

BAB II

DASAR TEORI

2.1 KAJIAN PUSTAKA

Salah satu faktor pendukung untuk permasalahan dalam penelitian yaitu dasar dari hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan saat ini. Fokus penelitian terdahulu yang mendasari penelitian kali ini dengan masalah performansi sinyal tautan ruang bebas menggunakan media optik.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Rosyidah Marwa, dkk dengan judul “Analisis Performansi FSO Dengan Teknik OFDM Pada Kanal *Kim* Dan *Kruse* Menggunakan Modulasi QPSK”[4]. Mengamati performansi sistem OFDM pada FSO menggunakan modulasi QPSK dengan kanal *Kim* dan *Kruse*. Parameter yang diamati menggunakan BER dengan nilai acuan 10^{-4} . Penelitian ini menunjukkan bahwa kanal *Kim* memiliki sistem performansi dengan kondisi *visibility* atmosfer lebih jauh daripada kanal *Kruse*, karena model *Kruse* diusulkan untuk kondisi asap (*haze*), yang memiliki efek redaman lebih rendah daripada kabut (*fog*). Kemudian jarak visibilitas mengalami peningkatan sebesar 200 m jika menggunakan peningkatan *amplifier* sebesar 2 Watt.

Pada jurnal yang ditulis oleh Annisa Inayah Salsabila, dkk tahun 2020 [10]. Meneliti tentang analisis performansi FSO menggunakan modulasi *Phase Shift Keying* (PSK) dengan model kanal *Kim* dan *Kruse*. Penelitian ini menggunakan skema Pengkodean 16-level *Phase Shift Keying* (16-PSK) untuk melihat performansi yang dihasilkan terhadap sistem. Parameter yang digunakan sebagai pengukur kualitas performansi adalah *Bit Error Rate* (BER). Penelitian ini menggunakan kondisi atmosfer seperti *Light fog*, *Thick Fog*, dan *Haze* dengan masing-masing variasi *wavelength* antara 1310 sampai 1550 nm. Hasil dari jurnal ini menunjukkan bahwa semakin meningkat nilai *visibility* maka akan lebih bagus nilai BER yang didapat. Dan pada penelitian dari tiga kondisi atmosfer dan dua Panjang gelombang menunjukkan bahwa hasil dari kualitas BER yang paling baik ada pada kondisi atmosfer *haze* dengan Panjang gelombang 1550 nm dan daya kirim 20Watt dengan nilai BER $7.62E-09$ dengan jarak sejauh 9,6 km.

Selanjutnya pada pengujian yang dilakukan oleh Sarvina Dewi,dkk [11] menggunakan skema modulasi *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) dan *On Off Keying* (OOK) dengan model kanal *Kim* dan *Kruse* sebagai perbandingan performansi yang dihasilkan oleh sistem FSO. Pengujian ini menggunakan parameter ukur *Bit Error Rate* (BER) dan menggunakan APD *Photodetector* sebagai *receiver*. Pengujian ini menggunakan variasi daya sebesar 1-5Watt dengan Panjang gelombang 850, 1310, dan 1550nm. Hasil dari pengujian ini menyatakan bahwa modulasi OOK-RZ memiliki kinerja lebih baik dibanding 16-QAM dan OOK-NRZ dengan nilai BER terbaik dengan jarak 1,5 km pada kondisi *dense fog* di kedua kanal. Kondisi *light fog* yaitu 3,5 km pada kanal *Kim* dan 3 km pada kanal *Kruse*. Sedangkan untuk kondisi *Clear Air* mencapai 10 km pada kanal *Kim* dan 9,5 km pada kanal *Kruse*. Serta dapat disimpulkan bahwa model kanal *Kim* memiliki performa lebih baik dari kanal *Kruse*.

Penelitian yang ditulis oleh Dio Audia Rachmat, dkk[3]. Menulis tentang analisis performansi sistem FSO menggunakan modulasi *Pulse Position Modulation* (PPM) dengan model kanal *Kim* dan *Kruse*. Pengujian ini menggunakan *Line coding On-Off Keying* (OOK) yang dibantu oleh modulasi PPM untuk meningkatkan efisiensi daya dari *Line coding* tersebut. Parameter ukur yang digunakan oleh penelitian ini adalah *Bit Error Rate* (BER) dan menghasilkan sebuah riset bahwa skema modulasi PPM lebih baik dibandingkan dengan modulasi OOK karena memiliki nilai BER yang lebih baik dengan nilai BER yang paling baik pada modulasi PPM sebesar $2,507 \times 10^{-129}$

Kemudian pada penelitian yang dilakukan oleh Fatrheza Imantaqwa, dkk[2]. Meneliti tentang performansi modulasi *Subcarrier Intensity Modulation* (SIM) dan *On-Off Keying* (OOK) sebagai bahan perbandingan. Pengujian ini juga menggunakan model kanal *Kim* dan *Kruse* sebagai perbandingan nilai pada parameter *visibility*. Parameter ukur yang dapat menilai tingkat kualitas sistem pada penelitian ini adalah BER dengan *Photodetector* PIN sebagai *receiver*. Adapun hasil dari penelitian ini adalah modulasi SIM lebih baik daripada modulasi OOK-NRZ dan OOK-RZ, dan pada panjang gelombang 1550 nm dengan nilai 10^{-98} pada kanal model *Kim* dan 10^{-73} pada kanal model *Kruse*. Adapun kajian Pustaka yang sudah diklasifikasikan dalam bentuk tabel terdapat pada tabel 2.1 sebagai berikut,

