

Evaluasi Kinerja Filter Finite Impulse Response (FIR) Menggunakan Window Kaiser dan Hamming pada Komunikasi Li-Fi Dalam Ruangan

Adinda Raihanah¹, Sopian Soim^{*2}, Lindawati Lindawati³

^{1,2,3}Teknik Telekomunikasi, Politeknik Negeri Sriwijaya, Indonesia

Email: ¹062140352350@student.polsri.ac.id, ²sopiansoim@gmail.com, ³lindawati@polsri.ac.id

Abstrak

Keterbatasan spektrum radio akibat padatnya penggunaan perangkat nirkabel memicu kebutuhan akan inovasi teknologi komunikasi yang efisien dan hemat energi. *Light Fidelity* (Li-Fi) hadir sebagai solusi dengan memanfaatkan spektrum cahaya tampak sebagai media transmisi. Teknologi ini menyediakan kecepatan transfer data yang lebih cepat dan efisien dalam penggunaan energi karena dapat diintegrasikan langsung dengan sistem pencahayaan LED. Penelitian ini berfokus pada analisis performa Li-Fi dari segi *filter Finite Impulse Response* (FIR) menggunakan jenis *window* Kaiser dan Hamming. Kedua jenis *window* ini diuji untuk menganalisis *Bit Error Rate* (BER), *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), dan bentuk *eye diagram* pada jarak 1 hingga 6 meter menggunakan simulasi MATLAB untuk berbagai *bit rate*. Hasil simulasi menunjukkan BER rendah pada jarak 1 dan 1.5 meter, dengan nilai 2×10^{-9} . Untuk SNR pada jarak 1 meter, *window* Kaiser menghasilkan nilai 17 dB, sedangkan Hamming nilai 15 dB. Bentuk *eye diagram* pada jarak 1 meter menunjukkan bukaan lebar untuk kedua *window*, mengindikasikan kualitas sinyal yang baik. Dari hasil simulasi, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *window* Kaiser memberikan performa yang lebih baik dibandingkan Hamming. Studi ini memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan teknologi komunikasi nirkabel yang lebih handal dan efisien.

Kata kunci: Bit Error Rate (BER), Finite Impulse Response (FIR), Hamming Window, Kaiser Window, Komunikasi Nirkabel, Li-Fi, Matlab

Performance Evaluation of Finite Impulse Response (FIR) Filter Using Kaiser Window and Hamming in Indoor Li-Fi Communication

Abstract

The limitation of the radio spectrum due to the dense usage of wireless devices has spurred the need for innovative communication technology that is efficient and energy-saving. Light Fidelity (Li-Fi) has emerged as a solution by utilizing the visible light spectrum as a transmission medium. This technology provides faster data transfer rates and efficiency in energy usage as it can be directly integrated with LED lighting systems. This research focuses on the performance analysis of Li-Fi in terms of Finite Impulse Response (FIR) filters using Kaiser and Hamming window types. Both window types are tested to analyze Bit Error Rate (BER), Signal-to-Noise Ratio (SNR), and the eye diagram shape at distances of 1 to 6 meters using MATLAB simulation for various bit rates. The simulation results show low BER at distances of 1 and 1.5 meters, with a value of 2×10^{-9} . For SNR at a distance of 1 meter, the Kaiser window produces a value of 17 dB, while the Hamming window results in 15 dB. The eye diagram shape at a distance of 1 meter shows a wide opening for both windows, indicating good signal quality. From the simulation results, it can be concluded that the use of the Kaiser window provides better performance compared to Hamming. This study makes a significant contribution to the development of more reliable and efficient wireless communication technology.

