

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Penelitian [6] mengembangkan dari penelitian sebelumnya terkait desain dan fungsionalitas *indoor* Li-Fi untuk menyediakan model komunikasi nirkabel yang lebih baik. Tujuan dari penelitian model ini yaitu penurunan *Bit Error Rate* (BER), peningkatan data *rate*, dan kualitas sinyal. Untuk mencapai hasil dan akurasi terbaik, penelitian ini memeriksa dan menguji seluruh sistem pada nilai yang berbeda dengan berbagai sudut transmisi, kecepatan data, jarak, frekuensi, dan responsivitas dioda PIN. Pengujian juga dilakukan dengan menggunakan filter yang berbeda, skema modulasi, dan pulsa yang ditransmisikan untuk mencapai *Q-Factor* atau faktor berkualitas tinggi pada jarak antara sumber konektivitas dan pengguna yang berbeda. Model penelitian menyimpulkan filter *Chebyshev* adalah pilihan terbaik karena menghasilkan kualitas tinggi dan BER rendah. Kualitas terbaik terjadi pada skema modulasi NRZ karena BER yang rendah. Transfer data menggunakan berbagai bentuk pulsa optik seperti *Gaussian*, *Hyperbolic*, *Triangular* dan *Raised cosinus*, di mana pulsa *Gaussian* memberikan hasil jarak yang lebih jauh dan BER terendah. Pada sudut transmisi 15° , faktor Q tertinggi berada pada kecepatan data rendah yaitu 10 Mbps dan BER rendah pada kecepatan data yang lebih rendah, dan variasi BER mengikuti perubahan kecepatan data. Desain penelitian ini efektif untuk meningkatkan konektivitas nirkabel dalam ruangan.

Penelitian [7] menjelaskan teknologi Li-Fi sebagai masa depan komunikasi nirkabel dan untuk membantu pembaca menyadari teknologi komunikasi optik nirkabel baru yang sedang banyak dieksplorasi ini. Standar IEEE 802.15.7 dapat memberikan komunikasi dengan kecepatan data tinggi yang bebas kedip dengan tiga jenis fisik modulasi komunikasi cahaya tampak yang mencapai 96 Mbps untuk mendukung saat hidup berdampingan dan mengurangi *flicker*. Li-Fi memiliki kelebihan pada kecepatan data yang tinggi, keamanan, daya rendah, penghematan spektrum RF, tidak berbahaya bagi manusia, dan hemat listrik. Keterbatasan pada Li-Fi di antaranya hanya dapat bekerja pada area LoS, sinyal dapat terdistorsi oleh

sumber cahaya lain, dan pemasangannya yang mahal. Dengan keunggulan yang dimiliki Li-Fi, teknologi ini aman digunakan pada lokasi sensitif gelombang radio seperti rumah sakit, pesawat terbang, dan untuk pencegahan kecelakaan lalu lintas melalui komunikasi antar kendaraan. Sehingga teknologi Li-Fi di masa depan dapat mengatasi kekurangan yang ada untuk melengkapi masalah teknologi komunikasi nirkabel.

Penelitian [8] melakukan validasi pendekatan pemodelan saluran pada pengukuran saluran MIMO menggunakan saluran *souder* dan pemodelan 3D dengan menerapkan *ray tracing*. Model simulasi 3D di lingkungan pengujian dibuat dalam *platform OpticStudio* dan mengimpor model CAD dari objek di dalam lingkungan. Untuk mendapatkan panjang lintasan dan daya dari setiap sinar yang dipancarkan, dilakukan penelusuran sinar non-sekuensial dalam lingkungan simulasi. Spesifikasi sumber cahaya yang digunakan meliputi daya optik total, pola radiasi, intensitas spektral daya, dan sejumlah sinar yang dipancarkan. Hasil perbandingan saluran yang diukur dengan saluran yang dimodelkan menunjukkan kecocokan yang baik antara semua Tx dan Rx. *Ray tracing* dapat menciptakan model saluran Li-Fi yang realistis bahkan saat menggunakan MIMO dengan banyak pengguna seluler dan *front end* optik terdistribusi. Analisis *path loss* dan *delay spread* menunjukkan korelasi yaitu semakin tinggi *path loss* maka *delay spread* akan lebih lama karena penyebaran *multipath*. Melalui nilai tunggal dan throughput yang dapat dicapai pada penelitian ini telah mempertimbangkan kinerja tautan MIMO terdistribusi. Semakin jauh pengguna, semakin signifikan nilai singular yang diamati, dan semakin banyak aliran yang dapat didukung secara paralel. Akhirnya, penelitian dapat menyelidiki pengaruh mobilitas pengguna pada total throughput yang terkait dengan nilai tunggal dan SNR setiap pengguna.

