

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian ini memiliki acuan kepada beberapa jurnal, beberapa contohnya yaitu dalam penelitian yang dilakukan oleh yang dilakukan oleh Tawfik, dkk. tahun 2021 [8] dengan judul “*Performance Analysis and Evaluation of Inter-Satellite Optical Wireless Communication System (IsOWC) from GEO to LEO at Range 45000 km*” melakukan analisis pada sistem IS-OWC dengan jarak 45000 km dengan cara memvariasikan panjang gelombang optik, modulasi yang digunakan serta *photodetector* yang digunakan pada sisi penerima, selanjutnya melihat perbandingan daripada *pulse generator* yang digunakan, yaitu NRZ dan RZ pada sisi *transmitter* [8].

Selanjutnya penelitian Priya sharma dan Santosh meena tahun 2018 [9] dengan judul “*Performance Analysis of Inter-Satellite Optical Wireless Communication (Is-OWC) System by using Channel Diversity Technique*” dimana sistem yang dirancang menggunakan skema *diversity technique* jumlah *optical wireless channel* yang berbeda-beda seperti 2x2, 4x4, 6x6, 8x8 dan 16x16 (*transmitter* dan *receiver* yaitu). Didapatkan bahwa pada jarak 5000 km dengan menggunakan lebih banyak channel pada sistem maka nilai daripada Q-factor juga meningkat dan nilai dari BER berkurang. Juga dengan banyaknya jumlah *transmitter* dan *receiver* antenna maka sinyal yang diterima dari jalur yang berbeda dapat meningkat juga kekuatan penerimaan sinyal meningkat [9].

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Dnzagira, dkk. tahun 2021 [10] dengan judul “*LED-Based Visible Light Intersatellite Communication for Distributed Space Systems*” dimana pada penelitian ini menggunakan LED sebagai sumber cahaya dengan skenario dimana ukuran, *massa*, *power*, dan juga biaya menjadi persyaratan yang sangat kritical utamanya pada *Small Moisture active Passive – Constellation*, konstelasi SmaP-C ini yaitu susunan satelit kecil yang saling berkomunikasi. Pada penelitian ini membahas bagaimana sumber cahaya LED-based visible light ISC sebagai salah satu alternatif yang sesuai utamanya untuk ukuran satelit yang kecil juga mampu dan mendukung berbagai pengaplikasian daripada DSS atau *Distribution space system*, dimana dengan

menggunakan *laser* hal ini tidak memungkinkan untuk pengaplikasian DSS dikarenakan *laser* hanya mendukung *point-to-point communication* sebagai akibat daripada *high precision pointing* dan *extremely narrow field-of-view* (FOV) dalam *requirement* pada sistem komunikasi [10].

Penelitian yang dilakukan Jagana bihari padhy dan Bijayananda Patnaik tahun 2018 [3] dengan judul “*DPSK and Manchester coding for Inter-satellite Optical Wireless Communication systems*” melakukan perancangan sistem dengan menggunakan skema modulasi DPSK dan juga *line coding manchester*, dimana *error* peformansi pada sistem yang disebabkan oleh *differential detection scheme* dan *simple clock extraction* dapat meningkat dan teratasi dengan adanya operasi daripada *manchester coding*. Sistem yang disimulasikan menggunakan data rate 40 Gbps dengan *laser power* 30 dBm. didapatkan bahwa peformansi daripada sistem dalam hal ini BER dan *Q-factor* meningkat dengan adanya *manchester coding* [3].

Selanjutnya penelitian tugas akhir oleh Muhammad Iqbal tahun 2020 dengan judul “*Performansi Sistem OFDM Menggunakan Format Modulasi DQPSK Pada Sistem ISOWC*” melakukan perancangan sistem menggunakan sistem OFDM dan format modulasi DQPSK pada sistem IS-OWC, penelitian dilakukan dengan menghitung *bit error rate*, *quality factor* dan *power link budget* [11].

Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Mahmoud M. A. Eid, dkk. tahun 2020 [12] dengan judul “*Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances*” dilakukan perancangan sistem dengan memanfaatkan dua sumber cahaya yang berbeda yaitu *Continous wave laser* (CW Laser) dan *Vertical cavity surface emitting laser* (VCSEL) dengan *data rate* yang digunakan yaitu 10 Gb/s dan *input power* daripada *light wave* adalah 10 dBm. Setelah dilakukan evaluasi mengenai peformansi daripada sistem IS-OWC yang telah dirancang dan dengan membandingkan sumber cahaya yang digunakan yaitu *CW laser source* dan *VCSEL laser diode* dimana keduanya menggunakan format NRZ dan RZ pada jarak antar satelit sekitar 5000 km didapatkan hasil bahwa *bit error rate* meningkat baik menggunakan skema NRZ dan RZ, dengan meningkatnya jarak propagasi antara satelit maka peformansi daripada sistem menurun dengan adanya jarak transmisi yang lebih jauh. Peformansi daripada sistem IS-OWC sangat baik dengan

menggunakan VCSEL *laser diode* dikarenakan sistem tersebut menawarkan *Q-factor* yang lebih besar dan nilai BER yang lebih kecil [12].

Penelitian yang dilakukan oleh Bhogal, dkk. tahun 2018 [5] dengan judul “*Performance Investigation of CPFSK integrated with OFDM in Inter-satellite OWC System*” melakukan evaluasi daripada performa sistem dalam hal *power* yang diterima, *Q-factor* dengan memvariasi jarak pentransmisiannya, serta *bit rate value*. Penelitian ini menggunakan *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) dikarenakan salah satu faktor yang mempengaruhi performansi daripada sistem IS-OWC adalah *multipath fading*. Oleh karenanya dilakukan perancangan sistem menggunakan teknik modulasi *Continous Phase Shift Keying* (CPFSK) dengan mengintegrasikan OFDM pada cakupan komunikasi jarak jauh pada jarak 8000 km dengan *bit rate* sebesar 10 Gbps menggunakan diameter *aperture* antena penerima sebesar 22 cm dan *operating wavelenght* 1550 nm. Pada perancangan sistem daripada penelitian yang telah dilaksanakan yaitu bertujuan untuk mendapatkan hasil evaluasi dari daya yang diterima oleh sistem serta nilai daripada *Q-factor* yang masih dapat diterima [5]. Hasil dari perancangan sistem dimana integrasi CPFSK menggunakan OFDM pada IS-OWC menunjukkan efesiensi performansi dengan cakupan komunikasi jarak jauh yaitu 8000 km dengan *bit rate* sebesar 10 Gbps serta tingginya nilai dari daya terima (*received power*) juga dengan nilai yang masih dapat diterima berkaitan dengan *Q-Factor*.

Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Adebusola, dkk. tahun 2020 [2] dengan judul “*Performance Evaluation of Inter Satellite Optical Wireless Communication Link at Multiple Optical Wavelengths Using Diverse Modulation Techniques*” dimana melakukan variasi panjang gelombang sinyal optik pada jarak 36000 km dengan *bit rate* sebesar 10 Gbps dan *power input* sebesar 40 dBm, dengan melakukan uji coba beberapa format modulasi yang digunakan pada sistem serta melakukan analisa dan evaluasi mengenai peformansi daripada sistem. Format modulasi yang digunakan antara lain NRZ, RZ, RC, SP, dan GP dengan panjang gelombang yang divariasikan antara lain 750, 850, 950, 1550 dan 1650 nm. Penelitian ini mendapatkan hasil performa daripada NRZ sangat baik jika dibandingkan dengan modulasi lainnya terhadap variasi panjang gelombang sinyal optik yang telah disimulasikan [2].

Kemudian Singh dan Malhotra pada tahun 2021 [6] melakukan penelitian menggunakan *Polarization Division Multiplexing* (PDM) dan *Enhanced detection* pada sistem *Coherent Detection IS-OWC* dengan jarak transmisi 60.000 km serta berhasil mengirimkan 400 Gbps *information signal*. Dari hasil penelitian tersebut juga dapat terlihat bahwa semakin besar *pointing error* yang terdapat pada sistem maka semakin besar pula penurunan performansi pada sistem IS-OWC.

Penelitian oleh Fodil, dkk. tahun 2021 [7] dengan judul “*Pointing Error Angle Effect on the performance of 10 Gbps Ultra-long Satellite Optical Wireless Communication*” yaitu melakukan perancangan sistem menggunakan *operating wavelength* 1550 nm dengan *line coding* NRZ dan RZ untuk selanjutnya memvariasikan *transmitter output power* dan *transmitter pointing error*. Jarak yang disimulasikan yaitu 500-5000 km. Dari hasil percobaan didapatkan bahwa *line coding* NRZ dan RZ memiliki maksimum *pointing error* antara 4,25  $\mu$ rad – 3.9  $\mu$ rad dengan CW *Laser power* sebesar 25 dBm, Didapatkan bahwa *line coding* NRZ memiliki performansi lebih baik dengan menggunakan daya CW *Laser* sebesar 25 dBm, link komunikasi dapat mencapai jarak hingga 4500 km. Disimpulkan bahwa untuk mempertahankan kondisi BER =  $10^{-9}$  maka dari sistem yang diusulkan *link* yang dapat tercapai yaitu dengan jarak 4500, 3500, 2750, dan 2250 nm [7]. Pada Tabel 2.1 menunjukkan beberapa jurnal acuan penelitian yang dilakukan.

**Tabel 2.1 Jurnal Acuan**

No Referensi	Tahun	Tujuan	Diskusi dan Hasil
[2]	2020	Melakukan desain sistem IS-OWC dengan <i>bit rate</i> 10 Gbps dan <i>power input</i> (daya masukan) 40 dBm pada jarak 36.000 menggunakan format modulasi yang berbeda-beda.	Percobaan yang dilakukan yaitu menggunakan variasi panjang gelombang optik dan variasi skema modulasi ( <i>line coding</i> ). Simulasi dilakukan untuk mendapatkan Q-factor dimana pada percobaan ini Q-factor berkurang seiring dengan meningkatnya variasi panjang gelombang yang digunakan
[5]	2018	Melakukan evaluasi performansi sistem IS-OWC pada parameter daya terima dan Q-factor dengan variasi jarak transmisi serta nilai <i>bit rate</i> yang berbeda-beda.	Menggunakan teknik modulasi CPFSK menggunakan kombinasi OFDM pada sistem IS-OWC. Didapatkan hasil efesiensi performa dengan jarak cakupan 8000 km dengan kecepatan 10 Gbps dan nilai <i>received power</i> dan Q-factor yang masih dapat diterima.

**Tabel 2.1 Jurnal Acuan (Lanjutan)**

No Referensi	Tahun	Tujuan	Diskusi dan Hasil
[7]	2021	Melakukan analisis performansi dengan <i>bit rate</i> 10 Gbps pada <i>Low Earth Orbit</i> sistem IS-OWC. Beserta pengaruhnya performansi <i>pointing error angle</i> menggunakan <i>line coding</i> yang berbeda.	Melakukan variasi <i>pointing error</i> pada satelit <i>Low Earth Orbit</i> untuk melihat performansinya sistem IS-OWC, menggunakan <i>line coding</i> NRZ dan RZ dan variasi <i>transmitter output power</i> , didapatkan hasil yang memungkinkan adanya optimisasi untuk mencapai jarak atau <i>link distance</i> yang terbaik.
[6]	2019	Melakukan desain simulasi dan analisis 400 Gbps CO-OFDM pada sistem IS-OWC dengan menggunakan <i>polarization division multiplexing</i> .	Melakukan analisis simulasi <i>bit rate</i> 400 Gbps menggunakan <i>orthogonal frequency division multiplexing</i> dan <i>coherent detection</i> sistem IS-OWC (CO-OFDM) menggunakan skema <i>polarization division multiplexing</i> (PDM). Disimpulkan bahwa performansi sistem menurun seiring dengan meningkatnya efek dari <i>pointing error angle</i> . Hasil penelitian menunjukkan peningkatan kapasitas transmisi dengan degradasi <i>signal to noise ratio</i> sebesar 3,68 dB pada sinyal sisi penerima serta dengan jarak <i>link</i> sejauh 60,000 km.
[13]	2021	Melakukan pemodelan sistem IS-OWC dan simulasi performansi sistem menggunakan PDM-16 QAM pada sistem transmisi IS-OWC serta penggunaan DSP dan <i>coherent detection</i> .	Menggunakan <i>polarization division multiplexing</i> (PDM) 16 QAM sebesar 160 Gbps terhadap IS-OWC <i>link</i> , untuk melihat hasil transmisi komunikasi jarak jauh. Desain penelitian menggunakan teknik <i>coherent detection</i> untuk memitigasi efek daripada <i>system error</i> dan <i>space turbulence (pointing error)</i> . Hasil penelitian menunjukkan bahwa transmisi daripada 160 Gbps information dapat tercapai dengan baik pada jarak 20,000 km dengan nilai BER yang <i>reliable</i> . penelitian menunjukkan bahwa meningkatnya sudut <i>pointing error</i> akan menyebabkan efesiensi daripada sistem menurun.

**Tabel 2.2 Perbandingan Parameter**

Parameter			
Jurnal Bhogal [5] Tahun 2018	Jurnal Adebousola [2] Tahun 2020	Jurnal Singh and Malhotra [6] Tahun 2021	Jurnal Fodil [7] Tahun 2021
<i>Wavelength:</i> 1550 nm	<i>Wavelength:</i> 750,850,950,1550,1650 nm	<i>Wavelength:</i> 850 nm	<i>Wavelength:</i> 1550 nm
Diameter Antena: 22 cm (Tx dan Rx)	Diameter Antena: 15 cm (Tx dan Rx)	Diameter Antena: 15 cm	Diameter Antena: 15 cm
<i>Bit rate:</i> 2 – 12 Gbps	<i>Bit rate:</i> 10 Gbps	<i>Bit rate:</i> 400 Gbps	<i>Bit rate:</i> 10 Gbps
<i>Frequency laser:</i> 193.1 Thz (1550 nm)	<i>Frequency laser:</i> 193.1 Thz (1550 nm)	<i>Frequency laser:</i> 352.7 Thz (850 nm)	<i>Frequency laser:</i> 193.1 Thz (1550 nm)
<i>Daya Laser:</i> -	<i>Daya Laser:</i> 40 dBm	<i>Daya Laser:</i> 30 dBm	<i>Daya Laser:</i> 20, 25, 30 dBm
<i>Distance:</i> 1.000 – 9.000 km	<i>Distance:</i> 36.000 km	<i>Distance:</i> 60.000 km	<i>Distance:</i> 1.000 – 5.000 km
<i>Pointing Error:</i> Tx = 0 $\mu$ rad, Rx = 0 $\mu$ rad	<i>Pointing Error:</i> Tx = 0 $\mu$ rad, Rx = 0 $\mu$ rad)	<i>Pointing Error:</i> Tx = 0 $\mu$ rad, Rx = 1 $\mu$ rad	<i>Pointing Error:</i> Tx = 0, $\mu$ rad Rx = 9 $\mu$ rad

