

## **BAB II**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 KAJIAN PUSTAKA**

Penelitian [3] mengenai dampak kesalahan pengarahan pada sistem komunikasi ruang optik terdapat dua bagian, bagian pertama jarak statis antara titik penerima dan pusat berkas yang disebut *boresight*. Namun pengaruh pengembaraan sinar terhadap kualitas komunikasi dapat diabaikan dan dampak *beam wander* pada kualitas komunikasi tidak dapat diabaikan. Mengenai efek dari noise detektor, turbulensi atmosfer atau faktor lain terhadap kinerja BER dalam komunikasi optik. Penelitian ini menunjukkan kemungkinan pergerakan sinar dua dimensi kira-kira mengikuti distribusi *Rayleigh*. Untuk menganalisis lebih lanjut pengaruh *noise* detektor dan kesalahan pengarahan pada tingkat kesalahan bit, bagian ini menganalisis pengaruh *jitter*, daya transmisi, apertur penerima dan *boresight* pada tingkat kesalahan bit komunikasi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pengaruh kesalahan pengarahan dan *derau* detektor pada kesalahan bit, pada model sistematis sistem komunikasi, rumus BER diturunkan dan simulasi tersebut memperoleh hukum perubahan *bit error rate*.

Penelitian [6] melakukan penyelidikan dengan memberikan analisis untuk sistem *SatCom* optik *downlink* untuk menghadapi kondisi buruk agar memilih *Ground Station* terbaik dan memberikan kondisi saluran terbaik serta menciptakan konektivitas lancar antara satelit ke bumi. Parameter yang digunakan pada penelitian ini yaitu parameter hamburan geometris untuk jenis – jenis awan digunakan untuk mengetahui redaman yang dekat dengan permukaan bumi disebabkan oleh awan tebal, dan ada beberapa simulasi yang dilakukan yaitu menepatkan *Ground Station* lebih tinggi dapat mengurangi kondisi atmosfer dan meningkatkan kinerja keseluruhan. Sudut puncak dapat mengalami dampak langsung dikarenakan jauh lebih rendah ketika sudut bernilai kecil. Kesimpulan dari penelitian ini berfokus pada *SatCom* laser *downlink* dipilih *Ground Station* untuk menyediakan konektivitas yang andal dan keragaman situs maksimum dan desain sistem penting membantu desain *SatCom* laser *downlink* serta hasilnya menunjukkan bahwa ketinggian *Ground Station* dan sudut puncak sangat penting.

Penelitian [7] mengirimkan informasi dari satelit GEO ke satelit LEO dan stasiun bumi yang tidak dapat mengirim/menerima data secara permanen. Teknik yang digunakan yaitu teknik *multi input multi output* (MIMO) untuk memahami pengaruh terhadap Is-OWC. Pengaruh panjang gelombang operasi yang berbeda pada sistem Is-OWC sangat berpengaruh dikarenakan semakin panjang gelombang dapat memberikan keuntungan yang signifikan. Kesimpulan penelitian ini sistem Is-OWC dibuat antar satelit GEO dan LEO pada jarak 45000 Km memiliki faktor Q yang baik dan teknik MIMO menghasilkan faktor Q yang tidak meningkatkan kinerja adanya efek turbulensi atmosfer dan WDM mencapai faktor Q yang mendapatkan nilai maksimum.

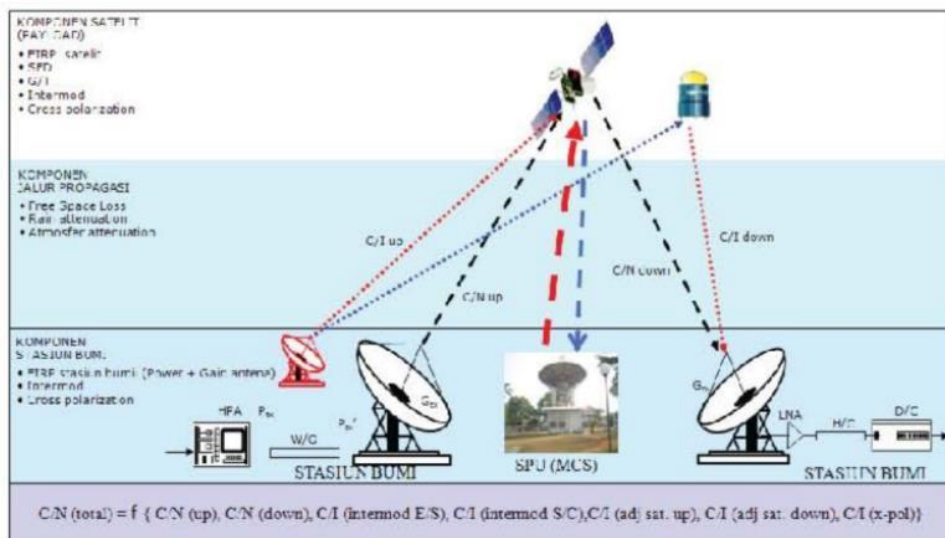
Penelitian [8] memfokuskan penelitian pengembangan lapisan untuk satelit kelas *pico/nano* dengan pertimbangan terhadap dampak penerangan latar belakang matahari. Satelit yang digunakan satelit kecil sebagai jaringan sensor diluar angkasa dan memiliki keunggulan dibandingkan satelit konvensional dikarenakan observasi dapat terkoordinasi, pengukuran resolusi tinggi dan identifikasi inklusif terhadap antariksa. Masalah yang didasari pada *Intersatellite Communication* (ISC) adalah efek *Doppler* yang menyebabkan frekuensi sinyal diterima berbeda dengan frekuensi yang dikirim adanya gerakan yang menambah atau mengirim jarak. Akhirnya, penelitian dapat menyelidiki bahwa keterbatasan utama satelit kecil adalah faktor bentuk terbatas yang mengatur *size, mass and power* (SMAP) yang dibawa kedalam pesawat. Mengembangkan model analitik ISL dan evaluasi dampak penerangan matahari terhadap kinerja untuk skema IM/DD.

Penelitian [9] memanfaatkan beberapa stasiun bumi untuk penggunaan kembali spektrum dan sistem RF pada pita frekuensi tinggi dapat memungkinkan terpengaruh awan air. Oleh karena itu penyelidikan tutupan awan dilakukan tahap perencanaan dan perancangan sistem komunikasi satelit darat. Penelitian ini melakukan perhitungan ketersediaan berkorelasi dan tidak berkorelasi pada jaringan *optical ground station* (OGS) pada satelit GEO dan data *cloud* selama 5 tahun yang dihasilkan pada simulasi 3 jaringan berbeda yaitu di Jerman, Eropa dan antar benua. Hasilnya jaringan Jerman mengalami korelasi yang kuat antar lokasi bumi sedangkan jaringan Eropa dan antar benua mendapatkan hasil yang lebih baik karena cuaca yang dialami lebih baik.

