

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 kinerja sistem komunikasi *Free Space Optic* (FSO) menggunakan *cell-site diversity*.

Berdasarkan hasil-hasil dari penelitian yang telah dilakukan diketahui bahwa FSO merupakan teknologi yang dapat dijadikan solusi untuk kebutuhan *user* saat ini karena *bandwidth* dan kecepatannya yang tinggi. Secara khusus, peneliti akan menganalisis teknologi FSO menggunakan teknik *space diversity*. Faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja FSO, nilai *Q-factor*, BER, *jitter* serta distorsi akan menjadi acuan dalam pembuatan penelitian. Selanjutnya membuat skematis hasil penelitian tersebut dalam sebuah Tabel yang disusun berdasarkan tahun penelitian dari yang terdahulu hingga yang terkini. Untuk memudahkan pemahaman terhadap bagian ini, dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut:

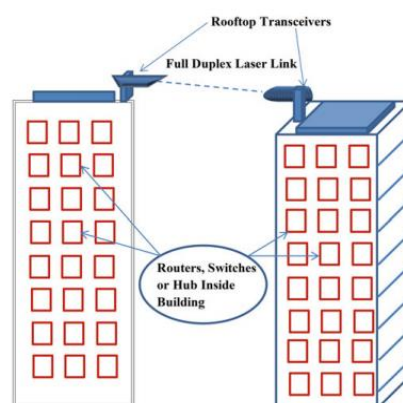
Tabel 2.1 Kajian jurnal penelitian terkait

No	Tahun	Peneliti	Masalah Penelitian	Hasil Penelitian
1.	2017	Abishek Sharma, Kanika Thakur	Membandingkan antara skema MDRZ, CSRZ, dan DRZ menggunakan <i>channel</i> komunikasi <i>single mode fiber</i> (SMF), <i>optical wireless communication</i> (OWC) dan <i>free space optic</i> (FSO)	MDRZ lebih baik dibandingkan dengan pengkodean CSRZ dan DRZ berdasarkan nilai BER yang diimplementasikan pada tiga sistem komunikasi yaitu OWC, SMF dan FSO [4].
2.	2017	Usha, Manisha	Rancangan sistem komunikasi <i>Free Space Optic</i>	Dengan mengirimkan data dari pemancar dan disebarkan menggunakan saluran nirkabel dengan menyertakan berbagai parameter seperti kabut, faktor atenuasi, hujan dan turbulensi atmosfer. Kemudian BER dievaluasi dengan variasi beberapa parameter seperti jarak, daya pemancar, faktor <i>path loss</i> , intensitas sinyal yang diterima dan turbulensi atmosfer. Faktor path loss sangat berpengaruh terhadap Efek dari turbulensi atmosfer dan kabut tebal [5].

3.	2013	Tri Nopiani Damayanti	Pengaruh efek sintilasi pada <i>Free Space Optic Communication System (FSOC)</i>	Dari hasil simulasi didapatkan bahwa daya output power semakin mengecil jika redaman atau attenuasi semakin besar, hal ini disebabkan karena adanya gangguan atau efek turbulens pada media transmisi system FSOC yang menyebabkan terjadinya efek sintilasi yang mengakibatkan BER yang dihasilkan semakin besar sehingga mempengaruhi kualitas kinerja system FSOC. Dari hasil eye diagram didapatkan bahwa peningkatan redaman atau attenuasi mempengaruhi lebarnya eye diagram. Semakin lebar eye diagram, attenuasi atau redaman semakin kecil sehingga akan mengurangi potensi data yang error yang menyebabkan performansi kinerja semakin bagus [6].
4.	2007	Yuli Kurnia Ningsih, Indra Surjati, Danubrata	Penerapan Free Space Optic (FSO) Pada Gedung E dan FG di Kampus A Universitas Trisakti	FSO pada penelitian ini dapat diimplementasikan karena redamannya masih jauh dari nilai <i>link margin</i> [7]

2.2 FREE SPACE OPTIC (FSO)

FSO adalah teknologi *line-of-sight* yang menggunakan laser dan *photo detector* untuk menghubungkan antara dua *user* tanpa kabel. FSO dapat mengirimkan data, suara atau video dengan kecepatan yang mampu mencapai 2,5 Gbps. Unit FSO terdiri dari optik *transceiver* dengan laser (pemancar) dan *photo detector* (penerima) untuk menyediakan kemampuan full duplex (*bi-directional*) [5].