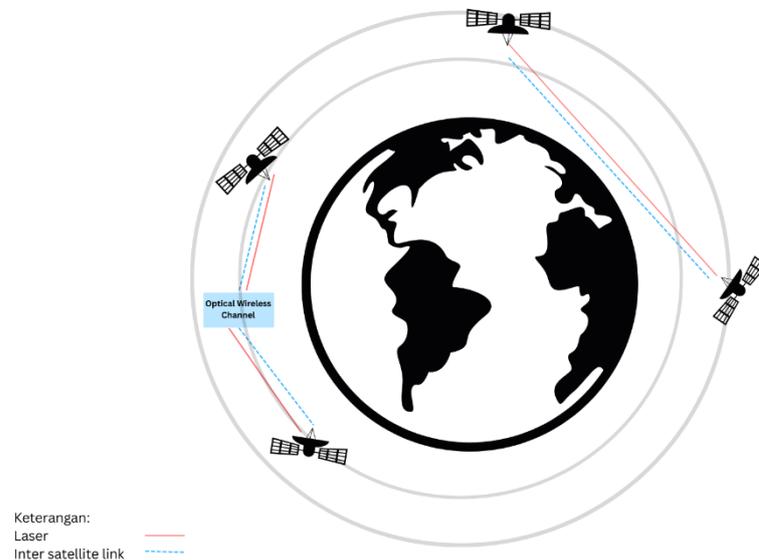
Tabel 2.2 menampilkan beberapa perbedaan parameter yang digunakan dalam melakukan simulasi perancangan sistem IS-OWC, perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya yaitu pada parameter *pointing error transmitter*, nilai daya CW Laser yang digunakan 0 dBm dan jarak tempuh link komunikasi 500 hingga 5000 km. penelitian ini juga melakukan pengukuran performansi sistem dengan menggunakan parameter ukur *Error Vector Magnitude*, *Symbol Error Rate*, *Bit Error Rate* dan daya terima OWC dari sistem IS-OWC tersebut.

## 2.2 DASAR TEORI

### 2.2.1 Intersatellite Link

*Intersatellite Link* (ISL) adalah hubungan yang terjadi antara dua atau lebih satelit yang saling berkomunikasi satu sama lain dengan menggunakan sinyal RF. Seiring perkembangan waktu kebutuhan akan *bitrate* yang lebih besar dan efisien

menjadi salah satu faktor yang mulai dipertimbangkan maka dari itu diperkenalkan *optical link*.



**Gambar 2.1 Ilustrasi *Intersatellite Optical Wireless Communication***

Pada Gambar 2.1 terlihat ilustrasi bagaimana *Intersatellite Optical Wireless Communication* pada LEO dan MEO, dimana terjadinya hubungan komunikasi antar satelit dengan ketinggian orbit rendah dan komunikasi antar satelit pada orbit menengah menggunakan cahaya *Laser* sebagai sumber cahaya dan *Optical Wireless Channel* sebagai media pentransmisian pada sistem IS-OWC.

Komunikasi antara satelit yang menggunakan optik terjadi pada tahun 2001 antara satelit ARTEMIS dan SPOT 4 dengan kecepatan 50 Mbps dimana satelit ini terletak pada orbit GEO dan LEO, Selanjutnya pada tahun 2014 transmisi data pertama kali dilakukan antara Sentinel 1A pada orbit LEO dan satelit Alphasat pada orbit GEO, pada tahun 2016 *European data relay system* (EDRS) mulai menawarkan layanan LEO to GEO dengan menggunakan 40 link optik dalam satu hari, dimana pada tahun 2021 15000 link optik berhasil diimplementasikan [8]. EDRS sendiri adalah konstelasi satelit pada orbit GEO yang bertugas melakukan *relay* informasi dan data antara satelit, pesawat luar angkasa, stasiun bumi dan lainnya dimana menyediakan layanan transmisi data dalam jumlah besar serta dengan mengurangi waktu pengiriman data atau *time delay* yang kecil [14].

### 2.2.1.1 Komunikasi Satelit

Komunikasi antar satelit dapat terjadi ketika satelit melakukan komunikasi dengan stasiun bumi sehingga komunikasi atau informasi tersebut dapat diteruskan kepada satelit lainnya [15]. Pertukaran informasi antar satelit pada IS-OWC menggunakan sinar *laser* sebagai sumber cahaya dan panjang gelombang optik sebesar 1310 nm dan 1550 nm. Metode komunikasi IS-OWC menggunakan komponen optoelektronik untuk melakukan proses konversi *Radio Frequency* (RF) terhadap konversi optik menggunakan *Laser* dan *modulator* optik pada sisi *transmitter*, kemudian melakukan proses demodulasi pada sisi *receiver* menggunakan *pin photodetector*.

Penelitian ini mensimulasikan komunikasi satelit yang terjadi antara satelit satu dengan satelit lainnya. Dilakukan percobaan menggunakan 2 satelit yang berada pada orbit yang sama yaitu orbit rendah. Kemudian dilanjutkan dengan mensimulasikan sistem menggunakan 2 satelit lainnya pada ketinggian orbit menengah, sehingga pada hasil simulasi penelitian ini, komunikasi sistem terjadi pada orbit yang sama. Hasil pengukuran performansi dari sistem dapat terlihat pada parameter *Error Vector Magnitude*, *Bit Error Rate*, dan *Symbol Error Rate*.