## 2.2 DASAR TEORI

### 2.2.1 Sistem Komunikasi Satelit

Sistem komunikasi satelit adalah jaringan satelit buatan yang ditempatkan di angkasa untuk tujuan telekomunikasi. Satelit komunikasi modern menggunakan orbit bumi rendah. Dalam sistem ini, terdapat dua elemen dasar, yaitu Stasiun Bumi (*Ground Segment*) dan Satelit (*Space Segment*). Stasiun bumi mengirimkan sinyal informasi ke arah satelit melalui frekuensi *uplink*, dan satelit sebagai *repeater* tunggal di luar angkasa meneruskan sinyal informasi ke arah tujuan melalui frekuensi *downlink*. Penggunaan sistem komunikasi satelit sangat relevan ketika terdapat jarak hubungan antar stasiun yang cukup jauh dan medan geografis yang sulit, sehingga transmisi lain tidak memungkinkan. Selain itu, sistem ini juga efisien dalam penggunaan frekuensi [10].



**Gambar 2.1 Satelit Komunikasi [10].**

Gambar 2.1 menggambarkan skema komunikasi satelit antara stasiun bumi dan satelit dengan berbagai faktor yang mempengaruhi kualitas sinyal. Pada bagian satelit, terdapat parameter *Gain to noise temperature ratio* (G/T) yang menunjukkan kemampuan satelit untuk menerima sinyal, *Power Equivalent Bandwidth* (PEB), polarisasi sinyal, intermodulasi, dan polarisasi silang. Komponen jalur propagasi mencakup kehilangan sinyal di *Free Space Loss* dan redaman sinyal akibat *Atmospheric Attenuation*. Stasiun bumi terdiri dari dua bagian utama, stasiun bumi *uplink* dilengkapi dengan *Power Amplifier* dan *Waveguide*, serta stasiun bumi *downlink* yang dilengkapi dengan *Low Noise Amplifier* dan *Down Converter* [10].

### **2.2.2 Ground Segment**

*Ground Segment* yaitu stasiun-stasiun bumi yang bertebaran di seantero tanah air. Ruas ini terdiri dari perangkat pemancar, penerima, antena dan sebagainya yang semuanya berada di bumi. Setiap tempat dalam liputan satelit, dapat berhubungan dengan tempat lain yang memiliki stasiun bumi dan dapat menghubungi segenap stasiun bumi yang berada di wilayah cakupan antenanya. Sistem ini mengikuti sistem sebelumnya yang sudah ada sehingga sistem media transmisi merupakan rantai untuk menyalurkan jasa telekomunikasi [10].

### **2.2.3 Space Segment**

Satelit dalam *space segment* berfungsi sebagai pengulang (*repeater*) yang menerima gelombang mikro, memperkuatnya dan mengirimkan kembali ke bumi. Selain itu, satelit juga memproses translasi frekuensi dari *uplink* frekuensi 5,925 GHz hingga 6,425 GHz menjadi *downlink* frekuensi 3,7 GHz hingga 4,2 GHz. Secara singkat, *space segment* bagian dari sistem komunikasi satelit yang berperan dalam menghubungkan sinyal antara bumi dan satelit luar angkasa [10].

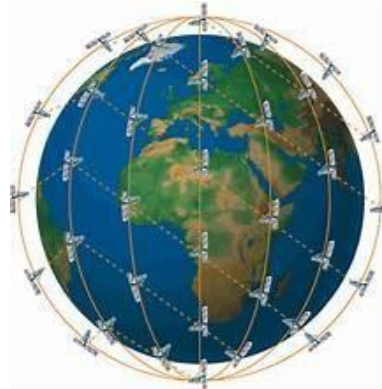
### **2.2.4 Orbit Stasioner**

Orbit adalah tempat beredarnya satelit mengelilingi permukaan bumi. Orbit satelit memiliki tiga jenis orbit yang berbeda dan memiliki kelebihan dan kekurangannya. Orbit Stationer merupakan sebuah orbit yang menempatkan satelit untuk terus berada dalam posisinya merujuk pada titik atau lokasi. Satelit dalam orbit stationer umumnya bergerak dari arah timur ke barat mengikuti perubahan rotasi bumi [10].

### **2.2.5 Low Earth Orbit (LEO)**

Satelit LEO merupakan satelit yang mempunyai ketinggian mencapai 320-800 Km diatas permukaan bumi yang sangat dekat dengan bumi. Satelit ini harus memiliki kecepatan yang sangat tinggi agar tidak terlempar atmosfer. Kecepatan edar satelit LEO mencapai 27.259 Km/h mengitari bumi dalam waktu 90 menit. Satelit LEO banyak diluncurkan untuk berbagai aplikasi karena jaraknya yang dekat dengan bumi dan biaya relatif murah. Saat ini, ada lebih dari 8.000 satelit

yang mengorbit pada orbit LEO. Aplikasi satelit LEO meliputi komunikasi seluler, pemantauan bumi dan navigasi [10].



**Gambar 2.2 Orbit Satelit LEO [10].**

Pada Gambar 2.2 merupakan orbit satelit LEO, satelit ini memiliki kelebihan serta kekurangan. Kelebihan dari satelit LEO yaitu memiliki latensi yang rendah dan resolusi gambar yang tinggi karena kedekatannya dengan permukaan bumi. Kekurangan pada satelit LEO memerlukan konstelasi banyak satelit untuk cakupan global yang konsisten karena orbitnya yang rendah dan cakupan area yang terbatas [10].

### **2.2.6 Medium Earth Orbit (MEO)**

Satelit MEO adalah satelit yang mempunyai ketinggian diatas 10.000 Km memiliki jarak yang cukup jauh. Jumlah satelit pada orbit MEO tidak banyak dibandingkan orbit LEO dan memiliki *delay* sebesar 60-80 ms. Satelit MEO memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing [10].

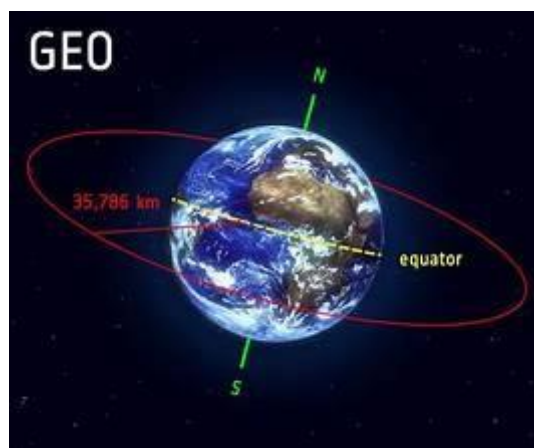


**Gambar 2.3 Orbit Satelit MEO [10].**

Gambar 2.3 merupakan gambaran satelit MEO, satelit MEO memiliki kelebihan, *delay* relatif lebih kecil dibandingkan satelit GEO, memiliki sudut pandang ke satelit lebih baik, frekuensi lebih baik dari satelit GEO, jumlah satelit lebih sedikit dari satelit LEO dan umur satelit MEO lebih panjang dibandingkan LEO. Kekurangan Satelit MEO memiliki jumlah satelit MEO lebih banyak dari satelit GEO, Antena stasiun bumi lebih mahal dan lebih kompleks dan trafik kanal memiliki kapasitas sedang [10].

