

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Pada penelitian ini tidak lepas dari banyak kesalahan dan kekurangan maka dari itu ada baiknya untuk mengambil referensi dari penelitian-penelitian sebelumnya untuk dijadikan sebagai rujukan untuk penelitian ini. Dalam hal ini beberapa penelitian terkait yang diambil memiliki beberapa kesamaan dalam parameter uji agar dapat dijadikan bahan perbandingan. Diharapkan pada penelitian kali ini dapat meneruskan penelitian-penelitian terkait sebelumnya untuk menjadi tolak ukur dan lebih bermanfaat pada penelitian yang akan datang.

Pada sebuah penelitian yang dilakukan pada tahun 2018 [2] meneliti tentang analisis dan performansi 2,5 Gbps *Inter-satellite optical wireless communication* (IS-OWC) di konstelasi LEO. Pada penelitian tersebut dilakukan perbandingan dengan 4 tipe modulasi yaitu *On-Off key* (OOK), *Gaussian*, RZ, dan NRZ serta parameter yang divariasikan yaitu *transmit Power*, *wavelength*, dan *aperture diameter*. Berdasarkan penelitian tersebut didapat hasil bahwa tipe modulasi NRZ memperoleh nilai Q-Factor yang lebih baik yaitu 20,58 pada jarak yang sama 4965 KM, kemudian jika daya semakin besar dan *wavelength* lebih pendek mendapatkan nilai Q-Factor yang lebih baik dan dapat mengurangi Free Space Path Loss (FSL), serta setelah diamati bahwa pengiriman data dengan *bitrate* beberapa Gbps dimungkinkan dapat melintasi jarak ribuan kilometer dengan OWC.

Pada tahun 2019 penelitian yang berjudul *Modeling and Performance Analysis of 400 Gbps CO-OFDM Based IS-OWC System Incorporating Polarization Division Multiplexing with Enhanced Detection* [6]. Pada penelitian tersebut melakukan perbandingan terhadap skema modulasi yakni *4-level phase shift keying* dan *4-quadrature amplitude modulation*, serta *Signal Noise Ratio* (SNR), *Total Received Power*, dan diagram konstelasi sebagai parameter analisis. Hasil data yang diperoleh melalui serangkaian percobaan adalah skema pengkodean 4-QAM memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan dengan skema pengkodean 4-PSK, karena pada skema pengkodean 4-QAM memperoleh hasil

nilai SNR dan *total received Power* yang dapat diterima pada jarak 60000 km. Dari hasil tersebut juga dapat disimpulkan bahwa panjang gelombang 850 nm bekerja jauh lebih baik dibandingkan dengan 1550 nm.

Pada penelitian di tahun 2020 yang membahas tentang 20Gbit/s-40 GHz OFDM based LEO-GEO Radio over Inter-satellite optical wireless communication (Ro-ISOWC) system using 4-QAM modulation [7]. Penelitian tersebut melakukan pemodelan dua sistem tautan antar satelit yakni *Optical Wireless Communication (OWC)* dan *Radio Frequency (RF)* dengan menggunakan modulasi 4-QAM dengan jarak 35000 km LEO-GEO. Berdasarkan kesimpulan pada penelitian tersebut didapat hasil ketika menggunakan *wavelength* sebesar 850 nm, informasi sebesar 20Gbit/s-40 GHz berhasil ditransmisikan dengan jarak lebih dari 35000 km dari LEO-GEO.

Pada sebuah penelitian yang dilakukan di tahun 2021 dengan judul *Pointing Error Angle Effect on the Performance of 10 Gbps Ultra-Long SATELLITE Optical Wireless Communication* [8]. Penelitian ini menganalisis parameter *pointing error*, perbandingan teknik *line coding NonReturn to Zero (NRZ)* dan *Return to Zero (RZ)* dengan rentang jarak 1000-5000 km serta *transmit Power* sebesar 20,25,30 dBm. Melalui hasil yang diperoleh pada *transmit Power* 25 dBm, *line coding NRZ*, dan *pointing error angle* 1 μ rad, menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan dapat mencapai jarak tautan di 45000 km.

Berikut pada tabel 2.1 menunjukkan rangkuman kajian pustaka berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya.

Tabel 2.1 Rangkuman Kajian Pustaka

Referensi	Tujuan	Hasil
Modelling and Performance Analysis of 2.5 Gbps IsOWC System in LEO Constellation (2018) [2].	Menganalisis perbandingan terhadap variasi <i>wavelength</i> , <i>transmit Power</i> , <i>aperture diameter</i> dan 4 tipe modulasi yakni NRZ, RZ, OOK, Gaussian	Modulasi NRZ memperoleh hasil lebih baik dengan nilai Q-Factor sebesar 20.58.

Referensi	Tujuan	Hasil
Modeling and Performance Analysis of 400 Gbps CO-OFDM Based Inter-satellite Optical Wireless Communication (IsOWC) System Incorporating Polarization Division Multiplexing with Enhanced Detection (2019) [6].	melakukan perbandingan terhadap skema modulasi yakni 4-PSK dan 4-QAM	skema pengkodean 4-Qam memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan dengan skema pengkodean 4-Psk, karena pada skema pengkodean 4-Qam memperoleh hasil nilai SNR dan <i>total received Power</i> yang dapat diterima pada jarak 60000 km.
20Gbit/s-40GHz OFDM based LEO-GEO Radio over Inter-satellite optical wireless communication (Ro-IsOWC) system using 4-QAM modulation (2020) [7].	Pemodelan dua sistem tautan antar satelit yakni <i>Optical Wireless Communication</i> (OWC) dan <i>Radio Frequency</i> (RF) dengan menggunakan modulasi 4-Qam dengan jarak antara LEO-GEO	1. ketika menggunakan <i>wavelength</i> sebesar 850 nm, informasi sebesar 20Gbit/s-40 GHz berhasil ditransmisikan dengan jarak lebih dari 35000 km dari LEO-GEO.
Pointing Error Angle Effect on the Performance of 10 Gbps Ultra-Long SATELLITE Optical Wireless Communication (2021) [8].	menganalisis parameter <i>pointing error</i> , perbandingan teknik <i>line coding Non Return to Zero</i> (NRZ) dan <i>Return to Zero</i> (RZ) dengan rentang jarak 1000-5000 km serta <i>transmit Power</i> sebesar 20,25,30 dBm	hasil yang diperoleh pada <i>transmit Power</i> 25 dBm, <i>line coding</i> NRZ, dan <i>pointing error angle</i> 1 μ rad, menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan dapat mencapai jarak hingga 45000 km