### 2.2.2 Intersatellite Optical Wireless Communication (IS-OWC)

*Intersatellite Optical Wireless Communication* adalah sistem komunikasi antara satelit dengan menggunakan sinyal optik dan *wireless* yang akan menghubungkan antara satelit satu dan lainnya baik berada pada orbit yang sama atau berada pada yang berbeda sebagai contoh *Low Earth Orbit to Geostationary Earth Orbit* dan *Low Earth Orbit to Medium Earth Orbit*. Pada IS-OWC system digunakan sumber cahaya *LASER* sebagai sinyal pembawa atau *carrier signal* untuk mentransmisikan sinyal tersebut sistem bergantung pada beberapa parameter seperti panjang gelombang cahaya *laser*, *transmitted power*, jenis dan teknik modulasi yang akan digunakan, ukuran daripada antena baik pada *transmitter* dan *receiver* [9]. *Received Power* pada *Inter-satellite Link* (ISL) didefinisikan oleh *Friis transmission equation*:

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

Keterangan:

$P_R$  = Power received (dB)

$P_T$  = Transmitter power (dB)

$\eta_T$  = Transmitter optics efficiency

$\eta_R$  = Receiver optics efficiency

$\lambda$  = wavelength

$D$  = Distance between satellite

$G_T$  = Transmitter telescope/antenna gain (dB)

$G_R$  = Receiver telescope/antenna gain (dB)

$L_T$  = Transmitter pointing loss factor (urad)

$L_R$  = Receiver pointing loss factor (urad)

Transmitter gain dapat dihitung dengan menggunakan formula berikut [2]

$$G_T = \left(\frac{\pi D_T}{\lambda}\right)^2 \quad 2.2$$

Dimana  $D_T$  adalah diameter daripada *transmitter telescope*, selanjutnya *Receiver gain* dapat dihitung dengan menggunakan formula berikut:

$$G_R = \left(\frac{\pi D_R}{\lambda}\right)^2 \quad 2.3$$

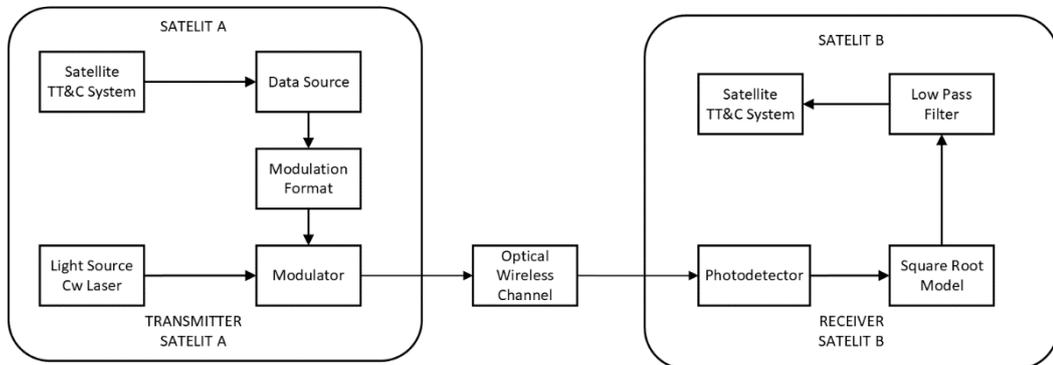
Dimana  $D_R$  adalah diameter daripada *receiver* daripada *telescope*, selanjutnya *transmitter pointing loss factor* dapat dihitung dengan menggunakan formula:

$$T_I = e^{-T_G \theta_T^2} \quad 2.4$$

Untuk *receiver pointing loss factor* dengan formula:

$$R_I = e^{-R_G \theta_R^2} \quad 2.5$$

Dimana  $\theta_T$  dan  $\theta_R$  adalah *transmitter* dan *receiver pointing error*.



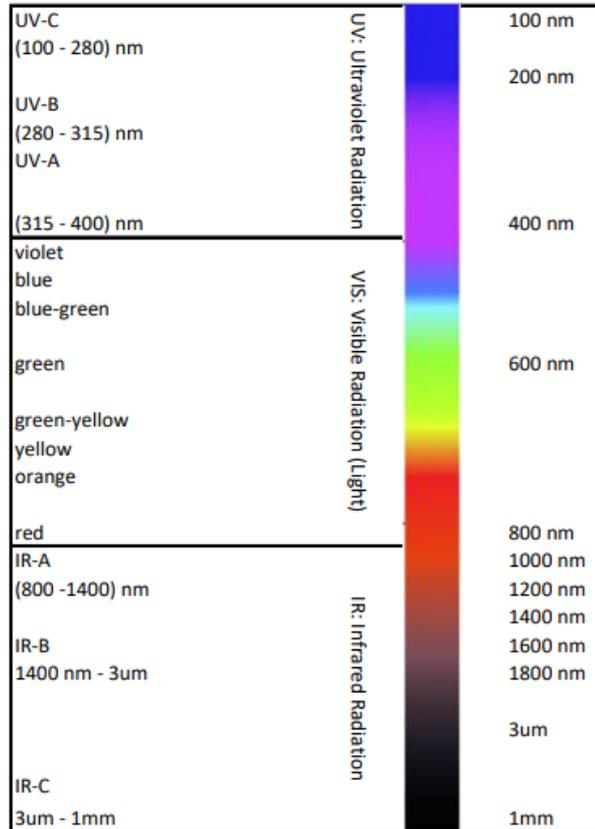
**Gambar 2.2 Blok Diagram Intersatellite Optical Wireless Communication**

Pada Gambar 2.2 terlihat bahwa sistem IS-OWC terdiri dari bagian *transmitter*, *optical wireless channel* dan bagian *receiver*. Pada bagian *telemetry, tracking and command system* satelit a untuk selanjutnya memasuki *data source* selanjutnya *modulation format* dan memasuki blok *modulator*. Pada blok *modulator* juga terdapat masukan daripada sumber cahaya yang digunakan dalam hal ini digunakan *CW Laser*. Setelahnya data yang akan dikirimkan memasuki bagian *optical wireless channel* dimana berfungsi sebagai media pentransmisi yang digunakan pada sistem IS-OWC. Pada bagian *receiver* satelit b terdapat blok diagram *photodetector*, yang berfungsi mengubah sinyal cahaya menjadi sinyal listrik, *photodetector* yang digunakan adalah *Avalanche Photo Diode (APD)* yang kegunaannya sangat ideal dalam sistem IS-OWC dimana pada pentransmisi jarak jauh mengakibatkan berkurangnya intensitas daripada cahaya transmisi [2].

Dalam praktiknya IS-OWC adalah bagian daripada teknik transmisi secara *wireless* terhadap berbagai jenis dan tipe daripada jaringan (*network*). Dalam terminologinya disebut sebagai *Free space optic technology*, beberapa contohnya antara lain *wireless optical communication, fiber-less* dan *laser communication*. Dimana teknologi-teknologi ini menggunakan *fiber optic* dalam proses komunikasinya dikarenakan penggunaan cahaya dalam membawa informasi. Dengan keunggulan tersebut maka *FSO link* dapat memberikan layanan pada berbagai jenis aplikasi dalam hal ini pertukaran informasi seperti (*internet, video, games, data*) antara dua titik yang berbeda dan dimana saja pada permukaan bumi menggunakan *optical wireless satellite (IS-OWC) network* [7]. Dengan segala keunggulannya sistem *free space optical wireless communication* memiliki beberapa kekurangan, adapun kekurangannya yaitu dimana hujan, kabut, dan dengan tingginya jarak propagasi akan sangat berdampak pada sistem tersebut [16].

*Intersatellite communication* menawarkan ukuran yang kecil serta berat yang ringan dengan *bandwidth* dan *data rate* yang lebih tinggi, serta harga yang murah dan imunitas yang lebih tinggi terhadap interferensi [17]. Selanjutnya salah satu tantangan daripada IS-OWC adalah *misspointing* antara *transmitter* dan *receiver* yang disebabkan oleh beragam jenis parameter, utamanya yang berada pada satelit contohnya *satellite vibration* yang dihasilkan karena adanya *space turbulence* dan *subsystem* satelit yang memperburuk *bit error rate* [7].