### 2.2.7 Geostationery Earth Orbit (GEO)

Satelit GEO merupakan satelit yang ditempatkan dalam orbit posisinya tetap dengan suatu titik di bumi. Waktu edarnya sama dengan waktu rotasi bumi dikarenakan memiliki posisi yang tetap dan posisi satelit GEO sejajar dengan garis khatulistiwa. Satelit GEO mempunyai jarak 35.786 Km dari permukaan bumi. Satelit GEO memiliki berbagai fungsi dan aplikasi, termasuk komunikasi global seperti televisi satelit, radio, dan internet. Pemantauan cuaca untuk perkiraan yang lebih akurat serta navigasi dan penentuan posisi. Salah satu keuntungan utama satelit GEO adalah cakupan konstan ke area tertentu posisinya yang tetap, serta kemampuan untuk mencakup area yang sangat luas dengan satu satelit, mengurangi kebutuhan akan banyak satelit [10].



**Gambar 2.4 Orbit Satelit GEO [10].**

Gambar 2.4 pada satelit GEO memiliki keterbatasan, seperti latensi sinyal yang lebih tinggi akibat jaraknya yang jauh dari bumi, yang dapat mempengaruhi aplikasi yang memerlukan respon waktu nyata, dan biaya peluncuran lebih tinggi dibandingkan dengan orbit rendah atau menengah. Satelit GEO memainkan peran

penting dalam berbagai aspek kehidupan, dari komunikasi hingga pemantauan cuaca dengan kemampuan untuk menyediakan layanan yang andal dan cakupan luas [10].

### 2.2.8 *Optical Wireless Communication (OWC)*

*Optical Wireless Communication* atau komunikasi nirkabel optik yaitu teknologi kuno yang memerlukan transmisi radiasi optik informasi melalui saluran ruang bebas. Teknologi OWC adalah salah satu skema alternatif yang paling menjanjikan untuk mengatasi hambatan jarak jauh di akses *broadband* yang sedang berkembang [11]. OWC menawarkan solusi jaringan fleksibel yang memberikan layanan *broadband* sesungguhnya dan memberikan pengiriman berkecepatan tinggi ke serat optik dan teknologi ini menawarkan spektrum bebas lisensi dengan kecepatan data hampir tidak terbatas, biaya pengembangan rendah serta kemudahan dan kecepatan instalasi [14]. Komunikasi nirkabel optik terhubung secara ekonomis dan memiliki keunggulan, OWC telah terhubung dalam beberapa kegunaan. Telah digunakannya yaitu laser karena sifatnya yang koheren dan dapat mengirimkan informasi untuk disampaikan [12].

OWC memiliki perhitungan sistematis seperti dibawah ini:

$$P_R = P_T \eta_T \eta_R \left( \frac{\lambda}{4\pi Z} \right)^2 G_T G_R L_T L_R \quad (2.1)$$

Persamaan 2.1 dimana,  $P_R$  yaitu *received optical power*,  $P_T$  sebagai *transmitted optical power*,  $\eta_T$  sebagai *transmitter optical efficiency*,  $\eta_R$  sebagai *receiver optical efficiency*,  $\lambda$  sebagai *wavelength*,  $Z$  sebagai *link range*,  $G_T$  sebagai *transmitter telescopic gain*,  $G_R$  *receiver telescopic gain*,  $L_T$  sebagai *transmitter pointing loss*,  $L_R$  sebagai *receiver pointing loss*, dan  $(\lambda/4\pi Z)$  yaitu persamaan untuk menentukan *free space path loss*. Untuk nilai  $L_T$  dan  $L_R$  bisa dengan persamaan:

$$L_T = \exp(-G_T \theta_T^2) \quad (2.2)$$

$$L_R = \exp(-G_R \theta_R^2) \quad (2.3)$$

Persamaan 2.2 dan 2.3  $\theta_T$  sebagai *transmitter pointing error angle* dan  $\theta_R$  sebagai *receiver pointing error angle*.

Untuk nilai  $G_T$  dan  $G_R$  didapatkan melalui persamaan:

$$G_T = \left( \frac{\pi D_t}{\lambda} \right)^2 \quad (2.4)$$

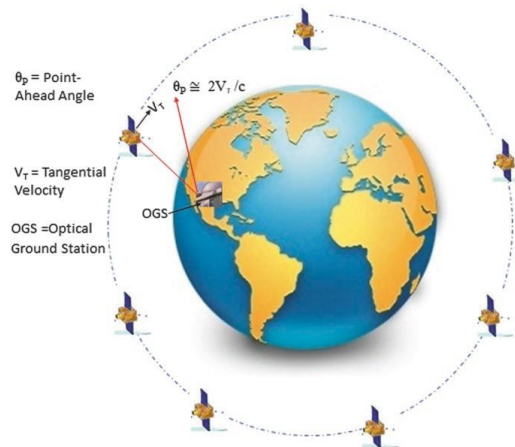
$$G_R = \left(\frac{\pi D_T}{\lambda}\right)^2 \quad (2.5)$$

Persamaan 2.4 dan 2.5  $D_T$  dan  $D_R$  sebagai besar *aperture diameter* yang digunakan. Lalu, hubungan antara jumlah total daya yang diterima pada penerima dengan *aperture diameter* dinyatakan pada persamaan [12].

### 2.2.9 Komunikasi Laser Antara *Ground Station* Dan Satelit

Sistem komunikasi laser antara *ground station* dan satelit memiliki gangguan pada saat proses pengiriman berlangsung. Gangguan tersebut diantaranya efek dari atmosfer seperti turbulensi atmosfer dan *medium* hamburan dapat terjadi pada akhirnya membatasi kecepatan data maksimum yang dapat dicapai. Analisis yang dibahas berlaku untuk menganalisis hubungan komunikasi antara satelit dan stasiun bumi. Efek turbulensi atmosfer untuk laser *uplink* sangat berbeda dari *downlink* yang perlu dipertimbangkan sistem komunikasi satelit laser. Beberapa parameter yang perlu dipertimbangkan untuk desain sistem komunikasi satelit laser adalah latensi antara pengirim dan sumber tujuan, frekuensi *doppler* bergeser karena pergerakan satelit (mempengaruhi karakteristik antarmuka digital antar satelit) dan masalah searah terima [13].

