

ANALISIS DAN PERANCANGAN SISTEM *VISIBLE LIGHT COMMUNICATION* DI RUANG RAPAT FAKULTAS TEKNIK ELEKTRO DI TELKOM UNIVERSITY LANDMARK TELKOM

(*ANALYZING AND DESIGNING VISIBLE LIGHT COMMUNICATION SYSTEM IN SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING MEETING ROOM AT TELKOM UNIVERSITY LANDMARK TOWER*)

1st Gary Bagaswara
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

garybagaswara@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Dr. Ir. Erna Sri Sugesti, M.Sc.

Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

ernasugesti@telkomuniversity.ac.id

3rd M. Irfan Maulana, S.T., M.T.

Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

muhammadirfanm@telkomuniversity.ac.id

Abstrak - Telkom University Landmark Tower (TULT) adalah fasilitas dalam upaya Telkom University untuk mencapai status *Research & Entrepreneurial University* pada tahun 2023. Gedung ini mengusung tema *Go Green* dan merupakan *Smart Building*. Penelitian ini merancang *Visible Light Communication* (VLC) *indoor* yang berfokus pada Ruang Rapat Fakultas Teknik Elektro (FTE) di TULT, tempat yang sering digunakan oleh banyak orang dengan kebutuhan pertukaran data yang cepat. Dengan tujuan untuk membantusistem *Wireless Local-Area Network* (WLAN) yang sudah banyak digunakan. Simulasi menggunakan simulasi computer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada skenario dengan 8 LED, nilai SNR tertinggi mencapai 47,77 tanpa interferensi cahaya matahari, dan nilai BER menggunakan modulasi On-Off Keying (OOK) Non-Return to Zero (NRZ) sebesar $1,02 \times 10^{-203}$. Namun, saat ada interferensi cahaya matahari, SNR turun menjadi 29,37 dan nilai BER OOK-NRZ adalah $2,44 \times 10^{-3}$. Dengan demikian, performa sistem VLC tanpa interferensi jauh lebih baik, dengan SNR yang 1,63 \times lebih tinggi daripada saat terkena interferensi cahaya matahari.

Kata Kunci - VLC, Ruang Rapat FTE, TULT, BER, SNR.

I. PENDAHULUAN

Telkom University Landmark Tower (TULT) adalah fasilitas dalam upaya Telkom University untuk mencapai status *Research & Entrepreneurial University* pada tahun 2023. Gedung ini mengusung tema *Go Green* dan merupakan *Smart Building* [1].

Konsep tema bangunan *Go Green* yaitu memiliki konstruksi dan desain yang memiliki dampak negatif seminimal mungkin terhadap lingkungan. Biasanya bangunan yang menerapkan tema *Go Green* disebut *Green Building*. *Green Building* juga memperhatikan kualitas udara dan energi yang digunakan oleh bangunan. Selain itu, kondisi dalam ruangan seperti kadar oksigen, emisi

karbon dioksida, temperatur dan suhu dapat dikontrol dan diawasi sepanjang waktu [2][3][4]

Smart Building merupakan bangunan yang memiliki integrasi dari berbagai sistem dan layanan dengan tujuan untuk mengawasi dan melakukan pengendalian kondisi ruangan. Teknologi VLC merupakan salah satu teknologi yang mendukung *Smart Building*. [5][6][7]

Visible Light Communication (VLC) merupakan sebuah teknologi dalam sistem komunikasi yang menggunakan cahaya tampak sebagai sinyal pembawanya. VLC memiliki bandwidth yang sangat tinggi, *datarate* dari VLC dapat mencapai 1 Gbps. VLC memiliki ketahanan terhadap gelombang elektromagnetik, memiliki kanal yang tidak berlisensi, menggunakan daya dengan sangat rendah serta tidak memiliki dampak terhadap Kesehatan tubuh. Standar IEEE yang pertama tentang VLC diatur dalam IEEE 802.15.7-2011. Sinar matahari merupakan salah satu kendala tersebut, namun hal ini sudah dapat diatasi dengan penggunaan *optical bandpass blue filter* yang mengkompensasi pengurangan sebesar 53% laju data oleh sinar matahari [8][9][10][11]

Berdasarkan beberapa penelitian yang telah diuraikan di atas, maka diperlukan analisis dan pemodelan yang tepat untuk teknologi VLC supaya dapat mendukung jaringan nirkabel *WiFi* yang telah ada. Adapun perancangan sistem yang akan dibuat dilakukan pada Ruang Rapat FTE di TULT pada dua kondisi intensitas cahaya yang berbeda. Parameter performansi yang akan dievaluasi adalah nilai SNR dan BER. Dari penelitian ini diharapkan sebuah model sistem VLC yang dapat mendukung teknologi *WiFi* dengan kualitas jaringan yang baik.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Telkom University Landmark Tower (TULT)

Telkom University Landmark Tower merupakan gedung perkuliahan tertinggi di Jawa Barat. Gedung ini mengusung tema *Go Green* dan merupakan *smart building*.

TULT juga merupakan fasilitas untuk Telkom University dalam mewujudkan *Research & Entrepreneurial University* sebagai rencana strategis Telkom University di tahun 2023. Gedung ini terdiri atas 19 lantai, didalamnya terdiri dari 178 ruang kelas, ruang kesehatan, ruang dosen, ruang rapat/sidang, mushola, laboratorium serta *Research Center* [1]. Gambar 2.1 merupakan gedung TULT.



Gambar 2.1 Gedung TULT

B. Visible Light Communication (VLC)

VLC merupakan sebuah teknologi dalam sistem komunikasi yang menggunakan cahaya tampak sebagai sinyal pembawanya. Sinyal informasi VLC dibawa oleh cahaya tampak antara 400 THz (780 nm) dan 800 THz (375 nm) [5]. VLC memiliki keunggulan yaitu dengan penggunaan cahaya sebagai pembawa sinyal informasi, membuat sumber daya yang tidak terbatas dan tentunya tidak membutuhkan biaya yang banyak, VLC memiliki sistem yang tahan dan tidak menimbulkan interferensi pada sistem komunikasi yang lain. VLC yang tahan Interferensi oleh gelombang menjadikan elektromagnetik VLC dapat digunakan pada tempat seperti Pesawat, memiliki kecepatan yang sangat tinggi dengan penggunaan cahaya sebagai pembawa sinyal informasinya, dan cahaya tidak dapat menembus benda padat seperti beton atau material yang tidak dapat ditembus oleh cahaya. Hal ini menjadikan sistem VLC memiliki keamanan yang tinggi dan tidak mudah untuk dicuri atau diambil datanya [6]. *Data rate* VLC dapat mencapai 1 Gbps, memiliki ketahanan terhadap gelombang elektromagnetik, memiliki kanal yang tidak berlisensi, menggunakan daya dengan sangat rendah serta tidak memiliki dampak terhadap Kesehatan tubuh. Standar IEEE yang pertama tentang VLC diatur dalam IEEE 802.15.7-2011 untuk jaringan nirkabel personal [8][9]. Gambar 2.2 merupakan ilustrasi sistem VLC. VLC dapat diimplementasikan pada ruangan *indoor* seperti ruang rapat FTE di gedung TULT yang berkemungkinan memiliki intensitas cahaya yang tinggi pada siang hari. Sinar matahari merupakan salah satu kendala tersebut, namun hal ini sudah dapat diatasi dengan penggunaan *optical bandpass blue filter* yang mengkompensasi pengurangan sebesar 53% laju data oleh sinar matahari [10]. Gangguan sinar matahari yaitu adanya *ambient light noise* yang sangat memengaruhi kinerja VLC dibandingkan kondisi normal [11].