Gambar 2.1 FSO communication link[8]

Sistem FSO menggunakan sinar infra merah laser yang tidak terlihat dalam rentang 750 nm hingga 1550 nm. FSO menyediakan transmisi komunikasi *point-to*

point melalui atmosfer menggunakan sinyal optik sebagai pembawa frekuensi seperti yang terlihat pada Gambar 2.1. Keuntungan dari FSO diantaranya efektivitas biaya dan instalasi mudah, penyediaan bandwidth yang tinggi dan berbagai macam aplikasi komunikasi FSO bebas dari perizinan.

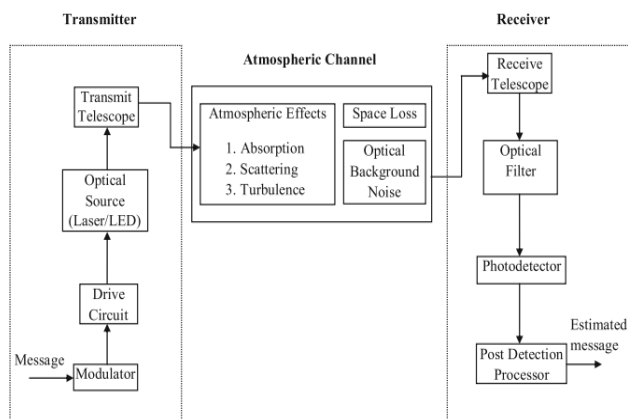
Tabel 2.2 Klasifikasi *eye safety* untuk pemancar sumber titik

Kelas	650 nm cahaya tampak	850 nm <i>infrared</i>	1310 nm <i>infrared</i>	1550 nm <i>infrared</i>
Kelas 1	<0,2 Mw	<0,5 mW	<8,8 mW	<10 mW
Kelas 2	0,2 – 1 mW	n/a	n/a	n/a
Kelas 3A	1 – 5 mW	0,5 – 2,5 mW	8,8 – 45 mW	10 – 50 mW
Kelas 3B	5 – 500 mW	2,5 – 500 mW	45 – 500 mW	50 – 500 mW

Tabel 2.3 Klasifikasi keamanan sumber optik oleh IEC

Kelas	Interpretasi
Kelas 1	Aman untuk dilihat langsung
Kelas 2	Diperlukan pelindung mata untuk mengatasi respon kedipan mata
Kelas 3A	Aman untuk dilihat tanpa pelindung mata. Melihat langsung dapat membahayakan
Kelas 3B	Melihat langsung sangat membahayakan

International Electrotechnical Commission (IEC) telah mengklasifikasikan ketentuan penggunaan laser sebagai sumber optik seperti yang terlihat pada Tabel 2.2. Pada Tabel 2.3 menjelaskan tentang tingkat keamanan untuk setiap kelas. Sistem *wireless* optik jarak jauh menggunakan sumber optik kelas 3B untuk menghasilkan *bitrate* yang tinggi. Kelas 1 sangat dianjurkan untuk sistem *wireless* optik *indoor* karena pancarannya aman dalam berbagai keadaan. Perangkat optik yang digunakan dapat digunakan tanpa memerlukan tindakan pencegahan atau penanganan keselamatan yang khusus [5].



Gambar 2.2 Blok diagram sistem komunikasi FSO[8]

Blok diagram dari komunikasi FSO ditunjukkan pada Gambar 2.2. *Link* komunikasi FSO terdiri dari tiga bagian subsistem yaitu pemancar (*transmitter*), saluran transmisi (*Channel*) dan penerima (*Receiver*).