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka

No.	Judul	Tahun	Tujuan	Parameter	Hasil
[4]	Analisis Performasi FSO Dengan Teknik OFDM Pada Kanal <i>Kim</i> Dan <i>Kruse</i> Menggunakan Modulasi QPSK. Rosyidah Marwa, dkk	2021	Mengetahui performasi FSO dengan menggunakan teknik OFDM pada kondisi kabut dengan model kanal <i>Kim</i> dan <i>Kruse</i> serta dapat mengetahui dampak dan pengaruh panjang gelombang, daya kirim dan nilai FFT terhadap sistem performasi FSO pada kondisi kabut.	<i>Bit error rate, Signal-to-noise ratio, Visibility, Dark current, Divergence angle, Boltzman.</i>	Panjang gelombang berpengaruh terhadap jarak transmisi dari pengirim ke penerima disetiap kondisi atmosfer, dimana semakin lebar. Panjang gelombang dapat meningkatkan jarak transmisi lebih jauh dengan kualitas BER yang baik.
[10]	Analisis performasi modulasi 16-PSK pada kanal <i>Kim</i> dan <i>Kruse</i> di <i>free space optic communication</i> . Annisa Inayah Salsabila, dkk	2020	Menganalisa performasi sistem komunikasi FSO pada kanal <i>Kim</i> dan <i>Kruse</i> menggunakan modulasi 16-PSK dengan variasi panjang gelombang, jarak, daya kirim dan <i>visibility</i> . Performasi yang dianalisa adalah hasil nilai BER.	<i>Bit error rate, Visibility, Signal-to-noise ratio, Boltzman, Divergence angle, Dark current.</i>	Jarak mempengaruhi kualitas performasi BER. Semakin tinggi nilai panjang gelombang, <i>visibility</i> dan daya kirim yang digunakan maka jarak tempuh yang didapat semakin jauh dan dihasilkan nya BER dengan kualitas yang baik.
[11]	Analisa 16-QAM dan OOK pada kanal <i>Kim</i> dan <i>Kruse</i> di sistem komunikasi ruang bebas. Sarvina Dewi, dkk	2020	Mengetahui performasi dari kualitas performasi BER pada sistem komunikasi FSO pada model kanal <i>Kim</i> dan <i>Kruse</i> menggunakan skema modulasi 16-QAM dan OOK.	<i>Visibility, Boltzman, Divergence angle, Bit error rate, Dark current, Signal-noise-ratio</i>	Kanal <i>Kim</i> dan <i>Kruse</i> dapat bekerja pada link yang jauh dengan memadukan panjang gelombang dan daya kirim. OOK-RZ memiliki kinerja lebih baik dari 16-QAM dan OOK-RZ sehingga OOK-RZ dapat menempuh link lebih jauh.

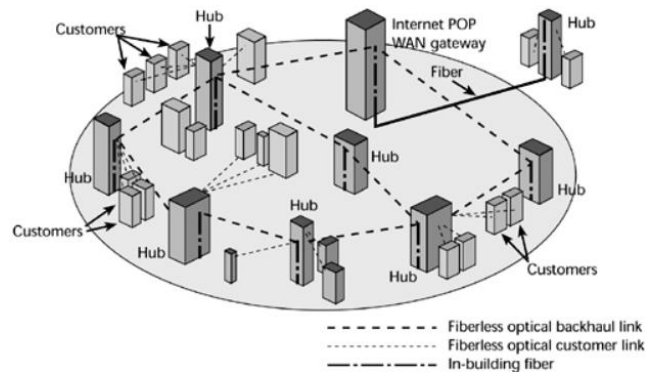
[3]	Analisis performa modulasi PPM pada FSO dengan kanal <i>Kim</i> dan <i>Kruse</i> model pada jarak 2km. Dio Audia Rachmat, dkk	2020	Mengetahui sistem komunikasi FSO layak menjadi jaringan komunikasi <i>Backup</i> dengan menganalisis performansi teknologi FSO pada model kanal <i>Kim</i> dan <i>Kruse</i> menggunakan format modulasi PPM. Kemudian dibandingkan dengan format modulasi OOK-NRZ dan OOK-RZ.	<i>Bit error rate, Visibility, Dark current, Divergence angle, Boltzman, Signal-to-noise ratio.</i>	Dari perbandingan antara modulasi PPM, OOK-NRZ dan OOK-RZ, nilai BER pada modulasi PPM jauh lebih baik dari nilai BER modulasi lainnya pada kanal <i>Kim</i> . Kemudian untuk perbandingan antara kanal <i>Kim</i> dengan kanal <i>Kruse</i> , Nilai BER pada kanal <i>Kim</i> memiliki nilai yang lebih baik dari kanal <i>Kruse</i> .
[2]	Analisis performansi <i>Subcarrier Intensity Modulation</i> pada kanal model <i>Kim</i> dan <i>Kruse</i> di Free Space Optic. Fatrheza Imantaqwa, dkk	2019	menganalisa teknologi <i>Free Space Optic</i> (FSO) pada kanal <i>Kim</i> dan <i>Kruse</i> menggunakan modulasi SIM. Lalu dibandingkan dengan modulasi OOK-NRZ dan OOK-RZ. Performansi yang dianalisa adalah hubungan <i>visibility</i> terhadap nilai BER.	<i>Bit error rate, Visibility, Background noise, Boltzman, Divergence angle, Dark current.</i>	BER menggunakan SIM lebih baik daripada menggunakan modulasi OOK-NRZ dan OOK-RZ, dan pada panjang gelombang 1550 nm dengan nilai 10^{-98} pada kanal model <i>Kim</i> dan 10^{-73} pada kanal model <i>Kruse</i> .