Gambar 2.2 Ilustrasi sistem VLC.

C. Transmitter VLC

Transmitter merupakan perangkat pengirim sinyal informasi melalui cahaya, seperti lampu LED yang dikontrol modulasi sinyal untuk mengubah tingkat intensitas cahaya yang dikeluarkan lampu LED sesuai dengan informasi yang ingin dikirimkan. Cahaya yang telah dimodulasi *transmitter* dapat diterima oleh *receiver*. Total daya kirim LED (P_{tx}) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [12]:

$$P_{tx} = N_{LED} \cdot P_{LED} \quad (2.1)$$

dimana N_{LED} merupakan jumlah LED yang digunakan, dan P_{LED} adalah daya kirim tiap-tiap LED yang digunakan.

1. Light Emitting Diode (LED)

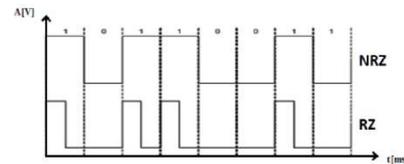
LED biasanya merupakan pilihan sumber cahaya terbaik, memerlukan sirkuit penggerak yang tidak terlalu rumit dibandingkan dioda laser karena diperlukan sirkuit stabilisasi termal atau optik dan dapat dibuat lebih murah dengan hasil yang lebih tinggi [12]. Dalam emisi Lambertian (m_1), daya optik terpancar dari satuan luas ke satuan sudut padat, dapat dihitung dengan persamaan berikut [13]:

$$m_1 = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \phi_{\frac{1}{2}})} \quad (2.2)$$

dimana $\phi_{\frac{1}{2}}$ merupakan *Full Width at Half Maximum* (FWHM).

2. On-Off Keying (OOK) Modulation

OOK merupakan teknik modulasi yang umum digunakan pada komunikasi cahaya tampak dikarenakan teknik modulasi ini yang paling sederhana diantara modulasi lainnya. OOK terbagi menjadi dua yaitu OOK-NRZ (*Non-Return to Zero*) dan OOK-RZ (*Return to Zero*). OOK merupakan modulasi dimana bit "1" melambangkan "on atau true" dan bit "0" melambangkan "off atau false".



Gambar 2.3 Modulasi OOK-NRZ dan RZ

Gambar 2.3 menunjukkan bit 0 1 0 1 1 0 yang digambarkan ke dalam pulsa rektangular OOK-RZ dan OOK-NRZ. Pada modulasi OOK-RZ pulsa yang mewakili bit 1 akan kembali ke bit nol sebelum menyelesaikan slot bit. Sedangkan pada modulasi OOK-NRZ pulsa yang mewakili bit 1 tidak akan kembali ke bit nol setelah menyelesaikan slot bit. Pulsa rektangular dengan periode bit (T_b) yang dihasilkan *transmitter* dapat dihitung dengan persamaan berikut [13]:

$$T_b = \frac{1}{R_b} \quad (2.3)$$

dimana R_b merupakan *bit rate*. Energi per bit (E_b) pada modulasi OOK-NRZ dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$E_b = 2 \cdot (R \cdot P_R)^2 \cdot T_b \quad (2.4)$$

dimana R merupakan responsivitas *photodetector*, P_R merupakan daya terima. Kemudian pada modulasi OOK-RZ dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$E_b = \frac{2 \cdot (R \cdot P_R)^2 \cdot T_b}{Y} \quad (2.5)$$

dimana Y merupakan *duty cycle*.

3. Kanal *Line of Sight* (LOS)

Kanal LOS pada VLC, sinyal ditransmisikan dari *transmitter* menuju *receiver* secara langsung tanpa penghalang, memiliki kecepatan pengiriman data yang mencapai ratusan Mbps [12], dan tahan terhadap interferensi cahaya lain serta tingkat kesalahan pengiriman *bit* yang lebih rendah. Kanal LOS memiliki persamaan sebagai berikut [12]:

$$H = \frac{(m_1+1) \cdot A \cdot \cos^{(m_1+1)} \Phi}{2 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (2.6)$$

dimana H merupakan kanal, A merupakan *areaphotodetector* pada *receiver*, Φ merupakan sudut propagasi *transmitter* dan *receiver*, d merupakan jarak *transmitter* terhadap *receiver*.

D. Jarak *Transmitter* terhadap *Receiver*

Pada sistem VLC jarak *transmitter* terhadap *receiver* dapat mempengaruhi intensitas cahaya yang akan diterima oleh *photodetector*. Semakin jauh jarak *transmitter* terhadap *receiver* maka semakin sedikit intensitas cahaya yang diterima oleh *photodetector*, sehingga menyebabkan daya yang diterima semakin kecil dan begitu juga sebaliknya. Berikut rumus yang digunakan untuk menghitung (d) jarak *transmitter* terhadap *receiver* [12]:

$$d = \sqrt{(X_r - X_t)^2 + (Y_r - Y_t)^2 + (h)^2} \quad (2.7)$$

dimana X_r merupakan koordinat *receiver* sumbu x , X_t merupakan koordinat *transmitter* sumbu x , Y_r merupakan koordinat *receiver* sumbu y , Y_t merupakan koordinat *transmitter* sumbu y dan h merupakan tinggi *receiver* ke *transmitter* (m). Sudut perpindahan (ϕ) atau *Receive angle* dihitung dengan persamaan [12].

$$\phi = \arccos \left(\frac{h}{d} \right) \quad (2.8)$$

E. Interferensi Cahaya Matahari

Sistem VLC sangat dipengaruhi oleh penyinaran sinar matahari sepanjang hari, bervariasi dari matahari terbit hingga terbenam. Untuk menghitung *noise* yang dihasilkan oleh cahaya matahari dalam suatu kanal transmisi menggunakan persamaan [14]:

$$H(t) = H_B + H_{intf}(t) \quad (2.9)$$

dimana $H(t)$ merupakan nilai kanal setelah terkena sinar matahari, H_B merupakan rata-rata nilai *background irradiance*, dan $H_{intf}(t)$ merupakan waktu komponen yang bervariasi dengan rata-rata nol. Radiasi matahari langsung, q_{sun} dapat diukur di lokasi yang diusulkan melalui fotodiode. Maka untuk menghitung *sunlight irradiance* dari matahari dapat menggunakan persamaan [14]:

$$q_{sun} = 1350,3 \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] [\sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega)] \quad (2.10)$$

dimana ϕ merupakan lokasi bujur, ω merupakan sudut perpindahan dan δ merupakan deklinasi matahari dalam derajat, dirumuskan dengan [14]:

$$\delta = 23,45 \sin \left[360 \left(\frac{284+n}{365} \right) \right] \quad (2.11)$$

F. *Receiver* VLC

Pada VLC, *receiver* adalah perangkat yang digunakan untuk menerima sinyal informasi yang dikirimkan melalui Cahaya, yang terdiri dari sebuah sensor cahaya yang mampu menangkap sinyal cahaya yang dikirimkan oleh *transmitter* VLC. Sinyal cahaya yang telah diterima oleh *receiver* akan dikonversi kembali menjadi sinyal elektrik oleh sebuah demodulator yang dapat dipahami oleh manusia atau perangkat yang lain. Daya terima *receiver* (P_{rx}) dihitung dengan persamaan berikut [13].

$$P_{rx} = P_{tot} \cdot H \cdot T_s(\Psi) \cdot g(\Psi) \cdot \cos(\Psi) \cdot N_{LED}, 0 \leq \Psi \leq \Psi_{con} \quad (2.12)$$

dimana, Ψ adalah sudut hubungan antara permukaan *receiver* dan sumbu normal, $T_s(\Psi)$ adalah koefisien filter transmisi, $g(\Psi)$ & $\cos(\Psi)$ adalah *gain concentrator* dan FOV.