Transmitter fungsi utamanya adalah untuk memodulasi sinyal pesan ke pembawa optik yang kemudian disebarkan melalui atmosfer ke penerima. Komponen penting dari pemancar adalah (a) modulator, (b) rangkaian driver untuk sumber optik untuk menstabilkan radiasi optik terhadap fluktuasi suhu, dan (c) kolimator atau teleskop yang mengumpulkan, mengkolaborasikan, dan mengarahkan radiasi optik ke arah penerima. Modulasi yang paling banyak digunakan adalah modulasi intensitas di mana data sumber dimodulasi pada irradiansi / intensitas pembawa optik. Ini dapat dicapai dengan memvariasikan arus penggerak dari sumber optik secara langsung dengan sinyal pesan yang akan dikirim atau dengan menggunakan modulator eksternal [8].

Tabel 2.4 Perbandingan LED dan LD [9]

Karakteristik	LED	LD
Lebar spektrum optik	25 – 100 nm	0,1 – 5 nm
<i>Bandwidth</i> modulasi	Puluhan KHz hingga ratusan MHz	Puluhan KHz hingga puluhan GHz
Kebutuhan rangkain khusus	N/A	Rangkaian kompensasi <i>threshold</i> dan temperatur
<i>Eye safety</i>	Dapat fleksibel	Harus memenuhi <i>eye safety</i>
<i>Reliabilitas</i>	Tinggi	Sedang
Biaya	Rendah	Sedang hingga tinggi

Pada sistem komunikasi *wireless optic*, *transmitter* sumber optik dibagi menjadi dua yaitu *Light Emitting Diode* (LED) dan *Semiconductor Laser Diode* (LD). Tabel 2.4 menunjukkan perbandingan antara LED dan LD. Untuk penggunaan LD maupun LED tergantung dari kebutuhan karena setiap komponen mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing.

Karena saluran (*channel*) komunikasi FSO memiliki atmosfer sebagai media propagasinya, ia dipengaruhi oleh faktor lingkungan yang tidak dapat diprediksi seperti awan, salju, kabut, hujan, dll. Faktor-faktor ini tidak memiliki karakteristik yang tetap dan menyebabkan atenuasi dan penurunan kualitas dari sinyal yang diterima. Saluran ini merupakan salah satu faktor pembatas dalam kinerja sistem FSO [8].

Receiver fungsi utamanya adalah untuk memulihkan data yang dikirimkan dari radiasi optik. *Receiver* terdiri dari teleskop penerima, filter optik, *photodetector* dan *demodulator*. Teleskop penerima mengumpulkan dan memfokuskan radiasi optik yang masuk ke *photodetector*. Filter optik mengurangi tingkat radiasi dan mengarahkan sinyal pada *photodetektor* yang mengubah sinyal optik insiden menjadi sinyal listrik [8].

Tabel 2.5 Perbandingan PIN *photodiode* dan APD [9]

Karakteristik	PIN <i>photodiode</i>	APD
<i>Bandwidth</i> modulasi	Puluhan MHz hingga puluhan GHz	Ratusan MHz hingga puluhan GHz
Kebutuhan rangkaian tambahan	—	Sumber tegangan bias yang tinggi, rangkaian pengkompensasi suhu
Linearitas	Tinggi	Rendah
Biaya	Rendah	Sedang hingga tinggi

Pada sisi *receiver* dibagi menjadi dua yaitu PIN *photodiode* dan *Avalanche Photo Diode* (APD). Perbandingan antara PIN *photodiode* dan APD terlihat pada Tabel 2.5.

2.3 PANJANG GELOMBANG PADA KOMUNIKASI FSO

Pemilihan panjang gelombang dalam sistem komunikasi FSO merupakan parameter yang sangat penting karena mempengaruhi kinerja dan sensitivitas detektor sistem. Penggunaan panjang gelombang yang lebih rendah akan sangat menguntungkan karena *gain* antena berbanding terbalik dengan operasi panjang gelombang. Namun, panjang gelombang yang lebih tinggi memberikan kualitas *link* yang lebih baik. Pengoptimalan panjang gelombang secara benar dalam desain FSO akan membantu dalam mencapai kinerja yang lebih baik. Pemilihan panjang gelombang sangat bergantung pada efek atmosfer, redaman, dan *noise power*. Selanjutnya, ketersediaan komponen pemancar dan penerima, peraturan keselamatan mata dan biaya sangat berdampak pada pemilihan panjang gelombang dalam proses desain FSO.