Titik pengamatan tempat pemancar laser berada di optik *ground station*, pemancar laser diarahkan ke posisinya dimana satelit akan berada ketika pancaran sinar tiba. Hal ini memerlukan sudut depan  $\theta_p \cong 2V_T/c$ , dimana  $V_T$  adalah kecepatan satelit yang tegak lurus terhadap garis pandang dan  $c$  adalah kecepatan cahaya.



**Gambar 2.5 Pancaran Laser *Ground Station*-Satelit [13].**



Gambar 2.5 merupakan pergeseran pada *doppler* terjadi adanya gerak relatif antara satelit dan satelit terminal seluler yang dapat terletak di tanah atau di luar angkasa. Semakin tinggi ketinggian satelit dari bumi, semakin lambat geraknya mengelilingi posisi orbitnya menuju suatu titik bumi. Sinar laser dengan optik terbatas difraksi, sinar yang ditransmisikan minimum lebar yang dapat dicapai dengan persamaan [13]:

$$\theta_p \cong 1.24\lambda/D \quad (2.7)$$

Persamaan 2.7 dimana  $\lambda$  adalah panjang gelombang laser dan D adalah diameter bukaan. Untuk panjang gelombang laser tipikal  $\lambda = 1,55 \mu m$  dan diameter transmisi 10 cm, lebar sinar yang ditransmisikan [13].

### 2.2.10 Pulse Position Modulation (PPM)

*Pulse Position Modulation* atau biasa disebut PPM merupakan skema pengkodean yang mengirimkan informasi digital dengan mengubah posisi relatif dari pulsa-pulsa dalam waktu yang ditentukan. Pada link LOS OWC kebutuhan *bandwidth* tidak terlalu lebar dan tidak menjadi perhatian utama. PPM dengan efisiensi daya yang jauh lebih baik dan pilihan yang menarik. PPM adalah teknik modulasi ortogonal dan merupakan bagian dari modulasi pulsa. PPM merupakan metode pengkodean sinyal digital yang digunakan dalam komunikasi optik. PPM setiap simbol digitalnya diwakili oleh dua pulsa dengan posisi yang berbeda dalam interval waktu yang diberikan. Posisi relatif pulsa ini menentukan nilai biner yang dikirim yang memungkinkan pengiriman dua *bit* informasi dalam setiap interval waktu [14].

Teknik modulasi PPM meningkatkan efisiensi daya *On Off Keying* (OOK) namun mengorbankan kebutuhan *bandwidth* yang meningkat dan kompleks yang lebih besar. Simbol L-PPM terdiri dari pulsa dengan daya konstan yang menempati satu durasi slot dalam L ( $= 2^M$ , dimana resolusi bit  $M > 0$  adalah bilangan bulat) slot waktu yang mungkin dengan slot yang tersisa kosong. Informasi dikodekan dalam posisi pulsa dan posisi pulsa sesuai dengan nilai desimal dari data masukan *M-bit*. Untuk mencapai *throughput* yang sama dengan durasi OOK, durasi slot PPM  $T_{s\_PPM}$  lebih pendek dari durasi *bit* OOK  $T_b$  dengan faktor  $L/M$  pada persamaan:

$$T_{SPPM} = \frac{T_b M}{L} \quad (2.8)$$

Persamaan 2.8  $T_{SPPM}$  menggambarkan simbol untuk modulasi pulsa (SPPM),  $T_b$  adalah waktu bit,  $M$  adalah jumlah posisi pulsa, dan  $L$  panjang pesan.

Bentuk pulsa transmisi untuk L-PPM diberikan pada persamaan:

$$x(t)_{PPM} = \begin{cases} 1 & \text{for } t \in [(m-1)T_{SPPM}, mT_{SPPM}] \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.9)$$

Persamaan 2.9 pada  $x(t)_{PPM}$  menunjukkan sinyal modulasi PPM pada interval waktu tertentu  $[(m-1)T_{SPPM}, mT_{SPPM}]$  dan bernilai 0 diluar interval, dimana  $m$  adalah indeks pulsa.

Oleh karena itu, urutan simbol PPM menunjukkan dengan persamaan:

$$x(t)_{PPM} = LP_r \sum_{k=0}^{L-1} c_k p\left(t - \frac{kT_{Symb}}{L}\right) \quad (2.10)$$

Persamaan 2.10 dimana,  $c_k \in \{c_0, c_1, c_2, \dots, c_{L-1}\}$  adalah barisan simbol PPM,  $p(t)$  fungsi pembentuk pulsa dengan kesatuan tinggi dan durasi  $T_{Symb}/L$ ,  $T_{Symb} (= T_b M)$  adalah simbol interval dan  $LP_{avg}$  adalah daya puncak optik simbol PPM.

Dalam PPM, semua sinyal memiliki jarak yang sama pada persamaan:

$$d_{min-PPM} = \min_{i \neq j} \int dt = 2LP^2 \log_2 \left( \frac{L}{R_b} \right) \quad (2.11)$$

Pada persamaan 2.11 menggambarkan jarak minimum antara dua sinyal dalam modulasi PPM yang bergantung pada panjang pesan  $L$ , kekuatan pulsa  $P$ , dan laju bit  $R_b$ .

Penggunaan PPM menghasilkan peningkatan kompleksitas sistem, karena penerima memerlukan sinkronisasi slot dan simbol untuk mendemodulasi sinyal. Namun demikian, terutama karena efisiensi dayanya, PPM telah menjadi teknik modulasi yang paling banyak digunakan untuk sistem OWC serta komunikasi laser luar angkasa dan konsumsi daya yang lebih rendah [14].

Spektrum daya listrik L-PPM menggunakan persamaan:

$$S_{PPM}(f) = |P(f)|^2 [S_{c,PPM}(f) + S_{d,PPM}(f)] \quad (2.12)$$

Persamaan 2.12 dimana,  $P(f)$  adalah transformasi *fourier* bentuk pulsa dan  $S_{c,PPM}(f)$  dan  $S_{d,PPM}(f)$  masing-masing komponen kontinu dan diskrit, yang diberikan dengan persamaan [14]:

$$S_{c.PPM}(f) = \frac{1}{T_{symp}} \left[ \left(1 - \frac{1}{L}\right) + \frac{2}{L} \sum_{k=1}^{L-1} \left(\frac{k}{L} - 1\right) \cos\left(\frac{k 2\pi f T_{symp}}{L}\right) \right] \quad (2.13)$$

$$S_{c.PPM}(f) = \frac{2\pi}{T_{symp}^2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta \left[ f - \frac{kL}{T_{symp}} \right] \quad (2.14)$$

Pada Persamaan 2.13 menghitung mengenai efisiensi spektral, dimana  $T_{symp}$  waktu simbol,  $L$  jumlah level modulasi. Persamaan ini menggabungkan aspek modulasi dan interferensi untuk menghitung efisiensi spektral. Persamaan 2.14 mengukur efisien data dapat ditransmisikan dengan mempertimbangkan untuk keamanan, semakin besar  $L$  semakin kecil modulasi dengan mempertimbangkan efek setiap level modulasi pada frekuensi tertentu.