1. *Positive Instrict Negative* (PIN) *Photodetector*

PIN *photodetector* adalah jenis detektor cahaya yang digunakan pada VLC pendeteksi sinyal cahaya yang diterima dari sumber cahaya, memiliki tingkat sensitivitas tinggi, tingkat respons yang cepat, tingkat *noise* yang rendah dan kemampuan yang baik untuk menangani cahaya yang terlalu terang atau terlalu redup, sehingga dapat digunakan dalam berbagai aplikasi VLC [12]. Responsivitas adalah rasio banyaknya arus pada *photodetector* terhadap kekuatan daya optik. Sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut [13]:

$$R = \frac{I_p}{P_o} \quad (2.13)$$

dimana I_p merupakan arus dari *photodetector* dan P_o merupakan daya yang dapat diterima oleh *photodetector*. Responsivitas merupakan nilai konstan pada panjang gelombang tertentu. Hal ini disebabkan karena arus pada *photodetector* berbanding lurus dengan daya optik pada *photodetector* [13].

2. *Optical Concentrator*

Optical concentrator adalah perangkat peningkat kekuatan sinyal cahaya pada VLC. Nilai *optical concentrator* dipengaruhi luas *Field of View* (FOV), semakin kecil FOV maka *optical concentrator* dapat lebih mengoptimalkan cahaya yang ditangkap akan berpengaruh pada daya yang akan dikirim oleh *photodetector*. Berikut persamaan untuk menghitung *Gain Concentrator* $g(\Psi)$ [12].

$$g(\Psi) = \frac{n^2}{\sin(\text{FoV})^2} \quad (2.14)$$

dimana n merupakan indeks refraktif *concentrator*.

G. *Signal to Noise Ratio* (SNR)

SNR menampilkan banyak *noise* pengganggu sinyal transmisi atau perbandingan daya sinyal yang diinginkan terhadap *background noise*. SNR yang memiliki nilai rendah disebabkan *bandwidth* modulasi terbatas dari sistem VLC dan daya efisien terdapat pada jarak 1 m setelah transmisi. SNR ditulis dengan persamaan berikut [12][13]:

$$SNR = \frac{(m_o \cdot P_{rx} \cdot R)^2}{2 \cdot q(i_p + i_D) \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot B_e + \frac{4 \cdot K_B \cdot T \cdot B_e}{R_L}} \quad (2.15)$$

dimana m_o merupakan *modulation index*, q merupakan muatan elektron sebesar $1,602 \times 10^{-19}$ C, i_p merupakan arus variasi waktu primer, i_D merupakan *dark current*, B_e

merupakan *Bandwidth*, M^2 merupakan faktor multiplikasi dan $F(M)$ merupakan *noise figure* yang masing-masing bernilai 1, konstanta Boltzman k_B bernilai $1,38054 \cdot 10^{23} J/K$, T merupakan suhu mutlak, dan R_L merupakan nilai tahanan. Sedangkan perhitungan SNR untuk sistem VLC yang terdapat interferensi cahaya matahari dapat menggunakan persamaan [12][13]:

$$SNR = \frac{(m_o \cdot P_{rx_i} \cdot R)^2}{2 \cdot q \cdot q_{sun} \cdot (I_p + I_D) \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot B_e + \frac{4 \cdot k_B \cdot T \cdot B_e}{R_L}} \quad (2.17)$$

dimana q_{sun} merupakan hasil *sunlight irradiance*. Kemudian SNR_{dB} dihitung dengan persamaan [12][13]:

$$SNR_{dB} = 10 \cdot \log(SNR) \quad (2.16)$$

H. *Q-Factor*

Q-Factor adalah ukuran kualitas resonator atau filter, mengacu pada kemampuan modulasi cahaya yang dipancarkan oleh sumber cahaya untuk menyampaikan informasi. Berikut adalah persamaan dari *Q-Factor* [12]:

$$Q - Factor = \frac{10^{SNR/10}}{2} \quad (2.18)$$

jika *Q-factor* suatu filter tinggi, maka filter tersebut memiliki lebar pita yang sempit dan dapat menyaring sinyal dengan efisiensi yang tinggi pada frekuensi tengah pita. Sebaliknya, jika *Q-factor* suatu filter rendah, maka filter tersebut memiliki lebar pita yang lebar dan tidak dapat menyaring sinyal dengan efisiensi tinggi pada frekuensi tengah pita.

I. *Bit Error Rate (BER)*

Sinyal cahaya yang membawa pulsa-pulsa cahaya masing-masing memiliki 1 bit data. Bit yang dimiliki tiap pulsa cahaya tidak selalu terkirim dengan sempurna. BER dapat diartikan sebagai jumlah *error* tiap jumlah bit data yang terkirim pada suatu sistem. Pada OOK-NRZ gelombang penuh apabila kondisi 1, sehingga memiliki *bandwidth* yang lebih besar dan dengan daya yang lebih besar juga. Rumus BER dalam modulasi OOK-NRZ adalah [15]:

$$BER_{OOK-NRZ} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{SNR}\right) \quad (2.19)$$

Sedangkan OOK-RZ memiliki *bandwidth* lebih kecil dari OOK-NRZ dan memiliki efisiensi daya lebih rendah karena hanya mengirimkan setengah gelombang. Rumus BER dalam modulasi OOK-RZ adalah [15]:

$$BER_{OOK-RZ} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \sqrt{SNR}\right) \quad (2.20)$$

Pada Tugas Akhir ini, nilai *threshold* BER yang digunakan adalah:

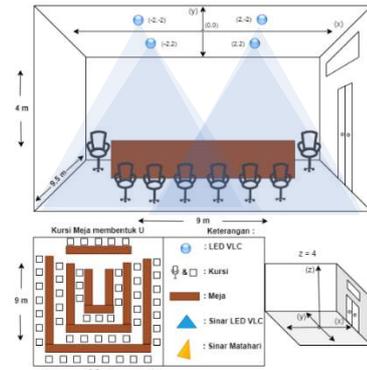
$$BER \leq 10^{-3} \quad (2.2)$$

III. METODE

A. Simulasi Sistem VLC

Pada simulasi ini terdapat 4 skenario. Skenario pertama merupakan sistem VLC 4 LED, skenario kedua merupakan sistem VLC 8 LED, skenario ketiga merupakan sistem VLC 4 LED dengan interferensi Cahaya matahari, dan skenario keempat merupakan sistem VLC 8 LED dengan interferensi Cahaya matahari. Daya kirim masing-masing LED sebesar 2 Watt, dan *bit rate* sebesar 1 Gbps.