Keywords: Bit Error Rate (BER), Chemical Equilibrium, Finite Impulse Response (FIR), Hamming Window, Kaiser Window, Li-Fi, Matlab, Wireless Communication

1. PENDAHULUAN

Di era saat ini teknologi mengalami perkembangan yang pesat, kita sebagai manusia dituntut agar dapat beradaptasi dengan berbagai macam perubahan, salah satunya adalah cara berkomunikasi yang dilakukan secara daring. Adapun komunikasi saat ini dilakukan secara daring melalui media nirkabel. Akan tetapi dunia mengalami permasalahan karena banyaknya perangkat yang menggunakan spektrum radio hal ini mengakibatkan kepadatan

pada spektrum radio dan juga membuat tidak terpenuhinya permintaan untuk memakai spektrum radio di masa depan [1]. Dilain hal adanya permasalahan dimana penggunaan frekuensi radio yang dilarang dan dapat mengakibatkan masalah kesehatan seperti di rumah sakit [2]. Oleh karena itu ditemukan teknologi bernama Light-Fidelity, Light-fidelity (LiFi) adalah teknologi komunikasi nirkabel optik (OWC) dua arah, berkecepatan tinggi, dan berjaringan penuh yang menggunakan cahaya tampak sebagai media perambatan dalam *downlink* untuk tujuan penerangan dan komunikasi [3].

Teknologi Li-Fi pertama kali dikembangkan oleh tim riset yang dipimpin oleh Prof. Harald Haas di Universitas Edinburgh. Haas memperkenalkan teknologi ini dalam acara bernama *TED GLOBAL TALK* [4]. Li-Fi menggunakan spektrum cahaya tampak atau biasa disebut *visible light communication* sebagai media transmisinya yang mana ini menawarkan *bandwidth* sekitar 789 THz. Li-Fi menggunakan media *light emitting diode* (LED) sebagai media pemancar dan *photodiode* sebagai media penerima [5]. LED digunakan sebagai pemancar dikarenakan masa pakainya yang lebih lama dan penghematan energinya yang lebih baik dibandingkan sumber pencahayaan tradisional [6]. Teknologi ini memiliki berbagai keuntungan lainnya sebagai contoh biaya kabel yang rendah, akurasi dan kecepatan transfer data, peningkatan keamanan dan keamanan untuk pengguna [7].

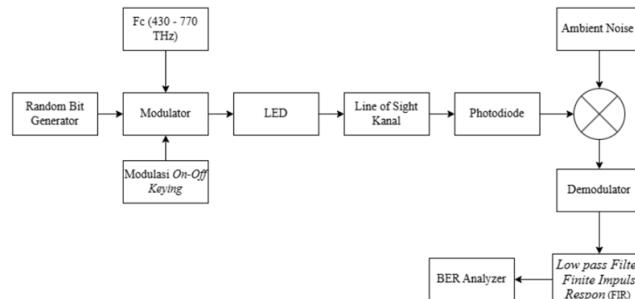
Dalam banyak penelitian sebelumnya untuk Li-Fi komunikasi dalam ruangan. Seperti dalam penelitian berikut bahwasanya peneliti menggunakan modulasi NRZ-OOK dan RZ-OOK untuk komunikasi Li-Fi dalam ruangan dengan modulasi terbaik yang digunakan adalah RZ-OOK dimana bit rate tertinggi 500 mbps dapat dicapai memakai modulasi ini untuk nilai SNR didapat berada disekitar 55.01–70.17 dB [8]. Dalam penelitian lainnya menggunakan modulasi NRZ-OOK, *Adaptive differential equalization* (ADE) dan *RF filter* untuk mengurangi berbagai *noise* dan mendapatkan nilai BER yang rendah, dalam penelitian ini didapat nilai BER yang rendah 1×10^{-5} dengan menggunakan ADE dan *RF filter* secara bersamaan [9]. Dalam penelitian berikut mendesain dan menganalisis Li-Fi dalam ruangan untuk berbagai *filter* IIR, bentuk pulsa, sudut transmisi dan modulasi yang digunakan untuk parameter yang diuji berupa *Q-factor*, *bit rate*, dan BER terhadap jarak didapat kesimpulan bahwa chebyshev merupakan *filter* dan pengkodean sumber NRZ yang terbaik dalam kualitas yang tinggi dan BER yang rendah [1]. Lalu dalam penelitian berikut ini menggunakan empat jenis *filter* optik yaitu Bessel, Gaussian, Rectangular, dan Trapezoidal dalam kondisi lingkungan dalam rungan yang banyak *noise*. Dengan mengukur nilai BER, *Q-factor*, dan bentuk *eye diagram* dapat disimpulkan bahwa *filter* Gaussian merupakan *filter* yang memiliki kinerja terbaik di antara keempat *filter* lainnya [10]. Pada Penelitian lainnya memperkenalkan pengembangan sistem *Visible Light Communication* (VLC) yang mampu mencapai laju data 40 Mb/s dengan memanfaatkan panel LED besar yang sudah ada di lingkungan kantor dalam ruangan. Penelitian ini berfokus pada kelayakan penggunaan infrastruktur penerangan LED yang ada untuk tujuan komunikasi data. Pada penelitian ini menggunakan modulasi *Carrierless Amplitude Phase* (CAP) dan *filter* *Finite Impulse Response* (FIR) dalam pemrosesan sinyal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem VLC yang diusulkan mencapai kecepatan data sampai dengan 40 Mb/s yang nilai BER yang rendah di berbagai kondisi dalam ruangan [11].

