

## BAB II

### DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam referensi [10] oleh B.S. Pratama yang berjudul “Analisis Performansi *Multi User Detection* pada Kanal NLOS untuk sistem NOMA-VLC” membahas tentang menerapkan GRPA sebagai teknik alokasi daya. Proses SIC sebagai *Multi User Detection* (MUD) dalam NOMA-VLC dengan skema 6 penggunaan. Kondisi pertama kanal LOS terdapat 2 *user*, kondisi kedua untuk *channel* NLOS dengan menambahkan reflektor terdapat 2 *user*, untuk kondisi ketiga *channel* NLOS dengan efek bayangan. Pada hasil simulasi ini menunjukkan bahwa perbandingan VLC yang menggunakan NOMA mampu meningkatkan data *rate* maksimal sebesar 74.7 Mbps dan nilai SNR dengan peningkatan tiap *user* sebesar 7dB dibandingkan tanpa NOMA. Penerapan sistem NOMA-VLC dapat meningkatkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan sistem tanpa NOMA. Hal ini disebabkan oleh *superimposed* pada pemancar yang memungkinkan pengirim sinyal informasi secara bersamaan, sehingga meningkatkan efisiensi spektral. Dari sisi penerima, penggunaan SIC juga berkontribusi pada peningkatan performa dengan mengurangi interferensi antara sinyal-sinyal. Pengguna yang berada di Saluran NLOS reflektor lebih baik daripada pengguna lain di saluran LOS dan saluran NLOS bayangan. Dalam hal ini, reflektor memantulkan cahaya yang menyebabkan pengguna menerima sinyal dari berbagai arah. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan NOMA-VLC.

Dalam referensi [11] oleh R.A. Salsabila yang berjudul “Kapasitas Sistem NOMA-VLC dengan Perubahan Metode Alokasi Daya Pada Kanal Propagasi NLOS” membahas dua metode alokasi daya yaitu *gain ratio Power Allocation* (GRPA) dan metode alokasi daya *static Power Allocation* (SPA), dengan mempertimbangkan perbedaan kondisi kanal *non-direct line of sight* (NLOS) dengan jumlah *user* 4 dan 10. Setiap *user* dengan daya 7 watt. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan alokasi daya GRPA pada sistem dengan jumlah pengguna yang besar menggunakan satu *platform* LED sebagai pemancar lebih

efektif daripada penerapan alokasi daya SPA. Alokasi daya GRPA meningkat sebesar 71.66%, sementara alokasi daya SPA hanya meningkat sebesar 69.27%. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan NOMA-VLC.

Pada Refensi [12] oleh G.S.Pratama yang berjudul “Analisis Performansi *Free SIC* Pada Noma VLC Menggunakan *Pulse Modulation*” membahas tentang tentang sistem *Free SIC* untuk mengatasi error detection yang disebabkan oleh SIC dengan menggunakan dua modulasi yang berbeda untuk setiap kondisi kanalnya. Modulasi OOK digunakan pada kondisi kanal yang buruk memiliki jarak 5.2 m dan untuk modulasi *Multi level Pulse Position Modulation* (MPPM) digunakan pada kondisi yang baik memiliki jarak 3 m dan pemodelan sistem *downlink* yang menggunakan kanal LOS diberikan satu buah lampu LED memiliki daya 60 mW. Kemudian membandingkan kinerja BER dari pengguna MUD jenis *Free SIC* dan SIC tersebut untuk didapatkan mana yang lebih baik. Hasil dari penelitian ini dikatakan bahwa *free SIC* memiliki sistem yang sederhana dan lebih unggul karena tidak adanya interferensi, hanya memerlukan daya yang lebih rendah dengan menggunakan dua modulasi yang berbeda sedangkan dengan SIC masih adanya interferensi. Dalam hal ini, penelitian ini memberikan kontribusi penting untuk pengembangan metode yang lebih efisien dan efektif untuk pengembangan NOMA-VLC.