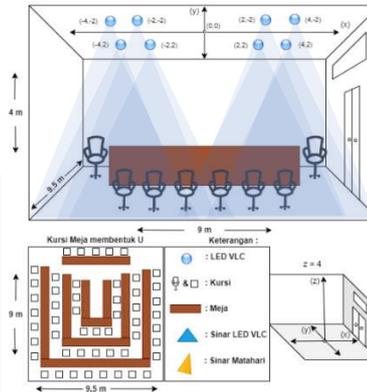
1. Skenario I



Gambar 3.1 Skenario I

Gambar 3.1 merupakan skema ruangan skenario I berukuran (9,5 × 9 × 4) meter, dengan 4 buah lampu LED dengan titik koordinat (x, y): posisi LED pertama pada titik (2, 2) meter, LED kedua pada titik (2, -2) meter, LED ketiga pada titik (-2, 2) meter, LED keempat pada titik (-2, -2) meter dan titik z pada ketinggian 4meter.

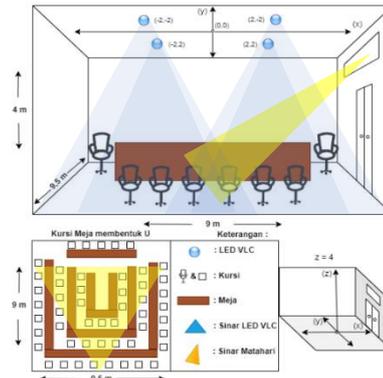
2. Skenario II



Gambar 3.2 Skenario II

Gambar 3.2 merupakan skema ruangan skenario II berukuran (9,5 × 9 × 4) meter, dengan 4 buah lampu LED dengan titik koordinat (x, y): posisi LED pertama pada titik (2, 2) meter, LED kedua pada titik (2, -2) meter, LED ketiga pada titik (-2, -2) meter, LED keempat pada titik (-2, 2) meter, LED kelima pada titik (4, 2) meter, LED keenam pada titik (4, -2) meter, LED ketujuh pada titik (-4, -2) meter, LED kedelapan pada titik (-4, 2) meter dan titik z pada ketinggian 4meter.

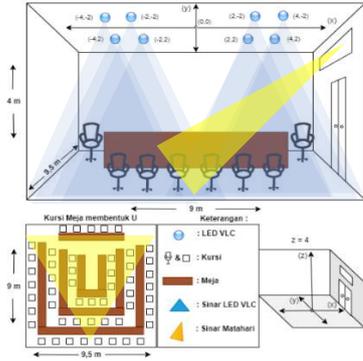
3. Skenario III



Gambar 3.3 Skenario III

Gambar 3.3 merupakan skema ruangan skenario III berukuran (9,5 × 9 × 4) meter, dengan 4 buah lampu LED dengan titik koordinat (x, y): posisi LED pertama pada titik (2, 2) meter, posisi LED kedua pada titik (2, -2) meter, posisi LED ketiga pada titik (-2, -2) meter, dan posisi LED keempat pada titik (-2, 2) meter, titik z pada ketinggian 4meter, dan terdapat interferensi cahaya matahari.

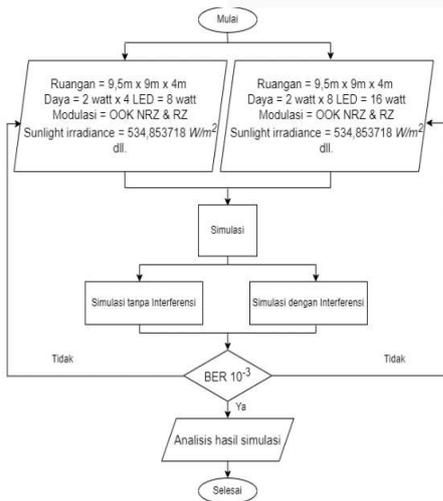
4. Skenario IV



Gambar 3.4 Skenario IV

Gambar 3.4 merupakan skema ruangan skenario IV berukuran (9,5 × 9 × 4) meter, dengan 4 buah lampu LED dengan titik koordinat (x, y): posisi LED pertama pada titik (2, 2) meter, posisi LED kedua pada titik (2, -2) meter, posisi LED ketiga pada titik (-2, -2) meter, posisi LED keempat pada titik (-2, 2) meter, posisi LED kelima pada titik (4, 2) meter, posisi LED keenam pada titik (4, -2) meter, posisi LED ketujuh pada titik (-4, -2) meter, posisi LED kedelapan pada titik (-4, 2) meter, titik z pada ketinggian 4meter dan terdapat interferensi Cahaya matahari.

B. Diagram Alir Simulasi



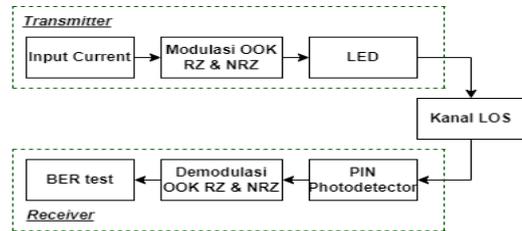
Gambar 3.5 Diagram alir simulasi penelitian sistem VLC

Pada Gambar 3.5 merupakan diagram alir yang digunakan sebagai acuan dalam melakukan simulasi, yang berfungsi untuk mengetahui langkah-langkah yang dilakukan untuk mencapai hasil yang diharapkan. Setiap segmen dalam diagram alir ini memiliki fungsi masing-masing. Simulasi diawali dengan memulai, lalu *input* parameter sistem VLC yang digunakan yaitu: menggunakan jenis LED berwarna putih sebagai pengganti lampu ruangan. Lalu menggunakan *Transmitter* sebanyak 4 dan 8 buah LED. Dimana masing-masing LED memiliki daya sebesar 2Watt. *Bit rate* pada

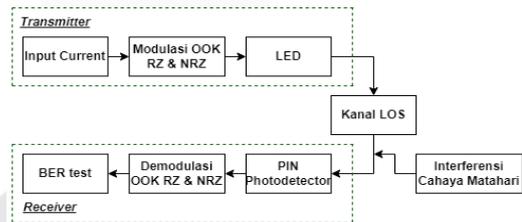
sistem VLC ini adalah 1 Gbps. Kemudian simulasi dilakukan pada ruangan seluas (9,5 × 9 × 4) meter dan modulasi yang digunakan adalah modulasi OOK RZ & NRZ.

Kanal yang digunakan adalah LOS. Lalu *photodetector* yang digunakan adalah jenis PIN. Kemudian menggunakan beberapa skenario, yaitu dalam kondisi tanpa interferensi cahaya matahari, dan dalam kondisi dengan interferensi cahaya matahari, asumsi *Sunlight Irradiance* sebesar 534,853718 W/m². Simulasi ini menggunakan simulasi komputer. Kemudian melakukan proses simulasi dengan beberapa skenario yang berbeda untuk mendapatkan BER dengan nilai 10⁻³. Jika tidak mendapatkan nilai BER 10⁻³ atau masih terdapat bit yang *error* pada data BER *coverage*, maka dilakukan perubahan spesifikasi data pada masukan, sehingga perlu dilakukan simulasi ulang untuk mendapatkan nilai BER 10⁻³. Setelah mendapatkan nilai minimum BER 10⁻³, maka dilakukan analisis terhadap hasil yang didapatkan dari semua skenario yang telah dilakukan, serta membandingkan hasil performa sistem berdasarkan parameter yang telah dipaparkan untuk mendapatkan hasil kerja sistem VLC yang optimal.