### 2.2.2.1 Optical spectrum



**Gambar 2.3 Optical Radiation Wavelength**

Pada Gambar 2.3 *Optical spectrum* terbagi menjadi 3 bagian, yaitu *Ultraviolet radiation* dengan rentang 100 nm - 400 nm, kemudian *visible light* atau sumber cahaya tampak dengan rentang cahaya 400 nm – 800 nm, dan terakhir ada *infrared radiation* dengan rentang panjang gelombang optik adalah 800 nm – 1 mm [18]. Pada penelitian tugas akhir ini akan dilakukan variasi panjang gelombang cahaya dengan rentang 1310 dan 1550 nm terhadap sistem IS-OWC. *Optical spectrum* secara umum didefinisikan sebagai *encompass electromagnetic radiation* (meliputi radiasi elektromagnetik) dengan panjang gelombang berkisar antara 10 nm sampai  $10^3 \mu\text{m}$  atau frekuensi berkisar antara 300 Ghz – 3000 Thz.

### 2.2.2.2 IS-OWC Transmission Design

Dalam melakukan desain daripada sistem IS-OWC terdapat beberapa bagian yaitu *transmitter*, *medium* dan bagian *receiver*. *Transmitter* terbagi dalam beberapa bagian atau *subsystem*. Sumber data adalah *subsystem* pertama. *Subsystem* ini dibutuhkan sebagai sarana dalam mengirimkan informasi yang dibutuhkan.

Biasanya data tersebut berasal dari sistem *telemetry, tracking and command* (TT&C) yang ada pada satelit data ini berbentuk data digital. *Subsystem* kedua adalah format modulasi yang akan digunakan, yaitu menggunakan *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) *sequence generator* dan *multiplexer orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) untuk menggabungkan beberapa sinyal menjadi satu output medium transmisi. Selanjutnya *Continuous Wave Laser* atau *CW Laser* akan menjadi *subsystem* ketiga, daya yang digunakan adalah 0 dBm, dalam proses mendesain *IS-OWC satellite transmitter*, *CW Laser* sendiri adalah dimana keluaran atau *output* daripada sinyal *Laser* tersebut adalah *non-stop* dan *non-modulated*. *Laser* akan digunakan dalam perancangan *system* kali ini dikarenakan kemampuannya dalam melakukan transmit jarak jauh. Selanjutnya komponen terakhir atau keempat dalam *subsystem transmitter* adalah *Mach Zehnder Modulator*. Dimana *MZ modulator* sendiri adalah sebuah *optical modulator* yang operasinya bergantung pada *output* keluaran dari *pulse generator* untuk dapat melakukan variasi intensitas sumber cahaya yang datang dari *Laser*.

#### **2.2.2.3 Optical Wireless Channel**

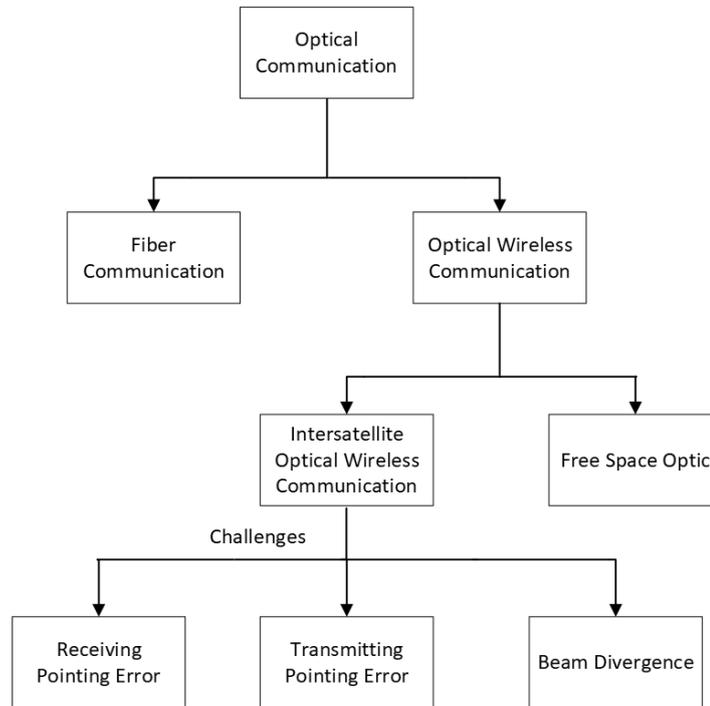
Ruang yang diapit oleh dua satelit yang terhubung disebut sebagai *Optical Wireless Channel* (OWC), dimana dalam artian lainnya sebagai media atau kendaraan yang mentransmisikan atau merambatkan cahaya yang dipancarkan. Pada *software Optisystem* pada setiap sisi dari dua satelit yang diapit oleh *optical transmitter* memiliki ukuran antena pengirim dan antena penerima *optical receiver* sebesar 15 cm Selanjutnya pada penelitian ini akan melakukan simulasi dimana *transmitter* antena memiliki kondisi *pointing error* sebesar 0, 1, 2, 3, 4 dan 5  $\mu$ rad. *Line of Sight* adalah koneksi antara *transmitter* dan *receiver* dalam melakukan perambatan informasi (*propagation*) dari titik satu ke titik lainnya.

#### **2.2.2.4 IS-OWC Receiver Design**

Selanjutnya pada sisi *receiver Erbium Doped Fibre Amplifier* atau EDFA sebagai *amplifies* daripada sinyal optik sebelum sinyal diterima oleh *pin photo detector* yang terdapat didalam subsistem *coherent detection*. Pada perancangan *receiver design* juga ditambahkan *local oscillator*. Setelah melewati subsistem deteksi koheren maka akan memasuki komponen OFDM *demodulation*, pada komponen ini dapat terlihat *symbol error rate* (SER) dan *error vector magnitude*

(EVM) dari data yang diterima. Kemudian dilanjutkan dengan komponen QAM *sequence generator* dan pada komponen terakhir terdapat BER *test set*, yang berfungsi untuk menampilkan *bit errors* dan nilai dari *bit error rate*.