2.2 FREE SPACE OPTIC

Teknologi *Free Space Optic* (FSO) merupakan pengembangan teknologi komunikasi fiber optik. Berbeda dengan fiber optik, komunikasi FSO melakukan proses pertukaran informasi tanpa kanal fisik. Komunikasi FSO bekerja pada kisaran panjang gelombang inframerah antara 700 nm hingga 1600 nm. Komunikasi FSO, mentransmisikan sinyal dengan menyebarkan berkas cahaya melalui *free space* (ruang bebas), udara, *vacuum space* sehingga dapat dikategorikan dalam komunikasi *wireless*. FSO mampu memberikan layanan teks, suara, dan video[11]. Adapun persamaan dalam sistem FSO sebagai berikut[12],

$$P_{Received} = P_{Transmitted} \frac{d_R^2}{(d_T + \theta R)^2} 10^{-\frac{TX}{10}} \times 10^{-\frac{RX}{10}} \times 10^{-\frac{AD}{10}} \times 10^{-\alpha R} \quad (2.1)$$

Dimana d_R merupakan *Aperture diameter* penerima dalam satuan meter (m), dan d_T merupakan *Aperture diameter* pengirim dalam satuan meter (m). θ merupakan *beam divergence* atau bagian divergensi. R adalah jarak dalam satuan kilometer (km) dan α adalah atenuasi atmosfer dalam satuan dB/km. TX adalah *Transmitter Loss* dan RX adalah *Receiver Loss* serta AD merupakan *Additional Losses* dalam satuan dB[12]. Gambar 2.1 merupakan konfigurasi dari *Free space Optic* (FSO).



Gambar 2.1 Konfigurasi FSO[13]

FSO memiliki *bandwidth* yang relatif besar sehingga memungkinkan untuk menghasilkan *data rate* yang tinggi. Sistem komunikasi FSO bersifat *full duplex* yang berarti komunikasi dapat dilakukan dua arah. Tingkat keamanan yang dimiliki FSO juga lebih baik dibandingkan teknologi *wireless* lainnya karena pancaran cahaya dari *LASER* sangat terfokus dan divergensiya sangat sempit, sehingga sulit dideteksi *spectrum analyzer* atau *RF meter*. FSO juga sulit terinterferensi[14].

Free Space Optic (FSO) memiliki beberapa kelebihan, yaitu[4] :

1. Dapat digunakan jarak jauh.

Teknologi FSO cocok untuk digunakan pada jarak jauh, salah satu penggunaan yang dapat diterapkan ialah di sistem komunikasi satelit.

2. Memiliki *bandwidth* yang besar Penggunaan.

FSO diharapkan dapat membuat jalur komunikasi yang memiliki *bandwidth* yang lebih besar mencapai 100 Gbps.

3. Instalasi mudah, tidak membutuhkan jalur galian seperti fiber optik.

Komunikasi FSO tidak membutuhkan kabel optik sehingga mudah untuk melakukan instalasinya karena jalur transmisinya dilewatkan melalui ruang bebas/atmosfer.

4. Penggunaan spektrum tanpa lisensi.

Menggunakan panjang gelombang dan frekuensi yang tinggi pada FSO, hal ini sangat menguntungkan bagi semua pihak karena tidak diperlukan lisensi sehingga mengurangi biaya dan waktu pengaturan. Karena tidak terjadi kemacetan spektrum yang disebabkan oleh interferensi dari gelombang radio dan *microwave*.

5. Lebih murah dalam instalasi.

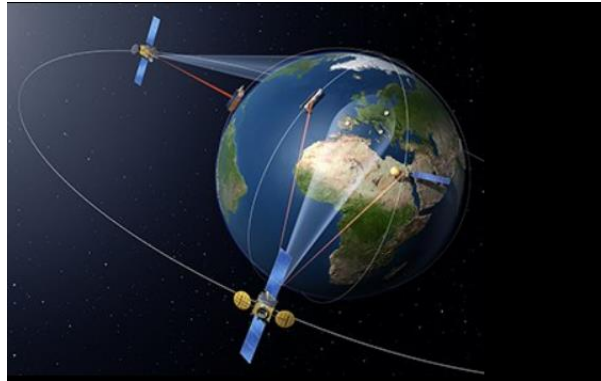
Karena jalur komunikasi melalui atmosfer sehingga dapat mengurangi biaya operasional instalasi.

2.3 OPTICAL WIRELESS COMMUNICATION

Sistem Komunikasi Optik pada umumnya dibagi menjadi 2 berdasarkan media transmisinya yaitu *guided* dan *unguided*. *Guided* adalah sistem komunikasi yang memanfaatkan kabel sebagai media transmisi. Sedangkan *Unguided* adalah sistem komunikasi yang memanfaatkan udara sebagai media transmisi. OWC merupakan salah satu jenis Sistem Komunikasi Optik yang memanfaatkan udara sebagai media transmisi. FSO dan VLC merupakan penerapan dari OWC[15].

OWC mendapatkan perhatian yang meningkat dalam beberapa tahun terakhir karena kemampuan OWC menawarkan transmisi *data rate* tinggi dalam jarak pendek dan dapat memecahkan masalah *lastmile bottleneck*. Keuntungan dari sistem OWC adalah bebas dari regulasi lisensi spektrum, namun kinerja sistem

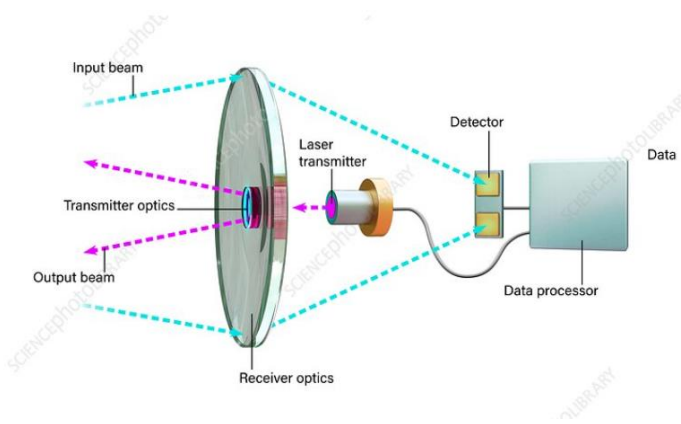
OWC sangat bergantung pada kondisi atmosfer[14]. Gambar 2.2 merupakan Ilustrasi dari sistem Optical Wireless Communication (OWC).