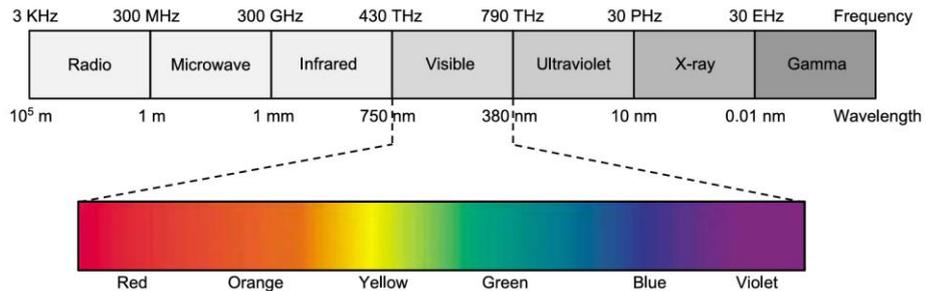
Pada referensi [13] oleh M.F. Pratama yang berjudul “Pengaruh *Random Orientation* Terhadap PPM Pada Peforma Sistem VLC” membahas pengaruh orientasi acak pada sudut penerima (*receiver*) sebesar  $0^\circ$ ,  $25^\circ$  dan  $45^\circ$  di lingkungan dalam ruangan. Modulasi yang digunakan adalah PPM untuk mentransmisikan data informasi, dengan frekuensi bit yang menjadikan masukan pada arus masuk sebelum di transmisikan. Informasi yang telah diproses dikumpulkan melalui sumber cahaya LED untuk *transmitter* dan diterima oleh *User Equipment* (UE) sebagai *receiver*.

Penelitian ini juga mengevaluasi nilai *Bit Error Rate* (BER) dengan menggunakan modulasi 2-PPM, 4-PPM, dan 8-PPM. Dalam hal ini penelitian ini penggunaan M pada PPM dapat mempengaruhi hasil dari setiap BER yang

bergantung pada *Signal to Noise Ratio* (SNR). Oleh karena itu, penelitian ini menunjukkan bahwa modulasi PPM dapat diimplementasikan pada NOMA-VLC.

## 2.2 Visible Light Communication (VLC)

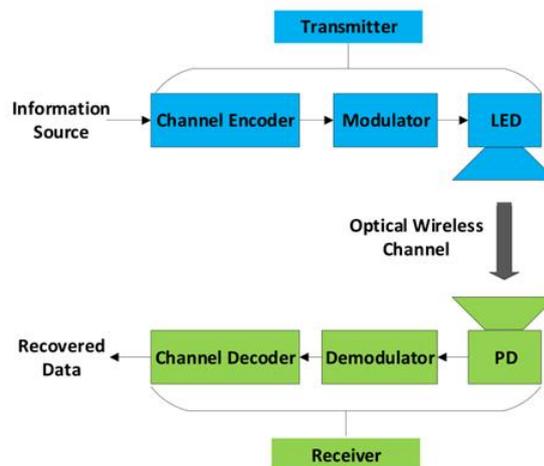
*Visible Light Communication* (VLC) merupakan sistem komunikasi cahaya tampak sebagai media transmisi cahaya dan terdapat *photodetector* berperan sebagai sinyal informasi pada pengirim data.



**Gambar 2.1 Spektrum Panjang Gelombang [14]**

Pada Gambar 2.1 menunjukkan bahwa spektrum elektromagnetik memiliki rentang spektrum dari frekuensi rendah hingga frekuensi tinggi. Seperti dapat dilihat pada gambar diatas menunjukkan rentang spektrum cahaya tampak dalam spektrum elektromagnetik yang dapat digunakan pada sistem VLC, yaitu 400 THz – 700 THz dengan rentang nilai Panjang gelombang yaitu 380 nm – 780 nm.

Cahaya tampak memiliki beragam variasi warna, pencampuran warna tersebut menghasilkan frekuensi yang berbeda sehingga perbedaan frekuensi tersebut berpengaruh besar jika digunakan sebagai media pengirim informasi [15]. Dalam sistem VLC, *Light Emitting Diode* (LED) digunakan sebagai sumber cahaya disii pengirim, dimana cahaya yang dihasilkan oleh LED berfungsi sebagai sinyal pembawa. Di sisi penerima, terdapat *photodetector*. Penggunaan LED dalam VLC memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan lampu lainnya seperti lampu neon dan lampu pijar. Keunggulan tersebut antara lain kecepatan transmisi data yang tinggi dan daya tahan lama, yang membuatnya lebih ekonomis dan efisien dalam hal biaya dan energi [11].