C. Simulasi Sistem VLC



Gambar 3.6 Blok diagram VLC



Gambar 3.7 Blok diagram VLC interferensi

Pada Gambar 3.6 kondisi tanpa interferensi cahaya matahari dan Gambar 3.7 dengan interferensi matahari. Pada *Transmitter* terdapat *Input Current* yang merupakan masukan awal, data berisikan spesifikasi sistem, yaitu menggunakan *Transmitter* sebanyak 4 dan 8 buah LED. Dimensi ruangan seluas (9,5 × 9 × 5) meter, menggunakan *bit rate* 1 Gbps, menggunakan modulasi OOK RZ dan OOK NRZ, dll. LED merupakan salah satu komponen elektronika yang memancarkan cahaya saat diberi *forward bias*, LED memancarkan sinyal informasi yang telah termodulasi ke sebuah medium sebelum sampai ke *photodetector* dengan daya masing-masing LED sebesar 2Watt.

Medium yang digunakan untuk merambatkan sinyal informasi dari *transmitter* ke *receiver* berupa kanal LOS. Interferensi yang mempengaruhi performansi sistem VLC adalah *Sunlight Irradiance*. Setelah sinyal ditransmisikan kemudian diterima oleh *photodetector* tipe PIN pada *receiver* yang berfungsi untuk menerima sinyal informasi yang

dipancarkan, sinyal yang diterima berupa cahaya tampak dan ditranslasikan menjadi sinyal elektrik. Kemudian sinyal informasi yang diterima dilakukan pengecekan nilai *Bit Error Rate* (BER), untuk mengetahui banyaknya bit *error* yang terdapat dalam sinyal informasi yang diterima, BER *test* juga salah satu parameter pengujian performansi sistem VLC.

D. Parameter Simulasi

Pada Tabel 3.1 dipaparkan nilai – nilai parameter didapatkan dari berbagai sumber diantaranya dari *datasheet* untuk perangkat – perangkat optik seperti LED untuk bagian *transmitter* dan PIN untuk *receiver*. Parameter lain seperti *index refraksi*, *dark current*, *index modulasi*, *konstanta elektron*, *konstanta boltzman*, suhu mutlak, resistansi dan intensitas Cahaya matahari didapatkan dari kajian studi literasi dari jurnal maupun buku. Untuk parameter ruangan dan lampu dilakukan berdasarkan pengukuran dan penempatan lampu yang sudah ada di Ruang rapat FTE di TULT untuk mendapatkan hasil simulasi yang mirip dengan keadaan sebenarnya.

Tabel 3.1 Tabel Parameter simulasi sistem VLC.

Parameter	Nilai
LED	4 dan 8
Daya	2Watt / buah
<i>Full Width at Half Maximum</i> (FWHM)	50°
Kanal	LOS
Jenis Modulasi	OOK-NRZ dan OOK-RZ
<i>Bit rate</i>	1 Gbps
<i>Modulation Index</i> (m_m)	0,5
Luas <i>Photodetector</i>	$1,00 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
<i>Field of View</i> (FOV)	70°
<i>Optical Concentrator</i> (G_{CON})	2,460
<i>Bandwidth</i>	1 GHz
<i>Index Refraction</i> (n)	1,474
<i>Dark Current</i> (i_p)	6×10^{-7}
Responsivitas (R)	0,725 A/W
Konstanta Elektron (q)	$1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Konstanta Boltzmann (K_B)	$1,38054 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
Suhu Perangkat (T)	300 K
Resistansi (RI)	50 Ohm
Intensitas Cahaya	40%, 60% dan 80%
<i>Sunlight Irradiance</i>	534,853718 W/m^2
Dimensi Ruangan	(9,5 × 9 × 4) meter

Lampu LED telah menjadi pilihan utama sebagai transmitter dalam sistem VLC dengan alasan yang sangat kuat. Pertama-tama, efisiensi energi yang tinggi adalah salah satu faktor kunci yang membuat lampu LED sangat cocok untuk VLC. Lampu LED mampu menghasilkan cahaya dengan menggunakan daya yang rendah, membuatnya sangat efisien dalam mengubah energi listrik menjadi cahaya. Efisiensi ini adalah aset berharga dalam aplikasi nirkabel

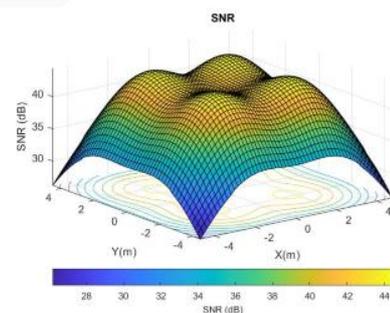
yang membutuhkan penggunaan energi yang hemat. Tidak hanya itu, lampu LED memiliki masa pakai yang panjang dan ketahanan yang baik, yang menjadikannya pilihan yang andal untuk digunakan sebagai transmitter dalam VLC. Kemudahan pengendalian lampu LED, serta ketersediaan dan biaya yang terjangkau, semakin memperkuat kasus penggunaannya dalam teknologi VLC. Lampu LED 2Watt digunakan karena untuk memudahkan analisis perhitungan BER dan SNR, agar dapat memvisualisasikan distribusi *error* dalam ruangan.

Teknik modulasi OOK-NRZ cukup sederhana diimplementasikan, efisien secara energi karena sumber cahaya hanya dinyalakan saat mengirimkan bit bernilai 1, menghemat daya dan memperpanjang umur sumber cahaya. Di sisi lain, OOK-RZ memiliki keunggulan dalam sinkronisasi dan deteksi bit yang lebih akurat, karena adanya perubahan tingkat intensitas di pertengahan bit memudahkan dalam mendeteksi awal dan akhir setiap bit serta mengurangi gangguan interferensi. Model Interferensi sinar matahari pada penelitian ini didasarkan pada bentuk jendela dalam ruangan rapat TULT. Parameter 80% menunjukkan intensitas interferensi Cahaya matahari untuk pagi, 60% menunjukkan intensitas interferensi cahaya matahari pada siang hari dan 40% menunjukkan intensitas Cahaya matahari pada sore hari untuk mengestimasi secara sederhana dampak interferensi terhadap performansi sistem VLC.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini berisi paparan peneliti terhadap hasil-hasil penelitian VLC dengan *transmitter* sebanyak 4 dan 8 LED. Untuk koordinat 4 LED berada pada titik (2, 2, 4), (2, -2, 4), (-2, -2, 4) dan (-2, 2, 4) meter. Sedangkan untuk koordinat 8 LED pada titik (2, 2, 4), (4, 2, 4), (2, -2, 4), (4, -2, 4), (-2, -2, 4), (-4, -2, 4), (-4, 2, 4) dan (-2, 2, 4) meter. Daya masing-masing sebesar 2Watt, dan *bit rate* 1 Gbps. Menggunakan kanal LOS pada ruang rapat FTE di TULT yang berukuran (9,5 × 9 × 4) meter. Simulasi dilakukan dalam kondisi dengan maupun tanpa adanya interferensi cahaya matahari. Untuk kondisi dengan interferensi cahaya matahari dimana *sunlight irradiance* sebesar 534,853718 W/m^2 . Menggunakan modulasi OOKRZ dan OOK NRZ. Dilakukan untuk mencari nilai BER lebih kurang atau sama dengan nilai sebesar 10^{-3} dan SNR saat mencapai nilai tersebut.

