 96 Mb/s.

Teknik modulasi yang digunakan *visible light communication* (VLC) seharusnya tidak boleh menimbulkan efek *dimming* karena dapat mengganggu fungsi LED sebagai perangkat penerangan. Berdasarkan penelitian pada jurnal [2] tantangan utama pada VLC salah satunya adalah *dimming support*. *Dimming support* merupakan pertimbangan penting bagi VLC untuk penghematan daya dan efisiensi energi yang diinginkan untuk menjaga komunikasi sementara pengguna meredupkan sumber cahaya secara sewenang-wenang.

Oleh karena itu, pada jurnal ini dilakukan simulasi kinerja skema *variable pulse position modulation* (VPPM) untuk mengontrol peredupan pada *visible light communication* (VLC) yang diharapkan dapat meminimalisir *dimming* pada VLC dan mengetahui seberapa baik teknik modulasi VPPM untuk mengontrol *dimming* pada VLC.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Visible Light Communication (VLC)

*Visible Light Communication* (VLC) atau yang biasa di sebut dengan istilah “cahaya tampak” adalah salah satu sebuah teknologi komunikasi nirkabel optik yang menggunakan cahaya sebagai media dalam komunikasi pada umumnya spektrum pada cahaya memiliki rentan panjang gelombang 380 nm sampai 750 nm dengan *spectrum frekuensi* 430 THz sampai 790 THz.

### 2.2 Light Emitting Diode (LED)

LED merupakan komponen elektronika yang dapat memancarkan cahaya terdiri dari perangkat semikonduktor yang memiliki 2 kutub yaitu kutub *positive* dan kutub *negative*.

### 2.3 Variable Pulse Position Modulation (VPPM)

*Variable Pulse Position Modulation* (VPPM) merupakan salah satu modulasi digital yang di mana bit pesan dikodekan dengan mentransmisikan pulsa di awal simbol untuk "0" dan di akhir simbol untuk "1". Pada skema ini menggunakan *Pulse Position Modulation* (PPM) biner yang mendukung pencahayaan secara bersamaan dengan mengontrol peredupan cahaya dan komunikasi [5].

### 2.4 Kanal Transmisi

Pada jurnal ini digunakan kanal transmisi yang berjenis *Single Channel* yang terdiri dari 2 jenis yaitu *Line of Sight* (LOS) dan *Non Line of Sight* (N-LOS). Yang digunakan yaitu Kanal LOS mempunyai tingkat kesalahan bit yang lebih rendah yang merupakan suatu kondisi dimana distribusi cahaya bersifat langsung atau tidak ada *obstacle* antara *transmitter* dan *receiver*[9].

### 2.5 Dimming

*Dimming* atau biasa yang disebut dengan istilah “peredupan” yang berarti perubahan kecerahan cahaya yang menghasilkan peredupan merupakan salah satu tantangan utama bagi VLC. Peredupan perlu dalam pengimplementasian VLC karena dapat menghemat energi dan meningkatkan nilai estetika. Namun peredupan juga mempunyai efek negatif pada komunikasi karena dapat membatasi kecepatan data yang di capai pada VLC.

### 2.6 Photodetector

*Photodetector* merupakan salah satu peran penting juga untuk sistem VLC. Karena *photodetector* pada umumnya adalah jenis perangkat yang dapat menangkap sinyal dari sumber cahaya kemudian mengubah energi cahaya menjadi energi listrik yang di transmisikan *transmitter* ke *receiver*.

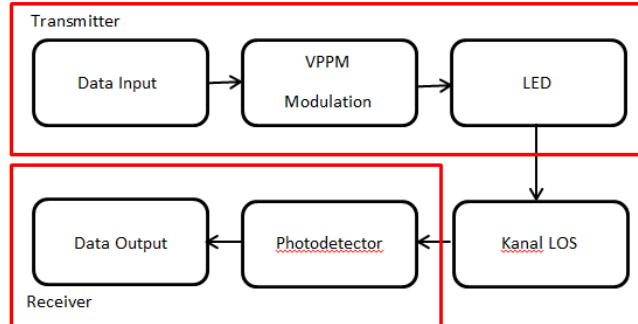
### 2.7 Sinyal to Noise Rasio (SNR)

*Signal to Noise Ratio* (SNR) adalah salah satu parameter pada sistem VLC yang dimana SNR merupakan perbandingan kualitas suatu sinyal daya dengan sinyal yang terhambat oleh *noise*.