Gambar 2.2 Ilustrasi OWC European Data Relay Satellite (EDRS)[16]

2.4 LIGHT AMPLIFICATION BY SIMULATED EMISSION OF RADIATION

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation yang dikenal dengan (*LASER*) merupakan sumber cahaya pada *transmitter* yang memancarkan radiasi elektromagnetik. Cahaya yang dipancarkan juga koheren atau memiliki fasa dan arah yang sama sehingga pancarannya juga kecil dan sangat terfokus. Cara kerja *Laser* dinamakan *lasing*, *lasing* merupakan kondisi dimana terjadinya penguatan cahaya didalam *laser* dioda. *Lasing* dapat terjadi ketika suatu sistem sudah dalam keadaan kesetimbangan atau tidak berubah ubah seiring berjalan nya waktu, yang disebut dengan kondisi Saturasi. *Laser* merupakan perkembangan dari *PN Junction* dengan pola yang lebih kecil dan jangkauan yang lebih panjang, radiasi emisi keluaran sangat monokromatis dan terarah[9]. Gambar 2.3 merupakan ilustrasi dari konfigurasi *LASER* pada sistem FSO.



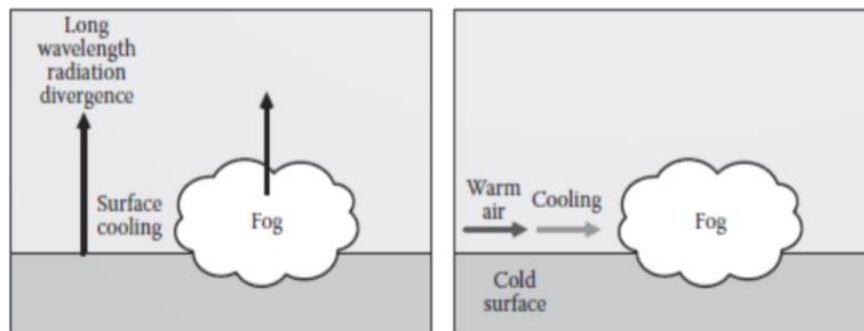
Gambar 2.3 Ilustrasi LASER dalam FSO[17]

2.5 KANAL ATMOSFER

Kanal atmosfer memiliki lingkungan yang sangat kompleks sehingga dapat mempengaruhi karakteristik dari pancaran propagasi optik yang menyebabkan adanya redaman, amplitude yang diinduksi turbulensi, dan fluktuasi fasa. Kanal atmosfer pada sistem FSO dipengaruhi oleh berbagai faktor yang dapat memengaruhi kualitas dan kehandalan komunikasi optik. Secara keseluruhan, kanal atmosfer adalah faktor penting dalam merancang dan mengoperasikan sistem FSO, dan pemahaman yang mendalam tentang karakteristik atmosfer dapat membantu dalam meningkatkan kualitas dan reliabilitas komunikasi optik[3].

2.5.1. *Visibility*

Visibilitas atmosfer merupakan ukuran yang berguna untuk memprediksi kondisi lingkungan atmosfer. Untuk memprediksi statistik redaman optik dari statistik visibilitas untuk memperkirakan jangkauan sistem *Free Space Optic* (FSO), hubungan antara visibilitas dan redaman harus diketahui[18].



Gambar 2.4 Radiasi kabut [3]

Gambar 2.4 merupakan ilustrasi dari radiasi kabut. Adapun Persamaan dasar untuk menghitung besarnya redaman atmosfer kelembaban adalah sebagai berikut[4],

$$A = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (2.2)$$

V adalah *visibility* dalam km, λ adalah panjang gelombang dalam nm, q adalah ukuran partikel di atmosfer, A adalah redaman kelembaban atmosfer dalam dB/km, dan 550 merupakan standar acuan rentang panjang gelombang dalam optik dalam satuan nm. Adapun nilai parameter *Visibility* pada setiap atmosfer yang ditunjukkan pada tabel 2.2 dibawah ini:

Tabel 2.2 Parameter redaman nilai Visibility[19]

Kondisi Atmosfer	Visibility (m)
<i>Dense Fog</i>	50 (0.05 km)
<i>Thick Fog</i>	200 (0.200 km)
<i>Moderate Fog</i>	500 (0.50 km)
<i>Light Fog</i>	770 (0.77 km)
<i>Very Light Fog</i>	1000 (1.00 km)
<i>Light Mist</i>	2000 (2.00 km)
<i>Clear Air</i>	20000 (20.00 km)

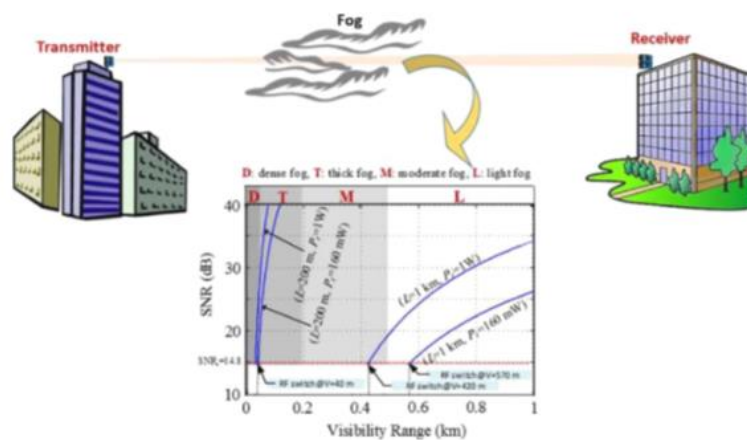
Adapun untuk mendapatkan nilai redaman setelah mengetahui redaman atmosfer *visibility* melalui perhitungan[20],

$$\alpha = -10\log_{10}(e)A \quad (2.3)$$

A adalah redaman kelembaban atmosfer dalam dB/km yang didapatkan dari hasil perhitungan rumus (2.1), e merupakan konstanta matematika atau juga disebut dengan bilangan euler dengan nilai kira-kira sebesar 2.71828[21].