**Gambar 2.2 Blok Diagram VLC [16]**

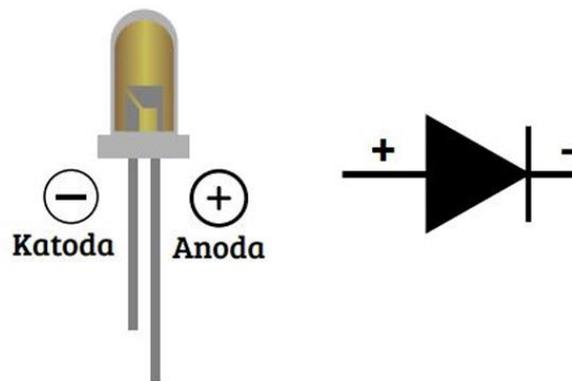
Pada Gambar 2.2 menjelaskan mengenai blok diagram untuk VLC yang menunjukkan dua komponen utama yaitu *transmitter* sebagai sisi pengirim dan *receiver* sebagai sisi penerima. Proses pada *transmitter* dimulai dengan sinyal informasi yang masuk ke dalam *channel encoder*. Sinyal informasi analog diubah menjadi sinyal informasi digital, kemudian sinyal tersebut diarahkan ke modulator dimana akan terjadi penumpangan sinyal informasi ke *carrier* berupa sinyal cahaya. Setelah melewati modulator, sinyal masuk ke LED. Pada sisi *receiver*, sinyal masuk ke *photodetector*, lalu diteruskan ke demodulator di mana terjadi pemisahan antara sinyal informasi dan *carrier*. Setelah itu, sinyal masuk ke *channel decoder* sinyal digital akan dirubah menjadi sinyal analog sehingga data dapat diterima [16].

### 2.3 *Light Emitting Diode (LED)*

LED adalah *diode* yang terbuat dari bahan semikonduktor yang dapat memancarkan cahaya, dengan keunggulan yang dimiliki LED seperti ukuran yang kecil, masa pemakaian yang lebih lama, kecerahan yang lebih tinggi [13]. LED dapat memancarkan cahaya monokromatik ketika dialiri tegangan maju (*forward bias*) dari anoda (P) menuju katoda (K). LED memiliki struktur kompleks yang terdiri dari beberapa elemen, termasuk substrat penghantar panas. Kristal LED memiliki jarak yang konstan, yang merupakan salah satu karakteristiknya. Spektrum emisi cahaya yang digunakan oleh LED dipengaruhi oleh komposisi

fosfor yang digunakan. Keseluruhan struktur LED umumnya diisi dengan lapisan *silicon*.

LED bekerja dengan mengkonversi sebagian energi listrik menjadi cahaya. Cahaya sendiri adalah bentuk energi yang dipancarkan oleh atom melalui partikel energi dan momentum yang disebut foton, yang merupakan unit dasar dari cahaya. Foton dihasilkan oleh gerakan *electron-electron*. Panjang gelombang cahaya yang dipancarkan oleh LED bergantung pada tingkat energi yang berada dan jenis bahan semikonduktor yang digunakan dalam *chip* LED.



**Gambar 2.3** Simbol dan Bentuk *Light Emitting Diode* [17]

Pada Gambar 2.3 menunjukkan bahwa LED memiliki dua buah kaki yaitu anoda dan katoda. Kaki anoda memiliki panjang yang lebih besar secara fisik daripada kaki katoda. [17]. Ketika LED diberi bias maju, maka *electron* yang berlebih di daerah tipe-n akan berpindah ke wilayah yang lebih banyak *hole* yaitu wilayah tipe-p (bermuatan positif). Ketika elektron bergabung dengan *hole*, proses tersebut menghasilkan foton yang menyebabkan cahaya monokromatik atau cahaya dengan satu warna [18].