Dari beberapa penelitian di atas dapat disimpulkan kebanyakan peneliti menggunakan modulasi OOK untuk komunikasi *single carrier* juga menggunakan *filter* IIR, *filter* optik, dan *filter* FIR dalam implementasinya ke teknologi Li-Fi. Namun, untuk *filter* FIR belum ada penelitian yang membahas lebih lanjut penggunaan teknik *window* yang digunakan dan efek dari penggunaan *filter* FIR dalam komunikasi Li-Fi, maka dari itu pada penelitian ini akan menggunakan *filter* FIR sehingga dapat melakukan evaluasi dan menganalisis bagaimana efek *filter* terhadap BER, SNR, dan *eye diagram* dalam komunikasi Li-Fi. Penelitian ini akan menggunakan *window* kaiser dan *window* hamming. *Window* kaiser dipilih karena pada penelitian sebelumnya *window* ini memiliki pita transisi terkecil, respon frekuensi ideal, dan redaman pita henti yang diinginkan dapat diatur menggunakan parameter α [12]. *Window* hamming dipilih karena pada penelitian terdahulu *window* ini merupakan teknik *window* yang lebih stabil dibandingkan dengan *window* rectangular. Dalam penelitian ini juga menggunakan modulasi *on-off keying* hal ini dilakukan karena modulasi ini sangat mudah diimplementasikan ke sistem dengan biaya implementasi yang rendah [13]. Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana kinerja *filter* FIR dengan menggunakan *window* Kaiser dan Hamming akan memengaruhi komunikasi Li-Fi dalam rungan dari segi tingkat kesalahan bit yang diterima atau nilai *Bit Error Rate* (BER), *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), bentuk *eye diagram* dan memberikan kontribusi yang signifikan dalam pengembangan teknologi komunikasi nirkabel yang lebih handal dan efisien di masa depan.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menggunakan metode kuantitatif yang bertujuan untuk mengevaluasi dan kinerja komunikasi Li-Fi melalui pengukuran tingkat kesalahan bit yang diterima atau BER, nilai *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), bentuk *eye diagram* yang dihasilkan dari *window* kaiser dan hamming dan dengan melakukan simulasi numerik berbasis model matematis untuk menganalisis performa sistem Li-Fi menggunakan aplikasi Matlab proses simulasi akan diulang sebanyak tiga kali untuk *window* kaiser dengan menggunakan *bit rate* yang berbeda yaitu

10 mbps, 20 mbps, dan 30 mbps hal yang sama juga dilakukan dengan *window hamming*. Sebelum menghitung nilai BER dan SNR perlunya membuat simulasi komunikasi nirkabel Li-Fi mengikuti diagram blok berikut.



Gambar 1. Diagram Blok Komunikasi Li-Fi

Pada gambar 1 merupakan gambar diagram blok untuk komunikasi Li-Fi tersebut menyajikan sebuah sistem komunikasi berbasis *Visible Light Communication* (VLC), yakni teknologi nirkabel yang memanfaatkan spektrum cahaya tampak untuk mentransmisikan data digital. Spektrum cahaya tampak yang digunakan berada pada kisaran frekuensi 430 hingga 770 THz, berbeda dari sistem komunikasi konvensional yang memakai gelombang radio. Proses dimulai dari Random Bit Generator, komponen yang berfungsi menghasilkan aliran bit acak yang terdiri dari nilai-nilai biner (0 dan 1) sebagai data digital mentah yang akan dikirimkan. Bit-bit ini kemudian masuk ke tahap modulasi, di mana digunakan teknik On-Off Keying (OOK). Dalam teknik OOK ini, bit '1' diwakili oleh nyala (on) LED, sedangkan bit '0' diwakili oleh kondisi mati (off) dari LED. Modulasi ini efektif untuk VLC karena sifat LED yang bisa menyala dan padam dengan sangat cepat, mengikuti pola bit.

