

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 KAJIAN PUSTAKA

Pada sub bab kajian pustaka peneliti melakukan studi literatur dari penelitian sebelumnya yang masih linier dengan penelitian yang akan dilakukan saat ini, tahap ini merupakan salah satu pendukung untuk memulai penelitian ini. Pada hal ini, fokus penelitian sebelumnya yang akan dijadikan acuan atau jurnal adalah terkait dengan teknologi Li-Fi nya. Pada penelitian [6] desain sistem jaringan Li-Fi telah dilakukan pengujian dengan berbagai parameter yang diujikan seperti sudut, kecepatan data, jarak, frekuensi, responsivitas PIN dioda dan skema modulasi untuk mencapai hasil yang terbaik. Penggunaan *filter Chebysev* merupakan pilihan *filter* terbaik karena menghasilkan kualitas tinggi dan BER yang rendah yaitu 10^{-47} . Selain itu modulasi NRZ ditemukan yang paling baik dalam hal kualitas dan BER yang rendah. Namun dalam pengujian ini belum mempertimbangkan parameter panjang gelombang, *bandwidth*, daya terima dan SNR.

Penelitian [7] Masalah utama komunikasi VLC, mulai dari masalah khusus cahaya (kedipan, peredupan, garis pandang, dan interferensi) hingga tantangan terkait komunikasi nirkabel (seperti *uplink* dan mobilitas) yang harus ditangani untuk mencapai kinerja yang baik. Teknologi ini menawarkan peluang besar untuk melengkapi infrastruktur nirkabel saat ini karena menawarkan peningkatan kinerja terutama di lingkungan kantor dan rumah yang dimana jaraknya pendek, penggunaan di lingkungan yang sensitif seperti rumah sakit dan memiliki keamanan yang lebih baik .

Penelitian [1] Teknologi Li-Fi harus saling berhadapan untuk transmisi data yang efektif. Perbedaan kecil menyebabkan gangguan pada transmisi. Gangguan dapat disebabkan oleh sumber cahaya eksternal. Tidak dapat menembus batu bata, dinding tebal seperti gelombang radio dan hanya diblokir oleh benda-benda, manusia, dll. Teknologi Li-Fi meningkatkan transmisi data secara efisien daripada teknologi Wi-Fi, dan pengamatan menunjukkan bahwa teknologi Li-Fi melakukan transmisi data yang tidak berbahaya dengan kecepatan tinggi menggunakan sumber cahaya, sehingga teknologi ini dapat digunakan juga di area sensitif sinyal seperti

rumah sakit, pusat pemindaian, saluran udara dan lain sebagainya.

Penelitian [8] Teknik MIMO yang dipilih dalam metode adaptif tergantung pada efisiensi spektral, BER target dan matriks saluran yang itu sendiri tergantung pada posisi dan konfigurasi *photodetector* (PD) dan sumber cahaya. Di sini, efek keragaman sudut penerima dan efisiensi spektral dipelajari untuk posisi yang berbeda di dalam ruangan dan teknik MIMO yang dipilih dalam kasus yang berbeda disajikan. Perhatikan bahwa parameter lain, seperti jarak antara sumber cahaya dan pemisahan PD, juga memengaruhi hasil yang tidak dipelajari.

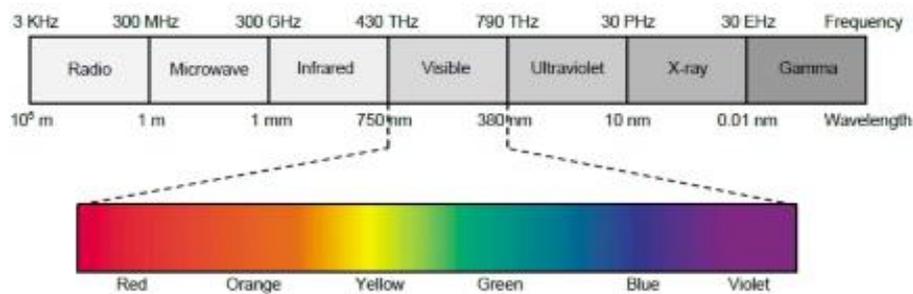
Penelitian [4] melakukan eksperimental saluran MIMO LiFi terdistribusi di ruang konferensi dalam ruangan. MIMO terdistribusi ini memberikan cakupan homogen, *throughput* yang lebih tinggi, kemungkinan rintangan yang lebih rendah dan latensi yang lebih rendah. Respons frekuensi semua saluran LiFi di ukur secara bersamaan dan kemudian kapasitas saluran diperkirakan dalam skenario multi pengguna yang berbeda. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa posisi *front-end* optik di infrastruktur dan pengguna memiliki dampak signifikan pada kapasitas yang dapat dicapai.

Penelitian [5] melakukan penelitian *broadband* terdistribusi 8x6 pengukuran saluran *multiple-input multiple-output* (MIMO) dalam sel manufaktur. Pengukuran saluran MIMO ini disajikan efektivitas keragaman antenna dalam pengaturan MIMO terdistribusi untuk mengatasi rintangan dari LOS. Pengukuran saluran MIMO ini menunjukkan bahwa saluran frekuensi hampir tidak selektif, tetapi bervariasi secara signifikan dalam domain spasial dengan perubahan secara signifikan bahkan untuk perubahan kecil. Oleh karena itu, keragaman antenna melalui saluran MIMO diperlukan untuk komunikasi nirkabel optik yang andal di lingkungan manufaktur. Keandalan dapat lebih ditingkatkan dengan penempatan Rx yang lebih baik.