### 2.2.2.5 Pointing Error



**Gambar 2.4 Tantangan *Optical Wireless Communication* [2]**

Gambar 2.4 menunjukkan bahwa *pointing error* adalah salah satu tantangan yang dihadapi dalam sistem IS-OWC dimana terjadinya ketidaksejajaran atau *misspointing* antara *transmitter* dan *receiver* [7]. Adanya ketidaksejajaran ini akan mengakibatkan *signal loss* [19]. Pada tugas akhir ini akan dilakukan percobaan dimana terdapat variasi *pointing error* yang berbeda-beda pada sisi *transmitter* dan kondisi *direct* pada sisi *receiver* atau 0  $\mu$ rad.  $L_T$  dan  $L_R$  merepresentasikan *pointing loss factor* pada sisi *transmitter* dan *receiver* dengan menggunakan formula sebagai berikut:

*Transmitter pointing loss factor:*

$$L_T = \exp(-G_T \theta_T^2) \quad 2.6$$

*Receiver pointing loss factor:*

$$L_R = \exp(-G_R \theta_R^2) \quad 2.7$$

Keterangan:

$G_T$  = *Transmitter telescope/antenna gain (dB)*

$G_R = \text{Receiver telescope/antenna gain (dB)}$

$L_T = \text{Transmitter pointing loss factor (urad)}$

$L_R = \text{Receiver pointing loss factor (urad)}$

$\theta_T = \text{Transmitter pointing error angle (urad)}$

$\theta_R = \text{Receiver pointing error angle (urad)}$

### **2.2.3 Low Earth Orbit**

*Low Earth Orbit* (LEO) memiliki ketinggian antara 160 km dan 2000 km serta memiliki periode rotasi sekitar 90 menit. Dimana posisi daripada satelit-satelit ini dapat mengubah posisinya relatif terhadap stasiun bumi. Untuk mencapai *global coverage* dibutuhkan sejumlah besar satelit agar konektivitas secara berkelanjutan dapat terjaga [20]. Menurut buku Sistem komunikasi satelit, satelit LEO berada pada ketinggian 320 - 800 Km dengan kecepatan edar satelit mencapai 27,359 Km/h, sedangkan menurut kenneth ketinggian *Low earth orbit* (LEO) adalah berkisar antara 700-3000 km [21]. Dalam pengaplikasiannya satelit LEO biasanya digunakan dalam *remote sensing* dan peramalan cuaca dikarenakan jaraknya yang tidak terlalu jauh dekat permukaan bumi [22]. Dalam beberapa tahun terakhir satelit pada orbit LEO dimanfaatkan sebagai sarana komunikasi dengan cara menempatkan sebagian besar satelit sehingga membentuk konstelasi yang dimana satelit tersebut dapat saling terhubung satu dan lainnya sehingga dapat memberikan layanan seperti internet.

### **2.2.4 Medium Earh Orbit**

*Medium Earth Orbit* (MEO) memiliki jarak antara 5000 – 15000 km dari permukaan bumi. Satelit yang berada pada orbit ini memiliki *delay* sebesar 60-80 ms [22]. Keuntungan lainnya dari penggunaan satelit MEO adalah pemakaian ulang frekuensi yang lebih baik daripada satelit *Geostationary Earth Orbit* (GEO) serta memiliki sudut pandang yang lebih baik jika dilihat dari stasiun bumi. Selanjutnya beberapa kekurangan daripada satelit yang berada pada orbit ini adalah biaya peluncuran yang cukup mahal. Hanya dapat melayani trafik dengan kanal berkapasitas sedanf dan membutuhkan antena stasiun bumi yang lebih kompleks.

### **2.2.5 Geostationary Earth Orbit**

Satelit *Geostationary Earth Orbit* (GEO) adalah satelit yang posisi edarnya tepat dengan posisi suatu titik di bumi (stasiun bumi) waktu edar satelit ini sama dengan waktu rotasi bumi dikarenakan posisinya yang sejajar. Satelit GEO mempunyai jarak 35.789 km dari permukaan bumi, keuntungan penggunaan satelit ini yaitu dalam melakukan proses *tracking* pelacakan stasiun bumi tidak perlu mengikuti pergerakan dari satelit tersebut. Beberapa kerugian daripada penggunaan satelit GEO yaitu delay propagasi yang cukup tinggi (240 ms), biaya investasi yang besar serta stasiun bumi memerlukan diameter antena yang besar untuk menerima informasi yang dikirimkan oleh satelit [22].

### **2.2.6 Optisystem**

*Optisystem* adalah sebuah *software* simulasi optik yang digunakan untuk melakukan desain, simulasi dan optimalisasi secara virtual untuk berbagai jenis *optical link* yang terdapat pada *physical layer* dari berbagai spektrum jaringan optik. *Optisystem* didasarkan pada pemodelan realistik sistem komunikasi serat optik, selain itu *software* ini dapat membuat simulasi yang kuat dan mendekati aslinya serta komponen-komponen didalamnya yang tersusun secara hierarkis [23].

### **2.2.7 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)**

*Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) adalah format modulasi yang menggabungkan dua *carriers* dimana *amplitudanya* dimodulasi secara independen dengan frekuensi optik yang sama dan fasanya terpisah sejauh  $90^\circ$ , *carriers* ini disebut sebagai *in-phase carriers* (I) dan *quadrature-phase carriers* (Q) [24]. Sinyal QAM menggunakan dua pembawa (*carrier*) kuadratur  $\cos\pi t$  dan  $\sin 2\pi t$ , dengan masing-masing dimodulasikan oleh bit informasi. QAM adalah gabungan daripada modulasi *Phase Shift Keying* (PSK) dan *Amplitude Shift Keying* (ASK), hal ini digunakan ketika membutuhkan modulasi dengan kecepatan tinggi [25] persinyalan QAM *amplitude* dan *phase* akan membawa informasi, sedangkan pada *Pulse Amplitude Modulation* (PAM) dan *Phase Shift Keying* (PSK) hanya *amplitude* atau *phase* yang akan membawa informasi [26]. Sinyal QAM dapat dituliskan sebagai berikut:

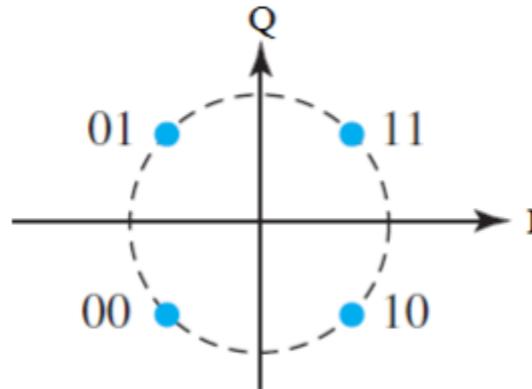
$$s(t) = I(t). \cos \omega_c t + Q(t). -\sin \omega_c t \quad 2.9$$

Keterangan:

$I(t)$  = amplitude kanal inphase sinyal kosinus ( $A. \cos \theta$ )

$Q(t)$  = amplitude kanal quadrature phase sinyal sinus ( $A. \sin \theta$ )

Konstelasi diagram daripada 4 QAM dapat terlihat pada gambar berikut:



**Gambar 2.5 Diagram Konstelasi 4 QAM**

Pada Gambar 2.5 terlihat bahwa terdapat 2 bit dalam 1 simbol pada konstelasi diagram 4-QAM. Modulasi 4 QAM adalah dimana satu simbolnya memuat 2 bit data yang akan ditransmisikan, seperti yang terlihat simbol ini menyatakan 2 nilai yang berbeda. QAM mentransmisikan laju bit bit yang lebih tinggi pada saluran atau kanal dengan lebar pita yang terbatas [27]. QAM juga dapat dipertimbangkan menjadi perpanjangan *logic* daripada *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK). Hal ini dikarenakan QAM juga memiliki dua *amplitude* secara independen termodulasi *carrier* dalam *quadrature* [28].