Berdasarkan hasil kajian pustaka pada tabel 2.1 dapat diamati bahwa perbedaan dengan penelitian ini adalah terletak pada parameter-parameter yang digunakan seperti daya pancar, panjang gelombang, *bitrate*, *aperture* diameter, jarak, dan teknik modulasi yang digunakan.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Komunikasi Satelit

Pada mulanya satelit merupakan ungkapan yang mewakili semua benda atau objek yang mengelilingi bumi. Bumi sendiri dikelilingi oleh beberapa objek misalnya seperti bulan, meteor, dan objek angkasa yang lainnya. Setiap planet memiliki jumlah satelit yang berbeda-beda, contohnya bumi memiliki satu satelit

yaitu bulan, venus memiliki empat satelit, merkurius delapan satelit, dan lain-lain. Sistem komunikasi satelit secara garis besar terdiri dari dua bagian yaitu, *space segment* dan *ground segment*. Dalam prosesnya, sinyal-sinyal dari *space segment* ke satelit, dan dari satelit ke *ground segment* akan mengalami berbagai redaman, dan gangguan sehingga mengakibatkan kualitas sinyal menurun [9].

Sistem komunikasi teknologi satelit adalah bidang yang berkembang pesat, dan aplikasinya selalu meningkat. Sistem komunikasi satelit digunakan untuk komunikasi radio, prakiraan cuaca, penyiaran, dan banyak aplikasi lainnya. Karena ada berbagai pita frekuensi yang dapat digunakan, pita khusus dipilih untuk komunikasi satelit. Berikut pada tabel 2.2 merupakan alokasi pita frekuensi satelit [10].

Tabel 2.2 Alokasi Pita Frekuensi Satelit

Pita Frekuensi	Rentang Frekuensi (GHz)
L - Band	1 - 2
S - Band	2 - 4
C - Band	4 - 8
X - Band	8 - 12.5
Ku - Band	12.5 - 18
K - Band	18 – 26.5
X - Band	26.5 - 40

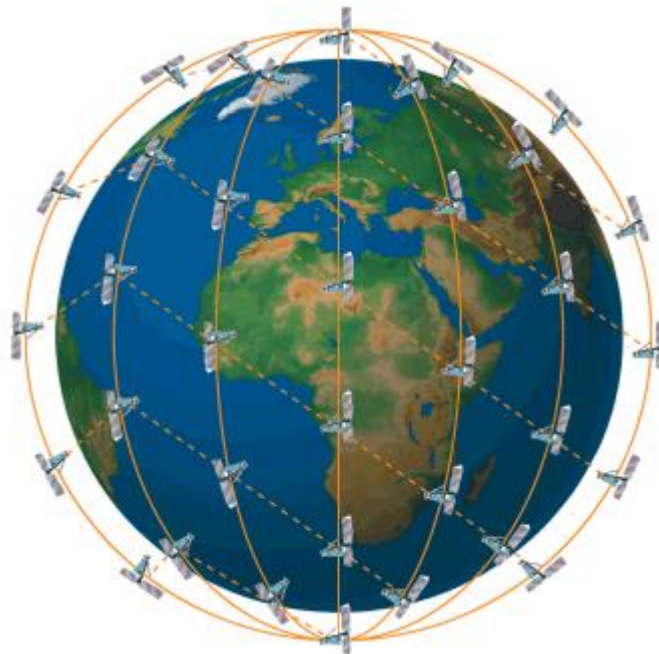
a) Orbit Stasioner

Orbit stasioner merupakan sebuah orbit yang menempatkan satelit untuk terus berada dalam posisinya merujuk pada titik atau lokasi. Satelit yang ditempatkan dalam orbit stasioner umumnya bergerak dari arah timur ke barat mengikuti perubahan rotasi bumi. Orbit stasioner ini diklasifikasikan berdasarkan ketinggiannya menjadi [9]:

1) LEO (*Low Earth Orbit*)

Sateit jenis LEO merupakan satelit yang mempunyai ketinggian 320-800 Km diatas permukaan bumi, sehingga harus mempunyai kecepatan yang sangat tinggi agar tidak terlempar ke atmosfer. Satelit Leo telah banyak digunakan untuk berbagai aplikasi karena jaraknya yang tidak terlalu jauh dan biaya yang murah. Perlu dicatat bahwa saat ini terdapat

lebih dari 8.000 satelit LEO yang mengorbit di sekitar Bumi. Satelit LEO memiliki beberapa keuntungan yakni, *delay* propagasi lebih rendah dibandingkan satelit MEO dan GEO, mudah dioperasikan dengan daya dan antena kecil, dan daya terima lebih besar dan frekuensi bisa dipakai ulang dan beberapa kerugian yakni, jumlah satelit di orbit LEO lebih banyak, perlu biaya operasi dan pemeliharaan yang besar karena jumlah satelit yang banyak, dan umur satelit lebih pendek dibandingkan dengan umur MEO dan GEO. Pada gambar 2.1 menunjukkan konstelasi pada orbit *low earth orbit* (LEO).