2.2 VISIBLE LIGHT COMMUNICATION (VLC)

Teknologi nirkabel optik atau biasa disebut dengan VLC. Teknologi baru ini menawarkan komunikasi nirkabel optik dengan menggunakan cahaya tampak, mulau dari panjang gelombang 380 nm hingga 750 nm. Frekuensi cahaya tampak lebih besar 10.000 kali dari spektrum frekuensi radio lainnya yaitu pada rentang 430 THz hingga 780 THz seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.1 [7]. Teknologi ini

dilihat sebagai alternatif untuk layanan komunikasi berbasis RF yang berbeda di jaringan area pribadi nirkabel. Peluang tambahan muncul dengan menggunakan solusi pencahayaan LED untuk penerangan dan komunikasi pada saat yang sama dan dengan modul yang sama. Hal ini dapat dilakukan karena kemampuan untuk memodulasikan LED dengan kecepatannya yang jauh lebih cepat dari yang dapat dideteksi mata manusia sambil tetap memberikan pencahayaan. Ini akan sangat relevan dalam sistem pencahayaan pintar dalam ruangan yang dimana lampu selalu menyala dalam ruangan [2].



Gambar 2.1 Spektrum Visible Light Communication

Standar sistem VLC baru dirancang dalam beberapa tahun terakhir, yakni dimulai dari tahun 2009 yang dimana IEEE 802.15.17 membentuk *task group* yang bekerja untuk membuat standar VLC yang meliputi *physical layer* dan *medium access control* (MAC) berdasarkan pendekatan *clean slate*. Selanjutnya draft standar IEEE 802.15.7 tersebut dipublikasikan pada Tahun 2010 yang mengajukan penggunaan beberapa teknik modulasi antara lain *On-Off Keying* (OOK), *Variable Pulse-Position Modulation* (VPPM), dan *Color-Shift Keying* (CSK). Meskipun mengakomodasi sistem komunikasi dengan aspek keamanan, pada praktiknya belum tentu dapat diaplikasikan pada suatu perangkat tertentu..

Dalam teknologi VLC terdapat dua pemodelan kanal yaitu *Line Of Sight* (LOS) dan juga *Non Line Of Sight* (NLOS). Model kanal LOS merupakan permodelan yang sangat baik digunakan dalam penelitian teknologi VLC karena presentasi kehandalan pengiriman data dapat terjamin dan energi yang berdifusi pada komponen lebih rendah dibandingkan NLOS. Model kanal propagasi LOS dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut [9]:

$$h_{los} = \frac{A_r(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \quad (2.1)$$

Keterangan:

h_{los} = Model kanal propagasi LOS

Ar = Area Photodetector (cm²)

m = Emisi Lambertian

d = Jarak antara LED dengan receiver (m)

\emptyset = Sudut penyinaran pada transmitter (derajat)

$\cos(\psi)$ = sudut terima pada receiver (derajat)

Ts(ψ) = penguatan pada filter optik (dB)

g(ψ) = konsentrator optik

Persamaan 2.1 model kanal propagasi LOS dengan Emisi Lambertian yang diasumsikan sebagai sumber pemancar LED dapat dituliskan dengan persamaan 2.2 [9]:

$$m = \frac{\ln 2}{\ln (\cos \phi_{\frac{1}{2}})} \quad (2.2)$$

Keterangan:

$\phi_{\frac{1}{2}}$ = Transmitter Half Angle (derajat)

2.3 Li-Fi (*LIGHT FIDELITY*)

Li-Fi adalah singkatan dari *Light Fidelity* merupakan teknologi dengan transmisi data melalui iluminasi dengan mengeluarkan serat optik dengan mengirimkan data atau sinyal melalui bola lampu LED yang intensitasnya bervariasi lebih cepat daripada yang dapat dilihat oleh mata manusia. Li-Fi adalah istilah yang digunakan beberapa orang untuk menyebut sistem komunikasi yang bersifat nirkabel yang cepat dan juga murah. Istilah Dengan menggunakan cahaya tampak ini sebagai media transmisinya, kecepatan bit yang dicapai oleh Li-Fi tidak dapat dicapai oleh Wi-Fi. Li-Fi memberikan *bandwidth*, efisiensi, ketersediaan, dan keamanan yang lebih baik daripada Wi-Fi dan telah mencapai kecepatan yang sangat tinggi [10]. Istilah Li-Fi mengacu pada teknologi *Visible Light Communication* (VLC) yang menggunakan cahaya sebagai media untuk menyampaikan komunikasi berkecepatan tinggi dengan cara yang mirip Wi-Fi sesuai dengan standar IEEE 802.15.7 [3].

Li-Fi biasanya diimplementasikan menggunakan LED putih. Prosedur operasionalnya sangat sederhana yaitu jika LED menyala maka mengirimkan digital 1, jika LED mati maka mengirimkan digital 0. LED dapat dinyalakan dan dimatikan dengan sangat cepat, yang memberikan peluang bagus untuk mentransmisikan data [10].



Gambar 2.2 Ilustrasi Sistem Komunikasi Li-Fi [11]

Gambar 2.2 menunjukkan skenario aplikasi Li-Fi baik *indoor* maupun *outdoor*. Dalam kondisi *indoor*, komunikasi dan penerangan dilakukan secara bersamaan. Dalam kondisi *outdoor* untuk kasus tertentu komunikasi dan penerangan dilakukan bersamaan misalnya pada lampu jalan dan lampu depan kendaraan, sedangkan dalam kasus lain hanya komunikasi dilakukan misalnya di lampu lalu lintas dan lampu belakang kendaraan [11].