### 2.8 Bit Error Rate (BER)

BER merupakan persentase bit dengan membandingkan jumlah bit error dengan jumlah keseluruhan bit saat data di transmisikan ke *receiver* [9]. Dimana tingkat toleransi BER sebesar kurang dari  $10^{-3}$ . Oleh karena itu semakin kecil nilai BER maka rasio kesalahan pada data akan semakin kecil juga.

**3. Perancangan system dan Simulasi Sistem**  
**3.1 Blok Diagram Sistem**

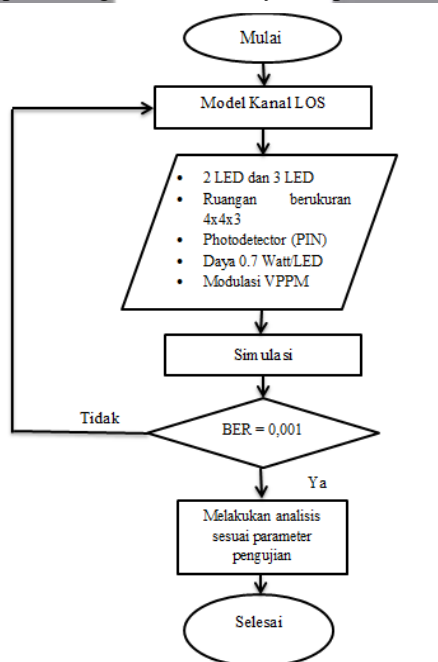


**Gambar 3.1** Blok Diagram sistem

Berdasarkan Gambar 3.1 sistem bermula dari input data yang terdapat pada bagian *transmitter* masuk ke *VPPM Modulator* yang merupakan suatu proses penumpangan data pada frekuensi gelombang pembawa ke sinyal informasi agar bisa dikirim ke penerima melalui media tertentu. LED merupakan pancaran cahaya yang menghasilkan sinyal elektrik yang kemudian dikonversikan dan ditransmisikan melalui kanal *Light of Sight (LOS)*. Setelah itu proses sudah masuk ke bagian *receiver* yang merupakan proses sinyal yang akan memasuki permukaan *photodetector* yang dimana di *photodetector* terjadi perubahan sinyal cahaya kembali menjadi sinyal listrik. *Photodetector* yang digunakan pada penelitian ini berjenis *Positive Intrinsic Negative (PIN)*. Setelah melewati *photodetector* daya yang diterima *receiver* selanjutnya dihitung untuk mengetahui perfromasi nilai *Bit Error Rate (BER)* dan *Signal to Noise Ratio (SNR)*.

**3.2 Flowchart system**

Berikut merupakan perancangan flowchart system pada **Gambar 3.2**.



**Gambar 3.2** Flowchart System

Berdasarkan Gambar 3.2 dapat ditunjukkan proses penelitian bermula pada perancangan sistem dengan model kanal LOS dan dengan parameter input yang telah ditentukan yaitu modulasi yang

digunakan adalah modulasi VPPM dengan menggunakan 2 buah LED dan 3 buah LED pada ruangan yang berukuran 4x4x3 meter, dengan daya LED 0.7 Watt/LED dan menggunakan *photodetector* PIN. Setelah itu dilakukan simulasi dengan perangkat lunak terhadap data yang telah dimasukan dengan parameter input dengan mengontrol peredupan lampu pada masing-masing skenario. Kemudian melakukan simulasi dengan target nilai BER  $10^{-3}$ . Jika nilai BER tidak mencapai target maka dilakukan kembali proses inputan data hingga nilai BER mencapai target. Selanjutnya jika telah mencapai target BER  $10^{-3}$  dilakukan analisis terhadap hasil yang telah didapatkan.

### 3.3 Pengujian sistem

#### 3.3.1 Parameter Input pada Transmitter

Parameter yang digunakan pada bagian *transmitter* dalam Tugas Akhir ini yaitu sebagai berikut :

1. Lampu LED

Terdapat parameter input pada bagian *transmitter* yaitu sebuah lampu yang berjenis LED yang berjumlah 5 buah dengan total daya 3.5 W yang masing-masingnya memiliki daya 0.7 W.

2. Kanal Transmisi

Kanal transmisi yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah jenis kanal LOS yang merupakan pada jalur komunikasi *directed* kondisi saat sistem pengiriman data antara *transmitter* dan *receiver* tidak terdapat penghalang ataupun *obstacle* lainnya.