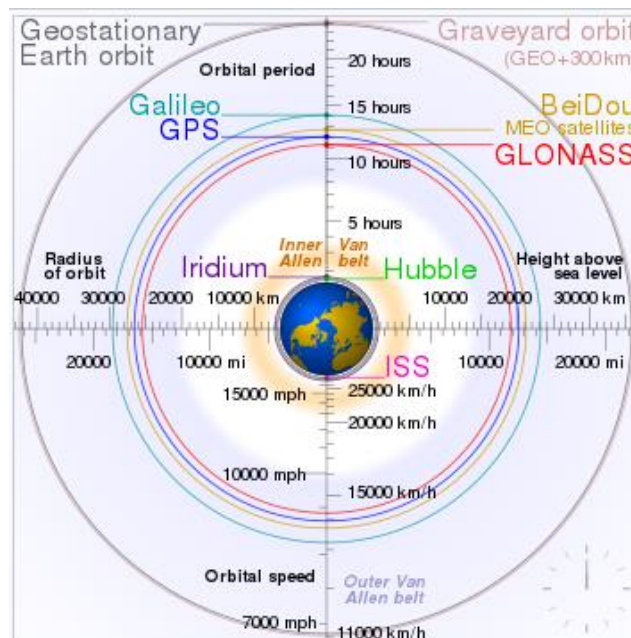
Gambar 2.1 Konstelasi LEO

2) MEO (*Medium Earth Orbit*)

Satelit pada orbit ini merupakan satelit yang mempunyai ketinggian di atas 10000 Km dengan aplikasi dan jenis yang sama seperti orbit LEO. Namun karena jaraknya cukup jauh, jumlah satelit di orbit MEO tidak sebanyak jumlah satelit di orbit LEO. Satelit MEO mempunyai *delay* sebesar 60-80 ms. Keuntungan satelit MEO yakni *delay/latency relative* lebih kecil dibandingkan satelit GEO dan umur satelit MEO lebih panjang dibandingkan satelit MEO dan memiliki kerugian yakni, hanya cocok melayani trafik dengan kanal kapasitas sedang, antena stasiun bumi lebih mahal dan biaya peluncuran lebih mahal dibandingkan satelit GEO.

3) GEO (*Geostationery Earth Orbit*)

Satelit GEO adalah satelit yang mengorbit yang posisinya tetap pada posisi suatu titik di Bumi. Satelit GEO berada 35,786 km di atas permukaan bumi. Lokasi di Kutub Utara dan Selatan tidak dapat dijangkau oleh satelit GEO karena eksplorasi wilayahnya yang terbatas. Keuntungan satelit GEO yakni, stasiun bumi tidak memerlukan alat pelacakan satelit, satu satelit dapat melayani cakupan yang luas, dan umur satelit 15-18 tahun serta kerugiannya yakni, *delay* propagasi 240 ms, biaya investasi satelit capex sekitar Rp. 1,25-2 triliun dan peluncurannya lebih rumit. Pada gambar 2.2 menunjukkan perbandingan ketinggian orbit LEO, MEO, dan GEO serta perbandingan waktu tempuh masing-masing orbit.



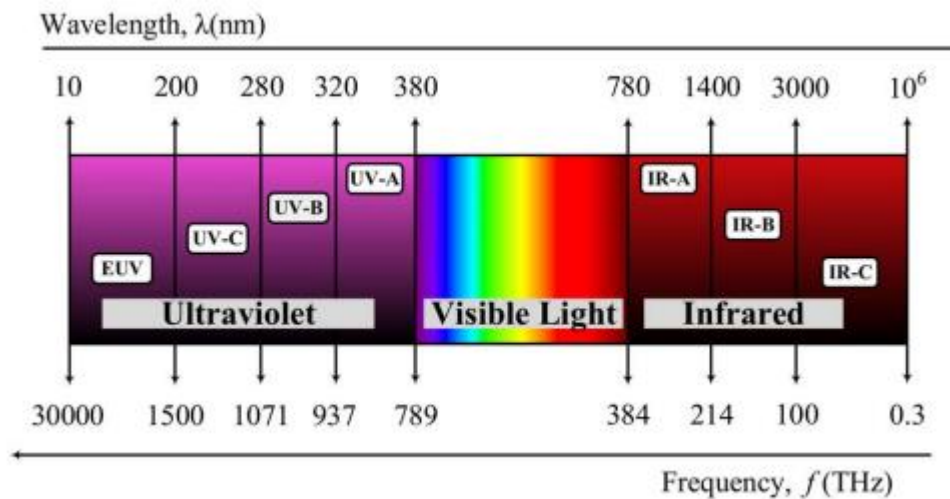
Gambar 2.2 Orbit Satelit LEO, MEO, GEO [9]

2.2.2 *Optical Wireless Communication (OWC)*

Wireless Communication tidak diragukan lagi telah menjadi sebuah utilitas penting dari kehidupan kita sehari-hari. Sebagian besar sistem komunikasi nirkabel yang ada menggunakan teknologi *Radio Frequency (RF)* untuk menyampaikan informasi. Oleh karena itu, dalam beberapa tahun terakhir, telah terjadi peningkatan minat yang signifikan dari kalangan akademisi dan industri dalam teknologi *Optical Wireless Communication (OWC)*. Sekarang sudah

banyak berbagai macam teknologi OWC yang memiliki jangkauan luas dengan berdasarkan hasil dari banyak kasus penggunaan yang dapat mereka layani [11].

Teknologi utama dari *Optical Wireless Communication* (OWC) adalah *Free Space Optic* (FSO), *Visible Light Communication* (VLC), *Optical Camera Communication* (OCC), dan jaringan nirkabel dengan cahaya, yang juga disebut sebagai LiFi. Secara fungsional teknologi yang paling mendekati komunikasi serat optik adalah *Free Space Optic* (FSO) karena menyediakan komunikasi *point-to-point* secara nirkabel pada jarak yang relatif besar hingga puluhan kilometer [12]. *Visible light communication* (VLC) menggunakan keseluruhan frekuensi panjang gelombang 380-780 nm seperti yang terlihat pada gambar 2.3 [13].