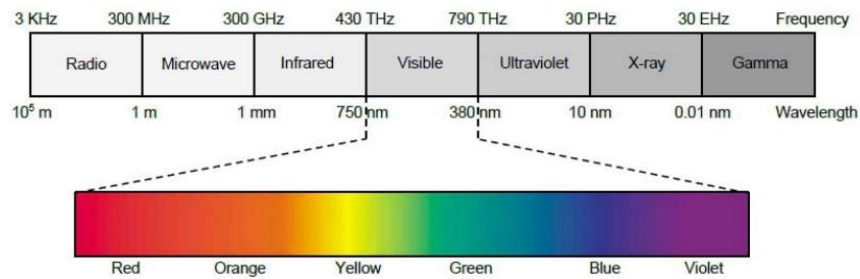
Penelitian [9] mempresentasikan teori terkait konsep dasar, aplikasi, dan tantangan teknologi VLC. Penelitian ini menampilkan konsep dasar dari *Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)-VLC* dan *open VLC*. Spektrum frekuensi VLC, LED *Panel*, OOK, VPPM, OPPM, M-CSK, dan MIMO-OFDM menjadi parameter teoritis penelitian ini. VLC dengan keunggulan frekuensi tinggi, spektrum bebas, ketersediaan infrastruktur dan lampu LED menarik banyak perhatian. Arsitektur dasar jaringan VLC pada sisi pengirim terdapat *optical filter/*

driver, dan pada sisi penerima terdapat *electrical filter* dan amplifier. Spektrum frekuensi VLC beragam mulai dari 380 nm hingga 750 nm sesuai dengan jenis warna LED. Dengan keuntungan yang ada dan sebagai peluang yang besar pada komunikasi nirkabel, pemanfaatan VLC dapat diintegrasikan dengan IoT dan *smart lighting*. Namun masih ada kendala pada teknologi VLC untuk dikomersialkan seperti control peredupan, berkedip, *uplink*, dan interferensi sehingga perlu lebih banyak eksplorasi untuk masa mendatang.

Penelitian [10] membahas kemungkinan penggunaan LED yang berbeda pada sistem Li-Fi yang dirancang menggunakan elemen listrik dalam jumlah minimum. Dalam penelitian ini, untuk membangun sistem transmisi sinyal audio melalui metode optik akan berfokus pada pertimbangan berbagai sumber sinyal cahaya, yaitu LED yang berbeda, di antaranya dari spektrum tampak dan inframerah untuk menunjukkan kinerja setiap LED dalam kondisi yang sama. Pengujian dilakukan pada jarak 20 cm dengan 5 LED berbeda, yaitu inframerah, hijau, merah, biru, dan putih dengan situasi yang sama. LED infra merah memiliki level sinyal audio yang paling tinggi. Empat dioda spektrum cahaya lainnya yakni *red*, *green*, dan *blue* (RGB) dan *white* LED menunjukkan level sinyal yang relatif sama, hal ini menunjukkan bahwa sistem LiFi dengan metode optik memungkinkan untuk dapat mentransmisikan beberapa sinyal audio berkecepatan tinggi, tanpa gangguan antar saluran. Di masa depan, dapat dilakukan eksperimen yang melibatkan dua atau lebih sumber cahaya ke satu penerima yang dapat berguna dalam berbagai pemrosesan sinyal audio, pencampuran dan performa musik waktu nyata.

2.2 Visible Light Communication (VLC)

Visible Light Communication (VLC) atau komunikasi cahaya tampak merupakan jenis komunikasi yang pengiriman datanya melalui modulasi gelombang cahaya dari spektrum cahaya tampak dengan panjang gelombang berkisar 380 nm hingga 750 nm. Dapat dilihat pada Gambar 2.1 di mana frekuensi cahaya tampak lebih besar 10.000 kali dari spektrum frekuensi radio lainnya yaitu 430 THz hingga 770 THz, sehingga memungkinkan komunikasi dengan kecepatan data yang sangat tinggi. Dibandingkan dengan spektrum lainnya, spektrum cahaya tampak tidak berbahaya bagi kesehatan manusia.



Gambar 2.1 Spektrum Elektromagnetik [9]

Penggunaan infrastruktur yang ada dan menyediakan layanan komunikasi adalah salah satu keuntungan VLC. Karena VLC menggunakan bola lampu LED sebagai media utamanya yang dapat berperan sebagai pencahayaan dan pengiriman data, sehingga lebih hemat energi dan biaya. Jenis LED akan berdampak pada kinerja sistem VLC karena saat mentransmisikan informasi, kecerahan iluminasi pencahayaan dapat terpengaruh oleh manipulasi cahaya [9]. Untuk mencapai transmisi kecepatan data yang tinggi, LED yang digunakan berkecepatan tinggi dan teknik *multiplexing* yang sesuai [1]. Selain VLC, terdapat teknologi serupa yang menggunakan spektrum cahaya tampak seperti *Optical Wireless Communication* (OWC) dan *Light Fidelity* (Li-Fi).