The International Commission on Illumination telah mengklasifikasikan radiasi optik ke dalam tiga kategori yaitu IR-A (700-1400 nm), IR-B (1400-3000 nm) dan IR-C (3000 nm-1 mm). Kemudian dapat di subklasifikasikan menjadi [8]:

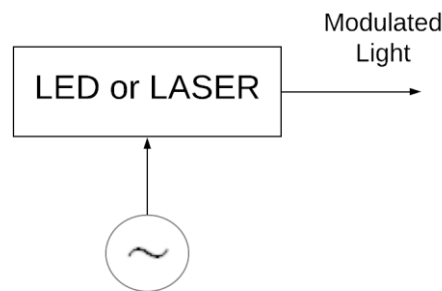
- a. *Near-infrared* (NIR) mulai dari 750 hingga 1450 nm yang memiliki atenuasi rendah dan biasanya digunakan untuk serat optik,
- b. *Short-Infrared* (SIR) mulai dari 1400 hingga 3000 nm dari mana 1530-1560 nm merupakan rentang spektral yang dominan untuk komunikasi jarak jauh,
- c. *Medium-Infrared* (MIR) mulai dari 3000 hingga 8000 nm yang digunakan dalam aplikasi militer untuk memandu rudal,
- d. *Long-Infrared* (LIR) mulai dari 8000 nm hingga 15 m yang digunakan dalam pencitraan termal
- e. *Far-infrared* (FIR) yang berkisar dari 15 m hingga 1 mm.

Hampir semua sistem FSO yang tersedia secara komersial menggunakan rentang panjang gelombang NIR dan SIR karena panjang gelombang ini juga digunakan dalam komunikasi serat optik dan komponennya tersedia di pasaran. Pemilihan panjang gelombang untuk komunikasi FSO harus mempertimbangkan keselamatan mata dan kulit agar tetap aman karena panjang gelombang tertentu antara 400 dan 1500 nm dapat menyebabkan potensi bahaya mata atau kerusakan pada retina.

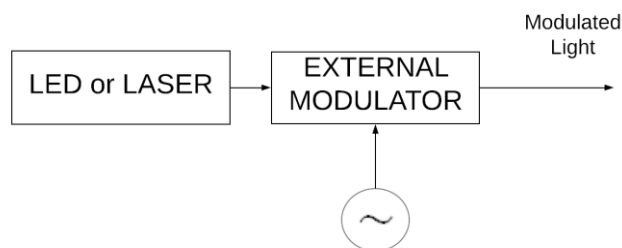
2.4 TEKNOLOGI DIFSO

Teknologi yang digunakan dalam sistem FSO hampir serupa dengan sistem RF konvensional. Sebagian besar teknik diadaptasi langsung dari sistem RF. Modulasi pembawa optik berbeda dari modulasi pembawa RF karena karakteristik dan keterbatasan perangkat yang digunakan untuk membawa proses modulasi. Modulasi optik dapat dilakukan dengan dua cara: internal atau eksternal seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4. Karakteristik dari modulator internal yaitu sumber secara langsung bervariasi sesuai dengan sinyal informasi untuk menghasilkan sinyal optik termodulasi. Frekuensi atau modulasi fase dapat diperoleh dengan mengubah panjang rongga laser.

Dalam kasus modulasi eksternal, perangkat eksternal bervariasi sesuai dengan sinyal modulasi. Sistem ini mampu memanfaatkan kekuatan penuh sumber. Namun, modulasi eksternal membatasi rentang modulasi dan membutuhkan arus penggerak yang relatif tinggi.