Gambar 2.3 Frekuensi Spektrum Cahaya Tampak [13]

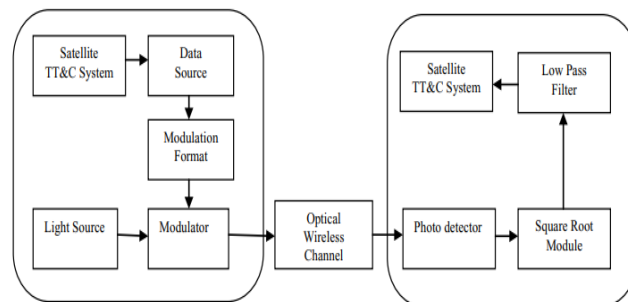
2.2.3 Inter-Satellite Optical Wireless Communication (IS-OWC)

Dalam waktu yang lama kebutuhan untuk mentransfer pesan antara dua titik dengan metode yang handal, aman, dan cepat dalam pengiriman pesan adalah salah satu kebutuhan yang sangat penting. Belakangan, Orang di jaman dahulu menyadari bahwa cara tercepat untuk menyampaikan informasi adalah cahaya. Akibatnya, orang-orang Yunani kuno membuat jaringan menara lampu di puncak gunung untuk menjalin komunikasi. Perangkat semikonduktor, misalnya, dioda laser, adalah salah satu inovasi paling signifikan dalam sains dan teknologi, menghasilkan pancaran cahaya sempit di pita tak terlihat (1280-1620 nm) atau spektrum cahaya tampak (400-700 nm). Banyak frekuensi pembawa optik telah ditentukan dan distandarisasi dalam pita 200 THz (1550 nm) dan 350 THz (850

nm) sebagai pita transmisi untuk komunikasi optik. Tidak seperti pita *Radio Frequency* (RF), pita frekuensi ini bebas dari persyaratan lisensi apa pun di seluruh dunia, juga tidak dapat mengganggu satelit atau peralatan RF lainnya. Band-band ini tersedia secara komersial saat ini dalam sistem *free space optic* (FSO) yang beroperasi dalam rentang panjang gelombang inframerah-dekat (IR) antara sekitar 750 nm dan 1600 nm.

Teknologi IS-OWC merupakan sistem komunikasi nirkabel optik antar satelit yang melibatkan penggunaan tautan antar satelit. IS-OWC adalah media yang efektif untuk menyediakan komunikasi *point-to-point* dengan komunikasi kecepatan data yang tinggi. Sistem IS-OWC menggunakan laser untuk menyediakan koneksi nirkabel dari pemancar ke penerima, yang berisi informasi yang disalurkan melalui *Optical Wireless Communication* (OWC). OWC memiliki keunggulan lebih efisien dalam hal konsumsi daya karena lebih rendah dan efektif dalam komunikasi jarak jauh (*long haul*) [4].

Pada tahun 2001, IS-OWC mulai diluncurkan diantara satelit ARTEMIS dan SPOT FOUR dengan kecepatan masing-masing 50 Mbps ditempatkan di GEO dan LEO. Demonstrasi peluncuran IS-OWC lainnya diadakan pada akhir tahun 2014 untuk membuktikan konsep proyek sistem *European Data Relay Satellites* (EDRS). pada November 2014, transmisi data pertama dilakukan antara Satelit Sentinel 1A di LEO dan satelit Alphasat di GEO, Kemudian pada Desember 2014, kampanye selesai dengan performa link yang melebihi ekspektasi. Pada akhir 2016, EDRS mulai menawarkan layanan LEO ke GEO untuk sekitar 40 tautan optik setiap hari. Berdasarkan data sekarang di tahun 2021, lebih dari 15.000 tautan berhasil diterapkan [14]. Pada gambar 2.4 dapat dilihat gambaran blok diagram sistem IS-OWC pada umumnya.



Gambar 2.4 Blok Diagram IS-OWC [14]

IS-OWC memiliki perhitungan matematis seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.1 [6] :

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

Dimana P_R yaitu *received optical Power*, P_T sebagai *transmitted optical Power*, η_T sebagai *transmitter optical efficiency*, η_R sebagai *receiver optical efficiency*, λ 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 persamaan $(\lambda/4\pi Z)$ adalah persamaan agar dapat menentukan *free space path lose*. Untuk nilai L_T dan L_R didapatkan melalui persamaan 2.2 dan 2.3 sebagai berikut:

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

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

Dimana θ_T sebagai *transmitter pointing error angle* dan θ_R dan *receiver pointing error angle*

Untuk nilai G_T dan G_R didapatkan menggunakan persamaan 2.4 dan 2.5 berikut ini:

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

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

Dimana D_t dan D_r merupakan besar *aperture diameter* yang digunakan. Kemudian, hubungan antara total jumlah daya yang diterima pada penerima dengan *aperture diameter* dapat dinyatakan seperti pada persamaan 2.6 berikut ini:

$$P_R = P_T \left(\frac{D_t D_r}{\lambda Z} \right)^2 \quad (2.6)$$

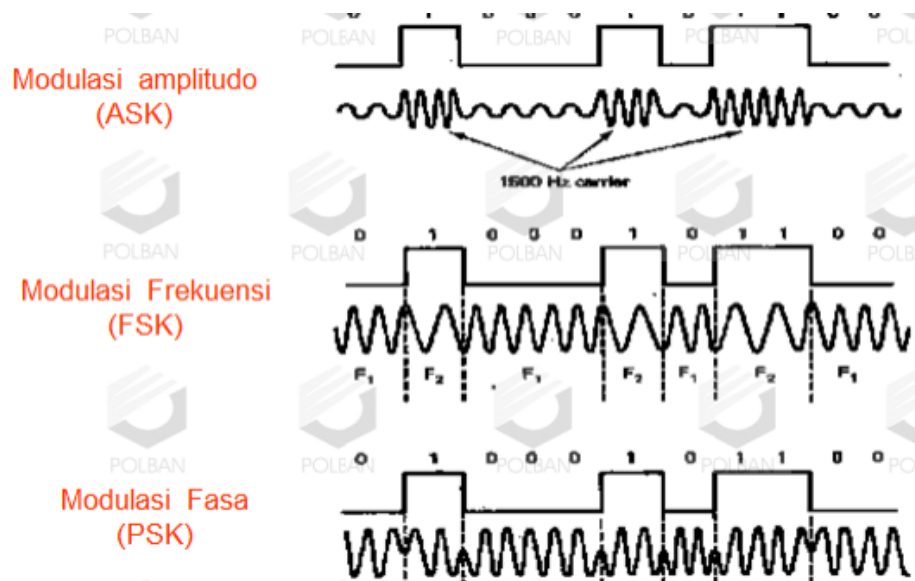
2.2.4 Modulasi Digital

Modulasi adalah suatu proses yang memungkinkan suatu gelombang pembawa (*carrier*) dapat membawa suatu sinyal informasi dimana terdapat parameter-parameter dari gelombang pembawa (*carrier*) tersebut, yaitu fasa, amplitudo, dan frekuensi. Parameter ini dapat disesuaikan dengan sinyal informasi untuk membentuk sinyal termodulasi.

Modulasi digital memiliki ciri-ciri bentuk hasilnya berupa *bit-bit* 0 dan 1. Metode modulasi digital pada dasarnya merupakan modifikasi dari metode modulasi analog. Teknik modulasi digital terbagi menjadi tiga jenis, yaitu *Amplitude Shift Keying* (ASK), *Frequency Shift Keying* (FSK), *Phase Shift Keying* (PSK)

Pada penelitian ini menggunakan modulasi digital 16-QAM karena QAM merupakan gabungan dari modulasi ASK (*Amplitude Shift Keying*) dan PSK (*Phase Shift Keying*). Pada modulasi 16-QAM kecepatan *bit* informasi empat kali lebih besar dari kecepatan simbol ($bit\ rate = baud\ rate \times m\text{-bit}$) karena setiap simbol memiliki empat *bit* $m = 4$ ($2^m = 16$)

Perbedaan gelombang hasil modulasi pada masing-masing modulasi digital dapat dilihat pada gambar 2.5 [15].

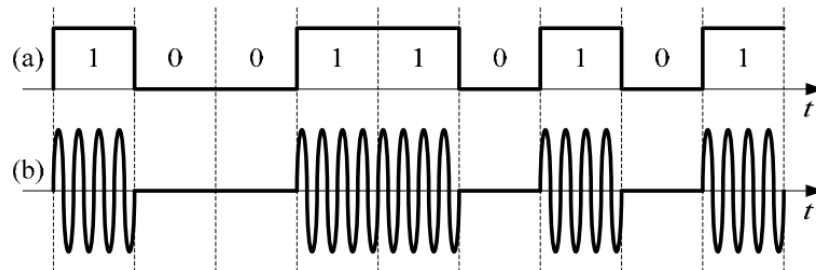


Gambar 2.5 Hasil Modulasi Sinyal Digital [15]

2.2.4.1 Modulasi *Amplitude Shift Keying* (ASK)

Modulasi ASK adalah teknik modulasi dengan menyesuaikan amplitude. Kemunculan frekuensi gelombang pemodulasi pada modulasi ini tergantung dari informasi digital. Dalam hal ini lebih mudah mencapai kecepatan digital yang lebih tinggi dengan teknik ini. Namun, teknik ini menimbulkan pelemahan dan distorsi saat mentransmisikan data jarak jauh, jadi teknik ini paling baik digunakan untuk mentransmisikan data jarak pendek. Faktor derau perlu

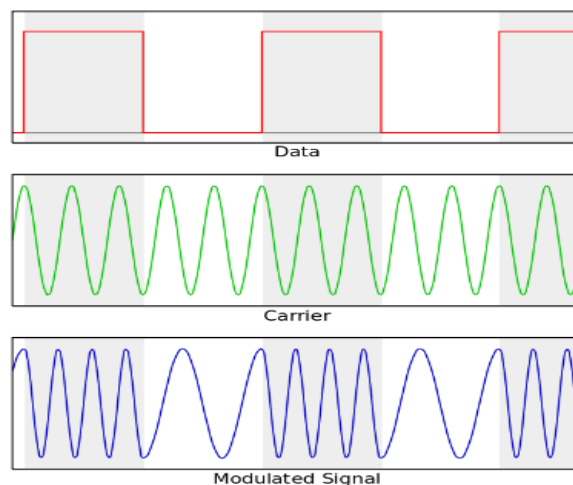
diperhatikan dengan sangat teliti, seperti pada modulasi AM. Kebisingan menekan lonjakan dalam bentuk gelombang multi-level, membuatnya sulit untuk mendeteksi level ambang secara akurat. Gambar 2.6 menunjukkan format modulasi sinyal ASK.