#### 3.3.2 Parameter Input pada Receiver

Parameter yang digunakan pada bagian *receiver* dalam Tugas Akhir ini yaitu sebagai berikut :

1. *Photodetector*

Pada penelitian Tugas Akhir ini menggunakan *photodetector* yang berjenis PIN *photodiode* yang mempunyai nilai responsivitas yang bernilai 0.47 A/W dengan *Field of View* (FOV) sebesar 70°.

#### 3.3.2 Parameter Lainnya

Adapun parameter lainnya yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah :

1. *Bit Error Rate* (BER)

BER adalah persentase bit dengan membandingkan jumlah bit *error* dengan jumlah keseluruhan bit saat data di transmisikan ke *receive*.

2. *Signal to Noise Ratio* (SNR)

SNR adalah salah satu parameter pada sistem VLC yang dimana SNR merupakan perbandingan kualitas suatu sinyal daya dengan sinyal yang terhambat oleh *noise*.

**Tabel 3.1** Parameter Sistem

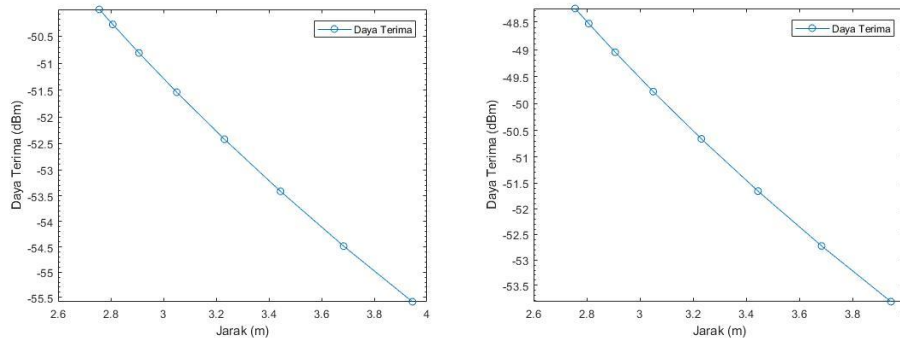
Parameter		Nilai
Transmitter	Jenis	LED
	Jumlah LED	2 & 3 buah
	Daya	0.7 Watt/LED
	Koordinat	(0,0)
	FWHM	50°
Receiver	FOV	70°
	Responsivitas	0,47 A/W
	Luas Photodetector	$10^{-4} m^2$
Lainnya	Dimensi ruangan	4x4x3 meter
	Modulasi	VPPM
	Kanal	LOS
	Bit rate	1 Gbps



#### 4. Hasil dan Analisis

Skenario pengujian dilakukan terhadap parameter dengan jumlah LED sebanyak 2 dan 3 buah LED dengan total daya masing-masing 0.7 Watt/LED.