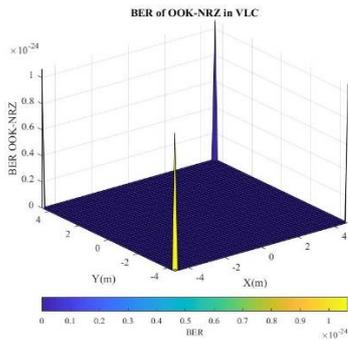
A. Hasil Skenario I



Gambar 4.1 SNR 4 LED

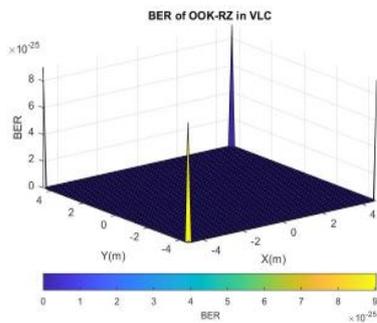
Seperti pada Gambar 4.1, untuk skenario I ini memiliki distribusi sinyal SNR yang merata. Nilai SNR dB tertingginya yaitu 44,43 dan nilai terendahnya yaitu 26,20.

Semakin jauh jarak *receiver* ke *transmitter*, maka nilai SNR semakin kecil. Hal ini disebabkan karena daya yang diterima oleh *receiver* juga semakin berkurang seiring bertambahnya jarak.



Gambar 4.2 BER OOK-NRZ 4 LED

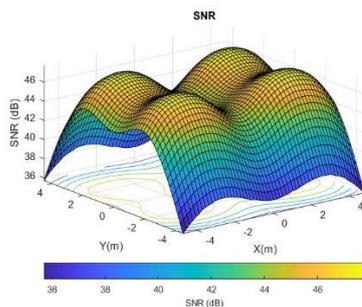
Nilai BER OOK-NRZ pada skenario I ini memiliki nilai yang baik, yaitu *Bit Error Rate* terendahnya sebesar 0 yang menandakan bahwa file dapat dikirim tanpa mengalami *error*. Namun di ujung ruangan terdapat *error* sebesar $1,07 \times 10^{-24}$. Tetapi nilai ini masih dapat dikategorikan sebagai nilai yang baik dimana batas *threshold* BER pada penelitian ini adalah 10^{-3} .



Gambar 4.3 BER OOK-RZ 4 LED

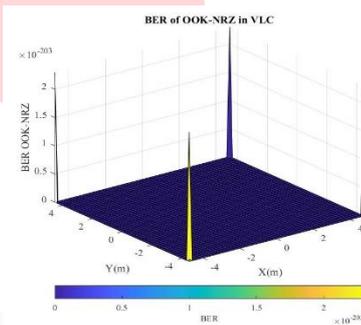
Nilai BER OOK-RZ pada skenario I ini memiliki nilai yang baik, yaitu *Bit Error Rate* sebesar terendang sebesar 0 yang menandakan bahwa file dapat dikirim tanpa mengalami *error*. Namun di ujung ruangan terdapat *error* sebesar $9,04 \times 10^{-25}$. Tetapi nilai ini masih dapat dikategorikan sebagai nilai yang baik dimana batas *threshold* BER pada penelitian ini adalah 10^{-3} .

B. Hasil Skenario II



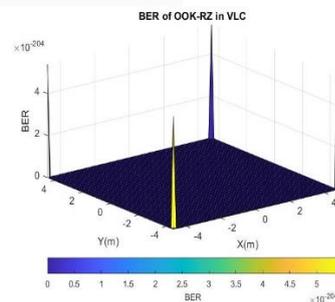
Gambar 4.4 SNR 8 LED

Seperti pada Gambar 4.4, untuk skenario II ini memiliki distribusi sinyal SNR yang merata. Nilai SNR dB tertingginya yaitu 47,77 dan nilai terendahnya yaitu 35,69. Semakin jauh jarak *receiver* ke *transmitter*, maka nilai SNR semakin kecil. Penggunaan lebih banyak lampu sebagai sumber cahaya, VLC memungkinkan cakupan area komunikasi yang lebih luas dimana jarak komunikasi yang ekstensif diperlukan. Kepadatan cahaya yang lebih tinggi memungkinkan sinyal VLC untuk mencapai perangkat penerima dengan lebih baik, mengurangi risiko gangguan, dan meningkatkan performansi sistem. Ini terutama penting dalam aplikasi di mana kualitas sinyal dan kinerja yang stabil sangat diharapkan, seperti dalam pengiriman data berkualitas tinggi atau dalam keadaan dengan banyak perangkat penerima yang tersebar di area yang luas. Dengan penyebaran cahaya yang merata dari banyak lampu, area yang tidak tercakup dalam cahaya dapat diminimalkan, sehingga dapat meningkatkan kinerja dan kualitas sinyal VLC.



Gambar 4.5 BER OOK-NRZ 8 LED

Nilai BER OOK-NRZ pada skenario II ini memiliki nilai yang baik, yaitu *Bit Error Rate* sebesar 0 yang menandakan bahwa file dapat dikirim tanpa mengalami *error*. Namun di ujung ruangan terdapat *error* sebesar $1,02 \times 10^{-203}$. Tetapi nilai ini masih dapat dikategorikan sebagai nilai yang baik dimana batas *threshold* pada penelitian ini adalah 10^{-3} .

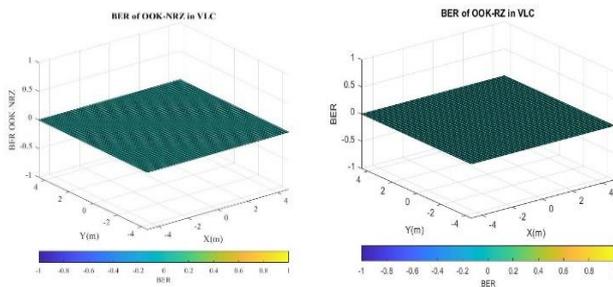


Gambar 4.6 BER OOK-RZ 8 LED

Nilai BER OOK-RZ pada skenario II ini memiliki nilai yang baik, yaitu *Bit Error Rate* sebesar 0 yang menandakan bahwa file dapat dikirim tanpa mengalami *error*. Namun di ujung ruangan terdapat *error* sebesar $5,39 \times 10^{-204}$. Tetapi nilai ini masih dapat dikategorikan sebagai nilai yang baik dimana batas *threshold* BER pada penelitian ini adalah 10^{-3} .

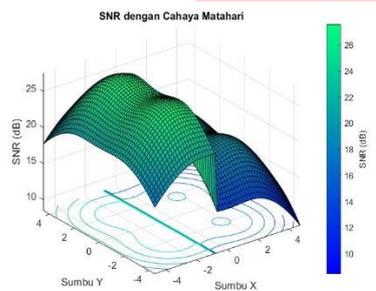
Parameter lampu 2Watt dipertimbangkan digunakan untuk memudahkan analisis perhitungan BER dan SNR, agar dapat memvisualisasikan distribusi *error* dalam ruangan. Seperti pada Gambar 4.7, apabila menggunakan daya lampu

LED 5Watt tidak terlihat *error*, sehingga penulis akan mengalami kesulitan dalam analisis perhitungan BER dan SNR.