Setelah proses modulasi, sinyal digital tersebut diubah menjadi bentuk optik menggunakan **LED** sebagai pemancar cahaya. LED akan memancarkan cahaya sesuai pola sinyal biner yang telah dimodulasi. Proses transmisi cahaya ini berlangsung melalui kanal Line of Sight (LoS), yaitu jalur komunikasi langsung tanpa penghalang antara pemancar (LED) dan penerima (*photodiode*). Kanal ini sangat bergantung pada orientasi dan posisi antara kedua perangkat, sehingga jika terdapat penghalang fisik, transmisi dapat terganggu atau bahkan terputus sama sekali. Setelah cahaya mencapai sisi penerima, ia diterima oleh *photodiode*, yaitu perangkat sensor optik yang berfungsi mengubah kembali sinyal cahaya menjadi sinyal listrik. Namun, selama proses transmisi, sinyal tidak selalu sampai dalam bentuk murni, karena adanya ambient noise yakni cahaya dari sumber-sumber lain di lingkungan sekitar seperti sinar matahari, lampu ruangan, atau pantulan cahaya yang masuk ke sistem dan tercampur dengan sinyal data utama.

Gabungan antara sinyal data dan noise ini akan diproses oleh demodulator, yang bertugas menerjemahkan sinyal listrik kembali menjadi data digital sesuai pola OOK yang telah digunakan sebelumnya. Untuk meningkatkan akurasi dalam pengambilan keputusan bit, sinyal tersebut kemudian melewati *Low Pass Filter* bertipe *Finite Impulse Response* (FIR). Filter digital ini dirancang untuk menyaring frekuensi tinggi yang tidak diinginkan dan hanya melewatkannya komponen sinyal frekuensi rendah yang relevan dengan data asli.

Langkah terakhir dalam sistem ini adalah proses evaluasi kualitas transmisi menggunakan *BER Analyzer* (*Bit Error Rate Analyzer*). Alat ini akan menghitung berapa banyak bit yang diterima secara salah (misalnya, bit '1' yang terbaca sebagai '0', atau sebaliknya) dibandingkan dengan jumlah total bit yang dikirimkan. Rasio kesalahan ini disebut sebagai *Bit Error Rate* (BER), yang menjadi indikator utama dalam menilai performa sistem komunikasi. Semakin kecil nilai BER, maka semakin handal sistem komunikasi VLC tersebut dalam mengirimkan data tanpa kesalahan. Nilai BER yang rendah menunjukkan bahwa sistem mampu mentransmisikan data dengan efisien meskipun terdapat gangguan dari lingkungan sekitar.

Pada proses pemancaran cahaya melalui LED, sistem dirancang dengan mengacu pada model kanal optik berdasarkan distribusi penceran lambertian, yang menggambarkan karakteristik penyebaran intensitas cahaya dari LED sebagai pemancar utama. Hukum lambert digunakan untuk menentukan besarnya daya optik yang diterima oleh *photodiode* berdasarkan sudut penceran (θ) dari LED terhadap bidang normal.