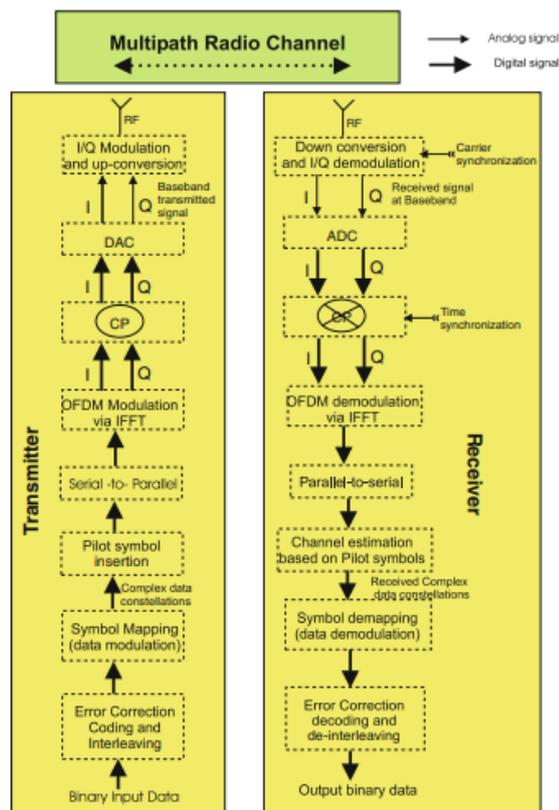
### 2.2.8 Multiplexing

*Multiplexing* adalah sebuah teknik penggabungan beberapa *input* sinyal informasi untuk kemudian ditransmisikan kedalam satu kanal transmisi untuk memaksimalkan efisiensi dari kanal tersebut. Dalam saluran transmisi terdapat beberapa cara dalam memanfaatkan *bandwidth* yang tersedia, metode pertama yaitu dengan membagi *bandwidth* spektrum frekuensi yang tersedia kedalam beberapa subset frekuensi dimana masing-masing *subset* tersebut dapat secara simultan dapat digunakan pada saluran transmisi dan melakukan alokasi frekuensi band kepada

*input channel* yang membutuhkan proses *multiplexing*. Metode kedua yaitu dengan melakukan alokasi semua *bandwidth* yang tersedia kepada masing-masing kanal untuk *fixed discrete time periode* (periode waktu diskrit tetap). Metode pertama dikenal sebagai *Frequency Division Multiplexing* (FDM) dan metode kedua disebut sebagai *Time Division Multiplexing* (TDM) [29].

### 2.2.9 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

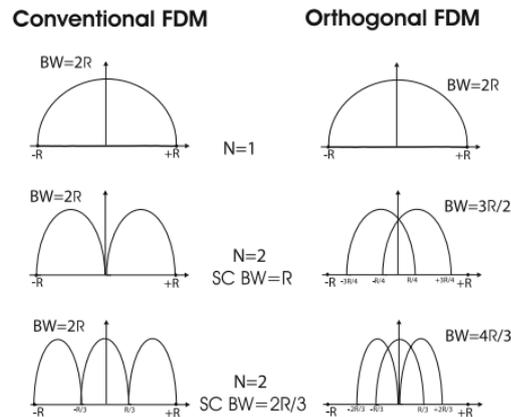
*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) adalah sebuah bentuk daripada *multi carrier transmission* dimana semua *subcarrier* berbentuk *orthogonal* antara satu dan lainnya. OFDM dapat menyediakan kapabilitas *high user data rate transmission* dengan kompleksitas dan ketepatan yang wajar, serta penggunaan spektrum yang sangat efisien sehingga sangat berguna dalam komunikasi [30].



**Gambar 2.6 OFDM Transceiver Model**

Pada Gambar 2.6 dapat terlihat *transcieiver system* daripada OFDM, dimana pada model ini *Forward Error Control/ Correction* (FEC) *coding* dan *interleaving* ditambahkan kedalam sistem untuk mempertahankan kondisi yang kokoh (*robust*)

dimana hal ini diperlukan untuk melindungi adanya *burst error*. Sebuah sistem OFDM dengan tambahan *channel coding* dan *interleaving* biasanya disebutkan sebagai *coded OFDM* (COFDM). Dapat terlihat bahwa terdapat bagan *transmitter* dan *receiver*, dengan *binary input* data sebagai masukan dan selanjutnya pada sisi penerima keluaran akan berupa nilai *binary*.



**Gambar 2.7 Perbandingan Konvensional FDM dan Orthogonal FDM**

Pada Gambar 2.7 menunjukkan perbandingan daripada *Frequency Division Multiplexing* (FDM) secara konvensional dan *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*. dimana pada OFDM, *Subcarrier Bandwidth* (SC BW) memiliki *spectral efficiency* yang dapat tercapai dengan mempertahankan keadaan orthogonalitas antara *subcarrier*. OFDM adalah salah satu teknik komunikasi *wireless* yang populer dikarenakan penempatan *bandwidth* dalam melakukan proses pentransmisian digunakan secara efisien dan sinyal hasil transmisi dapat didistribusikan secara efektif pada *multipath fading channel* [31].

### 2.2.9.1 Keunggulan OFDM System

Beberapa keunggulan dari adanya sistem OFDM antara lain:

1. Mengatasi *Intersymbol Interference* dan mengurangi *Intercarrier Interference*, dimana dengan menggunakan *Cyclic Prefix* atau *cyclic extension* daripada OFDM *symbol* biasa disingkat (CP). CP sendiri memberikan beberapa keuntungan dimana menempati *guard interval* yang selanjutnya menghilangkan efek daripada ISI atau *intersymbol interference* dan mempertahankan *orthogonality* sehingga menghilangkan secara keseluruhan *intercarrier interference*.

2. Adanya *Spectral Efficiency* pada sistem OFDM, *spectral efficiency* yang lebih baik dapat tercapai dengan mempertahankan *orthogonality* antara *subcarrier*. *Orthogonality* dapat memungkinkan OFDM untuk mengatur *subcarrier* dengan sedemikian rupa sehingga *sideband* daripada individual *carrier* saling *overlap* dan tetap mempertahankan sinyal yang diterima pada sisi *receiver* tanpa terganggu oleh interferensi daripada *Intercarrier Interference* (ICI).

#### 2.2.9.2 Kekurangan OFDM System

Beberapa kekurangan yang ada pada sistem OFDM adalah:

1. *Strict synchronization requirement*, OFDM sangatlah sensitif terhadap *error* sinkronisasi terhadap waktu dan frekuensi. Demodulasi daripada sinyal OFDM dengan *frequency offset* dapat mengakibatkan tingginya *bit error rate*. Sehingga untuk meningkatkan performansi OFDM link, sinkronisasi yang akurat sangatlah penting. Sinkronisasi dapat dilakukan dengan memperhatikan tiga faktor yaitu: *symbol*, *carrier frequency*, dan *sampling frequency synchronization*.
2. *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR), *peak to average ratio* proposional terhadap jumlah *subcarrier* yang digunakan pada OFDM system. Sebuah sistem OFDM dengan jumlah *subcarrier* yang banyak akan mengakibatkan besarnya PAPR ketika *subcarrier* menambahkan koheren. Besarnya PAPR yang ada pada sistem akan mengakibatkan implementasi daripada *digital to analog converter* dan *analog to digital converter* sangatlah sulit. Teknik *clipping* dan *windowing* dapat mengurangi PAPR dengan cara *non-linear distortion* pada sinyal OFDM [30].