2.5.2. Model kanal Kim

Kondisi cuaca yang berbeda dapat ditentukan berdasarkan nilai rentang visibilitasnya. Pada gambar 2.5 menunjukkan kisaran visibilitas dan redaman untuk kondisi cuaca yang berbeda[4].



Gambar 2.5 Ilustrasi visibilitas dan redaman kondisi cuaca berbeda

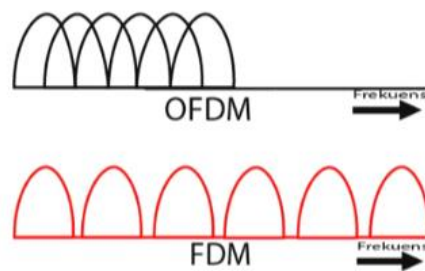
Di model FSO dapat dilakukan pendekatan untuk nilai standarisasi visibilitas nilai kondisi atmosfer dengan menghitung redaman link FSO. Pada model *Kim* memperhitungkan kondisi kabut pada parameter *visibility* dengan nilai dibawah 0,5 km. Sehingga dapat digunakan untuk kondisi berembun atau *visibility* yang rendah karena lebih spesifik[4]. Adapun untuk mencari nilai attenuasi menggunakan model kanal *Kim* dapat dirumuskan,

$$p = \begin{cases} 1.6, & v \geq 50 \\ 1.3, & 6 \leq v \leq 50 \\ 0.16v + 0.34, & 1 \leq v \leq 6 \\ pv - 0.5, & 0.5 \leq v < 1 \\ 0, & v < 0.5 \end{cases} \quad (2.4)$$

Pada model *Kim* memperhitungkan kondisi kabut pada parameter *visibility* dengan nilai dibawah 0.5 km. Sehingga dapat digunakan untuk kondisi berembun atau *visibility* yang rendah karena lebih spesifik[22].

2.6 ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) adalah teknik *multiplexing* dengan menggunakan frekuensi *multicarrier* yang saling ortogonal. Sifat ortogonal pada OFDM memungkinkan *subcarrier* yang disusun saling overlap dengan menutup jarak antar *subcarrier* sehingga *bandwidth* yang dibutuhkan menjadi lebih sedikit dibandingkan dengan *Frequency Division Multiplexing* (FDM)[23]. Gambar 2.6 merupakan ilustrasi dari perbandingan kinerja dari OFDM dan FDM.



Gambar 2.6 Perbandingan OFDM dengan FDM

Teknologi OFDM memiliki beberapa keunggulan yang menjadi kunci untuk sistem transmisi masa depan, seperti yang ditunjukkan di bawah ini[24]:

1. OFDM mentransmisikan aliran data berkecepatan tinggi dengan membagi mengubahnya menjadi beberapa *subcarrier* dengan kecepatan data rendah

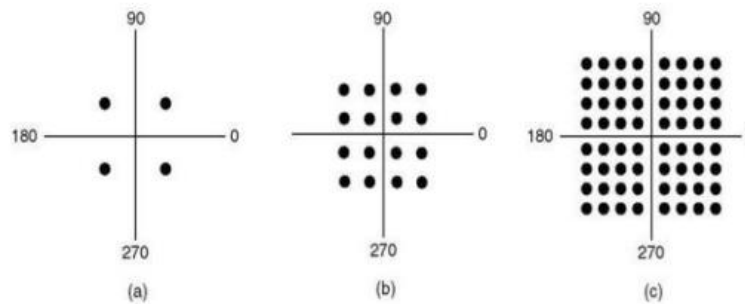
meningkatkan durasi simbol dan mengurangi interferensi simbol. Ketahanan intrinsik terhadap ISI menjadikan OFDM kandidat yang baik untuk kecepatan tinggi masa depan sistem komunikasi

2. OFDM memungkinkan peningkatan yang mulus dari kecepatan rendah ke transmisi berkecepatan tinggi hanya dengan menambah sub- pembawa dan spektrum, tanpa perubahan besar dalam sistem desain. Oleh karena itu, sangat terukur untuk migrasi ke kecepatan data yang terus meningkat di masa depan.
3. Efisiensi spektrum yang tinggi dapat dicapai dengan OFDM dengan pengaturan *subcarrier* yang tumpang tindih, jadi sistemnya kapasitas dapat sangat ditingkatkan.
4. Kemampuan *link-adaption* OFDM menyediakan bahkan efisiensi spektrum yang lebih tinggi, seperti jarak dan saluran modulasi kondisi-adaptif (penyesuaian bit per simbol) dipekerjakan.
5. Operasi hemat energi untuk mengurangi konsumsi daya dapat diimplementasikan oleh sistem OFDM melalui modulasi adaptif dan secara dinamis menghidupkan/mematikan *subcarrier* tertentu sesuai dengan kondisi saluran dan kebutuhan *bandwidth* pelanggan (yang akan menjadi dijelaskan dalam Bagian IV-D6).

2.7 M-Ary QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION

Quadrature Amplitude Modulation (QAM) merupakan salah satu bentuk modulasi digital yang mentransmisikan dua sinyal analog atau dua aliran bit digital dengan mengubah amplitudo dari gelombang pembawa menggunakan skema modulasi digital ASK atau *Analog Modulation* (AM). Dua gelombang pembawa dari frekuensi yang sama berada diluar fase satu sama lain 90° kondisi ini yang disebut *Quadrature* (2^M)[6].