Model matematis memanfaatkan orde lambertian (m) untuk menghitung sebaran intensitas cahaya, dimana m bergantung pada sudut setengah daya LED dan menunjukkan seberapa sempit atau lebar arah penceran. Daya optik yang diterima pada penerima dari pemancar LED untuk sinyal DC dihitung menggunakan persamaan [1]:

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\theta) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (1)$$

Pada persamaan (1) m adalah order lambertian dari LED, dihitung dari sudut pancaran setengah daya $\phi_{1/2}$ dengan persamaan berikut [1]:

$$m = \left\{ \frac{\ln 2}{\ln(\cos \phi_{1/2})} \right\} \quad (2)$$

A adalah luas area detektor *photodiode*, d adalah jarak dari pemancar dan penerima, ϕ sudut iradiasi (sudut antara garis normal pemancar dan arah menuju penerima) sudut ini dapat dihitung dengan menggunakan rumus [3]:

$$\cos(\phi) = \frac{h_a - h_u}{l} \quad (3)$$

dimana h_a merupakan tinggi *access point* (LED), h_u adalah tinggi perangkat penerima (*user*), dan l adalah garis antara LED dan *receiver* yang menghitung menggunakan [3]:

$$1 = \sqrt{r^2 + (h_a + h_u)^2} \quad (4)$$

ψ sudut *incident* (penerimaan) antara garis normal penerima dan arah datang cahaya sudut dapat dihitung menggunakan rumus berikut [3]:

$$\cos(\psi) = \frac{r \cos(\Omega - \alpha) \sin(\theta) + (h_a + h_u) \cos(\theta)}{l} \quad (5)$$

ψ_c *Field of View* (FOV) sudut maksimum dari arah tegak lurus permukaan detektor (*receiver*) di mana cahaya masih bisa diterima secara efektif, $T_s(\psi)$ Transmisi optik dari sistem lensa atau *filter* di depan detektor (biasanya dianggap konstan atau fungsi dari ψ), $g(\psi)$ gain dari lensa konsentrator optik dimana persamaannya sebagai berikut [1]:

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(\psi_c)}, & x \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (6)$$

$\cos^m(\phi)$ menggambarkan pola penyebaran cahaya dari LED menurut model Lambertian. Untuk menghitung daya yang diterima oleh *photodiode* menggunakan rumus berikut [1]:

$$P_r = \begin{cases} \frac{P_r (m+1) A_{det}}{2\pi d^2 \sin^2 \psi_c} \cos^m(\phi) T_s(\psi) n^2 \cos(\psi) & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (7)$$

Kemudian cahaya yang membawa informasi ini diterima oleh *photodiode*, yang mengubah sinyal optik menjadi sinyal listrik. Pada tahap ini, sinyal dapat terpengaruh oleh *ambient noise*, yang dapat menyebabkan degradasi dalam proses penerimaan. Sinyal listrik yang dihasilkan kemudian dikirim ke *demodulator* untuk mengekstrak kembali data biner dari sinyal yang diterima. Selanjutnya, sinyal melewati *Low Pass Filter Finite Impulse Response (FIR)* untuk menghilangkan noise atau komponen frekuensi tinggi yang tidak diinginkan dengan menggunakan teknik *window*.

Berikut persamaan untuk *window* Hamming [14]:

$$W(n) = \begin{cases} 0.54 - 0.46 * \cos 2\frac{\pi n}{N}, & \text{untuk } n = 0 \text{ sampai } N - 1 \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (8)$$

Pada persamaan (4) n indeks sampel dan N adalah panjang *window*.

Berikut untuk persamaan menggunakan *window* Kaiser sebagai berikut [15]:

$$w(n) = \frac{I_0 \left(\alpha \sqrt{1 - \left(\frac{2n}{N-1} - 1 \right)^2} \right)}{I_0(\alpha)} \quad (9)$$

untuk persamaan (4) parameter n adalah indeks sampel dari 0 sampai $N - 1$, N panjang *window*, dan α adalah parameter bentuk *window* yang mengontrol *trade-off* antara lebar *mainlobe* dan *sidelobe attenuation*. dimana I_0 merupakan fungsi bessel yang bisa dinyatakan dengan persamaan berikut[15]:

$$I_0(x) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{1}{k!} \left(\frac{x}{2} \right)^k \right]^2 \quad (101)$$

Pada persamaan (6) x adalah variabel bebas (input ke fungsi Bessel), k indeks penjumlahan dari 1 ke tak hingga.