## 2.4 *Photodetector*

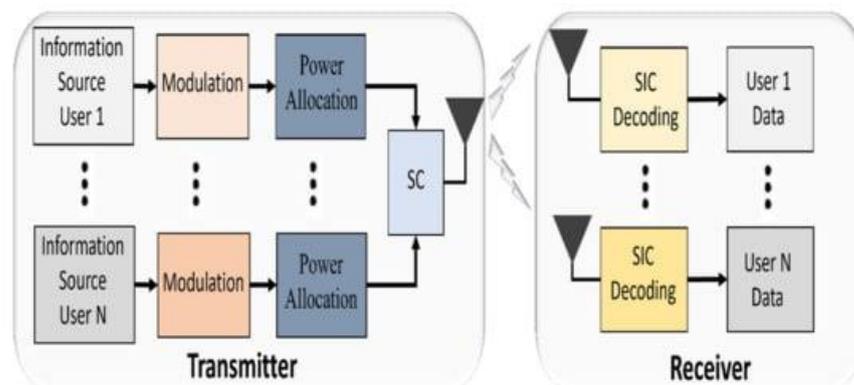
*Photodetector* adalah perangkat yang mengubah sinyal cahaya menjadi sinyal energi. *Photodetector* berperan sebagai perangkat yang mendeteksi cahaya atau sinyal yang dikirim oleh pemancar (*transmitter*) dan akan menerima oleh penerima (*receiver*) yang disebut sebagai *photodetector*. Terdapat dua jenis *photodetector* yaitu *Positive Intrinsic Negative* (PIN) dan *Avalanche Photodiode*

(APD). PIN disini dengan struktur perangkat terdiri dari daerah semikonduktor p dan n yang dipisahkan oleh daerah *intrinsic* dan hanya akan bekerja jika dialiri tegangan bias mundur [4]. PIN memiliki nilai multiplikasi (M) sebesar 1. Persyaratan yang harus dipenuhi oleh sebuah *photodetector* adalah sensitivitas yang tinggi terhadap panjang gelombang pancaran cahaya yang diterima oleh sinyal, *noise* yang rendah, kecepatan respons yang cepat, tidak *sensitive* terhadap perubahan suhu, kompatibilitas dengan berbagai sumber cahaya, harga terjangkau dan tahan lama.[19].

## 2.5 Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)

*Power domain multiple access* atau lebih dikenal dengan *Non-Orthogonal Multiple Access* adalah teknik yang memanfaatkan prinsip *non-orthogonal* untuk menggabungkan beberapa pengguna. NOMA terbagi menjadi dua jenis, yaitu *code-domain* NOMA dan *power-domain* NOMA [4]. Pada sisi pengirim (*transmitter*) diterapkan *Superposition coding* (SC) sehingga satu *subcarrier* digunakan oleh beberapa pengguna. Sementara itu, pada sisi penerima (*receiver*) diterapkan *Successive Interference Cancellation* (SIC) dengan menghilangkan interferensi pada sinyal pengguna dengan *channel gain* yang lebih rendah [20].

Pada sistem *downlink* VLC, penerapan NOMA sangat efektif untuk penggabungan jumlah *user* yang sedikit, sesuai dengan karakteristik LED sebagai sumber cahaya yang bertindak sebagai *small cell* untuk mengakomodasi sejumlah kecil *user* di dalam ruangan. Selain itu, dengan menggunakan NOMA, LED dapat mengirimkan sinyal *real* dan sinyal positif [11].



Gambar 2.4 Blok Diagram NOMA [21]

Pada Gambar 2.4 NOMA menggunakan sistem *Power Domain* dan *Code Domain*. Dalam sistem NOMA pada sisi pemancar (*transmitter*), proses dimulai dengan memasukkan *code* awal yang berisi sinyal informasi dan akan diteruskan dan akan terjadi penumpangan sinyal. Setelah memasukkan data selanjutnya memberikan informasi kepada sistem modulasi yang akan dipakai dalam pengiriman datanya. Pengalokasian daya akan terjadi di *Superposition Code* (SC) dengan mempertimbangkan kanal yang dimiliki masing-masing pengirim dan sinyal yang dikirimkan dari *transmitter* akan melalui kanal dan akan ditangkap oleh *receiver*. Pada sisi *receiver* sinyal akan terjadi proses secara berbeda antara *user* pertama dengan *user* yang lainnya. *Power Domain* NOMA terletak pada sisi *transmitter* mengeksplorasi cara baru mengenai pembagian daya transmit pada *user*, daya pada *user* biasanya ditentukan oleh *Channel State Information* (CSI). Pada sistem NOMA *user* dengan *Channel State Information* (CSI) rendah akan dikirimkan daya lebih besar dibandingkan dengan *user* lainnya, sedangkan dalam *Code Domain* NOMA terletak pada sisi *receiver*, sistem ini akan menyeleksi sinyal yang masuk dengan cara mendeteksi sinyal terjauh terlebih dahulu. Sinyal yang terjauh akan didekodekan dengan normal meskipun terdapat sedikit interferensi dan untuk sinyal terdekat akan didekodekan dengan cara mendeteksi sinyal *user* kedua dan menghilangkan sinyal tersebut dengan *Successive Interference Cancellation* (SIC) [22].