#### 2.2.10 Low Pass Filter (LPF)

*Low Pass Filter* (LPF) adalah jenis *filter* yang meredam atau mengurangi spektrum sinyal frekuensi tinggi kemudian melewatkan frekuensi rendah pada rentang frekuensi tertentu [32]. Fungsi daripada *low pass filter* yaitu ketika membutuhkan proses transmisi sinyal pada frekuensi rendah. Rentang frekuensi rendah yang dibutuhkan disebut *passband* dan rentang frekuensi tinggi disebut *stopband*. Frekuensi dimana *passband* dan *stopband* bertemu disebut sebagai

frekuensi *cutoff* [33]. LPF hanya melewatkan frekuensi yang lebih rendah daripada frekuensi *cutt off* dan meredam frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi *cut off*.

### 2.2.11 Mach Zehnder Modulator (MZM)

*Mach Zehnder Modulator* (MZM) adalah salah satu *modulator* yang cukup populer dalam sistem komunikasi optik. MZM digunakan sebagai modulator optik yang berfungsi untuk memodulasi sinyal pembawa optik sesuai dengan input dari sinyal listrik. Pada modulasi eksternal, *external modulator* digunakan untuk memodulasikan *optical carrier* atau sinyal pembawa optik sesuai sinyal elektrik yang masuk. MZM digunakan untuk melakukan *control phase* dan *amplitude* daripada sinyal optik. Pada dasarnya ketika gelombang sinyal optik masuk kedalam sisi *input* daripada MZM maka gelombang tersebut akan terbagi sehingga menjadi dua gelombang yang berbeda pada lengan *modulator* MZM. Tegangan bias diterapkan pada lengan *modulator* MZM untuk memicu pergeseran fasa selama proses tersebut berlangsung. Sinyal optik yang melewati lengan *modulator* MZM tersebut untuk selanjutnya akan digabungkan pada *output* MZM dan perbedaan fasa antara dua gelombang akan dikonversikan terhadap gelombang *amplitude* yang telah termodulasi [34].

### 2.2.12 Bit Error Rate

*Bit Error Rate* (BER) adalah perbandingan kesalahan atau *error* terhadap bit yang dikirimkan. BER memiliki fungsi untuk menguji berapa banyak kesalahan pembacaan pada sisi penerima setiap detiknya [35]. *Bit Error Rate* juga dapat disebut sebagai probabilitas *error* dimana probabilitas munculnya *error* dalam suatu proses pengiriman data. *Bit error rate* dan *Q-factor* dapat digunakan untuk melakukan pengukuran performansi daripada sistem. Dituliskan dengan menggunakan formula [2]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}Q} e^{(-\frac{Q^2}{2})} \quad 2.10$$

Dimana *Q* adalah *quality factor* dan ERFC adalah *complementary function*.

### 2.2.13 Symbol Error Rate

Nilai BER sebanding dengan nilai (*Symbol Error Rate*) SER dimana semakin besar nilai SER maka nilai daripada BER juga akan semakin besar. Hubungan antara SER dan BER akan berkaitan dengan nilai dari level modulasi yang akan sistem M-ary yang digunakan. sebagai contoh pada sistem 4-QAM dimana setiap simbol direpresentasikan dengan 2-bit maka apabila terdapat 1 simbol yang salah maka belum tentu simbol ke 2 juga akan salah [36].

### 2.2.14 Error Vector Magnitude

*Error vector magnitude (amplitude and phase vector)* adalah perbedaan *vector* antara kondisi referensi sinyal tanpa adanya *error* dan kondisi aktual ketika sinyal saat ditransmisikan pada waktu tertentu, dimana hal ini dapat digunakan untuk mengukur *amplitude* dan *error* fasa dari sinyal yang dimodulasi. *Error vector magnitude* (EVM) didefinisikan sebagai *ratio* akar pangkat (*root mean square*) rata-rata daya daripada *error vector* signal terhadap rata rata daya sinyal yang dibutuhkan, EVM dinyatakan dalam bentuk persentase. Semakin kecil nilai EVM maka kualitas sinyal semakin baik [37] . Persamaan matematis daripada EVM sebagai berikut [38]:

$$EVM_{RMS} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |S_n - S_{0,n}|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |S_{0,n}|^2} \quad 2.11$$

Keterangan:

$S_n$  = normalisasi simbol ke  $n$  pada aliran simbol yang diukur

$S_{0,n}$  = konstelasasi titik ideal dari normalisasi simbol ke  $n$

$N$  = nomor unik simbol pada titik konstelasi

Ketidaksempurnaan yang hadir didalam sistem *modulator*, *noise*, atau interferensi yang terdapat dalam link komunikasi, akan menyebabkan *magnitude* dan ketidakseimbangan *phase* pada setiap vektor serta keadaan daripada masing-masing kondisi sinyal. Akibat kombinasi daripada efek *magnitude* dan ketidakseimbangan fasa, maka kondisi aktual dari *vector* akan jauh daripada kata ideal. Perbedaan antara aktual dan ideal *vector* disebut sebagai *error vector*. *Magnitude* daripada *error vector* ini dapat disebut sebagai *Error Vector Magnitude* (EVM).

### 2.2.15 Coherent Detection

*Coherent detection* berasal dari komunikasi radio, dimana ketika *local carrier* akan bertemu dan bercampur dengan sinyal radio frekuensi yang telah diterima (*received radio frequency*) untuk menghasilkan sebuah produk akhir. Sehingga, sinyal radio frekuensi yang telah diterima dapat dilakukan proses translasi atau terjemahan dan dilakukan proses demodulasi [39]. Pada sistem deteksi koheren, frekuensi *input* dari sinyal optik dilakukan proses (*down converter*) terhadap *domain* sinyal *radio frequency* melalui pencampuran dengan *local oscillator* [40]. *Local oscillator* digunakan yang kemudian terjadi penggabungan dengan sinyal optik pada sisi penerima (*receiver*) dan secara efektif melakukan penguatan atau *amplifying* sinyal optik yang lemah [41].

*Coherent detection* tidak hanya dapat mencapai sensitivitas yang lebih tinggi daripada *direct detection* melainkan dapat secara signifikan meningkatkan *spectral efficiency*, juga dikarenakan menggunakan *phase*, *amplitude*, dan *polarization* daripada *optical carrier* (pembawa optik) untuk membawa informasi. Apabila dibandingkan dengan *direct detection*, maka *coherent detection* memberikan beberapa keuntungan:

1. Sensitivitas yang lebih baik, dimana hal ini bisa digunakan untuk mengurangi *power* atau daya yang dibutuhkan oleh sumber cahaya *laser*.
2. Toleransi yang lebih terhadap *optical impairment* (gangguan optik) seperti *chromatic dispersion*.
3. *Spectral efficiency* yang lebih tinggi [42].