Terakhir, performa sistem dianalisis menggunakan BER *Analyzer*, yang mengukur *Bit Error Rate* (BER) terhadap jarak mulai dari 1 meter hingga 6 meter dan bit rate 10 mbps sampai 30 mbps. *Bit Error Rate* (BER) diukur menggunakan persentase berikut persamaan BER [16] :

$$BER = \left(\frac{\text{jumlah bit error yang diterima}}{\text{jumlah total bit yang dikirim}} \right) \times 100\% \quad (11)$$

Atau untuk kasus ini menggunakan modulasi *on-off keying* (OOK) nilai BER dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [17]:

$$BER_{OOK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{SNR}{2\sqrt{2}} \right\} \quad (12)$$

Untuk menghitung nilai *Signal to Noise Ratio* (SNR) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut [18]:

$$SNR = \frac{\gamma^2 P^2 rec}{\sigma^2 total} \quad (13)$$

Dimana γ mewakili tingkat kecerahan P_{rec} merupakan kekuatan sinyal yang diterima dan σ total merupakan total jumlah *noise* yang diterima pada *photodiode*.

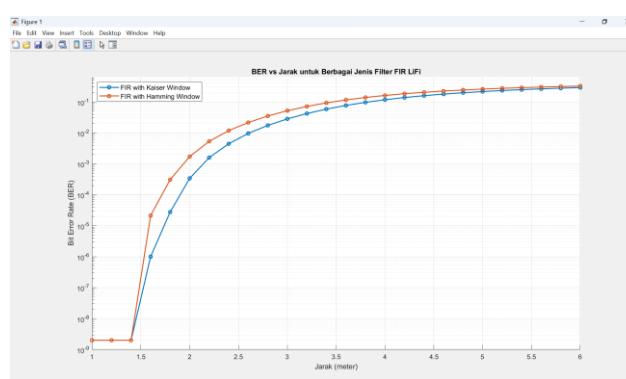
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah penelitian dilakukan dengan menggunakan simulasi melalui aplikasi matlab menggunakan parameter berikut ini:

Tabel 1. Parameter yang digunakan dalam penelitian

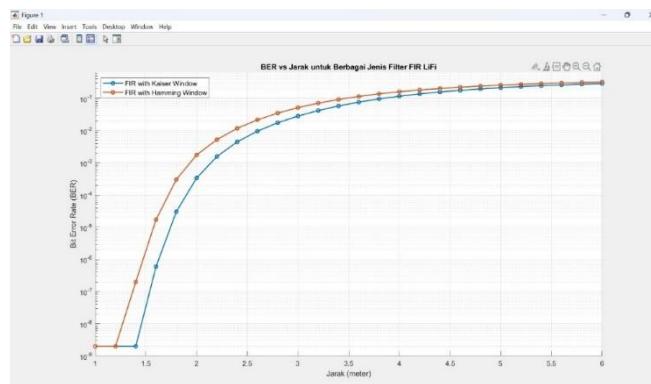
| No | Parameter | Simbol | Nilai |
|----|--------------------------------------|-----------|----------------|
| 1 | Bit rate | R_b | 10 – 30 Mbps |
| 2 | Jarak | d | 1 - 6 meter |
| 3 | Daya yang ditransmisikan LED | P_t | 50 mW |
| 4 | Luas area penerima photodioda | A_{det} | 1.5 cm^2 |
| 5 | Data input bit digital acak | N | 5.000.000 bits |
| 6 | Transmission gain | T_s | 0.5 dB |
| 7 | Indeks bias lensa | n | 1.5 |
| 8 | FOV penerima | ψ_c | 15° |
| 9 | Sudut insidien (diasumsikan optimal) | ψ | 0° |

3.1. Bit Error Rate (BER)



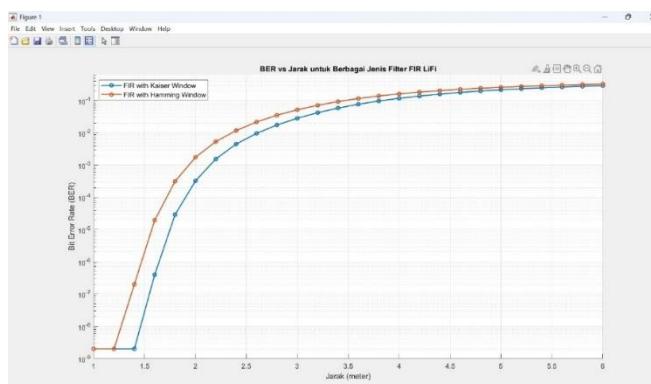
Gambar 2. Hasil Nilai BER Untuk *Window Kaiser* dan *Window Hamming* menggunakan *bit rate* 10 mbps