Untuk menganalisis probabilitas kesalahan slot untuk sistem PPM, dapat pendekatan analisis yang sama seperti diuraikan untuk OOK. Namun, karena adanya perbedaan laju pengambilan sampel dengan persamaan:

$$C_i = p(t) \otimes h(t) \otimes r(t) \Big|_{t=1 - \frac{T_b M}{L}} \quad (2.15)$$

Pada Persamaan 2.15 *respons impuls* waktu diskrit  $C_i$  dari sistem kaskade (filter pemancar, saluran dan filter penerima) dan dengan persamaan.

$$y_i = LRP_{avg} b_i \otimes h_k \Big|_{k=\zeta} \quad (2.16)$$

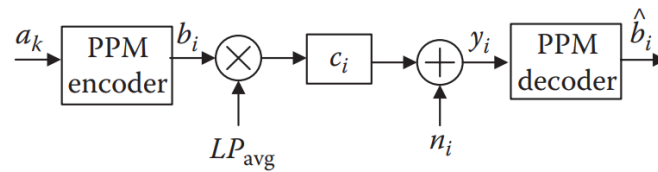
Persamaan 2.16 menggambarkan sinyal yang diterima  $y_i$  sebagai hasil dari konvolusi antara sinyal biner yang dikirim  $b_i$  dan respon sistem  $h_k$  yang dievaluasi pada  $k = \zeta$ , dikalikan dengan panjang pesan  $L$ .

Dapat diamati bahwa untuk kecepatan data yang sama, PPM akan memiliki rentang saluran yang lebih tinggi karena durasi pulsa yang lebih pendek, dan karenanya menghasilkan yang lebih tinggi untuk penyebaran penundaan yang dinormalisasi ke durasi bit yang sama. Untuk memperkirakan probabilitas kesalahan PPM dalam saluran *multipath*, perlu mempertimbangkan semua kombinasi simbol PPM dalam rentang saluran  $\zeta$ , menghitung probabilitas kesalahan slot dari masing-masing slot dan rata-rata di seluruh saluran. Oleh karena itu, probabilitas kesalahan slot PPM menunjukkan dengan persamaan [14]:

$$P_{se\_PPM\_hard}(f) = \frac{1}{2^\zeta} \sum_i^{2^\zeta} \left[ \frac{1}{L} Q \left( \frac{y_i - \alpha_{opt}}{\sqrt{N_0/2}} \right) + \frac{(L-1)}{L} Q \left( \frac{\alpha_{opt} - y_i}{\sqrt{N_0/2}} \right) \right] \quad (2.17)$$

Persamaan 2.17 menghitung probabilitas kesalahan simbol untuk modulasi PPM. Dimana  $\zeta$  jumlah posisi skema PPM,  $\alpha_{opt}$  adalah tingkat ambang batas

optimal,  $N_0$  densitas spektral kebisingan. Menjumlahkan dua komponen untuk setiap posisi  $i$  dalam skema PPM.

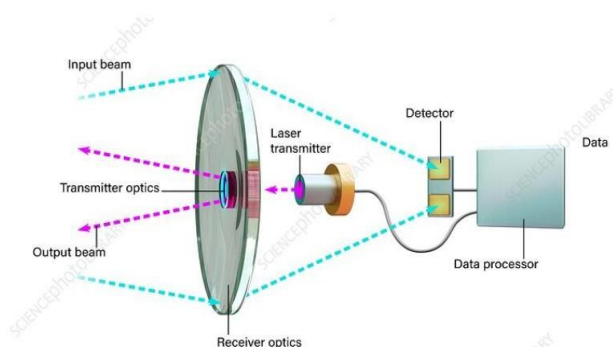


**Gambar 2.6 Sistem ekuivalen waktu diskrit skema PPM [14].**

Gambar 2.6 menunjukkan diagram blok dari sebuah sistem komunikasi yang menggunakan modulasi PPM, sinyal dimasukan dikodekan oleh PPM *encoder* menjadi sinyal dan dikalikan untuk mengontrol level daya sinyal rata-rata, menghasilkan sinyal. Sinyal kemudian ditambahkan dengan *noise* menghasilkan sinyal yang diterima, kemudian dikodekan kembali oleh PPM *decoder* untuk menghasilkan sinyal keluaran [14].

### 2.2.11 *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)*

*Light Amplification by Stimulated Emmission of Radiation* atau dikenal dengan (LASER) yaitu sumber cahaya pada *transmitter* yang memancarkan radiasi elektromagnetik. Cara kerja laser dinamakan lasing kondisi dimana terjadinya penguatan cahaya didalam laser *diode*. Lasing dapat terjadi ketika suatu sistem sudah dalam keadaan kesetimbangan atau tidak berubah seiring jalannya waktu [15]. Laser adalah perangkat memancarkan sinar sempit panjang gelombang tunggal, cahaya koheren sebagai hasil dari emisi terstimulasi. Setiap laser mengandung media aktif sumber atom yang akan mengalami siklus eksitasi dan se-eksitasi untuk melepaskan foton yang akan membentuk sinar laser. Tergantung pada jenis lasernya, media aktifnya dapat berupa padat, cair dan gas [17].



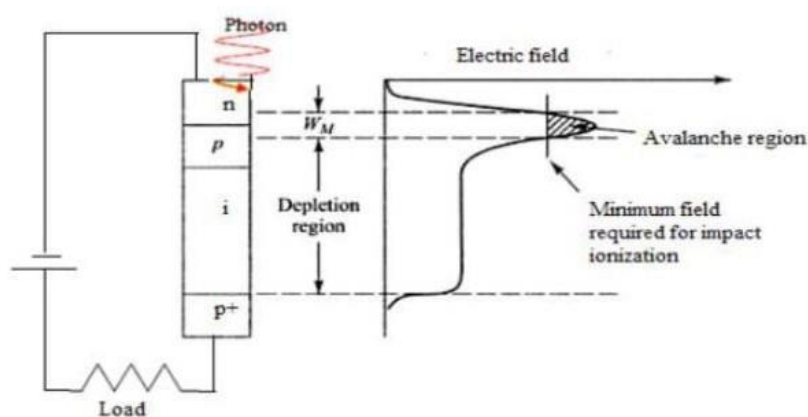
**Gambar 2.7 Ilustrasi Laser [17].**

Gambar 2.7 merupakan ilustrasi laser dan proses nya sinyal input diarahkan ke sistem optik pemancar yang mengarahkan sinyal ini ke pemancar laser. Pemancar laser kemudian menghasilkan sinyal laser yang difokuskan dan diarahkan ke arah penerima melalui sistem optik pemancar. Sinyal laser yang diterima kemudian difokuskan oleh sistem optik penerima dan diarah ke detektor. Detektor mengubah sinyal optik menjadi sinyal listrik yang kemudian di proses oleh pengolah data. Pengolah data keluaran yang dapat digunakan untuk komunikasi optik [17].