##### 4.1 Analisis Daya Terima Terhadap Jarak Propagasi

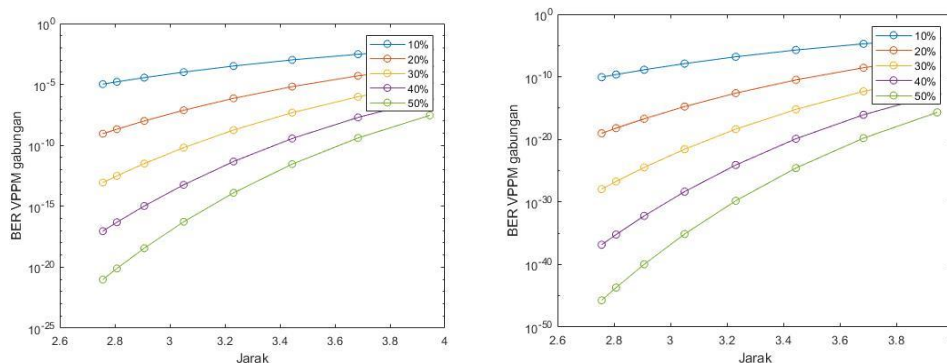


**Gambar 4.1** Grafik Perbandingan Daya Terima terhadap Jarak Propagasi Skenario 1 (kiri) dan Skenario 2 (kanan)

Pada Skenario 1, dilakukan simulasi pada 2 buah lampu dengan total daya 0.7 W dan letak koordinat (0,0) dengan ruangan yang berdimensi 4x4x3 meter. Gambar 4.1 menampilkan perbandingan daya terima terhadap jarak propagasi pada simulasi VLC Skenario 1. Daya terima maksimum yang dihasilkan adalah -50.0154 W pada jarak 2.7565 m. Daya terima minimum yang dihasilkan adalah -55.5917 W pada jarak 3.945 m, dan pada Skenario 2, Pada Skenario 2, dilakukan simulasi pada 3 buah lampu dengan total daya 2.1 W dan letak koordinat (1.5,1.5) dengan ruangan yang berdimensi 4x4x3 meter. Gambar 4.6 menampilkan perbandingan daya terima terhadap jarak propagasi pada simulasi VLC Skenario 2. Daya terima maksimum yang dihasilkan adalah -48.2545 W pada jarak 2.7565 m. Daya terima minimum yang dihasilkan adalah -53.8308 W pada jarak 3.945 m. Daya terima berbanding lurus dengan jarak propagasi. Semakin dekat jarak propagasi, maka daya terima yang dihasilkan semakin besar. Semakin jauh jarak propagasi, maka daya terima yang dihasilkan semakin kecil.

##### 4.2 Analisis BER dengan Modulasi VPPM

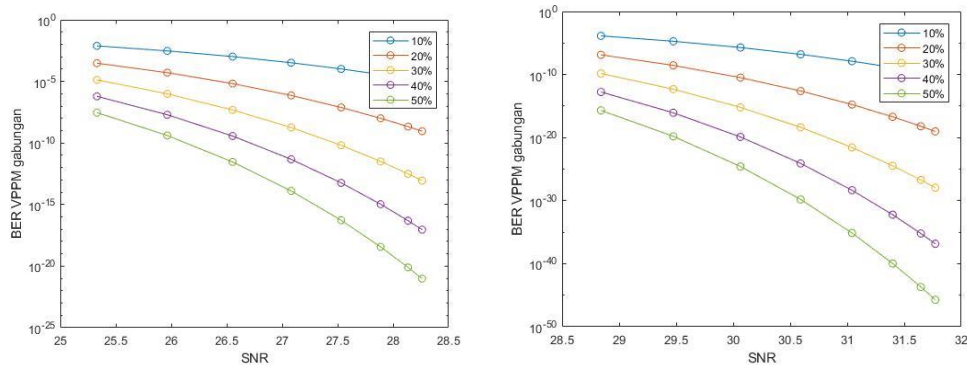
###### 4.2.2 Analisis BER Modulasi VPPM terhadap Jarak



**Gambar 4.2** Perbandingan BER Modulasi VPPM terhadap Jarak Propagasi dengan Tingkat Peredupan 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% Pada Skenario 1 (kiri) dan Pada Skenario 2 (kanan)

**Gambar 4.2** Menunjukkan hubungan antara VPPM dan kinerja BER menurut jarak propagasi dan rasio peredupan. Karena kinerja VLC berdasarkan VPPM mempengaruhi desain infrastruktur penerangan LED, akan sangat berarti untuk mengekspresikan kinerja komunikasi berdasarkan jarak propagasi dan rasio peredupan di bawah skenario VLC yang diberikan. Gambar 4.9 menunjukkan bahwa jarak antara TX dan RX harus berada dalam kisaran sekitar 2.7 hingga 3.9 m untuk mencapai BER  $10^{-3}$  dan fleksibilitas peredupan 10% hingga 50%.

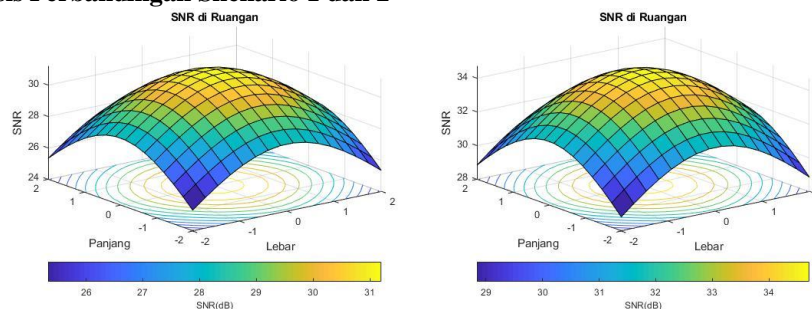
### 4.2.3 Analisis BER Modulasi VPPM terhadap SNR



**Gambar 4.3** Perbandingan BER Modulasi VPPM terhadap SNR dengan Tingkat Peredupan 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% Pada Skenario 1 (kiri) dan Pada Skenario 2 (kanan)