Gambar 2.3 Direct intensity [8]

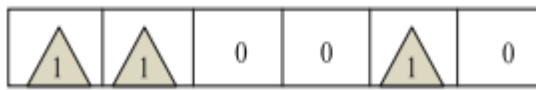


Gambar 2.4 Modulator eksternal [8]

2.5 BASEBAND MODULATION DAN DIRECT DETECTION SYSTEM

Dalam modulasi *baseband*, sinyal informasi secara langsung memodulasi LED / laser. Sinyal ini, sering disebut sinyal modulasi *baseband*, kemudian

ditransmisikan melalui saluran atmosfer. Di sisi penerima, informasi tersebut dipulihkan dari sinyal termodulasi-*baseband* menggunakan teknik deteksi langsung. Skema modulasi yang termasuk dalam kategori ini termasuk *on-off keying* (OOK) dan *Digital Pulse-Position Modulation* (PPM). Skema modulasi pulsa lain seperti *Digital Pulse Interval Modulation* (DPIM), *Pulse Amplitude and Position Modulation* (PAPM), dan *Differential Amplitude Pulse Interval Modulation* (DAPIM). Sebagian besar pada sistem FSO menggunakan skema modulasi OOK karena sederhana dan mudah diterapkan.

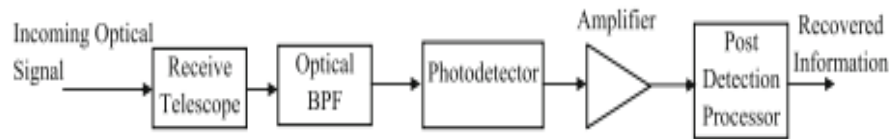


Gambar 2.5 OOK modulation mengirimkan pesan 110010 [8]

Dalam OOK, seperti yang terlihat pada Gambar 2.5 transmisi data biner diwakili oleh ada atau tidaknya pulsa cahaya, jika bit informasi adalah 1, laser dihidupkan untuk durasi tertentu, dan jika 0, tidak ada yang ditransmisikan. Sistem OOK membutuhkan adaptif *threshold* untuk menghadapi atenuasi di atmosfer. Dalam OOK dengan *non return to zero* (NRZ-OOK) *signaling*, bit satu hanya diwakili oleh pulsa optik yang menempati seluruh durasi bit, sementara bit nol diwakili oleh tidak adanya pulsa optik. Dalam OOK dengan *signaling return to zero* (RZ-OOK), satu bit direpresentasikan oleh adanya pulsa optik yang menempati bagian dari durasi bit [8].

Dalam teknik deteksi langsung, sinyal optik yang diterima dilewatkan melalui *band-pass* filter optik untuk membatasi radiasi. kemudian disalurkan ke fotodetektor yang menghasilkan keluaran sinyal listrik sebanding dengan intensitas sesaat dari sinyal optik yang diterima. Fotodetektor diikuti oleh *low-pass* filter elektrik (LPF) dengan *bandwidth* yang cukup untuk meneruskan sinyal informasi.

Diagram blok penerima deteksi langsung seperti pada Gambar 2.6, respon fotodetektor tidak sensitif terhadap frekuensi, fase atau polarisasi *carrier*, jenis penerima ini hanya berguna untuk intensitas sinyal termodulasi.



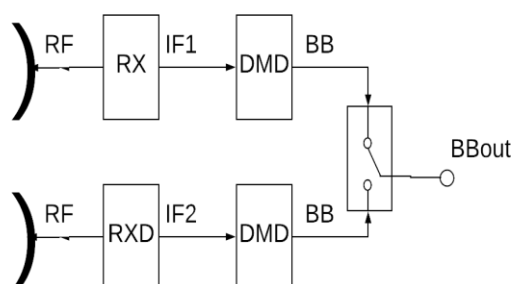
Gambar 2.6 Blok diagram *direct detection system*

2.6 DIVERSITY

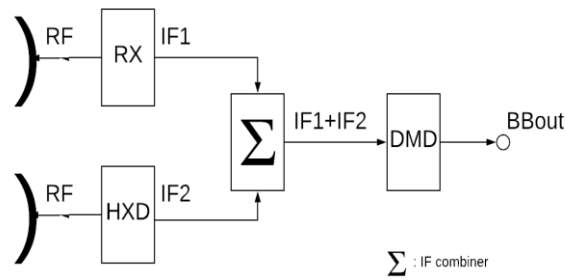
Teknik *diversity* merupakan suatu teknik yang digunakan untuk menambah kualitas penerimaan sinyal di sisi penerima (*receiver*). Ada beberapa jenis teknik *diversity* antara lain *space diversity* dan *frequency diversity*. Teknik yang digunakan dalam penelitian ini adalah teknik *space diversity*.