Gambar 2.6 Format Modulasi ASK (a) sinyal biner, dan (b) modulasi sinyal ASK

2.2.4.2 Modulasi *Frequency Shift Keying* (FSK)

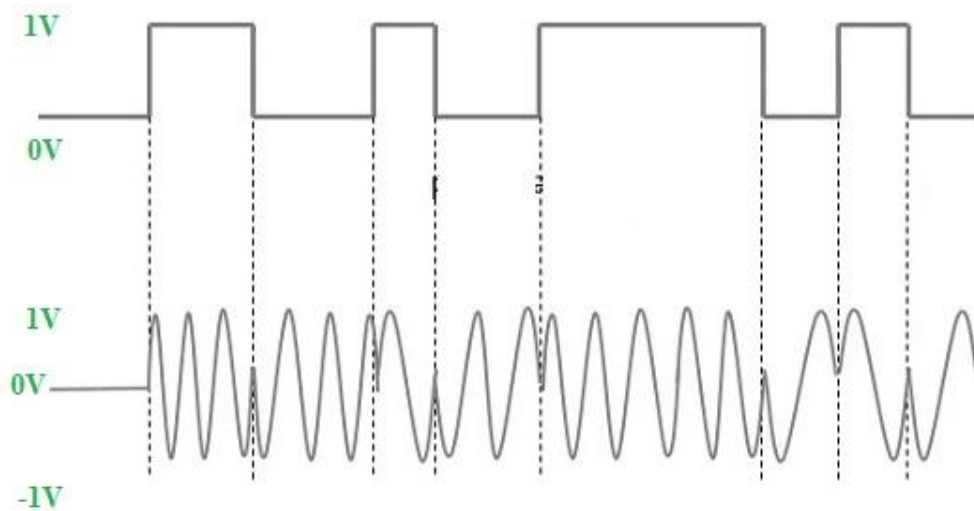
Modulasi FSK adalah teknik modulasi dengan menyesuaikan frekuensi (pergeseran frekuensi). Teknik ini memungkinkan pergeseran pergeseran frekuensi *output* frekuensi pemodulasi oleh gelombang modulasi. Besar frekuensi gelombang pemodulasi berubah-ubah sesuai ada/tidak adanya gelombang modulasi berupa informasi digital. Gelombang pemodulasi digeser ke atas dan ke bawah untuk memperoleh *bit* 0 dan *bit* 1, dimana kondisi ini disebut *mark* dan *space*. Teknik ini memiliki tingkat kesalahan yang sangat rendah dan karena itu biasanya digunakan untuk mengirimkan data dengan kecepatan *bit* yang relatif rendah. Gambar 2.7 menunjukkan hasil sinyal termodulasi FSK.



Gambar 2. 7 Hasil Sinyal Termodulasi FSK

2.2.4.3 Modulasi *Phase Shift Keying* (PSK)

Modulasi PSK adalah teknik modulasi dengan menyesuaikan fase. Modulasi ini mengubah fase frekuensi gelombang modulasi berdasarkan informasi digital. Sudut fasa mengacu pada pemancar dan penerima sehingga 6 teknik ini memerlukan frekuensi yang konstan untuk memudahkan stabilitas pada penerima. Relasi antara dua sudut transmisi digunakan untuk menjaga kestabilan sehingga fasa yang ada dapat dideteksi ketika fasa sebelumnya tidak diketahui. Hasil dari perbandingan kedua fasa tersebut menjadi referensi. Selain itu, teknik ini biasa digunakan dalam transmisi data berkecepatan tinggi. Gambar 2.8 menunjukkan hasil sinyal termodulasi PSK.



Gambar 2.8 Hasil Sinyal Termodulasi PSK

2.2.4.4 Modulasi *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM)

Quadrature Amplitude Modulation (QAM) adalah modulasi yang mengubah amplitudo dan fasa. Skema modulasi M-ary merupakan salah satu sistem transmisi data digital yang paling efisien karena mencapai efisiensi *bandwidth* yang lebih baik daripada teknik modulasi lainnya dan memberikan laju data yang lebih tinggi. QAM juga merupakan skema pengkodean informasi yang membawa data ke dalam sinyal *carrier* dengan variasi dari *amplitude* dan “*quadrature*” *carrier* yang berbeda fasa 90° dengan *main carrier* yang sesuai dengan *input* sinyal, Artinya, amplitudo dan fasa gelombang *carrier* berubah secara bersamaan sesuai dengan informasi yang dibutuhkan untuk ditransmisikan

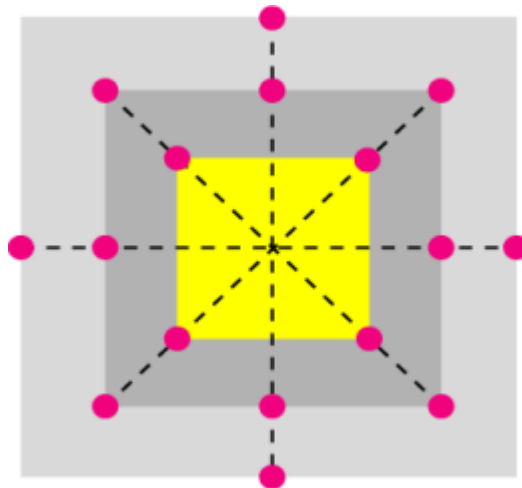
Secara matematis, M-ary QAM dapat ditulis seperti pada persamaan 2.7 berikut ini:

$$S_{kl}(t) = A_k \cos(2\pi f_c t + \theta_l)$$

$$k = 1, 2, \dots, M_1, l = 1, 2, \dots, M_2 \quad (2.7)$$

Dimana $S_{kl}(t)$ adalah sinyal modulasi m-ary qam pada waktu tertentu, A_k adalah amplitudo sinyal, t adalah waktu, θ_l adalah fase sinyal, M_1 adalah jumlah kemungkinan amplitudo *carrier*, M_2 adalah jumlah kemungkinan fasa *carrier*, dan f_c adalah frekuensi *carrier* [16].