### 2.2.12 Photodetector

*Photodetector* adalah alat pendeteksi cahaya yang memiliki fungsi mengubah besaran cahaya menjadi besaran listrik, prinsip kerjanya sinyal optik digabungkan dengan sinyal optik lainnya dikirim ke penerima dengan panjang gelombang tertentu dan jarak yang relatif jauh, *Photodetector* memiliki dua jenis utama yaitu, *Positive Intrinsic Negative Photodetector* (PIN) dan *Avalanche Photodiode* (APD). *Avalanche Photodiode* atau APD yaitu jenis fotodiode untuk mendeteksi intensitas cahaya dengan sensitivitas tinggi. APD bekerja di prinsip *avalanche multiplication*, dimana elektron hole pair yang dihasilkan oleh foton yang ditangkap di dalam fotodiode mengalami penggandaan pada proses ionisasi.

APD sendiri memiliki sensitivitas tinggi dan menghasilkan sinyal jauh lebih besar dibanding foto diode biasa. Pada APD menggunakan *reverse bias* pada medan listrik yang tinggi sehingga foton masuk ke daerah *avalanche* yang memiliki medan listrik yang tinggi. Kemudian terjadi *impact ionization*, fenomena tersebut menyebabkan ulitplikasi karena terciptanya pasangan *electron hole* [14].



**Gambar 2.8 Konstruksi APD Photodetector [14].**

Pada Gambar 2.8 menunjukkan APD, dengan *Photon* masuk dari sisi kiri, *Electric Field* menunjukkan arah medan listrik menuju *avalanche*. *Avalanche region* terjadinya ionisasi dampak menghasilkan banyak elektron. Dapat dijelaskan dengan persamaan APD [16]:

$$M = \frac{IM}{IP} \quad (2.18)$$

Persamaan 2.18 dimana M adalah *gain*, IM adalah nilai rata-rata total arus *output* yang di multiplasikan sedangkan IP adalah foton yang tidak dimultiplasikan dan dilanjutkan persamaan.

$$IP = R_0 P_r \quad (2.19)$$

Persamaan 2.19 menggambarkan hubungan antara daya keluaran optik,  $R_0$  responsivitas detektor optik menunjukkan efisiensi detektor mengubah daya optik menjadi arus listrik. Untuk mengetahui *gain* pada APD dengan persamaan:

$$M_{opt}^{x+2} = \frac{\frac{4K_h T}{R^l}}{x \cdot q(I_p + I_D)} \quad (2.20)$$

Persamaan 2.20 menunjukkan M adalah *gain*, x merupakan indeks *excess noise*, merupakan konstanta *Boltzman* ( $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ), T adalah suhu dalam *Kelvin*, q adalah muatan elektron ( $1.6 \times 10^{-19} \text{J}$ ),  $I_p$  adalah arus primer dan  $I_D$  adalah *dark current* pada *photodetector*, dan adalah resistansi beban dalam *ohm*. M yang telah dioptimasi mengakibatkan penyesuaian *dark current* yang terdapat dalam *photodetector* APD pada persamaan [18].

$$I_{DM} = \sqrt[2]{2qI_D(M_{opt})^2 B} \quad (2.21)$$

Persamaan 2.21 arus fotodiode yang dihasilkan  $I_{DM}$  dapat bergantung pada intensitas cahaya yang diterima  $I_D$  dan faktor penggandaan optik  $M_{opt}$ .

Responsivitas dari APD *photodetector* yang ditentukan dengan persamaan.

$$R_{APD} = R_0 M_{opt} \quad (2.22)$$

Persamaan 2.22 menggambarkan hubungan antara responsivitas keseluruhan dari sebuah APD dengan responsivitas APD  $R_{APD}$  dan faktor penggandaan optik  $M_{opt}$ . Nilai  $I_p$  untuk APD *photodetector* dapat dicari dengan persamaan.

$$I_p = P_r R_{APD} M_{opt} \quad (2.23)$$

Persamaan 2.23 menggambarkan antara hubungan antara arus keluaran  $I_P$  dari sebuah APD, daya optik yang diterima  $P_r$ , responsivitas APD  $R_{APD}$  dan faktor penggandaan optik  $M_{opt}$ .

### 2.2.13 Antenna Pointing Loss Atau Pointing Error

Dalam komunikasi satelit ketika *link* satelit dibuat maka yang diharapkan adalah agar stasiun bumi dan antena satelit selaras agar mendapat penguatan yang maksimal. Namun ada dua kemungkinan sumber kehilangan sumbu yaitu pada stasiun bumi dan pada antena di satelit. Hilangnya sumbu di satelit diperhitungkan dengan merancang *link* untuk operasi pada kontur antena satelit yang sebenarnya. Hilangnya sumbu di stasiun bumi disebut sebagai *antenna pointing loss*. Kerugian dari *antenna pointing loss* biasanya hanya sepersepuluh *decibel*, *pointing loss* dapat terjadi pada antena akibat ketidaksejajaran arah polarisasi. *Pointing error* harus diperhatikan dari data *statistic*, berdasarkan kesalahan yang sebenarnya diamati untuk sejumlah stasiun bumi, dan *pointing error* harus dipertimbangkan terpisah antara *uplink* dan *downlink* [28]. Nilai *antenna pointing loss* diperoleh dari persamaan [29]:

$$\phi_3 = \frac{70\lambda}{D}; \lambda = \frac{c}{f}; PE = 12(\phi/\phi_3)^2 \quad (2.24)$$

Persamaan 2.24 menggambarkan,  $\phi$  Antena *misspointing* (dB), D diameter antena (m) dengan c kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8$  m/s) dan f pada frekuensi (Hz).

### 2.2.14 Rugi-Rugi Propagasi

Sistem komunikasi satelit dengan memanfaatkan atmosfer sebagai media transmisinya sering mengalami *losses* (rugi-rugi) dalam propagasi gelombangnya. Rugi-rugi ini disebabkan oleh rugi ruang bebas, rugi atmosfer dan rugi hujan. Rugi-rugi ini berpengaruh dalam perhitungan lintasan satelit. Rugi yang muncul secara acak menyebabkan kekuatan sinyal berkurang dan berada di bawah sinyal yang ditentukan. Beberapa rugi-rugi yang berpengaruh didalamnya antara lain:

#### 1) Rugi Ruang Bebas

Rugi ruang bebas (*free space loss*) yaitu daya yang hilang karena proses menjalarnya energi elektromagnetik melalui ruang. Karena daya dikeluarkan oleh sumber sifatnya terbatas, sedangkan antena sinyal disebarkan kedalam

ruang, maka semakin jauh jarak, besarnya daya yang diterima semakin kecil tergantung pada jarak dari sumbernya Ditunjukkan dengan persamaan.

$$L_p = \left( \frac{4\pi d^2}{\lambda} \right) \quad (2.25)$$

Persamaan 2.25 dimana,  $d$  merupakan jarak antar satelit dengan stasiun bumi (m) dan  $\lambda$  panjang gelombang (m).