2.3.1 Modulasi Pada Li-Fi

Teknologi Li-Fi ini masih serupa dengan teknologi VLC yang menggunakan standar IEEE 802.15.7 yang memiliki *Physical Layer* (PHY) dan *Media Access Control* (MAC). Lapisan MAC ini digunakan sebagai tautan ke lapisan lain sedangkan lapisan PHY dikategorikan ke dalam 3 lapisan PHY diantaranya [12]:

1. PHY I ini bekerja dari mulai 11,67 kbps hingga 267,6 kbps untuk aplikasi di luar ruangan.
2. PHY II ini bekerja dari mulai 1,25 Mbps hingga 96 Mbps untuk mencapai kecepatan data.
3. PHY III bekerja dari 12 Mbps hingga 96 Mbps yang digunakan sebagai

sumber pemancar.

Teknik modulasi untuk dua lapisan fisik pertama mengidentifikasi penggunaan OOK (*On-Off Keying*) atau BASK (*Base Amplitude Shift Keying*) dan *Variabel Pulsa Position Modulation* (VPPM).

Dalam sistem berbasis Li-Fi, skema modulasi berbasis Peredupan adalah skema modulasi yang paling umum digunakan yang merupakan skema berbasis *single carrier*. Dalam skema modulasi berbasis peredupan, kecepatan dari data yang diinginkan di capai dengan mengontrol tingkat *On-Off* dari LED. OOK (*On-Off Keying*), PPM (*Pulse Position Modulation*), PWM (*Pulse Width Modulation*), , OSM (*Optical Spatial Modulation*) dan VPPM (*Variable Pulse Position Modulation*) merupakan skema modulasi berbasis peredupan utama ini yang dapat diimplementasikan dalam sistem indoor berbasis Li-Fi.

Untuk dapat mencapai kecepatan data lebih tinggi dan mengurangi efek dari distorsi atau interferensi, modulasi *multicarrier* ini juga berguna dalam sistem komunikasi Li-Fi namun skema modulasi *multicarrier* kurang hemat energi. Skema yang umum digunakan adalah OFDM tetapi sinyal berbasis OFDM bersifat kompleks dan bipolar sehingga untuk menerapkan OFDM untuk sistem komunikasi Li-Fi diperlukan beberapa modifikasi dalam teknik yang konvensional agar kinerja bisa lebih baik. Dalam penelitian sebelumnya mengusulkan OFDM Optik ACO-OFDM (*Asymmetrically Clipped Optical OFDM*) di mana *subcarrier* ganjil dimodulasi DCO-OFDM (*Direct Current-Biased Optical OFDM*) adalah skema di mana semua *subcarrier* dimodulasi dan sinyal unipolar dihasilkan dengan menambahkan arus searah positif. ACO-OFDM lebih hemat energi dibandingkan dengan DCO-OFDM. Hubungan antara cahaya yang dipancarkan oleh LED dan arus adalah *nonlinier* sehingga sifat nonlinier berbasis LED ini mempengaruhi kinerja skema modulasi berbasis OFDM [13].

2.3.2 Perbandingan Komunikasi Li-Fi Dengan Wi-Fi

Li-Fi membuat jaringan menggunakan elemen fotosensitif desktop yang beroperasi bersama-sama dengan lampu yang tidak dimodifikasi. Elemen fotosensitif desktop berisi LED inframerah untuk terhubung dengan saluran *uplink*. Dalam model ini, Li-Fi beroperasi dengan kecepatan data 5 Mbps di saluran *uplink*

dan *downlink* dan mencakup jangkauan hingga tiga meter [3].

Wi-Fi bekerja pada gelombang radio untuk menyediakan internet nirkabel dan koneksi jaringan dengan kecepatan tinggi. Ketika arus RF dilewatkan ke antena yang menciptakan medan elektromagnetik untuk merambat melalui ruang. Wi-Fi dilambangkan dengan standar IEEE 802.11x. Teknologi ini memanfaatkan perangkat AP untuk menyiarkan sinyal di sekitar perangkat komputer. Perbandingan dari teknologi Li-Fi dengan Wi-Fi disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Perbandingan Komunikasi Li-Fi dengan Wi-Fi [1]

Fitur	Li-Fi	Wi-Fi
Standar IEEE	802.15.7	802.11b
Komponen Sistem	bohlam LED dan fotodetektor	Router dan perangkat pelanggan (laptop, PDA, desktop)
Teknologi	IrDA	WLAN 802.11 a/b/g/n/ac/ad
Topologi	Poin to Poin	Poin to Multi-point
Data Transmisi	bits	Gelombang radio
Frekuensi	10000 kali dari Wi-Fi	rentang spektrum radio
Frekuensi band	100 kali dari Tera Hz	2.4GHz ; 4.9GHz ; 5GHz
Kecepatan Data	1 – 3.5 Gbps	WLAN-11n menawarkan 150Mbps dan WiGig/Giga-IR menawarkan sekitar 1 - 2 Gbps
Cakupan Area	10 meter	20 – 100 meter (WLAN 802.11b/11g). Bervariasi berdasarkan jenis daya transmisi dan antena
Cara Kerja	Transmisi data dengan cahaya lampu LED	Transmisi data melalui gelombang radio dengan router Wi-Fi
Interferensi	Tidak ada masalah interferensi dengan gelombang RF	Gangguan dengan router AP tetangga
Dampak Ekologis	Rendah	Tinggi
Privasi	Transfer data lebih aman	RF tidak dapat dicegah karenanya transmisi data keamanan kurang
Kepadaan Data	Lingkungan kerja kepadatan tinggi	Lingkungan kepadatan kurang karena masalah interferensi
Latensi	Mikrodetik	Millidetik
Biaya	Murah	Mahal