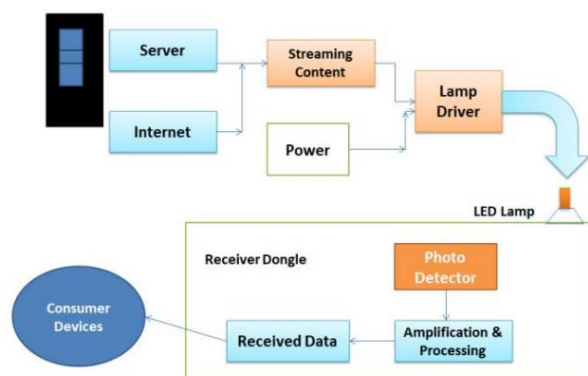
2.3 *Light Fidelity* (LI-FI)

Light Fidelity (Li-Fi) adalah teknologi baru jaringan komunikasi nirkabel yang menggunakan frekuensi cahaya tampak sebagai media komunikasinya. Dengan konsep VLC, Li-Fi adalah jaringan dua arah yang mendukung mobilitas dan memungkinkan akses multi-pengguna. Pada dasarnya, Li-Fi digunakan untuk komunikasi dalam ruangan yang mencapai kecepatan lebih tinggi dan tingkat keamanan lebih baik jika dibandingkan dengan teknologi yang bekerja pada frekuensi radio [11]. Li-Fi mengusulkan konektivitas *broadband* yang menggunakan LED sebagai pemancar sinyal dan fotodiode sebagai unit penerima [12]. Konsep Li-Fi pertama kali diperkenalkan oleh seorang fisikawan Jerman, bernama Harald Haas dalam TED *Global Talk* tentang *Visible Light Communication* [2] yang memperkenalkan Li-Fi dengan cara memukau terutama

untuk para peneliti dengan gagasan bahwa bohlam LED dapat berkomunikasi sekaligus melakukan penerangan biasa. Para peneliti banyak melakukan penelitian terkait teknologi ini karena keunggulan yang terdapat pada Li-Fi jika dibandingkan dengan teknologi Wi-Fi yang saat ini paling banyak digunakan, terutama pada kecepatan datanya yang sangat tinggi [4].

2.7.1 Prinsip Kerja Li-Fi

Light Fidelity adalah jenis teknologi VLC yang menggunakan LED untuk transmisi data yang bekerja pada kedipan LED dengan kecepatan yang sangat tinggi. Dengan mengkodekan intensitas cahaya ke 0 dan 1, Li-Fi mengirimkan sinyal dalam bentuk digital. Pada saat LED dalam keadaan *on* ini sebagai digital 1, dan *off* sebagai digital 0. Jadi dengan mengedipkan sumber cahaya LED dengan kecepatan yang sangat tinggi, pengiriman data dalam bentuk digital 0 dan 1 dapat dilakukan ke penerima dan manusia tidak dapat melihatnya dengan mata telanjang. LED putih terang sebagai sumber pemancar disebut sebagai luminer LED yang terdiri dari sumber LED dan *driver* LED. Sumber LED digunakan untuk mengontrol arus yang mengalir melalui LED dan pengontrolan kecerahan diatur pada *driver* LED. Ada dua jenis LED yang biasa digunakan untuk menghasilkan cahaya putih terang yaitu LED biru dengan kombinator cahaya fosfor dan LED merah, hijau, biru (RGB). Pada sisi penerima Li-Fi terdiri dari fotodiode yang menerjemahkan kode LED dengan cara yang sama saat dikodekan [13].



Gambar 2.2 Desain Sistem Li-Fi [7]

Dapat dilihat pada Gambar 2.2 yang menunjukkan desain sistem teknologi Li-Fi. LED merupakan bagian utama dari Li-Fi yang bekerja sebagai pemancar

yang mengirimkan data dalam bentuk cahaya dari internet ke lampu LED melalui *driver* LED. Ketika cahaya yang diterima LED jatuh pada fotodetektor sebagai penerima sinyal, maka data akan dikirimkan untuk memproses dan memperkuat sinyal serta mengirimkannya ke penerima [7].

2.7.2 Keunggulan dan Aplikasi Li-Fi

Teknologi Li-Fi memiliki banyak keunggulan dan manfaat untuk sistem komunikasi nirkabel masa depan yang didasarkan pada penggunaan sumber cahaya untuk transmisi data sehingga dapat mentransfer data dengan kecepatan tinggi mencapai 10 Gbps. Li-Fi memiliki tingkat keamanan yang tinggi karena cahaya tidak dapat menembus dinding dan harus berada pada LoS. Dengan menggunakan LED sebagai media utama sistem komunikasi Li-Fi, komunikasi data dan penerangan dapat dilakukan sekaligus sehingga meningkatkan efisiensi energi yang digunakan. Li-Fi dapat digunakan dalam area yang sensitif gelombang elektromagnetik dan tidak berpengaruh terhadap kesehatan manusia [7]. Berikut adalah implementasi teknologi Li-Fi pada area yang sensitif terhadap gelombang elektromagnetik:

- a) Rumah Sakit. Saat ini, tes *X-Ray* dan pemindai MRI pada rumah sakit menggunakan frekuensi radio yang dihadapkan langsung ke tubuh pasien dan bisa berbahaya bagi tubuh manusia. Teknologi Li-Fi dapat digunakan agar aman dan hemat daya.
- b) Pesawat Terbang. Penggunaan teknologi Li-Fi dapat digunakan dalam pesawat karena tidak menimbulkan gangguan navigasi pada jaringan yang aktif saat penerbangan.
- c) Industri. Banyak industri yang melarang penggunaan sinyal RF karena risiko kebakaran, Li-Fi dapat digunakan sebagai teknologi yang aman untuk transmisi data.
- d) Lalu Lintas. Penggunaan Li-Fi dapat diterapkan di lampu jalan dan komunikasi antar kendaraan untuk membantu mencegah terjadi kecelakaan yaitu melalui transmisi data yang cepat ke kantor pusat terdekat.

2.7.3 Perbandingan Li-Fi dan Wi-Fi

Teknologi nirkabel Wi-Fi dan Li-Fi memiliki banyak perbedaan dalam berbagai aspek parameter seperti berikut:

Tabel 2.1 Perbandingan Teknologi Wi-Fi dengan Li-Fi [14]

Kriteria	<i>Wireless Fidelity</i>	<i>Light Fidelity</i>
Transmisi Data	Gelombang radio	Teknologi <i>Visible Light Communication</i> (VLC)
Komponen	<i>Router, Modem, dan Access Points</i>	<i>Solid-State Lighting</i> (SSL) seperti lampu LED, LED driver, dan <i>Photodetector</i>
Frekuensi	2,4 GHz, 4,9 GHz, dan 5 GHz	10.000 kali spektrum frekuensi radio
Jarak	<300 m (berdasarkan propagasi radio dan interferensi)	<10 m (berdasarkan intensitas cahaya)
Kecepatan Transfer Data	Rendah, 100 Mbps – 1 Gbps	Sangat tinggi, >1 Gbps
Biaya/ Konsumsi Daya	Lebih banyak	Lebih sedikit
<i>Bandwidth</i>	Terbatas, 3 kHz – 200 GHz	Tidak Terbatas, 400 THz – 780 THz
Privasi	Kurang aman	Lebih aman
Kepadatan Data	Bekerja di lingkungan kepadatan tinggi	Bekerja di lingkungan yang tidak terlalu padat (masalah interferensi)
Topologi Jaringan	<i>Point to Point</i>	<i>Point to Multipoint</i>

2.7.4 Standar dan Modulasi pada Li-Fi

Teknologi Li-Fi serupa dengan VLC yang menggunakan spektrum cahaya tampak berdasarkan standar IEEE 802.15.7 yang dapat memberikan komunikasi dengan kecepatan data tinggi yang bebas kedip. Dengan adanya perkembangan pada teknologi LED, standar IEEE 802.15.7 memiliki kemampuan pendukung 96 Mbps dengan modulasi cepat dari sumber cahaya optik dan memungkinkan redup selama fungsinya berjalan. Standar IEEE 802.15.7 memiliki tiga jenis lapisan fisik atau *physics* (PHY) pada komunikasi cahaya tampak, yaitu [7]:

1. PHY 1 - bekerja pada 11,67 kbps hingga 266,6 kbps yang menggunakan modulasi posisi pulsa variabel dan tombol *on-off*.
2. PHY 2 - bekerja pada 1,25 Mbps hingga 96 Mbps yang menggunakan modulasi posisi pulsa variabel dan tombol *on-off*.

3. PHY 3 - bekerja pada 12 Mbps hingga 96 Mbps yang menggunakan teknik modulasi tertentu yang disebut sebagai *Color Shift Keying* (CSK).

Sistem komunikasi Li-Fi umumnya menggunakan modulasi berbasis *dimming* (peredupan) dengan skema *single carrier* yang mengontrol tingkat *on-off* LED untuk mencapai kecepatan data yang diinginkan. Skema modulasi tersebut di antaranya adalah *On-Off Keying* (OOK), *Pulse Width Modulation* (PWM), *Pulse Position Modulation* (PPM), *Variable Pulse Position Modulation* (VPPM), *Overlapping PPM* (OPPM), dan *Optical Spatial Modulation* (OSM) [15]. Untuk mencapai kecepatan data yang lebih tinggi dan mengurangi efek distorsi, skema modulasi *multicarrier* juga dapat digunakan pada sistem Li-Fi yang lebih hemat *bandwidth* tetapi kurang hemat energi jika dibandingkan dengan modulasi *single carrier*. Modulasi *multicarrier* OFDM adalah salah satu multipleksing yang umum digunakan pada jaringan Li-Fi [5].