2) Rugi Hujan

Rugi hujan merupakan hasil dari penyerapan dan hamburan yang dilakukan oleh hujan. Rugi ini menurunkan tingkatan sinyal yang diterima oleh stasiun bumi dan menaikkan temperatur derau sistem penerima.

3) Rugi Atmosfer

Rugi atmosfer disebabkan oleh partikel-partikel yang terdapat di atmosfer seperti partikel debu, asap, kabut dan uap air [19].

### 2.2.15 Gelombang Optik

Gelombang optik yaitu gelombang elektromagnetik yang berkaitan dengan cahaya atau radiasi dalam spektrum optik. Gelombang ini memiliki panjang gelombang yang lebih pendek dari gelombang radio. Panjang gelombang adalah jarak yang selang satuan dari pola gelombang. Panjang gelombang optik terbagi menjadi 3.

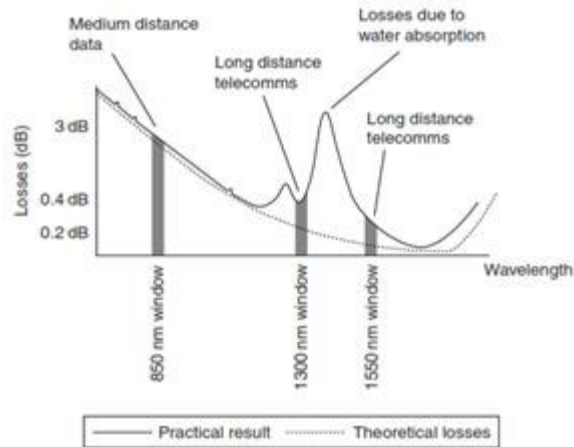
**Tabel 2.1 Panjang Gelombang Optik**

Wilayah	Panjang Gelombang	Operasi Kerja
Pertama	800 - 900 nm	850 nm
Kedua	1260 - 1360 nm	1310 nm
Ketiga	1500 - 1600 nm	1550 nm

Pada Tabel 2.1 standarisasi panjang gelombang optik berada pada dalam panjang 850, 1310, dan 1550 menjadi 3 bagian. Ketiga nilai tersebut dipilih karena sinyal optik tersebut memiliki kerugian paling kecil saat ditransmisikan dalam serat optik. Serat untuk *multimode* cocok untuk di gelombang 850 nm dan 1310 nm sedangkan serat mode tunggal baik digunakan pada panjang gelombang 1310 nm dan 1550 nm. Namun penggunaan panjang gelombang 1380 nm sangat dihindari penggunaannya, dikarenakan panjang gelombang ini memiliki kerugian yang



sangat tinggi karena air di dalam gelas. Air dalam bentuk ion hidroksil diserap dalam struktur molekul dan menyerap energi dengan panjang gelombang 1380 nm.



**Gambar 2.9 Panjang Gelombang [20].**

Gambar 2.9 menjelaskan pada diagram jendela panjang gelombang bahwa panjang gelombang 1300 dan 1550 nm memiliki kerugian yang lebih kecil daripada panjang gelombang lainnya. Kedua panjang gelombang ini menjadi lebih populer untuk komunikasi jarak jauh [20]. Panjang gelombang 850 nm ditandai dengan attenuasi rendah, sangat cocok untuk operasi *Free Space Optic*. Komponen pemancar dan detektor yang handal, berforma tinggi, dan murah umumnya tersedia dan umum digunakan dalam jaringan penyedia layanan dan peralatan transmisi saat ini. Teknologi detektor APD yang sangat sensitif dan *Vertical Cavity Surface Emitting Laser* (VCSEL) dapat digunakan untuk atmosfer. Panjang gelombang 1550 nm sangat cocok untuk transmisi ruang bebas karena attenuasinya rendah, serta tersebarnya komponen pemancar dan detektor berkualitas tinggi [27].

### 2.2.16 Bit Error Rate (BER)

*Bit Error Rate* (BER) yaitu terjadinya jumlah *error* tiap jumlah *bit* data yang terkirim pada suatu sistem digital. Jika jumlah *bit error* didefinisikan sebagai  $N_E$  dan jumlah *bit* total terkirim adalah  $N_T$ . Dapat dijelaskan pada persamaan [22].

$$BER = \frac{N_E}{N_T} \quad (2.26)$$

Persamaan 2.26 Nilai BER baik yang harus dipenuhi adalah BER  $10^{-6}$  sampai BER  $10^{-12}$ . BER disebut juga dengan *error probability* ( $P_e$ ) atau

probabilitas muncul *error* terjadi pada transmisi data. Proses transmisi data, *bit* tertentu memiliki amplitudo sinyal yang terlalu dekat dengan *threshold* sehingga tidak dapat dibedakan nilainya dengan benar [21].

BER juga dapat didefinisikan dalam hal *Probability Of Error* (POE) dengan persamaan.

$$POE = \frac{1}{2}(1 - erf)\sqrt{E_b / N_o} \quad (2.27)$$

Persamaan 2.27 dimana *erf* fungsi kesalahan,  $E_b$  energi dalam satu bit, dan  $N_o$  kepadatan spektral daya *noise* (daya *noise* dalam *bandwidth* 1 Hz). Fungsi kesalahan berbeda untuk setiap metode modulasi yang berbeda. *POE* berbanding lurus dengan  $E_b / N_o$ , yang merupakan bentuk *signal to noise ratio* [26].

### 2.2.17 Optical Power Meter

*Optical Power Meter* merupakan alat yang sangat penting di bidang telekomunikasi, fiber optik, dan teknologi optik lainnya. Alat ini digunakan untuk mengukur daya atau kekuatan sinyal optik yang dihasilkan oleh perangkat optik seperti laser, LED, serat optik dan komponen lainnya. Dengan melakukan pengukuran daya optik yang akurat, dapat memastikan bahwa sinyal optik bekerja dalam batas daya yang sesuai dengan spesifikasi dan memenuhi kebutuhan sistem.