Teknologi Wi-Fi terdiri dari manfaat seperti aksesibilitas global, hemat biaya, kemudahan penggunaan komunikasi, menghilangkan biaya penggunaan seluler, menghilangkan kabel dan kabel untuk perangkat komputer. Dari pengamatan studi tersebut, Li-Fi memberikan lebih banyak kinerja dalam hal fitur yang terdaftar. Dari penjelasan Tabel 2.2 mengenai Perbandingan Teknologi Li-Fi dengan WiFi ini dapat disimpulkan bahwa teknologi Li-Fi memiliki beberapa kelebihan diantaranya:

1. *Light Fidelity* menggunakan pencahayaan dari pada sinyal frekuensi radio sehingga tidak toleran pada gangguan.
2. Teknologi Li-Fi dapat diintegrasikan ke dalam perangkat – perangkat medis dan perangkat di rumah sakit karena teknologi ini tidak menangani gelombang radio, sehingga dapat dengan mudah digunakan di semua tempat di mana Bluetooth, inframerah, Wi-Fi, dan internet digunakan secara luas.
3. Di bawah air di laut Wi-Fi tidak berfungsi sama sekali tetapi cahaya dapat digunakan dan oleh karena itu eksplorasi bawah laut sekarang dapat dilakukan dengan lebih mudah.
4. Ada miliaran bohlam di seluruh dunia yang hanya perlu diganti dengan LED untuk mengirimkan data.
5. Keamanan adalah manfaat lain dari penggunaan cahaya untuk transfer data karena tidak menembus dinding.
6. Di jalan raya untuk aplikasi kontrol lalu lintas seperti di mana mobil dapat memiliki lampu depan berbasis LED, lampu latar berbasis LED, dan mereka dapat berkomunikasi satu sama lain dan mencegah kecelakaan. Menggunakan Teknologi ini di seluruh dunia, setiap lampu jalan akan menjadi titik akses data gratis.
7. Masalah kekurangan *bandwidth* dapat diselesaikan dengan Li-Fi.

2.4 KOMPONEN RANGKAIAN SISTEM

2.4.1 *Pseudo-Random Binary Sequence (PRBS)*

PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*) adalah urutan acak dari bilangan biner, dalam arti bahwa nilai elemen pada barisan tidak bergantung pada nilai

elemen lainnya . Urutan bit ini dirancang untuk mendekati karakteristik data acak. Model ini menghasilkan urutan N bits menggunakan persamaan 2.3 [14]:

$$N = T_w B_r \quad (2.3)$$

Untuk menghitung jumlah bit yang dihasilkan dapat menggunakan persamaan 2.4 [14]:

$$N_G = N - n_l - n_t \quad (2.4)$$

Keterangan:

N = Urutan bit (bits)

T_w = Global Parameter Time Window (s)

B_r = Bit rate (Mbps)

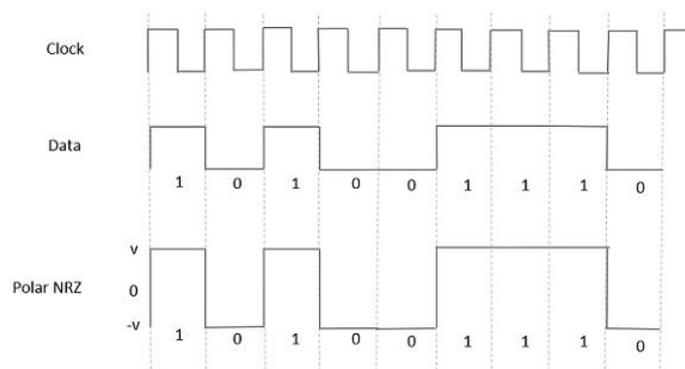
N_G = Jumlah bit yang dihasilkan (bits)

n_l = Jumlah nol di depan

n_t = Jumlah nol trailing

2.4.2 Non Return to Zero (NRZ)

Pengkodean sinyal menggunakan seperangkat aturan untuk mengatur simbol sinyal dengan pola tertentu, proses ini biasa disebut dengan *line coding*. Tujuan dari ini adalah untuk memeriksa berbagai jenis kode garis yang cocok untuk transmisi digital pada tautan optik. *Non Return to Zero* (NRZ) merupakan bentuk paling umum dari sinyal listrik yang digunakan secara internal dalam sistem digital. Setiap simbol memiliki nilai konstan yang sesuai dengan nilai simbol biner 1 dan 0 [15].



Gambar 2.3 Line Coding Non Return to Zero [15]

Keuntungan dari NRZ adalah bahwa transisi yang lebih sedikit antara 0 dan 0

1 diperlukan dibandingkan dengan RZ, karena amplitudo sinyal tetap sama jika bit berturut-turut adalah 1 atau 0. Sehingga bandwidth sinyal NRZ sedikit dari sinyal RZ [17]. Komponen NRZ menghasilkan pulsa listrik persegi panjang dengan bentuk tepi model exponential dengan persamaan 2.5 [14]:

$$E(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{t}{c_r}\right)}, & 0 \leq t < t_1 \\ 1, & t_1 \leq t < t_2 \\ e^{-\left(\frac{t}{c_f}\right)}, & t_2 \leq t < T \end{cases} \quad (2.5)$$

Keterangan :

c_r : koefisien waktu naik / rise time (s)

c_f : koefisien waktu jatuh / fall time (s)

T : periode bit (s)

2.4.3 Light Emitting Diode (LED)

LED (*Light Emitting Diode*) merupakan perangkat elektronika atau dioda yang terbuat dari bahan yang sifatnya semi konduktor dan dapat memancarkan cahaya. Bahan semi konduktor ini yang biasa digunakan LED diantaranya *arsenic*, *galium*, atau *phosphorus* yang dimana jenis dari bahan yang berbeda dapat menentukan warna cahaya yang di pancarkan oleh LED. Perbedaan warna pada ini LED akan menyebabkan adanya perbedaan panjang gelombang cahaya, seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2.3 [16].