Sinyal *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) menggunakan dua pembawa kuadratur $\cos 2\pi t$ dan $\sin 2\pi t$, masing-masing dimodulasikan oleh bit informasi. Metode dari transmisi sinyal memakai *Quadrature Carrier Multiplexing*. Inti dari QAM adalah gabungan antara modulasi PSK dan ASK hal ini digunakan ketika membutuhkan modulasi dengan kecepatan tinggi[25].



Gambar 2.7 Diagram Konstelasi (a) 4-QAM (b) 16-QAM (c) 64-QAM

Gambar 2.7 merupakan bentuk dari diagram konstelasi dari beberapa jenis modulasi digital QAM. Adapun sinyal QAM dapat dituliskan sebagai berikut[25]:

$$s(t) = I(t) \cdot \cos \omega_c t + Q(t) \cdot \sin \omega_c t \quad (2.5)$$

Dari persamaan diatas, dapat dilihat bahwa sinyal QAM dapat dibentuk dengan menjumlahkan sebuah sinyal kosinus dengan amplitudo I(t) dan sebuah sinyal sinus dengan amplitudo Q(t). Ini sama dengan menjumlahkan sebuah sinyal AM (*amplitude modulation*) yang menggunakan *carrier* kosinus dengan sebuah sinyal AM lain yang menggunakan *carrier* sinus. Kata *quadrature* pada QAM berasal dari kedua *carrier* yang berbeda fase 90°[25].

2.8 PHOTODETECTOR

Photodetector merupakan alat pendeteksi bersifat sensitif terhadap cahaya, berfungsi mengubah besaran cahaya menjadi besaran listrik, prinsip kerjanya sinyal optik digabungkan dengan sinyal optik lainnya lalu dikirim ke penerima dengan panjang gelombang tertentu dan jarak yang relatif jauh. Dalam komunikasi optik terdapat dua jenis *Photodetector* utama, yaitu *Positive Intrinsic Negative Photodetector* (PIN) dan *Avalanche Photodetector* (APD). Dari dua jenis *Photodetector* tersebut dibagi lagi dalam tiga jenis material bahan, yaitu Silicon (Si), Germanium (Ge) dan InGaAs[4].

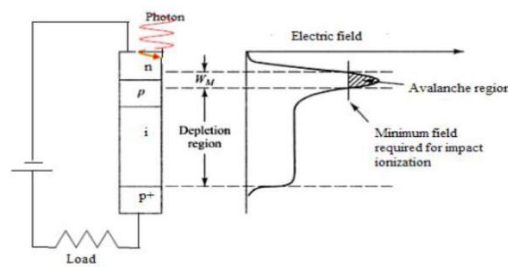
Panjang gelombang operasi untuk perbedaaan material *Photodetector* dapat dilihat pada Tabel 2.3

Tabel 2.3 Panjang Gelombang Operasi[19].

<i>Material</i>	<i>Responsivity (A/W)</i>	<i>Wavelength Range (nm)</i>	<i>Avalanche Gain (dB)</i>	<i>Dark Current (nA)</i>
<i>Silicon</i>	0,4-0,6	400-1100	20-400	0,1-10
<i>Germanium</i>	0,4-0,5	800-1600	50-200	50-500

<i>Material</i>	<i>Responsivity (A/W)</i>	<i>Wavelength Range (nm)</i>	<i>Avalanche Gain (dB)</i>	<i>Dark Current (nA)</i>
<i>InGaAs</i>	0,7-1	1100-1700	10-50	0,5-50

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 multiplikasi karena terciptanya pasangan *electron hole* baru[19]. Adapun Gambar 2.8 merupakan konstruksi dari *Photodetector* APD.



Gambar 2.8 Konstruksi APD *Photodetector*[19]

Pada APD dapat dirumuskan[22],

$$M = \frac{I_M}{I_P} \quad (2.6)$$

Dimana M adalah Gain, I_M adalah nilai rata-rata total arus output yang dimultiplikasikan, dan I_P adalah foton yang tidak dimultiplikasikan[22],

$$I_P = R_0 P_r \quad (2.7)$$

Untuk mengetahui gain pada APD, digunakan persamaan sebagai berikut[19],

$$M_{opt}^{x+2} = \frac{4K_b T}{x \cdot q (I_p + I_D)} \quad (2.8)$$

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 perlu penyesuaian *dark current* yang terdapat dalam *Photodetector* APD. [26],

$$I_{DM} = \sqrt{2qI_D(M_{opt})^2 B} \quad (2.9)$$

Responsivitas dari APD *Photodetector* yang ditentukan dengan persamaan berikut,

$$R_{APD} = R_0 M_{opt} \quad (2.10)$$

Maka nilai I_p untuk APD *Photodetector* dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut,

$$I_p = P_r R_{APD} M_{opt} \quad (2.11)$$

Parameter dari persamaan pada *Photodetector* dijelaskan pada tabel 2.4 sebagai berikut,

Tabel 2.4 Parameter rumus *Photodetector*.

Parameter	Keterangan
M	<i>Gain</i>
I_M	Rata-rata arus <i>output</i>
I_P	Foton yang tidak dimultiplasikan
x	<i>Excess noise</i>
T	Suhu
q	Muatan elektron
I_D	<i>Dark Current</i>
R_0	Responsivitas <i>Photodetector</i> APD
M_{opt}	<i>Optimization Gain</i>

2.9 GAUSSIAN OPTICAL FILTER

Gaussian adalah matematika yang diambil dari nama seseorang matematikawan Jerman, Karl Friedrich Gauss. *Gaussian Filter* merupakan salah satu *filter linier* dengan nilai pembobotan untuk setiap anggotanya dipilih berdasarkan bentuk fungsi *Gaussian*. *Gaussian filter* salah satu metode yang sangat baik untuk menghilangkan *noise* yang bersifat sebaran normal[27].