2.4 *Light Emitting Diode* (LED)

LED (*Light Emitting Diode*) merupakan perangkat elektronika berbahan semikonduktor yang menghasilkan cahaya ketika dialiri arus listrik. Cahaya dipancarkan saat arus listrik mengalir melewati material yang mengisi lubang elektron antara dua semikonduktor sehingga memancarkan foton. Cahaya pada lampu LED dipancarkan dalam spektrum tampak dengan berbagai variasi gelombang frekuensi rendah hingga tinggi sesuai dengan warna LED. Tabel 2.2 menunjukkan variasi warna LED beserta bahan semikonduktor dan panjang gelombang cahaya yang dipancarkan.

Tabel 2.2 Bahan, Panjang Gelombang, dan Warna LED

Bahan Semikonduktor	Panjang Gelombang	Warna
GaAs - <i>Gallium Arsenide</i>	850 – 940 nm	Infra merah
GaAsP - <i>Gallium Arsenic Phosphide</i>	630 – 660 nm	Merah
GaAsP - <i>Gallium Arsenic Phosphide</i>	605 – 620 nm	Amber
GaP - <i>Gallium Phosphide</i>	585 – 595 nm	Kuning
InGaAlP - <i>Indium Gallium Aluminium Phosphide</i>	550 – 570 nm	Hijau
SiC - <i>Silicon Carbide</i>	430 – 505 nm	Biru
GaN - <i>Gallium Nitride</i>	450 nm	Putih

Bola lampu LED menjadi pilihan sebagai media utama komunikasi cahaya tampak karena memiliki keunggulan pada efisiensi energi, daya tahan, biaya yang rendah, dan memungkinkan untuk memfokuskan cahaya LED dalam satu arah. Jika dibandingkan dengan bola lampu pijar tradisional, LED lebih unggul karena LED perumahan menggunakan sekitar 75% lebih sedikit energi dan dapat bertahan 25 kali lebih lama. Penggunaan teknologi LED ini memberikan dampak baik bagi industri dan masa depan pencahayaan. Bola lampu LED komersial saat ini yang paling umum digunakan adalah lampu LED putih yang dibuat dalam dua metode konvensional. Metode pertama yaitu untuk menghasilkan cahaya putih yang dilakukan dengan melapisi bola lampu LED biru dengan lapisan fosfor dan sebagian diubah menjadi kuning, sehingga saat kedua foton biru dan kuning bergabung akan menghasilkan cahaya putih. Metode kedua yaitu menggunakan LED RGB yang dilakukan dengan menggabungkan output merah, hijau, dan biru dari LED untuk menghasilkan cahaya putih. Jenis LED putih memungkinkan kontrol atas warna yang dipancarkan. Metode fosfor umum digunakan karena lebih murah dan lebih efisien daripada metode RGB, tetapi dalam VLC, LED RGB cenderung lebih berguna karena dapat mengontrol warna yang dipancarkan terhadap cahaya, dan standar IEEE untuk VLC menguraikan metode modulasi berdasarkan pada intensitas LED RGB [11].

Dalam model penggunaan LED sebagai sumber pemancar atau *transmitter* pada sistem Li-Fi, rata-rata daya optik adalah fungsi dari arus modulasi (sinyal *input*). Konversi arus menjadi daya optik dipengaruhi oleh responsivitas LED atau efisiensi kemiringan. Responsivitas dihitung sebagai berikut:

$$P = \eta \cdot h \cdot f \cdot \frac{i(t)}{q} \quad (2.1)$$

di mana η adalah efisiensi kuantum, h adalah konstanta Plank, f adalah frekuensi emisi, $i(t)$ adalah modulasi sinyal arus, dan q adalah muatan elektron. Responsivitas LED dipengaruhi oleh penambahan *bit rate* dan perubahan *channel spacing* yakni:

$$\eta = \frac{B_{tot}}{\Delta\nu^2} \quad (2.2)$$

B_{tot} merupakan *bit rate* total dan $\Delta\nu$ merupakan *channel spacing*. Bit rate total dapat dihitung sebagai berikut ini:

$$B_{tot} = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 \quad (2.3)$$

Karakteristik termodulasi tergantung dari masa pakai elektron dan perangkat dioda, dan dimodelkan oleh fungsi transfer yang diterapkan pada arus:

$$H(f) = \frac{1}{1 + j2\pi f(\tau_n + \tau_{rc})} \quad (2.4)$$

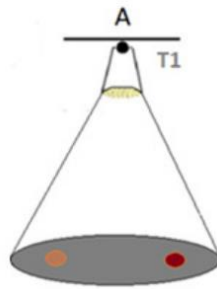
di mana τ_n adalah masa pakai elektron dan τ_{rc} adalah RC konstan.