2.6.1 SPACE DIVERSITY

Sinyal yang dipancarkan, mungkin dipantulkan oleh *obstacle* atau kondisi dari lapisan atmosfer bumi dalam radio hop. Hal ini dapat berarti bahwa sebagian sinyal mencapai antenna penerima secara langsung, dan sebagian yang lain secara tidak langsung, yaitu melalui sebuah pantulan dalam *hop* radio. Jika fase dari kedua sinyal sesampainya di penerima berlawanan disebabkan oleh beda panjang lintasan (*multipath propagation*) maka hal ini akan menyebabkan terjadinya *fading* (melemahnya sinyal). *Space diversity* adalah salah satu dari beberapa skema *diversity* nirkabel yang menggunakan dua atau lebih antenna untuk meningkatkan kualitas dan keandalan *link* nirkabel [10]. Dalam teknik *space diversity* ini tidak memerlukan lebih dari satu frekuensi kerja. Pada sistem ini, penerimaan menggunakan dua atau lebih antenna yang dipasang sedemikian rupa sehingga antenna yang satu dengan antenna yang lain terletak pada bidang vertikal secara terpisah.



Gambar 2.7 Pemrosesan *switch*



Gambar 2.8 Pemrosesan *combiner*

Teknik *space diversity* memiliki dua pilihan dalam pemrosesan yaitu *switch* dan *combiner*. Dalam pemrosesan *switch* antenna penerima akan memilih sinyal yang paling baik yang dikirimkan lebih dari satu antenna yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Tujuan dari menggunakan *switch* adalah untuk mendapatkan sinyal yang paling baik dayanya. Sedangkan dalam pemrosesan *combiner* sinyal dari beberapa antenna digabungkan yang kemudian dikirimkan ke sisi penerima seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Teknik ini digunakan agar sistem komunikasi FSO tetap dapat mengirimkan suatu informasi secara maksimal.

2.7 Q-FACTOR DAN BIT ERROR RATE (BER)

Q-factor merepresentasikan *optical SNR* untuk komunikasi optik biner atau digital dan memudahkan analisis performa sistem. Hubungan antara OSNR, *Q-factor* dan BER dapat dirumuskan seperti pada persamaan 2.1. [11]

$$Q = \frac{2\sqrt{2} OSNR}{1 + \sqrt{1 + 4OSNR}} \quad (2.1)$$

BER didefinisikan sebagai jumlah terjadinya *error* tiap jumlah bit data terkirim pada suatu sistem digital. Apabila jumlah bit error N_E dan jumlah bit total terkirim adalah N_T , maka BER dapat dirumuskan seperti pada persamaan 2.2.

$$BER = \frac{N_E}{N_T} \quad (2.2)$$

Pada jaringan komunikasi optik secara umum, nilai BER yang harus dipenuhi adalah BER $10^{-6} - 10^{-12}$. Artinya, tiap 10^6 hingga 10^{12} bit data yang dikirim, *error*

yang terjadi hanyalah pada 1 bit. BER juga disebut dengan *error probability* (P_e) atau probabilitas munculnya *error* dalam transmisi data. Dalam proses transmisi, bit tertentu memiliki amplitudo sinyal yang terlalu dekat dengan *threshold* sehingga tidak dapat dibedakan nilainya dengan benar. Nilai BER dapat pula dinyatakan dalam *Q-factor* melalui persamaan 2.3 [12].

$$\text{BER} = P_e(Q) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-Q^2/2}}{Q} \quad (2.3)$$

Dalam ITU-T Recs G.691, G.692 dan G.959.1 menyatakan BER yang baik tidak lebih buruk dari 10^{-12} dan sesuai dengan nilai *Q-factor* $\approx 7,03$ [13].