**Gambar 4.3** Pada skenario 1 (kiri) menunjukkan hasil distribusi BER di ruangan dan grafik perbandingan BER terhadap SNR dengan *dimming* 10%, 20%, 30%, 40%, 50% menggunakan modulasi VPPM. Pada tingkat peredupan 10%, nilai BER maksimum yang didapatkan adalah  $7.6 \times 10^{-3}$  pada SNR 25.3301 dB, dan nilai BER minimum yang didapatkan adalah  $4.47 \times 10^{-7}$  pada SNR 28.2614 dB. Pada tingkat peredupan 20%, nilai BER maksimum yang didapatkan adalah  $3.02 \times 10^{-4}$  pada SNR 25.3301 dB, dan nilai BER minimum yang didapatkan adalah  $9.08 \times 10^{-10}$  pada SNR 28.2614 dB. Pada tingkat peredupan 30%, nilai BER maksimum yang didapatkan adalah  $1.33 \times 10^{-5}$  pada SNR 25.3301 dB, dan nilai BER minimum yang didapatkan adalah  $8.86 \times 10^{-14}$  pada SNR 28.2614 dB. Pada tingkat peredupan 40%, nilai BER maksimum yang didapatkan adalah  $6.15 \times 10^{-7}$  pada SNR 25.3301 dB, dan nilai BER minimum yang didapatkan adalah  $9.13 \times 10^{-18}$  pada SNR 28.2614 dB. Pada tingkat peredupan 50%, nilai BER maksimum yang didapatkan adalah  $2.92 \times 10^{-8}$  pada SNR 25.3301 dB, dan nilai BER minimum yang didapatkan adalah  $9.7 \times 10^{-22}$  pada SNR 28.2614 dB. Kemudian pada skenario 2 (kanan) menunjukkan hasil distribusi BER di ruangan dan grafik perbandingan BER terhadap SNR dengan *dimming* 10%, 20%, 30%, 40%, 50% menggunakan modulasi VPPM. Pada tingkat peredupan 10%, nilai BER maksimum yang didapatkan adalah  $1.37 \times 10^{-4}$  pada SNR 28.8408 dB, dan nilai BER minimum yang didapatkan adalah  $8.95 \times 10^{-11}$  pada SNR 31.7721 dB. Pada tingkat peredupan 20%, nilai BER maksimum yang didapatkan adalah  $1.34 \times 10^{-7}$  pada SNR 28.8408 dB, dan nilai BER minimum yang didapatkan adalah  $9.38 \times 10^{-20}$  pada SNR 31.7721 dB. Pada tingkat peredupan 30%, nilai BER maksimum yang didapatkan adalah  $1.47 \times 10^{-10}$  pada SNR 28.8408 dB, dan nilai BER minimum yang didapatkan adalah  $1.13 \times 10^{-28}$  pada SNR 31.7721 dB. Pada tingkat peredupan 40%, nilai BER maksimum yang didapatkan adalah  $1.72 \times 10^{-13}$  pada SNR 28.8408 dB, dan nilai BER minimum yang didapatkan adalah  $1.43 \times 10^{-37}$  pada SNR 31.7721 dB. Pada tingkat peredupan 50%, nilai BER maksimum yang didapatkan adalah  $2.06 \times 10^{-16}$  pada SNR 28.8408 dB, dan nilai BER minimum yang didapatkan adalah  $1.88 \times 10^{-46}$  pada SNR 31.7721 dB.

### 4.2 Analisis Perbandingan Skenario 1 dan 2



**Gambar 4.1** Distribusi SNR di Ruangan pada Skenario 1 (kiri) dan Skenario 2 (kanan)

Untuk menganalisis perbedaan hasil antara Skenario 1 dan 2, dilakukan analisis perbandingan pada distribusi SNR sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 4.11. Berdasarkan Gambar 4.11, ditunjukkan bahwa karakteristik SNR di suatu ruangan dengan jumlah LED yang berbeda akan menghasilkan nilai SNR yang juga berbeda. Pada Skenario 1, nilai SNR maksimum yang dihasilkan adalah 28.2614 dB dan nilai SNR minimum yang dihasilkan adalah 25.3301 dB. Pada Skenario 2, nilai SNR maksimum yang dihasilkan adalah 34.7133 dB dan nilai SNR minimum yang dihasilkan adalah 28.8408 dB. Nilai SNR pada Skenario 2 lebih besar karena dengan jumlah LED yang lebih banyak akan meningkatkan daya terima yang dihasilkan.