Tabel 2.2 Warna LED [7]

Material	Panjang Gelombang (nm)	Warna
<i>Gallium Arsenide (GaAs)</i>	850 - 940	Infra-Red
<i>Gallium Arsenide Phosphide (GaAsP)</i>	630 - 660	Merah
<i>Gallium Arsenide Phosphide (GaAsP)</i>	605 - 660	Amber
<i>Gallium Phosphide (GaP)</i>	585 - 595	Kuning
<i>Indium Gallium Aluminium Phosphide (InGaAlP)</i>	550 - 570	Hijau
<i>Silicon Carbide (SiC)</i>	430 - 505	Biru
<i>Gallium Nitride (GaN)</i>	450	Putih

Dibandingkan dengan sumber pencahayaan yang konvensional seperti lampu pijar atau lampu neon, LED ini mempunyai banyak keunggulan diantaranya

kecepatan cahaya, masa pakai, efisiensi energi, dan keandalan. LED juga telah mendapatkan peningkatan kinerja yang signifikan selama 50 tahun terakhir. Saat ini, LED dapat memancarkan cahaya yang mencakup semua spektrum yang terlihat dari mulai panjang gelombang yang pendek ke panjang gelombang yang panjang. Sehingga penggunaan LED ini sudah banyak diterapkan di kehidupan sehari-hari seperti lampu lalu lintas, pencahayaan umum, dan tampilan panel datar.

Dalam LED, rata-rata daya optik merupakan fungsi dari arus modulasi atau sinyal input. Konversi arus menjadi daya optik dipengaruhi oleh responsivitas LED dengan menggunakan persamaan 2.6 [14]:

$$P = \eta \cdot h \cdot f \cdot \frac{i(t)}{q} \quad (2.6)$$

Keterangan:

P = Responsivitas LED (A/W)

η = efisiensi kuantum (0,05)

h = konstanta plank (6.6256×10^{-34} J.s)

f = frekuensi (THz)

q = electron charge (s)

$i(t)$ = modulasi current signal

Dalam hal ini responsivitas LED juga dipengaruhi oleh *bandwidth* dan *channel spacing* seperti yang ditunjukkan oleh persamaan 2.7 :

$$\eta = \frac{B_{total}}{\Delta\nu} \quad (2.7)$$

Keterangan:

B_{total} = *Bandwidth* total (nm)

$\Delta\nu$ = *channel spacing* (THz)

Untuk *bandwidth* total dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.8:

$$B_{total} = B_1 + B_2 + \dots + B_n \quad (2.8)$$

Karakteristik dari modulasi tergantung dari electron lifetime dan perangkat dioda yang dimodelkan oleh fungsi transfer yang diterapkan pada arus

menggunakan persamaan 2.9:

$$H(f) = \frac{1}{1+j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (\tau_n + \tau_{rc})} \quad (2.9)$$

Keterangan:

$H(f)$ = Fungsi transfer (THz)

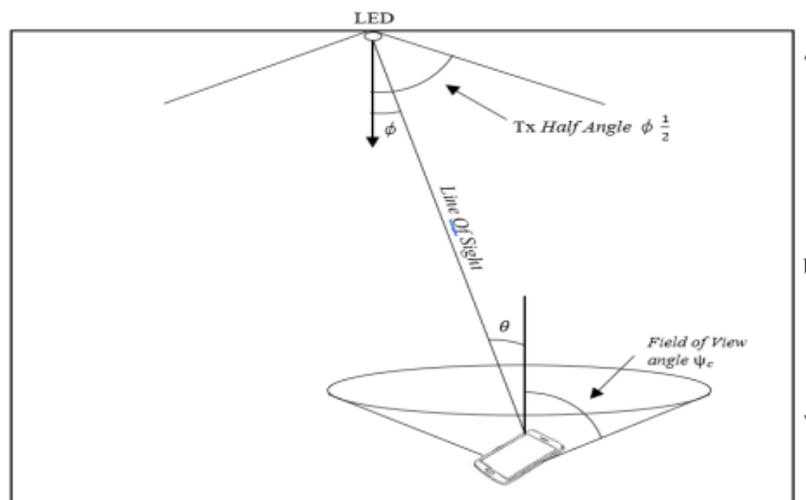
f = Frekuensi (THz)

τ_n = *Electron lifetime* (s)

τ_{rc} = RC Konstant (s)

2.4.4 Indoor Los Channel

Indoor LOS Channel merupakan kanal yang terdiri dari parameter yang dimana parameter ini mempengaruhi indeks dari LOS pancaran cahaya LED dalam ruangan. Untuk gambaran propagasi dari *indoor LOS Channel* ditunjukkan oleh Gambar 2.6.



Gambar 2.5 Indoor LOS Channel [17]

Parameter yang terdapat pada *Indoor LOS Channel* adalah [17]:

1. *Distance* / jarak (h) adalah jarak diantara LED dengan detektor area
2. *Field of View* (Ψ_c) adalah bidang pandang dari *photodetector* yang menerima cahaya yang dipancarkan.
3. *Tx Half Angle* ($\phi \frac{1}{2}$) adalah setengahnya dari sudut pancar cahaya LED pada bagian *transmitter*
4. *Incidence Angle* (θ) adalah sudut insiden atau sudut cahaya yang datang sehubungan dengan poros dari penerima

5. *Irradiance Angle* (ϕ) adalah sudut yang dipancarkan dan sehubungan tegak lurus pada pemancar.