2.4.1 LED Panel

Pada sistem berbasis Li-Fi di dalam ruangan, pengontrolan area cakupan sistem didasarkan pada skenario LED Panel (LP). LED Panel adalah sumber cahaya yang dapat berfungsi sebagai penerangan dan komunikasi data secara bersamaan. Jenis LP digunakan sesuai dengan kebutuhan desain komunikasi dalam ruangan, di antaranya terdapat *fixed*, *movable*, dan *hybrid* LP [2].

a) Fixed LED Panel

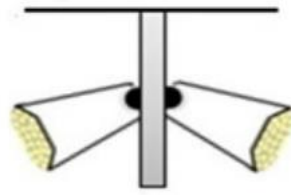
Jenis *fixed* LED Panel atau LP tetap memancarkan cahaya secara tegak lurus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. *Fixed* LP memiliki cakupan area yang luas untuk menampung pengguna karena jangkauan pancaran sinarnya tidak memiliki sudut kemiringan pada LED Panel, sehingga cahaya yang dipancarkan dapat lebih fokus. Pengguna dapat mengakses Li-Fi sesuai dengan posisi cahaya.



Gambar 2.3 Fixed LED Panel [2]

b) Movable LED Panel

Model *Movable* LED Panel atau LP bergerak memancarkan cahaya tidak secara tegak lurus, namun memiliki sudut kemiringan tertentu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 berikut:

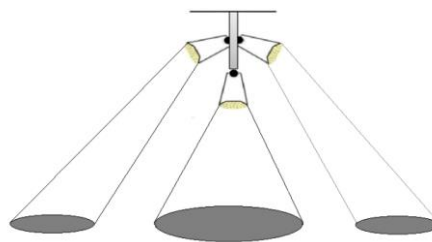


Gambar 2.4 *Movable LED Panel* [2]

Movable LED Panel bekerja pada bohlam LED yang dapat berputar pada sudut tertentu untuk menyesuaikan area jangkauan sesuai dengan kebutuhan penempatan penerima. Disini area jangkauan pemancar dikendalikan oleh rotasi LED pada sudut tertentu. Sudut yang diperhatikan disini yaitu sudut penyinaran (*irradiance*) dan sudut insiden (*incidence*). Sudut penyinaran merupakan sudut yang terbentuk terhadap sumbu tegak lurus pemancar dan sudut insiden merupakan sudut terhadap sumbu terima. Dalam penggunaan *movable LP*, intensitas cahaya pada penerima dapat dikontrol dengan menggunakan sudut penyinaran tertentu serta untuk mencapai daya terima maksimal yang diinginkan, pengontrolan juga dapat dilakukan pada jarak antara pemancar dan penerima.

c) *Hybrid LED Panel*

Hybrid LED Panel atau LP hibrida adalah gabungan kedua jenis LP yaitu *fixed LP* dan *movable LP* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 berikut:



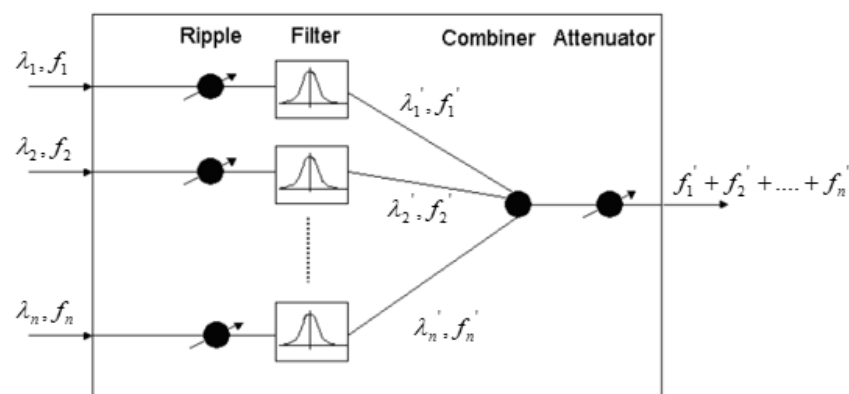
Gambar 2.5 *Hybrid LED Panel* [2]

Hybrid LED memancarkan cahaya secara tegak lurus dan memiliki sudut kemiringan tertentu, sehingga memiliki cakupan area yang lebih luas lagi karena menggunakan penggabungan jenis *fixed LP* dan *movable LP* secara bersamaan.

2.5 Multiplexing

Sistem *multiple-input multiple-output* (MIMO) merupakan sistem transmisi multi antenna yang menggunakan beberapa antenna untuk transmisi dan beberapa antenna sebagai penerima. Penggunaan MIMO dapat meningkatkan jangkauan transmisi melalui teknik keragaman spasial dan memberikan kecepatan transmisi data yang tinggi. Peningkatan laju tranmisi didapatkan dalam lingkungan propagasi pada komponen *multipath* melalui teknik yang biasa disebut sebagai *multiplexing* spasial. Salah satu standar nirkabel dari sistem MIMO yaitu berdasarkan IEEE 802.11n *wireless local area network* (WLAN). Dalam sistem VLC, penggunaan *intensity modulation/ direct detection* (IM/ DD) tanpa efek fading skala kecil, mengakibatkan sulit untuk mendapatkan matriks saluran MIMO peringkat penuh.