## 5. Kesimpulan dan Saran

### 5.1 Kesimpulan

1. Pada analisis ini dilakukan simulasi menggunakan modulasi VPPM dengan tingkat peredupan sebesar 10% sampai 50%. Sistem peredupan berbasis dengan mengubah lebar pulsa dalam satu durasi slot. Kinerja terbaik pada tingkat peredupan 50% hal tersebut dikarenakan lebih banyak sinyal yang dialokasikan.
2. Daya terima tertinggi diperoleh pada skenario 2 yaitu sebesar -48.2545 dengan total daya pancar 2.1 dengan kenaikan jarak akan memberikan pengaruh penurunan daya terima sebesar 0.5 dBm hal tersebut dikarenakan terjadi karena redaman cahaya di sepanjang jalur *transmitter ke receiver*. Oleh karena itu semakin jauh jarak *transmitter ke receiver* maka daya terima yang dihasilkan semakin kecil begitupun sebaliknya.
3. Hasil perhitungan Pada skenario 1 dan skenario 2 berbeda. Pada skenario 1 SNR maksimum yang dihasilkan adalah 28.2614 dB pada jarak 2.7565 m. SNR minimum yang dihasilkan adalah 25.3301 dB pada jarak 3.9449 m dan pada skenario 2 SNR maksimum yang dihasilkan adalah 34.7133 dB pada jarak 2.7565 m. SNR minimum yang dihasilkan adalah 28.8408 dB pada jarak 3.9449 m. Nilai SNR pada Skenario 2 lebih besar karena dengan jumlah LED yang lebih banyak dapat meningkatkan daya terima yang dihasilkan.
4. Dari hasil analisis jarak propagasi harus berada dalam kisaran sekitar 2.7 hingga 3.9 m untuk mencapai BER  $10^{-3}$  dan fleksibilitas peredupan 10% hingga 50%.

### 5.2 Saran

Pada pengembangan selanjutnya, dapat diterapkan beberapa skenario yang berbeda. Faktor interferensi cahaya matahari dapat dimasukkan sebagai parameter. Menggunakan modulasi yang berbeda. Selain itu, penggunaan reflektor juga dapat dipertimbangkan sebagai faktor dalam simulasi.

### Daftar Pustaka

- [1] D. C. O'Brien, L. Zeng, H. Le-Minh, G. Faulkner, J. W. Walewski, and S. Randel, "Visible Light Communications: Challenges and possibilities," *IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun. PIMRC*, pp. 1–5, 2008, doi: 10.1109/PIMRC.2008.4699964.
- [2] S. Rajagopal, R. D. Roberts, and S. K. Lim, "IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 3, pp. 72–82, 2012, doi: 10.1109/MCOM.2012.6163585.
- [3] N. Chi, H. Haas, M. Kavehrad, T. D. C. Little, and X. L. Huang, "Visible light communications: Demand factors, benefits and opportunities [Guest Editorial]," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 22, no. 2, pp. 5–7, 2015, doi: 10.1109/MWC.2015.7096278.
- [4] L. U. Khan, "Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges," *Digit. Commun. Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 78–88, 2017, doi: 10.1016/j.dcan.2016.07.004.
- [5] F. Zafar, D. Karunatilaka, and R. Parthiban, "Dimming schemes for visible light communication: The state of research," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 22, no. 2, pp. 29–35, 2015, doi: 10.1109/MWC.2015.7096282.
- [6] J. H. Yoo and S. Y. Jung, "Modeling and analysis of variable PPM for visible light communications," *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2013, no. 1, pp. 1–6, 2013, doi: 10.1186/1687-1499-2013-134.
- [7] M. L. G. Salmento *et al.*, "Application of a flyback converter and variable pulse position modulation for visible light communication," *14th Brazilian Power Electron. Conf. COBEP 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 1–5, 2017, doi: 10.1109/COBEP.2017.8257278.
- [8] J. G. Webster, A. R. Ndjiongue, H. C. Ferreira, and T. M. N. Ngatched, "Visible Light Communications (VLC) Technology," *Wiley Encycl. Electr. Electron. Eng.*, no. June, pp. 1–15, 2015, doi: 10.1002/047134608x.w8267.

- [9] S. R. Z. Ghassemlooy, W. Popoola, *Optical Wireless Communications System and Channel Modelling with MATLAB®*, Second Edition. 2019.
- [10] N. Chi, *LED-Based Visible Light Communications*. 2018.
- [11] F. Aftab, "Coverage area control approach using dimming factor of LED transmitter in light fidelity (Li-Fi)," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 95, pp. 23–36, 2016, doi: 10.14257/ijast.2016.95.03.