Pengukuran daya optik dilakukan dengan menggunakan *Optical Power Meter* (OPM) yang dilengkapi dengan sensor sensitif terhadap sinyal optik. Mampu mendeteksi dan mengukur daya sinyal optik dengan presisi tinggi. Pada OPM dapat memantau daya sinyal optik, mendeteksi penurunan daya atau kerusakan pada sistem dan melakukan pemeliharaan untuk menjaga performa sistem yang optimal. [24]. Dengan persamaan total pada *optical power*:

$$P = \frac{E}{t} \quad (2.28)$$

Persamaan 2.28  $P$  adalah daya optik,  $E$  energi cahaya yang ditransmisikan, dan  $t$  adalah waktu. Dalam dBm dengan persamaan:

$$P_{dBm} = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{1 \text{ mW}} \right) \quad (2.29)$$

Persamaan 2.29 dimana  $P_{dBm}$  adalah daya optik dalam dBm, dan  $P$  adalah daya optik dalam mW. Daya yang diterima oleh detektor memiliki persamaan:

$$P_r = P_t - \alpha L \quad (2.30)$$

Persamaan 2.30 dimana  $P_r$  daya yang diterima (dBm),  $P_t$  daya yang ditransmisikan (dBm),  $\alpha$  adalah kerugian serat optik (dB/km), dan  $L$  panjang serat optik (km). Dalam daya pancaran cahaya laser dengan persamaan:

$$P = I \times A \quad (2.31)$$

Persamaan 2.31  $P$  daya pancaran laser,  $I$  adalah intensitas cahaya laser, dan  $A$  area permukaan pancaran laser. Efisiensi pada optik dengan persamaan:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.32)$$

Persamaan 2.32  $\eta$  adalah efisiensi daya,  $P_{out}$  adalah daya keluaran, dan  $P_{in}$  adalah daya masukan [24].

### 2.2.18 Optical Spectrum Analyzer

*Optical Spectrum Analyzer* adalah pengukuran daya cahaya optik yang berubah seiring dengan panjang gelombang. Penggunaannya meliputi pengujian sumber cahaya laser dan LED untuk kebersihan spektral dan distribusi daya, serta untuk menguji karakteristik transmisi perangkat optik. Lebar spektral dari sumber cahaya menjadi parameter penting dalam sistem komunikasi serat optik karena adanya dispersi kromatik yang terjadi di dalam serat, yang membatasi lebar pita modulasi sistem tersebut [25]. Persamaan pada *optical spectrum*:

$$c = \lambda v \quad (2.33)$$

Persamaan 2.33 yaitu  $c$  adalah kecepatan cahaya (sekitar  $3 \times 10^8 m/s$ ),  $\lambda$  adalah panjang gelombang, dan  $v$  adalah frekuensi. Energi dengan sebuah foton memiliki persamaan:

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.34)$$

Persamaan 2.34 dimana  $E$  adalah energi,  $h$  adalah konstanta *planck* ( $6.626 \times 10^{-34} \text{Joule/s}$ )  $\lambda$  adalah panjang gelombang, dan  $v$  adalah frekuensi [25].

### 2.2.19 Software Optisystem

*Software Optisystem* merupakan perangkat lunak untuk mendesain yang inovatif dan berkembang pesat untuk memungkinkan pengguna dalam merencanakan pengujian dan mensimulasikan setiap jenis-jenis optik seperti:

1. Jaringan optik OTDM, SONET/SDH rings, CWDM, DWDM, PON, Kabel, OCDMA.

2. Transmisi single-mode/multi-mode.
3. *Free Space Optics* (FSO), *Radio Over Fiber* (ROF), OFDM (langsung, koheren).
4. *Amplifier* dan laser (EDFA, SOA, Raman, Hybrid, optimasi GFF, *Fiber Lasers*).
5. Pemrosesan sinyal (Listrik, Digital, Semua Optik).
6. Desain sub sistem pemancar dan penerima (Langsung/koheren).
7. Format modulasi (RZ, NRZ, CSRZ, DB, DPSK, QPSK, DP-QPSK, PM-QPSK, QAM-16, QAM-64).
8. Analisis kinerja sistem (*Eye Diagram/Q-factor/BER, Signal power/OSNR, Status polarisasi, Diagram konstelasi, Penalti linier dan non-linier*) [23].

#### **2.2.20 Non Return To Zero (NRZ)**

NRZ yaitu skema pengkodean biner yang dimana level tegangan sinyal tetap konstan selama interval *bit*, mewakili nilai biner 1 atau 0. NRZ tidak ada perubahan tegangan di tengah interval *bit* dan pola pada NRZ dibentuk menggunakan cara memodulasikan sinyal digital menggunakan sirkuit *flip-flop* atau gerbang logika.

#### **2.2.21 Pulse Generator**

*Pulse Generator* yaitu perangkat rangkaian elektronik yang menghasilkan pola pulsa dengan bentuk, durasi dan frekuensi tertentu. *Pulse Generator* dapat menghasilkan sinyal pulsa dengan berbagai bentuk gelombang dan dapat mengatur durasi pulsa, frekuensi pulsa, tingkat tegangan, dan fase pulsa sesuai kebutuhan

#### **2.2.22 Directly Modulated Laser Measured (DML)**

*Directly Modulated Laser Measured* mengacu pada pengukuran karakteristik laser yang secara langsung dimodulasi. DML adalah jenis laser yang digunakan dalam komunikasi optik dengan memodulasi langsung intensitas cahaya laser. DML sendiri, intensitas cahaya laser secara langsung diubah dengan sinyal modulasi seperti sinyal digital atau analog, DML biasanya digunakan dalam jarak pendek hingga menengah dalam komunikasi optik sendiri.

### **2.2.23 Optical Attenuator**

*Optical Attenuator* berfungsi sebagai mengurangi kekuatan atau intensitas pada sinyal optik dan mengurangi tingkat daya cahaya yang melewati serat optik atau jalur transmisi optik lainnya. Metode yang digunakan pada optical attenuator yaitu peredaman serat optik, penggunaan komponen optik filter dan teknik interferensi.

### **2.2.24 Electrical Rescale**

*Electrical Rescale* pada *software optisystem* mengacu untuk mengubah sinyal listrik dan mengatur amplitudo sinyal listrik dengan variasi amplitudo yang berbeda dengan menyesuaikan sinyal listrik untuk kebutuhan simulasi.

### **2.2.25 Oscilloscope**

*Oscilloscope* atau Osiloskop adalah alat pengukur yang digunakan untuk menganalisis sinyal listrik dalam bentuk gelombang. Osiloskop juga untuk melihat dan mengukur sinyal seiring waktu dan alat yang penting dalam analisis sistem elektronik itu sendiri. Osiloskop memungkinkan untuk melihat perubahan sinyal dan mengukur parameter sinyal seperti amplitudo, frekuensi, periode dan lainnya.

### **2.2.26 Dynamic Range (DR)**

*Dynamic Range* dalam *software optisystem* mengacu pada perbandingan antara level sinyal terkuat dengan sinyal level terlemah yang dapat diterima atau diukur. DR dapat menggambarkan kemampuan sistem dalam mengatasi dan memproses sinyal dengan tingkat amplitudo yang berbeda. DR menentukan pengiriman, penerima sinyal optik dan mengatasi perbedaan amplitudo sinyal disebabkan oleh beberapa faktor seperti jarak transmisi, redaman, dan gangguan lainnya.