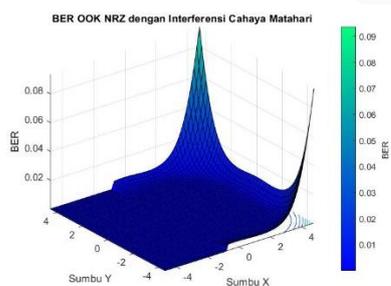
Gambar 4.7 BER daya 5Watt

C. Hasil Skenario III



Gambar 4.8 SNR VLC 4 LED Interferensi

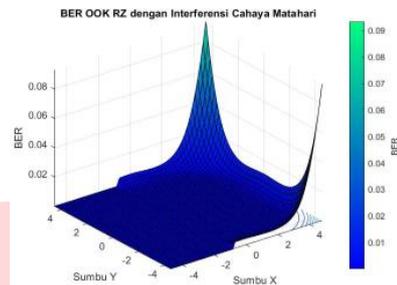
Seperti pada Gambar 4.8, untuk skenario III ini memiliki distribusi SNR yang tidak merata, dikarenakan sebagian ruangan terkena interferensi cahaya matahari lebih banyak. Nilai SNR dB tertingginya yaitu 27,57, nilai rata-ratanya 20,14 dan nilai terendahnya yaitu 8,99. Semakin jauh jarak *receiver* ke *transmitter*, maka nilai SNR semakin kecil. Interferensi Cahaya matahari dalam sistem VLC memiliki dampak serius pada performansi dengan mengakibatkan kehilangan data dan kesalahan transmisi. Ketika sinyal cahaya dari lampu pengirim terganggu oleh sumber cahaya lain atau objek di sekitarnya, data dalam sinyal dapat hilang atau rusak, menyebabkan kesalahan dalam pemahaman data oleh penerima. Selain itu, interferensi mengurangi nilai SINR, menghasilkan kesulitan bagi penerima untuk membedakan sinyal yang diinginkan dari interferensi. Penurunan SINR yang signifikan dapat mengganggu kinerja sistem dan meningkatkan tingkat kesalahan transmisi.



Gambar 4.9 BER OOK-NRZ 4 LED Interferensi

Nilai BER OOK-NRZ pada skenario III ini, bagian yang terkena sedikit interferensi cahaya matahari memiliki nilai *Bit Error Rate* sebesar $5,41 \times 10^{-33}$, sehingga termasuk

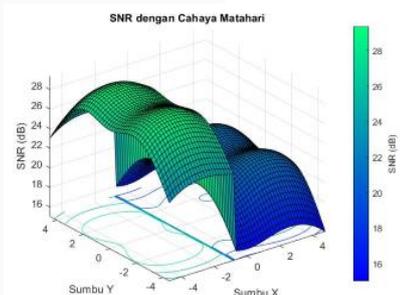
ke dalam kategori yang baik karena batas *threshold* BER pada penelitian ini adalah 10^{-3} . Namun pada bagian ujung ruangan yang terkena interferensi cahaya matahari lebih banyak, memiliki nilai *Bit Error Rate* maksimal sebesar 0,093. Sehingga pada skenario ini, bagian ruangan yang terkena interferensi cahaya matahari lebih banyak, nilainya lebih buruk dari bagian ruangan yang terkena sedikit interferensi cahaya matahari.



Gambar 4.10 BER OOK-RZ 4 LED Interferensi

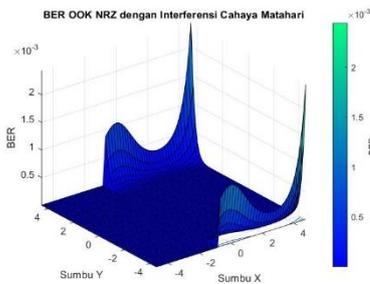
Nilai BER OOK-RZ pada skenario III ini, bagian yang terkena sedikit interferensi cahaya matahari memiliki nilai *Bit Error Rate* sebesar $6,56 \times 10^{-33}$, sehingga termasuk ke dalam kategori yang baik karena batas *threshold* BER pada penelitian ini adalah 10^{-3} . Namun pada bagian ujung ruangan yang terkena interferensi cahaya matahari lebih banyak, memiliki nilai *Bit Error Rate* maksimal sebesar 0,093. Sehingga pada skenario ini, bagian ruangan yang terkena interferensi cahaya matahari lebih banyak, nilainya lebih buruk dari bagian ruangan yang terkena sedikit interferensi cahaya matahari.

D. Hasil Skenario IV



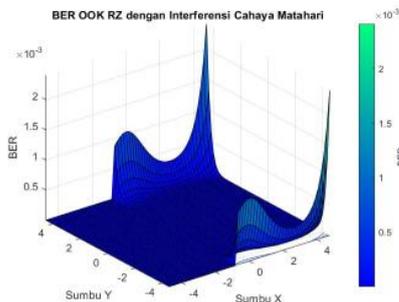
Gambar 4.11 SNR VLC 8 LED Interferensi

Seperti pada Gambar 4.11, untuk skenario IV ini memiliki distribusi SNR yang tidak merata, dikarenakan sebagian ruangan terkena interferensi cahaya matahari lebih banyak. Nilai SNR dB tertingginya yaitu 29,37, nilai rata-ratanya 22,10 dan nilai terendahnya yaitu 15,29. Semakin jauh jarak *receiver* ke *transmitter*, maka nilai SNR semakin kecil. Hal ini disebabkan karena daya yang diterima oleh *receiver* juga semakin berkurang seiring bertambahnya jarak dan bertambahnya intensitas cahaya matahari.



Gambar 4.12 BER OOK-NRZ 8 LED Interferensi

Nilai BER OOK-NRZ pada skenario IV ini, bagian yang terkena sedikit interferensi cahaya matahari memiliki nilai *Bit Error Rate* sebesar $4,70 \times 10^{-48}$. Namun pada bagian ujung ruangan yang terkena interferensi cahaya matahari lebih banyak, memiliki nilai *Bit Error Rate* maksimal sebesar $2,44 \times 10^{-3}$. Tetapi nilai ini masih termasuk ke dalam kategori yang baik karena batas *threshold* BER pada penelitian ini adalah 10^{-3} . Sehingga pada skenario ini, bagian ruangan yang terkena sedikit interferensi cahaya matahari, nilainya lebih baik dari bagian ruangan yang terkena interferensi cahaya matahari lebih banyak.



Gambar 4.13 BER OOK-RZ 8 LED Interferensi

Nilai BER OOK-RZ pada skenario IV ini, bagian yang terkena sedikit interferensi cahaya matahari memiliki nilai *Bit Error Rate* sebesar $5,86 \times 10^{-48}$, sehingga termasuk ke dalam kategori yang baik karena batas *threshold* BER pada penelitian ini adalah 10^{-3} . Namun pada bagian ujung ruangan yang terkena interferensi cahaya matahari lebih banyak, memiliki nilai *Bit Error Rate* maksimal sebesar $2,41 \times 10^{-3}$. Sehingga pada skenario ini, bagian ruangan yang terkena interferensi cahaya matahari lebih banyak, nilainya lebih buruk dari bagian ruangan yang terkena sedikit interferensi cahaya matahari.