Komponen LOS Channel dapat digunakan untuk memodelkan *free space propagation* dari sinyal nirkabel optik dalam ruangan. Diasumsikan sumber pancar LED adalah piringan Lambertian yang menyinari permukaan detektor yang terletak pada jarak h dari sumber. Sinyal yang dipancarkan oleh LED diasumsikan radiasi lambertian karena mematuhi hukum cosinus lambertian dengan persamaan 2.10 [6]:

$$R_0(\phi) = \left(\frac{m+1}{2\pi}\right) \cos^m \phi \quad (2.10)$$

Keterangan:

$R_0(\phi)$ = Radiasi Lambertian

ϕ = sudut radiasi (derajat)

m = Lambertian

Intensitas radiasi didefinisikan sebagai flus radiasi (daya) yang dipancarkan, dipantulkan atau diterima persatuan sudut yang diukur dalam steradian (sr). diasumsikan pemancar memancarkan pola radiasi simetris axial $P_t R_0(\phi)$, dimana P_t adalah daya optik rata-rata yang ditransmisikan, kemudian radiasi pada penerima dituliskan dengan persamaan 2.11 [6]:

$$I_s(d, \phi) = \frac{P_t R_0(\phi)}{d^2} \quad (2.11)$$

Keterangan:

$I_s(d, \phi)$ = Radiasi pada penerima

R_0 = Radiasi Lambertian

P_t = Daya optik rata-rata yang ditransmisikan (dBm)

d = jarak antara pemancar dan penerima (m)

Untuk persamaan 2.11 menunjukkan radiasi pada penerima. Selanjutnya, daya terima dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.12 :

$$P = I_s(d, \phi) A_{eff}(\psi) \quad (2.12)$$

Dimana ψ merupakan sudut datang terhadap sudut penerima dan A_{eff} dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.13:

$$A_{eff} = \begin{cases} A_{det} T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (2.13)$$

Keterangan:

P = Daya terima (dBm)

ψ = Sudut datang / *Incidence* (derajat)

ψ_c = FOV penerima (derajat)

A_{det} = area detektor (cm²)

T_s = penguat transmisi filter

g = penguat lensa penerima (dB)

Persamaan 2.13 menunjukkan area efektif pada penerima. Selanjutnya untuk menghitung penguat lensa penerima (g) pada persamaan 2.13 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.14:

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & elsewhere \end{cases} \quad (2.14)$$

Keterangan:

n = indeks bias lensa

Nilai daya terima dapat diketahui dengan melakukan substitusi pada persamaan yang dirumuskan pada persamaan 2.15:

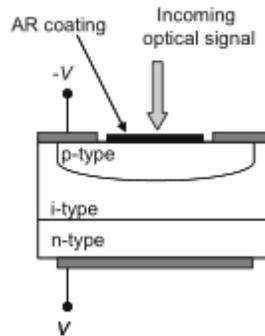
$$P_r = \begin{cases} \frac{P_t(m+1)A_{det}}{2\pi d^2 \sin^2 \psi_c} \cos^m(\theta) T_s(\psi) n^2 \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (2.15)$$

2.4.5 Photodetector

Photodetector adalah perangkat yang sangat sensitif pada cahaya dan berguna untuk mengubah sinyal yang diterima dari sinyal foton (cahaya) menjadi sinyal elektron (listrik). Sumber optik dari sisi pengirim ini akan mengubah sinyal listrik menjadi sinyal optik. Kemudian sinyal optik tersebut akan digabung dengan sinyal optik yang lainnya ke dalam satu serat optik yang selanjutnya dikirim dengan panjang gelombang dan jarak yang relatif jauh. Dari sisi penerima, sinyal optik yang masuk akan dikonversi kembali dari sinyal optik menjadi sinyal listrik. Konversi ini diolah menggunakan perangkat *photodetector*, terdapat banyak jenis

photodetector yang dapat digunakan sesuai dengan keperluan yang dibutuhkan [18].

Dalam komunikasi serat optik terdapat 2 jenis *photodetector* yaitu *Positive Intrinsic Negative (PIN) diode* dan *Avlanche Photodiode (APD)* . *PIN diode* adalah lapisan berbahan semikonduktor yang biasa digunakan pada transmisi optik dengan jarak yang relatif dekat sampai menengah, *APD diode* memiliki sensitivitas relatif besar karena mempunyai mekanisme penguat internal yang dapat menghasilkan lebih banyak elektron maka ini cocok digunakan pada sistem komunikasi optik dengan jarak jauh [18].

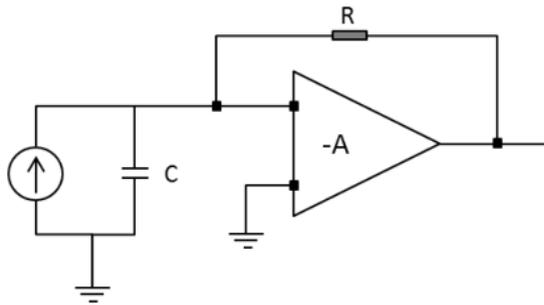


Gambar 2.6 Rangkaian struktur PIN Diode

PIN diode terdiri dari wilayah intrinsik yang diapit diantara lapisan tipe-p dan tipe-n seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.6. Komponen PIN digunakan untuk mengubah sinyal optik menjadi sinyal listrik saat ini berdasarkan Responsivitas perangkat yang dipengaruhi oleh beberapa noise seperti *thermal noise* dan *electrical noise*.

2.4.6 Transimpedance Amplifier (TIA)

Transimpedance Amplifier (TIA) merupakan komponen penting dari penerima optik dan jenis penguat ini mengubah arus menjadi sinyal tegangan. TIA akan memperkuat arus yang dihasilkan oleh fotodetektor dan mengubah arus menjadi tegangan yang sesuai dengan kebutuhan penerima [19]. Penerima nirkabel optik membutuhkan penguat gain variabel TIA yang stabil. Konfigurasi TIA yang umum digunakan adalah menerapkan umpan balik untuk menutup loop di sekitar tahap penguatan umpan maju untuk memungkinkan menyerap arus fotodiode dan menghasilkan kemampuan penggerak yang lebih baik [20].