### **2.5.1 *Superposition Code***

*Superposition Code* (SC) adalah suatu teknik pengkodean yang memungkinkan *base station* mengirimkan informasi dari beberapa *user* secara bersamaan di sisi *transmitter* [20].

### **2.5.2 *Successive Interference Cancellation***

*Successive Interference Cancellation* (SIC) merupakan algoritma iteratif di mana data diterjemahkan dengan urutan tingkat daya menurun. kemudian data pengguna yang diberi kekuatan tertinggi berikutnya didekodekan setelahnya [23]. SIC memecahkan kode informasi terkait dengan sinyal individu dari gabungan sinyal yang ditumpangkan. SIC mampu meningkatkan kapasitas suatu jaringan secara substansial karena adanya teknik mengelola interferensi. Proses SIC

mendeteksi *user* dengan sinyal terkuat terlebih dahulu. Lalu *user* tersebut akan melakukan proses pengulangan *encoding* dan memodulasi ulang sinyal. Lalu diulangi terus seperti itu sampai dengan *user* yang memiliki sinyal terendah, hal ini dapat terjadi dengan tanpa adanya interferensi.

## 2.6 Power Allocation

*Power Allocation* adalah teknik untuk berbagai semua alokasi daya yang tersedia di sisi pemancar. Pada penelitian kali ini, *Gain Ratio Power Allocation* (GRPA) digunakan untuk mendistribusikan total alokasi daya pada pengirim ke masing-masing penerima. *Gain Ratio Power Allocation* adalah metode alokasi daya bertujuan untuk memantau kualitas *channel* setiap *user*. GRPA memberikan alokasi daya lebih besar kepada *user channel* yang buruk untuk mencapai data *rate* yang tinggi dan efektif. Dalam GRPA untuk NOMA. Untuk *channel gain* setiap pengguna.

$$h_1 < h_2 < \dots < h_n \quad (2.4)$$

Sedangkan untuk alokasi daya setiap pengguna

$$\alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_n \quad (2.5)$$

Sedangkan, untuk skenario 2 *user* dapat ditulis dalam persamaan

$$\alpha_1 = \frac{h_2}{h_1+h_2}, \alpha_2 = \frac{h_1}{h_1+h_2} \quad (2.6)$$

Sedangkan, untuk skenario 4 *user* dapat ditulis dalam persamaan [11].

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{h_2.h_3.h_4}{h_1.h_2.h_3+h_1.h_2.h_4+h_1.h_3.h_4+h_2.h_3.h_4} \\ \alpha_2 &= \frac{h_1.h_3.h_4}{h_1.h_2.h_3+h_1.h_2.h_4+h_1.h_3.h_4+h_2.h_3.h_4} \\ \alpha_3 &= \frac{h_1.h_2.h_4}{h_1.h_2.h_3+h_1.h_2.h_4+h_1.h_3.h_4+h_2.h_3.h_4} \\ \alpha_4 &= \frac{h_1.h_2.h_3}{h_1.h_2.h_3+h_1.h_2.h_4+h_1.h_3.h_4+h_2.h_3.h_4} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Dimana  $\alpha_n$  adalah alokasi daya *user* n dan  $h_n$  adalah *channel gain* dari *user* n.

## 2.7 Kanal Transmisi

Kanal transmisi yaitu media yang digunakan untuk pengiriman data dari *transmitter* menuju *receiver*. Pada penelitian kali ini dalam VLC, terdapat dua pemodelan kanal transmisi yaitu *Line Of Sight* (LOS) dan *Non-Line Of Sight* (NLOS).