Dari gambar 2 menampilkan hasil simulasi sistem komunikasi Li-Fi untuk nilai BER terhadap jarak menggunakan *bit rate* 10 mbps, dimana sumbu y menunjukkan nilai BER dan sumbu x menunjukkan jarak antara pemancar (LED) dan penerima (*photodiode*) dalam satuan meter (m). Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai BER terus meningkat seiring bertambahnya jarak, pada jarak 1 meter sampai 1,4 meter menunjukkan nilai BER yang rendah yaitu dinali 10^{-9} untuk kedua jenis *window* tersebut dalam hal ini sistem komunikasi dalam kondisi yang optimal karena kesalahan bit yang diterima sangat kecil. Namun, pada jarak 1,6 meter ke atas nilai BER terlihat mengalami kenaikan yang signifikan terutama dengan menggunakan *window hamming* nilai BER langsung melonjak ke nilai 10^{-5} sementara menggunakan *window kaiser* nilai BER pada jarak yang sama berada di nilai 10^{-6} . Ini menandakan semakin banyaknya *error bit* yang diterima pada *photodiode* seiring bertambahnya jarak. Akan tetapi dari kedua *window* tersebut *window kaiser* memberikan hasil pembacaan nilai BER yang lebih rendah daripada *window hamming*.



Gambar 3. Hasil Nilai BER Untuk *Window Kaiser* dan *Window Hamming* menggunakan *bit rate* 20 mbps

Pada gambar 3 menunjukkan hasil nilai BER dengan menggunakan *bit rate* 20 mbps terlihat bahwa nilai BER mencapai 10^{-9} ditunjukkan pada jarak 1 meter sampai 1,4 meter dan menggunakan *window kaiser* dan menggunakan *window hamming* nilai tersebut bisa dicapai pada 1 meter sampai 1,2 meter. Nilai BER mulai melonjak untuk *window hamming* dari jarak 1,4 dimana pada jarak ini nilai BER telah mencapai disekitar 10^{-7} ke atas, pada jarak 2 meter nilai BER telah mencapai diatas 10^{-3} ini menandakan adanya perubahan yang signifikan terhadap sistem tersebut menandakan tingginya kesalahan bit yang terbaca meningkat. Untuk *window kaiser* pada jarak 1,6 meter nilai BER mulai naik hampir mendekati nilai 10^{-6} kemudian pada jarak 2,6 meter nilai BER telah mendekati 10^{-2} ini menandakan sistem telah banyak mendekripsi kesalahan nilai bit yang dikirim oleh pengirim.

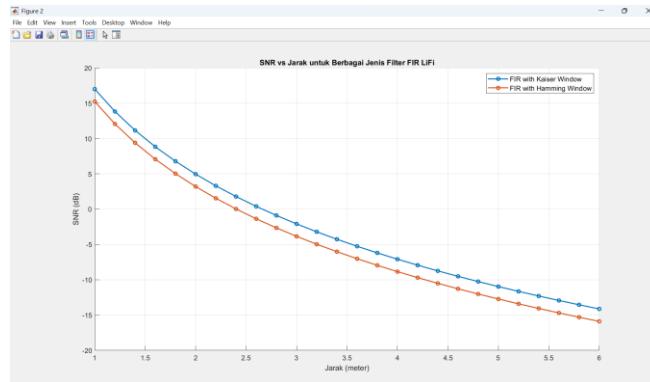


Gambar 4. Hasil Nilai BER Untuk *Window Kaiser* dan *Window Hamming* menggunakan *bit rate* 30 mbps