M-ary QAM memiliki beberapa bentuk yakni 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM dan 256-QAM. Modulasi 16-QAM adalah skema modulasi yang dapat mengirimkan 4 *bits* tiap simbol sehingga penggunaan *bandwidth* menjadi lebih efisien [17]. 16 QAM adalah suatu cara pentransmisian pada laju *bit-bit* yang lebih tinggi pada saluran/kanal dengan lebar pita yang terbatas. Modulasi 16-QAM adalah modulasi dimana sebuah simbol berisi 4 *bit* data yang akan ditransmisikan. *Symbol* dapat menyatakan 16 nilai yang berbeda (0000, 0001, 0010.....1111) [18]. Pada gambar 2.9 menunjukkan hasil diagram konstelasi 16-QAM.



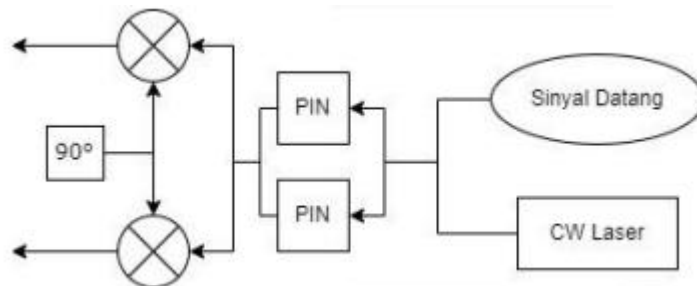
Gambar 2.9 Diagram Konstelasi 16-QAM

2.2.5 Coherent Detection

Pada bagian penerima dari sistem komunikasi optik terdapat teknik pendeteksian salah satunya deteksi koheren. Prinsip utama dari teknik deteksi koheren ini adalah untuk menyediakan penguatan pada sinyal yang datang dengan

melakukan penggabungan atau kombinasi dengan *continuous wave* (CW) laser berupa *local oscillator* (LO). Berdasarkan frekuensi dari *local oscillator*, deteksi koheren pada komunikasi optik dapat dibagi menjadi dua yaitu *homodyne* dan *heterodyne*.

Deteksi *heterodyne* dimana frekuensi dari *local oscillator* tidak sama dengan frekuensi sinyal yang datang. Pada saat sinyal dan *local oscillator* bergabung di photodioda frekuensi baru dihasilkan yang disebabkan oleh perbedaan frekuensi antara sinyal informasi dan frekuensi *local oscillator*. Selanjutnya deteksi *homodyne*, yang digunakan pada tugas akhir ini, mengandung syarat jika frekuensi sinyal yang datang sama dengan frekuensi *local oscillator*. Sinyal yang datang digabungkan dengan *output* dari laser *local oscillator*. Maksud dari penggabungan ini berarti ketika dua gelombang yang mempunyai frekuensi tertentu ω_1 dan ω_2 akan menghasilkan gelombang lain dengan frekuensi yang setara dengan $2\omega_1$, $2\omega_2$, dan $\omega_1 + \omega_2$ [19]. Arsitektur deteksi koheren ditunjukkan pada gambar 2.10 sebagai berikut:



Gambar 2.10 Arsitektur Deteksi Koheren [19]

2.2.6 Continuous (CW) Wave Laser

LASER adalah perangkat yang memancarkan cahaya dimana berkas cahaya bersifat monokromatik. LASER memiliki berkas cahaya yang sempit yang memancarkan cahaya secara tefokus sehingga dapat menjangkau komunikasi jarak jauh.

Continuous Wave (CW) Laser adalah laser gelombang kontinu (gelombang konstan). Akronim ini hanya digunakan untuk mengklasifikasikan laser "CW" secara terpisah dari *pulse* laser. CW Laser memproduksi output yang dapat dicapai dengan berbagai jenis bahan. Bahan-bahan ini termasuk gas, kristal dan berbagai bahan semikonduktor.

2.2.7 Range Panjang Gelombang Optik

Panjang gelombang merupakan sebuah jarak selang satuan berulang dari sebuah pola gelombang. Panjang gelombang optik tipikal dibedakan menjadi 3 wilayah kerja, Seperti pada tabel 2.3 berikut: [20]

Tabel 2. 3 Wilayah Kerja Panjang Gelombang

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

Standarisasi penggunaan panjang gelombang optik berada pada operasi 850, 1310, 1550 nm, yang dibagi menjadi tiga jendela. Ketiga nilai operasi ini dipilih karena sinyal optik dari ketiga panjang gelombang tersebut memiliki kerugian paling kecil saat ditransmisikan dalam serat optik.

Serat *multimode* cocok untuk panjang gelombang 850nm dan 1300nm, sedangkan serat mode tunggal paling baik digunakan untuk panjang gelombang 1310nm dan 1550nm. 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.

2.2.8 Bit Error Rate (BER)

BER merupakan nilai yang menunjukkan perbandingan dari *bit* yang *error* dengan *bit* yang dikirimkan dalam satu kali pengiriman pada sistem transmisi. Standar nilai BER yang digunakan pada sistem komunikasi optik yaitu 10^{-6} . Untuk menghitung parameter analisis BER dalam penelitian ini menggunakan persamaan 2.8 sebagai berikut:

$$BER = \frac{B_E}{B_T} \quad (2.8)$$

dimana B_E adalah jumlah *bit* yang *error* dan B_T adalah jumlah *bit* yang terkirim [21].

2.2.9 Optical 16-QAM Transmitter

Pada perangkat lunak *OptiSystem*, *optical 16-QAM transmitter* mengacu pada blok atau modul yang dapat digunakan untuk mensimulasikan sistem *transmitter* optik yang menggunakan modulasi 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) dan menerapkannya pada jalur ganda (*dual polarization*). Modulasi 16-QAM adalah salah satu bentuk modulasi yang sering digunakan dalam komunikasi optik untuk mentransmisikan data melalui saluran optik dengan menggunakan kombinasi amplitudo dan fase dari cahaya optik.