Dalam sistem FSO, dibutuhkan filter optik untuk mencapai sistem yang lebih stabil dan akurat. Diantara filter optik yang digunakan dalam sistem FSO, filter Gaussian memiliki kinerja yang lebih baik atas filter lain pada kondisi transmisi yang sama[28]. Adapun untuk fungsi filter sebagai berikut[29],

$$H(f) = \alpha e^{-\ln\sqrt{2}\left(\frac{2(f-f_c)^{2N}}{B}\right)} \quad (2.12)$$

Dimana $H(f)$ adalah fungsi transfer filter, α adalah parameter dari kerugian sisipan, f_c adalah frekuensi pusat filter yang ditentukan oleh parameter frekuensi,

B adalah parameter Bandwidth, N adalah parameter urutan, e adalah bilangan biner, dan f adalah frekuensi.

2.10 WAVELENGTH RANGE

Panjang gelombang merupakan sebuah jarak selang satuan berulang dari sebuah pola gelombang. Panjang gelombang optik tipikal dibedakan menjadi 3 wilayah kerja, Seperti pada tabel 2.5 berikut:

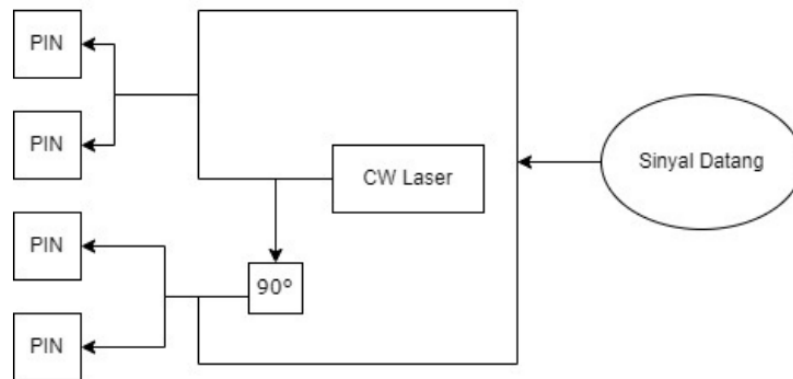
Tabel 2.5 Wilayah Panjang Gelombang [30]

Wilayah Kerja	Wavelength Range	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

Panjang gelombang tipikal umumnya 800 hingga 1600nm, tetapi saat ini, panjang gelombang yang paling umum digunakan dalam serat optik adalah 850nm, 1300nm dan 1550nm. Serat multimode cocok untuk panjang gelombang 850nm dan 1300nm, sedangkan serat mode tunggal paling baik digunakan untuk panjang gelombang 1310nm dan 1550nm. *Laser* dan dioda pemancar cahaya juga digunakan untuk perambatan cahaya pada serat optik. *Laser* lebih panjang dari perangkat mode tunggal dengan panjang gelombang 1310nm atau 1550nm, sedangkan dioda pemancar cahaya digunakan untuk perangkat multimode dengan panjang gelombang 850nm atau 1300nm[31].

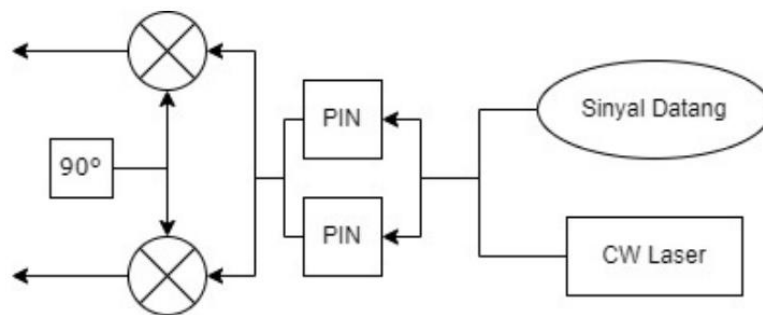
2.11 COHERENT OPTICAL DETECTION

Di bidang komunikasi optik, terdapat sistem pendeteksian yang disebut deteksi koheren. Salah satu cara penerapannya adalah dengan menggabungkan sinyal kontinu berupa gelombang berfrekuensi tetap atau disebut dengan *continuous wave* (CW) dengan osilator local atau disebut dengan *local oscillator* (LO) untuk menguatkan sinyal yang diterima. Deteksi koheren terbagi menjadi dua tipe utama, yaitu *homodyne* dan *heterodyne*.



Gambar 2.9 Arsitektur *Coherent Detection tipe homodyne*[32]

Gambar 2.9 merupakan arsitektur dari deteksi koheren homodyne. Deteksi koheren homodyne melibatkan penggunaan frekuensi yang berbeda antara osilator lokal dan frekuensi sinyal yang diterima. Ketika sinyal dan osilator lokal digabungkan, hal ini menghasilkan sinyal baru karena adanya perbedaan frekuensi antara sinyal informasi dan frekuensi osilator lokal.



Gambar 2.10 Arsitektur *Coherent Detection tipe heterodyne*[32]

Gambar 2.10 merupakan arsitektur dari deteksi koheren heterodyne. Deteksi koheren heterodyne merupakan metode pendeteksian di mana frekuensi sinyal masuk sama dengan osilator lokal. Sinyal dari kedua sumber, yaitu sinyal masuk dan gelombang dari *laser* osilator lokal, digabungkan. Proses penggabungan ini terjadi ketika dua gelombang dengan frekuensi tertentu, ω_1 dan ω_2 , berinteraksi untuk menghasilkan gelombang lain dengan frekuensi yang berhubungan, seperti $2\omega_1$, $2\omega_2$, dan $\omega_1 + \omega_2$ [32].