Tabel 4.1 Perhitungan simulasi

Skenario	LED	Daya	SNR	BER OOK-NRZ	BER OOK-RZ
I	4	8	44,43	$1,07 \times 10^{-24}$	$9,04 \times 10^{-25}$
II	8	16	47,77	$1,02 \times 10^{-203}$	$5,39 \times 10^{-204}$
III	4	8	27,57	$9,30 \times 10^{-02}$	$9,30 \times 10^{-02}$
IV	8	16	29,37	$2,44 \times 10^{-03}$	$2,41 \times 10^{-03}$

Pada Tabel 4.1 dari semua skenario, nilai SNR tertingginya yaitu skenario II senilai 47,77 dan nilai SNR terendahnya yaitu skenario III senilai 27,57. Untuk skenario tanpa interferensi, skenario II nilainya $1,73 \times$ lebih baik dari skenario I. Untuk skenario dengan interferensi cahaya matahari, skenario IV nilainya $1,07 \times$ lebih baik dari skenario III. Untuk nilai BER OOK-NRZ terendah yaitu skenario II senilai $1,02 \times 10^{-203}$ dan nilai tertingginya yaitu skenario III senilai 0,093.

Model Interferensi sinar matahari pada penelitian ini didasarkan pada bentuk jendela dalam ruangan rapat TULT. Parameter 80% menunjukkan intensitas interferensi Cahaya matahari untuk pagi, 60% menunjukkan intensitas interferensi cahaya matahari pada siang hari dan 40% menunjukkan intensitas Cahaya matahari pada sore hari untuk mengestimasi secara sederhana dampak interferensi terhadap performansi sistem VLC. Pemodelan interferensi Cahaya matahari ini juga mempertimbangkan Indonesia yang memiliki rentang *sunlight irradiance* berkisar antara (500 – 2045) W/m² baik dalam cuaca musim hujan maupun kemarau.

V. KESIMPULAN

Pada perancangan sistem VLC untuk ruang rapat FTE di TULT. Terdapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada hasil simulasi SNR 4 LED tanpa interferensi memiliki nilai SNR (dB) tertingginya yaitu 44,43, sedangkan hasil simulasi dengan interferensinya senilai 27,57. Artinya nilai SNR tanpa interferensi memiliki nilai tertinggi $1,61 \times$ lebih bagus dibanding nilai SNR dengan interferensi.
2. Pada hasil simulasi SNR 8 LED tanpa interferensi memiliki nilai SNR (dB) tertingginya yaitu 47,77, sedangkan hasil simulasi dengan interferensinya senilai 29,37. Artinya nilai SNR tanpa interferensi memiliki nilai tertinggi $1,63 \times$ lebih baik dibanding nilai SNR dengan interferensi.
3. Interferensi Cahaya matahari dalam sistem VLC memiliki dampak serius pada performansi dengan mengakibatkan kehilangan data dan kesalahan transmisi. Ketika sinyal cahaya dari lampu pengirim terganggu oleh sumber cahaya lain atau objek di sekitarnya, data dalam sinyal dapat hilang atau rusak, menyebabkan kesalahan dalam pemahaman data oleh penerima. Selain itu, interferensi mengurangi nilai SINR, menghasilkan kesulitan bagi penerima untuk membedakan sinyal yang diinginkan dari interferensi. Penurunan SINR yang signifikan dapat mengganggu kinerja sistem dan meningkatkan tingkat kesalahan transmisi.
4. Dari semua skenario, skenario II merupakan skenario dengan nilai BER terendah yaitu $5,39 \times 10^{-204}$, dan skenario III merupakan skenario dengan nilai BER tertinggi yaitu 0,093, artinya pada setiap 100bit yang dikirim terdapat 9bit error.
5. Penggunaan lebih banyak lampu sebagai sumber cahaya, VLC memungkinkan cakupan area komunikasi yang lebih luas dimana jarak komunikasi yang ekstensif diperlukan. Dengan kata lain, kepadatan cahaya yang lebih tinggi memungkinkan sinyal VLC untuk mencapai perangkat penerima dengan lebih baik, mengurangi risiko gangguan, dan meningkatkan keandalan sistem. Ini terutama penting

dalam aplikasi di mana kualitas sinyal dan kinerja yang stabil sangat diharapkan, seperti dalam pengiriman data berkualitas tinggi atau dalam keadaan dengan banyak perangkat penerima yang tersebar di area yang luas. Dengan penyebaran cahaya yang merata dari banyak lampu, area yang tidak tercapai dalam cahaya dapat diminimalkan, sehingga dapat meningkatkan kinerja dan kualitas sinyal VLC.

REFERENSI

- [1] Ulfah, M. (2020, August). GEDUNG 20 LANTAI MILIK YPT MEMASUKI PROSES TOPPING OFF. *ypt.or.id*, 27 August. 2020, <https://ypt.or.id/gedung-20-lantai-milik-ypt-memasuki-proses-topping-off/>. Accessed on April 14, 2022.
- [2] Li, Y. Y., Chen, P. H., Chew, D. A. S., Teo, C. C., & Ding, R. G. (2011). Critical project management factors of AEC firms for delivering green building projects in Singapore. *Journal of construction engineering and management*, 137(12), 1153-1163.
- [3] Hamzah, R. Y., Alnaser, N. W., & Alnaser, W. E. (2018). Accelerating the transformation to a green university: University of Bahrain experience. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 48, p. 06002). EDP Sciences.
- [4] Moore, T., & Iyer-Raniga, U. (2019). Reflections of a green university building: from design to occupation. *Facilities*, 37(3/4), 122-140.
- [5] Dang, S., Ma, G., Shihada, B., & Alouini, M. S. Enabling smart buildings by indoor visible light communications and machine learning. arXiv 2019. *arXiv preprint arXiv:1904.07959*.
- [6] Kumar, J. D., Priyadharsini, K., Srinithi, K., Sampriha, R. V., & Babu, C. G. (2021, March). An experimental analysis of lifi and deployment on localization based services & smart building. In *2021 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)* (pp. 92-97). IEEE.
- [7] Baig, S., Asif, H. M., Umer, T., Mumtaz, S., Shafiq, M., & Choi, J. G. (2018). High data rate discrete wavelet transform-based PLC-VLC design for 5G communication systems. *IEEE Access*, 6, 52490-52499.
- [8] Obeed, M., Salhab, A. M., Alouini, M. S., & Zummo, S. A. (2019). On optimizing VLC networks for downlink multi-user transmission: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2947-2976.
- [9] Abuella, H., Elamassie, M., Uysal, M., Xu, Z., Serpedin, E., Qaraqe, K. A., & Ekin, S. (2021). Hybrid RF/VLC systems: A comprehensive survey on network topologies, performance analyses, applications, and future directions. *IEEE Access*, 9, 160402-160436.
- [10] Lian, J., & Brandt-Pearce, M. (2019). Polarity-header optical OFDM for visible light communication systems. *IEEE Photonics Journal*, 11(5), 1-13.
- [11] Hsu, C. W., Chow, C. W., Lu, I. C., Liu, Y. L., Yeh, C. H., & Liu, Y. (2016). High speed imaging 3× 3 MIMO phosphor white-light LED based visible light communication system. *IEEE Photonics Journal*, 8(6), 1-6.
- [12] Keiser, G. (2003). *Optical communications essentials*. McGraw-Hill Education.
- [13] Ghassemlooy, Z., Popoola, W., & Rajbhandari, S. (2013). *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab*, 513 p Boca Raton. FL: Taylor & Francis Group, LLC. [Google Scholar]..
- [14] Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. John Wiley & Sons.
- [15] Elganimi, T. Y. (2013, December). Studying the BER performance, power-and bandwidth-efficiency for FSO communication systems under various modulation schemes. In *2013 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)* (pp. 1-6). IEEE.