### 2.7.1 *Line of Sight (LOS)*

*Line of Sight* adalah permodelan kanal yang sangat baik digunakan dalam teknologi VLC dikarenakan tidak boleh ada penghalang atau *obstacle* antara *transmitter* dan *receiver*. Pada perhitungan parameter LOS terdapat 1 parameter penting yang akan dicari, yaitu Lambertian  $m$  yang memiliki hubungan dengan *Full Widht at Half Maximum* (FWHM) sebagai berikut [24]:

$$m = \frac{\log_{10}(2)}{\log_{10} \cos \theta} \quad (2.7)$$

dimana nilai dari  $\theta$  merupakan FWHM. Sedangkan untuk persamaan pada kanal LOS dapat ditulis sebagai berikut [24]:

$$H_{los} = \frac{A_r \cdot (m+1) \cdot \cos^{(m+1)}}{2 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (2.8)$$

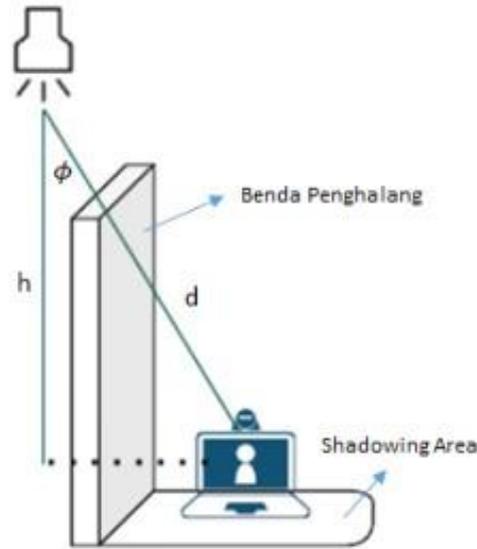
dimana  $A_r$  adalah luas area *photodetector* di sisi penerima, dan  $d$  adalah jarak *transmitter* terhadap *receiver*. Besar daya yang dapat diterima pada sisi penerima dapat ditulis dengan persamaan berikut [4].

$$P_r = P_{tot} \cdot H \cdot GRPA \quad (2.9)$$

$P_{tot}$  merupakan besarnya daya kirim dari LED dan  $H$  adalah kanal yang digunakan [4].

### 2.7.2 *Non-Line of Sight (NLOS)*

Dalam kanal transmisi *non-line of sight* (NLOS), nilai optikal *path loss* atau redaman yang dihasilkan lebih kompleks dikarenakan berbagai faktor seperti dimensi ruangan, pantulan dari permukaan langit-langit atau dinding, serta penyerapan cahaya oleh benda-benda yang didalam ruangan [25].



**Gambar 2.5** Kanal *Shadowing* Pada Sistem VLC

Pada skenario ruangan, biasanya ada benda-benda yang dapat menghalangi dan menyerap cahaya. Hal ini menyebabkan *user* yang berada pada daerah tersebut akan terpengaruh oleh efek *shadowing*. Pada Gambar 2.5 menunjukkan ilustrasi ruangan dengan efek bayangan atau *shadowing*. Persamaan untuk kanal NLOS dapat diterapkan sebagai berikut:

$$h_{shd} = \frac{A_r(m+1)}{2\pi d^2} \cos^{(m+1)}(\phi) O_{shd} \quad (2.10)$$

dimana  $O_{shd}$  adalah probabilitas cahaya yang berhasil sampai ke *receiver* setelah melewati penghalang atau suatu objek [25].

## 2.8 *Pulse Position Modulation (PPM)*

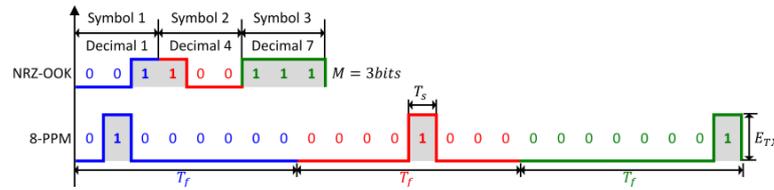
PPM adalah modulasi dimana pesan dikodekan dengan mentransmisikan satu pulsa dalam periode waktu yang diperlukan. Modulasi ini paing efektif digunakan dalam komunikasi optik.

Bentuk modulasi pulsa PPM melibatkan mengubah-ubah posisi pulsa yang tidak termodulasi sesuai dengan kekuatan sinyal modulasi. Semakin tinggi tegangan yang diberikan oleh sinyal modulasi, semakin berpengaruh letak pulsa PPM yang semakin jauh dari pulsa yang tidak termodulasi. Keuntungan yang didapat ketika memakai modulasi ini adalah amplitudo dan lebar pulsa tetap konstan, serta efisiensi daya yang unggul [4].