Prinsip dasar dari *Coherent Detection* adalah melakukan pemaduan (mixing) sinyal masukan dengan sinyal referensi yang sesuai, sehingga menghasilkan perbedaan frekuensi antara kedua sinyal tersebut. Proses ini memungkinkan pengambilan informasi modulasi (data) yang terdapat pada

gelombang optik transmisi. Berikut adalah penjelasan singkat tentang cara kerja *Coherent Detection*[33]:

1. Pemaduan (*Mixing*): Sinyal masukan yang diterima dari serat optik atau saluran transmisi optik diubah menjadi bentuk listrik menggunakan detektor fotodiode. Sinyal ini kemudian dicampur (*mixing*) dengan sinyal referensi yang dibangkitkan lokal dengan frekuensi dan fase yang tepat. Proses pemaduan ini menghasilkan perbedaan frekuensi antara sinyal masukan dan sinyal referensi.
2. Bandpass Filtering: Setelah pemaduan, sinyal perbedaan frekuensi ini disaring menggunakan filter jalur tengah (*bandpass filtering*) untuk menghilangkan komponen frekuensi rendah dan tinggi yang tidak diinginkan.
3. Demodulasi: Sinyal yang sudah difilter diubah menjadi sinyal basisband menggunakan *demodulator*. Proses demodulasi ini memungkinkan pemulihan data informasi yang terkandung dalam gelombang optik asli.
4. Pemulihan Data: Data yang telah didemodulasi diubah menjadi bentuk digital yang dapat diinterpretasikan oleh perangkat elektronik seperti komputer atau perangkat jaringan.

Keuntungan utama dari *Coherent Detection* adalah kemampuannya untuk memulihkan informasi dari gelombang optik dengan akurasi tinggi dan sensitivitas yang tinggi. Hal ini memungkinkan untuk mentransmisikan data pada jarak yang jauh melalui serat optik tanpa mengalami degradasi sinyal yang signifikan. Selain itu, teknik ini juga dapat mengatasi fenomena seperti dispersi cahaya (*chromatic dispersion*) yang terjadi saat sinyal optik berpropagasi melalui serat optik[33].

2.12 ERROR VECTOR MAGNITUDE

Error Vector Magnitude (EVM) adalah metrik kinerja alternatif yang menjanjikan pada rasio *signal-to-noise* (SNR) yang tinggi di mana sejumlah besar simbol akan diperlukan untuk penghitungan kesalahan yang akurat. *Error Vector Magnitude* adalah figur standar untuk mengevaluasi kualitas sinyal termodulasi vektor dalam sistem komunikasi digital nirkabel dan juga telah diterapkan untuk menilai kinerja saluran optik yang rusak oleh derau emisi spontan yang diperkuat

atau disebut juga *Amplified Spontaneous Emission* (ASE) dan untuk mengkarakterisasi sinyal optik. *Error Vector Magnitude* lebih cocok daripada penghitungan *Bit Error Rate* (BER) untuk urutan simbol yang tidak diketahui dan hubungan yang dibangun antara *Error Vector Magnitude* dan *Bit Error Rate* untuk penerimaan dengan bantuan data juga dapat diterapkan pada penerimaan tanpa bantuan data. Hubungan antara *Error Vector Magnitude* dan *Bit Error Rate* sangat menarik untuk sistem koheren optik yang beroperasi di dekat batas koreksi kesalahan maju atau disebut juga dengan *Forward Error Correction* (FEC)[34].

Ketika nilai *Error Vector Magnitude* sangat kecil, diagram konstelasi dari sinyal *digital* yang diukur pada *Vector Signal Analyzer* (VSA) akan muncul sebagai titik-titik yang berbeda. Di sisi lain, ketika nilai *Error Vector Magnitude* cukup besar, diagram konstelasi sinyal yang diukur akan muncul sebagai titik-titik yang buram. Jari-jari titik akan memberikan nilai *Error Vector Magnitude* [35]. EVM didefinisikan sebagai nilai *root-mean-square* (rms) dari perbedaan antara kumpulan simbol yang ditransmisikan ideal dan simbol yang diterima di bidang I-Q Vektor. kesalahan antara simbol yang diterima dan lokasi simbol yang ideal. *Error Vector* antara simbol yang diterima dan lokasi simbol yang ideal ditunjukkan pada gambar 2.11 sebagai berikut,



Gambar 2.11 *Error Vector* simbol yang diterima dan lokasi yang ideal[34]

EVM dapat dinyatakan sebagai berikut[34],

$$EVM_{rms} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |E_{r,i} - E_{t,i}|^2}{P_{\alpha}}} \quad (2.13)$$

Dimana N adalah jumlah simbol di mana EVM diperkirakan, E_r adalah vektor sinyal yang diterima, E_t adalah vektor transmisi ideal, dan P_α adalah daya transmisi ideal rata-rata untuk modulasi yang dipilih. E_t dapat berupa pola referensi yang diketahui untuk penerimaan dengan bantuan data atau dihitung relatif terhadap simbol terdekat di konstelasi untuk penerimaan tanpa bantuan data.

2.13 BIT ERROR RATE

Bit Error Rate (BER) merupakan perbandingan antara kesalahan (*error*) dengan bit yang dikirimkan keseluruhan. *Bit Error Rate* berfungsi untuk menguji seberapa banyak kesalahan pembacaan di sisi penerima setiap detiknya. *Bit Error Rate* (BER) berfungsi untuk menguji seberapa banyak kesalahan pembacaan di sisi penerima setiap detiknya[36]. Untuk Perhitungan BER dapat dituliskan dalam bentuk Persamaan:

$$BER = \frac{N_E}{N_T} \quad (2.14)$$

Dimana N_E adalah jumlah bit yang salah dan N_T adalah jumlah bit yang diterima. ada jaringan optik secara umum, Nilai BER dimisalkan dengan pemberlakuan BER sejumlah 10^{-13} atau dengan kata lain dalam 10^{-13} yang dikirimkan, error yang terjadi hanyalah 1 bit. ER juga disebut dengan *error probability* (P_e) atau probabilitas munculnya *error* dalam transmisi data[37].