Gambar 2.7 Rangkaian TIA

Rangkaian TIA ditunjukkan oleh Gambar 2.7 yang didasarkan pada konfigurasi umpan balik yang mengubah arus input menjadi tegangan output berdasarkan persamaan 2.16 :

$$V_{out} = i_{in} \cdot R \cdot \frac{A}{1+A} \quad (2.16)$$

Keterangan:

V_{out} = Tegangan output (Ohm)

A = gain tegangan open loop

i_{in} = arus input (A)

R = impedansi input efektif

Perangkat TIA biasanya terhubung setelah PIN *Photodetector*. Saat menggunakan model derau termal TIA disarankan untuk menonaktifkan model derau termal fotodiode PIN karena model derau termal PIN ditangkap dengan TIA.

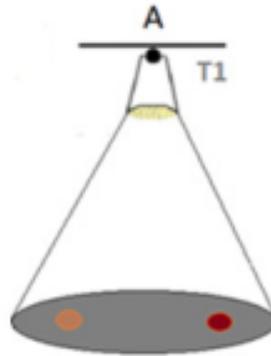
2.5 LED PANEL

Sistem komunikasi Li-Fi dalam ruangan ini memiliki sistem kontrol untuk area disekitaran LED yang didasarkan pada skenario LED Panel (LP). LED Panel merupakan sumber cahaya yang berfungsi sebagai penerangan dan dapat mengontrol cakupan dari pancaran LED. LED Panel terdiri dari 3 jenis diantaranya *fixed* LED, *movable* LED dan *hybrid* LED [13].

a. *Fixed* LED Panel

Pada jenis ini LED Panel akan memancarkan cahaya secara tegak lurus seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.8. Fixed LED Panel ini memiliki cakupan area yang luas untu dapat menampung pengguna dikarenakan

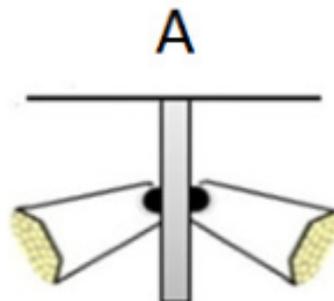
jangkauan pancaran sinarnya tidak memiliki sudut kemiringan pada LED Panel, sehingga cahaya yang dipancarkan dapat lebih fokus.



Gambar 2.8 Fixed LED Panel [13]

b. *Movable* LED Panel

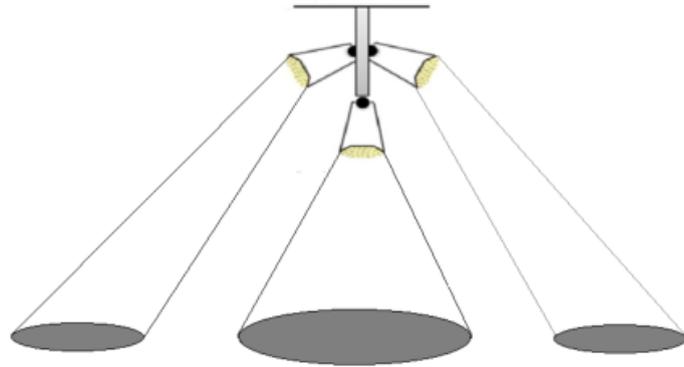
Pada *Movable* LED Panel ini LED Panel bergerak untuk memancarkan cahaya tidak secara tegak lurus, namun memiliki sudut kemiringan tertentu seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.9. *Movable* LED Panel bekerja pada lampu LED yang dapat berputar dengan sudut tertentu untuk dapat menyesuaikan area jangkauan yang dibutuhkan. Area jangkauan penerima ini dikendalikan oleh rotasi LED Panel, sudut yang menjadi perhatian pada *Movable* LED Panel ini adalah sudut penyinaran (*irradiance*) dan sudut datang (*Incidence*). Dalam *movable* LED Panel ini intensitas cahaya pada penerima dapat dikontrol dengan menggunakan sudut tertentu untuk dapat mencapai kinerja yang maksimal.



Gambar 2.9 Movable LED Panel [13]

c. *Hybrid* LED Panel

Pada *hybrid* LD Panel ini merupakan gabungan dari dua jenis LED Panel yaitu *Fixed* LED Panel dan *Movable* LED Panel seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.10. *Hybrid* LED Panel ini dapat memancarkan cahaya secara tegak lurus namun memiliki sudut kemiringan tertentu. Cakupan area yang dapat dijangkau oleh *Hybrid* LED Panel ini lebih luas lagi karena merupakan gabungan dari kedua jenis LED Panel.



Gambar 2.10 *Hybrid* LED Panel [13]

2.6 MULTIPLE INPUT MULTIPLE OUTPUT (MIMO)

Sistem *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) adalah sistem yang terdiri dari beberapa antena pengirim dan antena penerima. Perangkat antena dalam sistem MIMO ini tidak seperti sistem antena konvensional yang rentan terhadap *multipath*, sistem MIMO bekerja dengan baik pada komponen *multipath*. Komponen *multipath* ini dieksploitasi untuk efisiensi bandwidth dan meningkatkan diversitas. Sistem MIMO pada antena pengirim dan penerima ini terdiri dari lebih dari satu, antena penerima ini menerima sinyal yang akan dikirimkan oleh antena pengirim kemudian sinyal tersebut akan dikalikan dengan matriks kanal. Matriks kanal H sinyal yang diterima antena penerima dapat dirumuskan dengan persamaan 2.17 [21]:

$$s(t) = \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_L(t) \end{bmatrix}, x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_L(t) \end{bmatrix} \text{ dan } H(t) = \begin{bmatrix} h_{11}(t) & h_{12}(t) & \dots & h_{1k}(t) \\ h_{21}(t) & h_{22}(t) & \dots & h_{2k}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{L1}(t) & h_{L2}(t) & \dots & h_{Lk}(t) \end{bmatrix}$$