Wavelength division multiplexing (WDM) adalah teknik yang dapat digunakan untuk mengirimkan beberapa aliran data secara paralel. Dalam penggunaan WDM pada sistem VLC dengan beberapa LED sebagai pemancar dan beberapa fotodiode sebagai penerima, dapat mencapai transmisi data berkecepatan yang tinggi dengan *bandwidth* modulasi yang terbatas. Akan tetapi, *crosstalk* antar-warna menjadi parah ketika jumlah divisi panjang gelombang meningkat [16]. Selanjutnya, dalam sistem VLC, LED RGB telah digunakan berdasarkan WDM untuk mencapai kecepatan transfer data yang lebih tinggi [17].



Gambar 2.6 Subsistem Multiplexer

Subsistem pada Gambar 2.6 mengilustrasikan beberapa sinyal input yang disaring oleh filter optik dan kemudian digabungkan dalam satu sinyal. Filter optik dapat berupa filter optik *Rectangle*, *Gaussian*, atau *Bessel*. Tingkat *crosstalk* untuk komponen MUX dan DEMUX, ditentukan oleh 3 faktor yaitu *bandwidth*, *ripple*,

dan kedalaman filter. Faktor ini akan menentukan seberapa besar daya dari saluran tetangga.

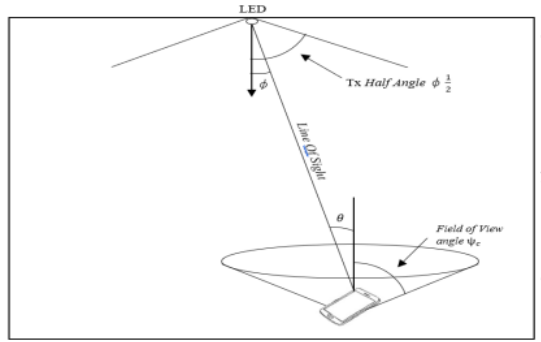
2.6 Photodiode

Photodiode atau dioda foto adalah komponen elektronika berbahan semikonduktor yang mengubah cahaya menjadi arus listrik. Disini arus merambat ketika foton diserap termasuk arus yang sangat kecil juga dapat merambat pada saat tidak ada cahaya. Dioda foto memiliki waktu respons yang lambat ketika luas permukaan dioda foto meningkat. Dioda foto banyak digunakan karena biaya yang rendah dan struktur kasar normal. Terdapat dua mode operasi dalam dioda foto, yaitu mode PV (*photovoltaic*) dan mode *photoconductive*. Pada mode PV, jangkauan dinamis yang dicapai kecil yang dikenal sebagai mode bias nol, sedangkan pada mode fotokonduktif disebut juga dengan mode bias terbalik di mana tegangan berlawanan tidak memberikan efek cukup besar pada cahaya dan efeknya lemah pada arus gelap. Dioda foto melibatkan beberapa parameter penerima seperti area fisik dioda foto, FOV, sensitivitas detektor, dan sebagainya. Pada sisi penerima, digunakan area yang luas untuk penerimaan dan menggunakan konsentrator optik untuk dapat meningkatkan area penerimaan sinyal yang efektif, memberikan penguatan bebas *noise* yang efisien, meningkatkan penguatan penerimaan, dan menghindari penggunaan area permukaan dioda foto yang besar [18].

2.7 Karakterisasi Indoor-Optical Channel

2.7.1 Indoor LoS Channel

Indoor LoS Channel adalah kanal yang berisi beberapa parameter yang mempengaruhi indeks LoS pancaran sinar LED di dalam ruangan seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2.7 Parameter *Indoor LoS Channel* [19]

Gambar 2.7 menunjukkan komponen parameter yang diatur dalam *indoor LoS channel* yang di antaranya adalah [19]:

- Distance* (h) yaitu jarak antara LED dan area detektor.
- Detector Area* (A_d) yaitu ukuran dari detektor pada *receiver* di mana cahaya akan dipancarkan sehingga detektor pada penerima dapat mendeteksi cahaya.
- Field of View* (ψ_c) yaitu bidang pandang dari sebuah *photodetector* yang menerima cahaya.
- Transmitter Half Angle* ($\phi_{1/2}$) yaitu setengah dari sudut pancaran sinar LED pada transmitter.
- Irradiance Angle* atau sudut penyinaran (ϕ) yaitu sudut yang dipancarkan sehubungan tegak lurus pada pemancar atau disebut sudut timbul.
- Incidence Angle* atau (θ) sudut insiden yaitu sudut cahaya yang datang sehubungan dengan poros penerima.