2.2.10 Optical Coherent 16-QAM Receiver

Pada perangkat lunak *OptiSystem*, *Optical Coherent 16-QAM Receiver* mengacu pada blok atau modul yang digunakan untuk mensimulasikan sistem penerima optik yang menggunakan pendekatan koheren untuk mendemodulasi dan mendeteksi sinyal 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) dengan menggunakan polarisasi ganda (*dual-polarization*). Dengan menggunakan *Optical Coherent 16-QAM Receiver* dalam *OptiSystem*, akan dapat mensimulasikan sistem penerima optik koheren 16-QAM, menganalisis kinerja sistem dalam mendemodulasi dan mendeteksi data optik, serta melihat bagaimana variasi parameter dapat mempengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan.

2.2.11 Universal Digital Signal Processing (DSP)

Universal Digital Signal Processing (DSP) adalah teknik pemrosesan sinyal digital yang luas digunakan dalam berbagai bidang, termasuk komunikasi optik. Namun, jika tertarik pada pemrosesan sinyal digital dalam konteks sistem komunikasi optik, perangkat lunak *OptiSystem* memiliki kemampuan untuk mensimulasikan beberapa teknik DSP yang digunakan dalam sistem komunikasi optik, seperti *equalization*, *demodulation*, dan pengurangan *noise (noise reduction)*.

2.2.12 Electrical Constellation Visualizer

Pada perangkat lunak *OptiSystem*, *Electrical Constellation Visualizer* adalah salah satu fitur atau komponen yang digunakan untuk memvisualisasikan dan

menganalisis konstelasi sinyal digital yang diterima setelah melewati sistem transmisi optik dan *receiver* optik.

2.2.13 Qam Sequence Decoder

QAM *Sequence Decoder* dalam *OptiSystem* digunakan untuk melaksanakan proses demodulasi pada sinyal QAM yang telah diterima melalui jalur transmisi optik atau saluran komunikasi lainnya. Modul ini mengambil sinyal yang telah dimodulasi QAM dan menguraikan sinyal tersebut menjadi data digital yang asli. Dengan menggunakan QAM *Sequence Decoder* dapat memahami kualitas sinyal yang diterima, tingkat kesalahan bit (*bit error rate*), dan kinerja sistem secara keseluruhan setelah sinyal melewati jalur transmisi optik dan mengalami berbagai gangguan seperti *noise*, distorsi, atau efek dispersi.

2.2.14 Paralel to Serial Converter

Pada perangkat lunak *OptiSystem*, *Parallel to Serial Converter* adalah salah satu modul atau komponen yang digunakan untuk mengubah data *paralel* menjadi data *serial* dalam simulasi sistem komunikasi optik. Konversi dari data *paralel* menjadi data *serial* diperlukan ketika data yang ditransmisikan dalam sistem komunikasi optik harus disusun dalam urutan *serial* sebelum dikirimkan melalui saluran optik.

2.2.15 Polarization Splitter

Polarization Splitter adalah komponen optik yang digunakan untuk membagi cahaya polarisasi ganda (*dual polarization light*) menjadi dua jalur cahaya yang terpisah, masing-masing dengan polarisasi yang tegak lurus satu sama lain (polarisasi horizontal dan vertikal). Komponen ini juga dapat digunakan untuk menggabungkan cahaya dari dua jalur polarisasi yang berbeda menjadi satu jalur cahaya polarisasi ganda.

2.2.16 Pulse Generator

Pada perangkat lunak *OptiSystem*, *Pulse Generator* adalah salah satu modul yang digunakan untuk menghasilkan sinyal pulsa dalam simulasi sistem

komunikasi optik. Modul ini memungkinkan Anda untuk menghasilkan sinyal pulsa dengan berbagai bentuk gelombang, frekuensi, durasi, dan amplitudo sesuai dengan kebutuhan simulasi Anda.

2.2.17 *Electrical Gain*

Dalam perangkat lunak *OptiSystem*, *Electrical Gain* adalah salah satu modul atau komponen yang digunakan untuk memodelkan penguatan sinyal listrik dalam simulasi sistem komunikasi optik. Modul ini memungkinkan Anda untuk mensimulasikan penguatan sinyal listrik dalam sistem komunikasi yang melibatkan komponen seperti penguat cahaya (*optical amplifier*) atau fotodetektor dengan responsivitas listrik.

2.2.18 *Mach-Zehnder Modulator*

Mach-Zehnder Modulator beroperasi berdasarkan prinsip interferensi cahaya, di mana sinyal optik dibagi menjadi dua jalur, satu jalur dikendalikan oleh sinyal listrik (sinyal modulasi), dan kedua jalur tersebut dipadukan kembali untuk menghasilkan sinyal modulasi optik.

2.2.19 *Polarization Combiner*

Pada perangkat lunak *OptiSystem*, *Polarization Combiner* adalah salah satu modul atau komponen yang digunakan untuk menggabungkan dua jalur cahaya dengan polarisasi yang berbeda menjadi satu jalur cahaya dengan polarisasi ganda (*dual polarization*). Komponen ini juga dapat digunakan untuk memodelkan penggabungan cahaya dari dua jalur polarisasi yang terpisah.

2.2.20 *Photodetector pin*

Photodetector pin dalam *OptiSystem* memungkinkan untuk mensimulasikan karakteristik dan kinerja dari *photodetector pin* dalam berbagai aplikasi sistem komunikasi optik. Anda dapat mengatur berbagai parameter, seperti responsivitas detektor, *noise*, responsivitas gelombang, dan lainnya untuk menganalisis bagaimana photodetector pin merespons dan mendeteksi sinyal optik dalam sistem.

2.2.21 BER Test Set

BER test set dalam *OptiSystem* berfungsi untuk melakukan pengujian BER dengan mensimulasikan pengukuran *bit error rate* pada sistem komunikasi optik. komponen ini biasanya digunakan untuk menguji kinerja dan keandalan sistem komunikasi optik, terutama dalam kondisi yang berbeda seperti kebisingan, distorsi, atau efek lainnya yang mempengaruhi kualitas sinyal optik.