Pada PPM informasi dikodekan dalam posisi pulsa dari data *input* M-bit. Bit masukan dapat dinotasikan sebagai berikut [13]:

$$L = 2^M \quad (2.11)$$

dimana resolusi bit yang digunakan adalah  $M > 0$  dan simbol L merupakan pulsa yang memiliki daya yang konstan. Sehingga M-ary yang akan mengatur pengiriman jumlah bit dalam satu atau secara bersamaan [13]. Pada penelitian kali ini digunakan dengan modulasi PPM jenis 4-PPM, 8-PPM dan 16-PPM.



**Gambar 2.6 Pulse Position Modulation [26]**

Pada Gambar 2.6 dapat disimpulkan untuk M yaitu 3 bit sehingga *output* dari PPM yaitu 8 bit, karena didapatkan dengan rumus  $2^M$  dan untuk mendapatkan bit 1 pada modulasi PPM bisa dilihat di sinyal modulasi OOK [26].

## 2.9 Signal to Interference Noise Ratio (SINR)

*Signal to Interference Noise Ratio* (SINR) adalah nilai perbandingan antara daya sinyal yang ditransmisikan terhadap interferensi dan *noise* terjadi dalam sistem. SINR sendiri tidak memiliki satuan karena berbentuk rasio, namun SINR dapat dikonversi ke dalam satuan desibel (dB). Nilai SINR adalah salah satu parameter untuk menentukan kualitas koneksi, dimana semakin besar nilainya menandakan kualitas koneksi pada model kanal yang digunakan semakin baik. Untuk menghitung nilai SINR digunakan rumus sebagai berikut [25]:

$$SINR = \frac{(R.M.P_r)^2 user_n}{(R.M.\sum_{k=n+1}^N (P_{rk}))^2 + \sigma^2 total} \quad (2.12)$$

$P_r$  adalah daya terima pada sistem (W), R adalah responsivitas (A/W), M merupakan penguatan *detector*, B merupakan *receiver electrical bandwidth*.

Persamaan *noise* quantum  $\sigma_q^2$  didefinisikan sebagai berikut:

$$\sigma_q^2 = 2qIB \quad (2.13)$$

dimana  $q$  merupakan muatan *electron* dengan nilai  $1.602 \times 10^{-19}$ ,  $B$  adalah *bandwidth*, dan  $I$  adalah arus primer yang dihasilkan dari perkalian responsivitas ( $R$ ) dan daya terima ( $P_r$ ), Hal ini dapat diartikan sebagai berikut:

$$I = R \times P_r \quad (2.14)$$

dan *noise* pada thermal ditentukan pada persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_{th}^2 = \frac{4k_bTB}{RL} \quad (2.15)$$

dimana  $k_b$  sebagai konstanta Boltzman dengan nilai  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K,  $T$  merupakan suhu ruangan dalam satuan Kelvin,  $B$  adalah *bandwidth* dan  $RL$  adalah hambatan dalam ( $\Omega$ ).

## 2.10 Kapasitas kanal

Kapasitas kanal adalah parameter yang mewakili kecepatan bit per detik maksimum yang dikirimkan dari pemancar ke setiap penerima selama proses pengiriman data. Kapasitas kanal dapat diperoleh dengan menggunakan teorema Shannon *Capacity* dengan persamaan sebagai berikut [11]:

$$C = B \log_2(1 + SINR) \quad (2.16)$$

dimana  $B$  merupakan *Bandwidth*,  $SINR$  merupakan *Signal to Interference Noise Ratio*.

## 2.11 Bit Error Rate (BER)

BER merupakan parameter yang menunjukkan nilai kesalahan bit saat sinyal ditransmisikan. Sebagai contoh BER  $10^{-4}$ , artinya terdapat kesalahan 1-bit ketika mengirimkan bit sebanyak  $10^4$ . Semakin kecil nilai BER, semakin baik juga performansi pada sistem transmisi tersebut. BER menyatakan ratio pengiriman jumlah bit yang *error* dalam satu waktu yang dihasilkan dari jumlah bit yang *error* dibagi total bit yang dikirimkan keseluruhan dalam satu waktu. Persamaan untuk menentukan nilai BER adalah sebagai berikut:

$$BER_{PPM} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{SINR \frac{L}{2} \log_2 L}\right) \quad (2.17)$$

dengan  $L$  adalah *leveling* digunakan pada PPM [19],  $SINR$  merupakan *Signal to Interference Noise Ratio*.