Sehingga menghasilkan model sederhana dari sinyal sistem MIMO seperti yang ditunjukkan oleh persamaan 2.18 [21]:

$$x(t) = H(t)s(t) \quad (2.18)$$

matriks H adalah matriks kanal MIMO ini dibentuk dari estimasi nilai pada kanal transmisi. Matriks ini akan sangat berguna untuk mendapatkan kembali sinyal informasi pada bagian sisi penerima.

2.7 SIGNAL TO NOISE RATIO (SNR)

Parameter *Signal to Noise Ratio* (SNR) adalah perbandingan dari daya dalam suatu sinyal pada daya yang dimiliki oleh *noise* yang muncul pada titik tertentu saat proses transmisi [22]. SNR ini berfungsi untuk mengetahui seberapa banyaknya noise yang ada pada sinyal yang di transmisikan. SNR juga dapat disebut OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*). Untuk mengukur SNR, diperlukan instrumen *Optical Spectrum Analyzer* (OSA), Nilai OSNR dinyatakan dalam desibel dan tidak dipengaruhi bentuk pulsa, format data, ataupun bandwidth sistem, untuk menghitung SNR dapat menggunakan persamaan 2.19 [23]:

$$SNR = \frac{R^2 P_r^2}{\sigma_{tot}^2} \quad (2.19)$$

Keterangan:

R = Responsivitas detektor (A/W)

P_r = Daya terima (dBm)

σ_{tot}^2 = Total noise

2.8 BIT ERROR RATE (BER)

Bit Error Rate (BER) adalah jumlah terjadinya *error* tiap jumlah data bit yang terkirim pada suatu sistem digital. Apabila jumlah bit *error* adalah N_E dan jumlah bit total yang terkirim adalah N_T maka menggunakan persamaan 2.20 [23]:

$$BER = \frac{N_E}{N_T} \quad (2.20)$$

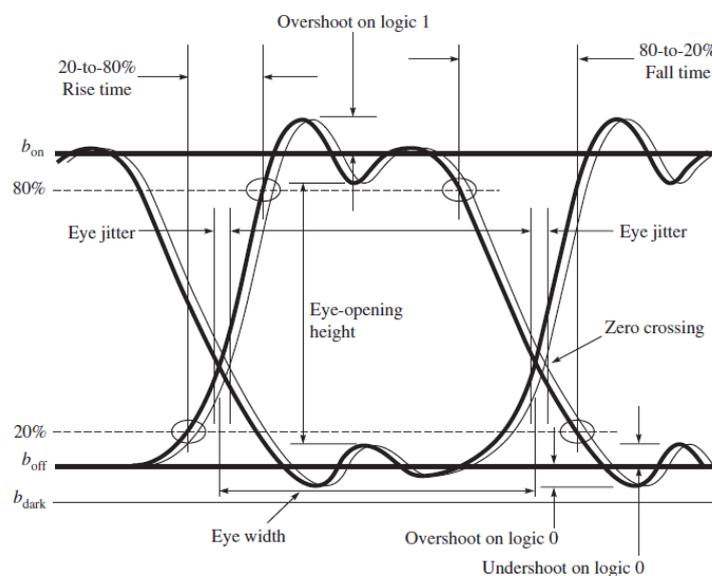
Keterangan:

N_E = jumlah bit eror (bits)

N_T = jumlah bit total (bits)

Secara umum pada sistem komunikasi optik, nilai BER yang harus dipenuhi yaitu 10^{-6} hingga 10^{-12} . Sehingga tiap 10^{-6} hingga 10^{-12} bit data yang dikirim, ada error yang terjadi hanya pada 1 bit. BER juga biasa disebut dengan *error probability* (P_e) atau probabilitas munculnya *error* dalam tranmisi data yang terjadi. Dalam proses transmisi data, bit tertentu mempunyai amplitudo sinyal yang terlalu dekat dengan threshold maka sangat sulit dibedakan nilai nya dengan benar [22].

Untuk mengetahui kualitas sinyal yang diterima oleh bagian *receiver* yaitu menggunakan *Eye diagram*. *Eye Diagram* akan menunjukkan efek distorsi pada sinyal cahaya yang ditampilkan dalam domain waktu. Karakteristik sinyal yang dapat dilihat dari *eye diagram* adalah *rise time*, *fall time*, *jitter*, *side-tones*, *ringing*, dan *variability* [24]. *Eye diagram* diperoleh dari *display instrumen* pengukuran BER dan juga bisa untuk memperkirakan nilai BER, *Q Factor* dan SNR secara statistik. Gambar 2.8 menunjukkan konfigurasi umum dan parameter dasar *eye diagram*.



Gambar 2.11 *Eye diagram* [23]

Dari Gambar 2.8 tentang konfigurasi umum *eye diagram* dapat diamati kinerja sistem diantaranya [23]:

1. *Eye width* merupakan interval waktu yang dimana sinyal yang diterima oleh *receiver* tidak ada *error* akibat *noise* atau interferensi pulsa lain.
2. *Eye opening height* menunjukkan keterpisahan dari sinyal 0 dan sinyal 1.

3. *Overshoot* menunjukkan bahwa terdapat *noise*.
4. *Eye jitter* menunjukkan adanya distorsi pada fiber optik.