2.8 RUGI-RUGI KARENA KONDISI CUACA

Kinerja FSO sangat berpengaruh pada berbagai faktor lingkungan diantaranya kabut, salju, hujan dan lain-lain. Faktor ini menyebabkan penurunan daya sinyal yang diterima. Visibilitas atmosfer merupakan ukuran yang berguna untuk memprediksi kondisi lingkungan atmosfer. Untuk memprediksi statistik redaman optik dari statistik visibilitas untuk memperkirakan jangkauan sistem FSO, hubungan antara visibilitas dan redaman harus diketahui. Istilah yang disebut “*specific attenuation*” digunakan untuk merepresentasikan atenuasi per satuan panjang yang dinyatakan dalam dB/km dengan rumus sebagai berikut :

$$\beta(\lambda) = \frac{1}{R} \cdot 10 \log \left(\frac{P_o}{P_R} \right) = \frac{1}{R} \cdot 10 \log (e^{\gamma(\lambda)R}) \quad (2.4)$$

Dimana R adalah panjang *link*, P_o daya optik yang dipancarkan dari pemancar. P_R adalah daya optik pada jarak R , dan γ adalah koefisien atenuasi atmosfer.

Pelemahan karena kabut dapat diprediksi dengan menerapkan teori “*Mie Scattering*”. Namun, teori ini memerlukan informasi yang terperinci tentang parameter kabut. Oleh karena itu digunakan pendekatan alternatif yang didasarkan pada informasi jangkauan visibilitas, dimana pelemahan akibat kabut diprediksi menggunakan model empiris umum. Panjang gelombang 550 nm biasanya digunakan sebagai panjang gelombang referensi rentang visibilitas. Persamaan 2.5 mendefinisikan redaman spesifik kabut untuk “*Mie Scattering*”.

$$\beta(\lambda) = \frac{3.91}{v} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-p} \quad (2.5)$$

Dengan v (km) adalah rentang jarak pandang, λ (nm) adalah panjang gelombang operasi, dan p koefisien distribusi ukuran hamburan.

Berdasarkan model Kim, p dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$p = \begin{cases} 1,6 & v > 50 \\ 1,3 & 6 < v < 50 \\ 0,16v + 0,34 & 1 < v < 6 \\ v - 0,5 & 0,5 < v < 1 \\ 0 & v < 0,5 \end{cases} \quad (2.6)$$

Untuk model Kruse, P dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$p = \begin{cases} 1,6 & v > 50 \\ 1,3 & 6 < v < 50 \\ 0,585v & 1 < v < 6 \end{cases} \quad (2.7)$$

Kondisi cuaca yang berbeda dapat ditentukan berdasarkan nilai rentang visibilitasnya. Tabel 2.6 merangkum kisaran visibilitas untuk kondisi cuaca yang berbeda.

Tabel 2.6 Nilai *visibility* berdasarkan kondisi cuaca [8]

Kondisi cuaca	Visibility (km)	Loss (dB/km) di 785 nm
<i>Thick fog</i>	0,2	-89,6
<i>Moderate fog</i>	0,5	-34
<i>Light fig</i>	0,770 – 1	-20 s.d -14
<i>Thin fog/heavy rain</i>	1,9 – 2	-7,1 s.d -6,7
<i>Haze/ medium rain</i>	2,8 - 4	-4,6 s.d -3
<i>Light haze/light rain</i>	5,9 – 10	-1,8 s.d 1,1
<i>Clear/drizzle</i>	18 – 20	-0,6 s.d 0,53
<i>Very clear</i>	23 – 50	-0,46 s.d -0,21

Atenuasi yang disebabkan karena salju dapat bervariasi tergantung pada ukuran salju. Karena ukuran salju lebih besar daripada tetesan air hujan, salju menyebabkan sinyal lebih pudar dibandingkan dengan tetesan hujan. Ukuran salju bisa sebesar 20 mm yang dapat sepenuhnya memblokir jalur sinyal optik tergantung

pada lebar berkas sinyal. Sedangkan tetesan hujan yang cukup besar dapat menyebabkan pelemahan sinyal yang tidak tergantung pada panjang gelombang. Pelemahan yang dihasilkan oleh curah hujan meningkat secara linear dengan laju curah hujan.