2.7.2 Hukum Lambertian

Saluran optik dalam ruangan memiliki beberapa karakteristik. Saluran dalam ruangan karena pencahayaan LED dapat dimodelkan sebagai pola radiasi Lambertian. Intensitas radiasi direpresentasikan sebagai berikut [20]:

$$I(\phi) = I(0) \cos^{m_l}(\phi) \quad (2.5)$$

di mana, ϕ adalah *angle of irradiance*, $I(0)$ adalah intensitas cahaya di pusat dan m_l adalah orde Lambertian yang didefinisikan sebagai:

$$m_l = \frac{\ln(2)}{\ln(\cos \phi_{1/2})} \quad (2.6)$$

di mana, $\phi_{\frac{1}{2}}$ adalah setengah sudut pada setengah pencahayaan LED. Pencahayaan/ intensitas horizontal pada suatu titik diberikan sebagai,

$$I_{hor} = I(0) \frac{\cos^{m_l}(\phi)}{d^2 \cos(\psi)} \quad (2.7)$$

Penguatan saluran pada pemancar di dalam ruangan dinyatakan sebagai,

$$H = \frac{m_l + 1}{2\pi d^2} \cos^{m_l}(\phi) \cos(\psi), \quad 0 \leq \psi \leq \psi_{con} \quad (2.8)$$

di mana, d adalah jarak transmisi dari pemancar ke penerima, dan ψ adalah sudut datang.

2.8 Parameter Kinerja Sistem *Indoor* Li-Fi

2.8.1 *Signal to Noise Ratio* (SNR)

Signal to Noise Ratio (SNR) merupakan parameter yang harus diperhatikan pada sistem transmisi data. SNR digunakan untuk membandingkan daya sinyal yang diinginkan terhadap *background noise* atau untuk menunjukkan banyak *noise* yang mengganggu sinyal transmisi. Instrumen *Optical Spectrum Analyser* (OSA) dibutuhkan untuk mengukur SNR, di mana OSA hanya membaca daya sinyal dan *noise*, nilainya tidak dipengaruhi oleh bentuk pulsa, *bandwidth* sistem, atau format data yang dinyatakan dalam:

$$SNR = 10 \log \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \quad (2.9)$$

Nilai SNR dapat dinyatakan dalam variabel *Q-factor* yang mempermudah analisis performa sistem dengan merepresentasikan *optical* SNR (OSNR) untuk komunikasi optik biner/ digital. Berikut persamaan untuk hubungan antara OSNR, *Q-factor*, dan BER [21]:

$$Q = \frac{2\sqrt{2} OSNR}{1 + \sqrt{1 + 4 OSNR}} \quad (2.10)$$

2.8.2 *Bit Error Rate* (BER)

Bit Error Rate (BER) merupakan jumlah terjadinya *error* tiap jumlah bit data yang terkirim pada suatu sistem digital. Apabila jumlah bit *error* didefinisikan sebagai N_E dan jumlah bit total terkirim adalah N_T maka persamaan sebagai berikut:

$$BER = \frac{N_E}{N_T} \quad (2.11)$$

Berdasarkan standar ITU-T G.691 yang menyatakan bahwa nilai BER yang baik dalam sistem komunikasi optik berada pada tidak lebih buruk dari maksimum BER 10^{-12} (ditentukan oleh kode aplikasi) [22]. Artinya 10^{-12} bit data yang dikirim, *error* yang terjadi hanya pada satu bit saja. Nilai maksimum BER tersebut sesuai dengan nilai *Q-Factor* = 7 (sesuai dengan standar ITU-T O.201) [23]. BER dapat disebut juga dengan *error probability* (P_e) atau probabilitas munculnya *error* dalam terjadinya transmisi data. Pada proses transmisi data, bit tertentu memiliki amplitudo sinyal yang terlalu dekat dengan *threshold* sehingga tidak dapat dibedakan nilainya dengan benar.

Nilai BER dapat juga dinyatakan dalam variabel *Q-factor* dengan menggunakan persamaan seperti berikut [21]:

$$BER = P_e(Q) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{Q} \quad (2.12)$$

2.9 Software Optisystem

Optisystem merupakan perangkat lunak inovatif yang memungkinkan pengguna untuk dapat merencanakan, menguji, dan mensimulasikan desain:

1. Jaringan optik termasuk OTDM, SONET/ SDH *rings*, CWDM, DWDM, PON, Kabel, OCDMA.
2. Transmisi *single-mode/ multi-mode*.
3. *Free Space Optics* (FSO), *Radio Over Fiber* (ROF), OFDM (langsung, koheren).
4. Amplifier dan laser (EDFA, SOA, Raman, *Hybrid*, optimasi GFF, *Fiber Lasers*).
5. Pemrosesan sinyal (Listrik, Digital, Semua Optik).
6. Desain sub sistem pemancar dan penerima (langsung/koheren).
7. Format modulasi (RZ, NRZ, CSRZ, DB, DPSK, QPSK, DP-QPSK, PM-QPSK, QAM-16, QAM-64).
8. Analisis kinerja sistem (*Eye Diagram/ Q-factor/ BER, Signal power/ OSNR, Status polarisasi, Diagram konstelasi, Penalti linier dan non-linier*)

Sistem optik terus berkembang secara dinamis menjadi semakin kompleks. Pada perangkat lunak *Optisystem* ini akan membantu pengguna dalam masalah desain dengan kekuatan dan fleksibilitas serta memfasilitasi desain fotonik yang efisien dan efektif [24].