Gambar 4 merupakan gambar grafik yang menunjukkan hasil nilai BER yang didapat dari simulasi dengan menggunakan *bit rate* 30 mbps. Terlihat bahwa dengan menggunakan *window hamming* nilai terendah yang didapat berada pada jarak 1 meter sampai 1,2 meter, sedangkan menggunakan *window kaiser* nilai terendah yang didapat berada pada jarak 1 meter sampai 1,4 meter. Ini menandakan pada jarak tersebut komunikasi Li-Fi ini optimal karena kesalahan pembacaan bit bisa diminimalisir. Untuk *window kaiser* pada jarak 1,6 meter mulai mengalami kenaikan nilai BER yang signifikan yaitu mendekati nilai 10^{-6} yang menandakan adanya kenaikan kesalahan pembacaan bit yang diterima. Begitupun *window hamming* pada jarak 1,4 meter nilai BER naik

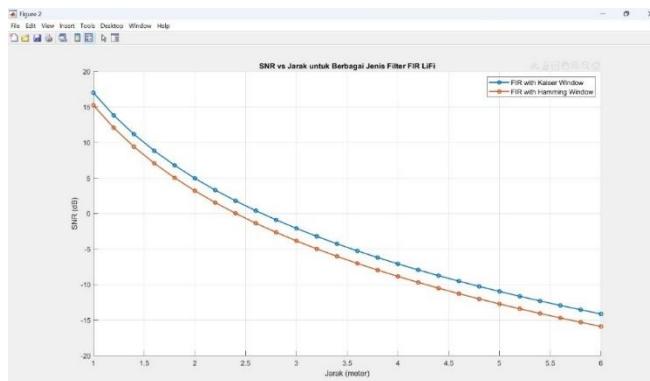
mendekati nilai 10^{-6} . Lalu pada jarak 3 meter kedua teknik *window* tersebut menghasilkan nilai BER yang mendekati 10^{-1} menandakan sangat banyaknya kesalahan pembacaan bit yang diterima ini berarti komunikasi Li-Fi pada jarak ini sudah sangat tidak optimal untuk digunakan.

3.2. signal to noise ratio (SNR)



Gambar 5. Hasil Nilai SNR Untuk *Window* Kaiser dan *Window* Hamming menggunakan *bit rate* 10 mbps

Gambar 5 merupakan grafik pembacaan nilai *signal to noise ratio* (SNR), dimana sumbu x merupakan jarak antara pemancar (LED) dan penerima (*photodiode*) dalam satuan meter (m) dan sumbu y menunjukkan nilai SNR dalam satuan desibel. Dari grafik tersebut terlihat bahwa *window* kaiser menghasilkan nilai SNR yang lebih besar yaitu 17 dB daripada menggunakan *window* hamming nilai SNR berada disekitar nilai 15 db pada jarak 1 meter. Untuk jarak maksimum nilai SNR berada di bawah minus untuk kedua *window* tersebut yang menandakan daya *noise* lebih besar daripada daya sinyal hal ini menandakan sistem komunikasi lifi tersebut dalam kondisi yang sangat tidak optimal.

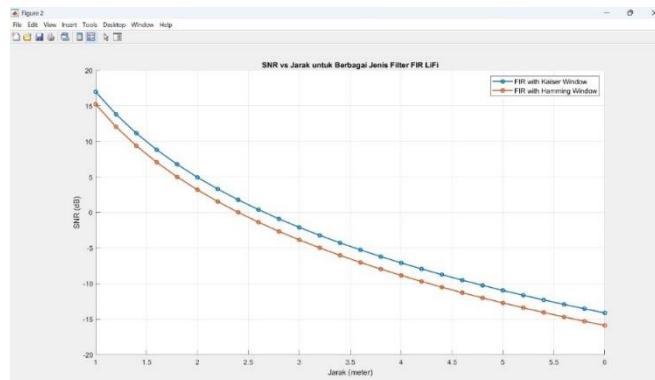


Gambar 6. Hasil Nilai SNR Untuk *Window* Kaiser dan *Window* Hamming menggunakan *bit rate* 20 mbps

Gambar 6 menunjukkan hasil pembacaan nilai SNR untuk kedua *window* tersebut. Terlihat bahwa nilai SNR dengan menggunakan *window* kaiser lebih tinggi daripada menggunakan *window* hamming, ini terlihat pada jarak minimum yaitu 1 meter nilai SNR untuk *window* kaiser adalah 16.9 dB sedangkan *window* hamming berada disekitar 15.2 dB ini menandakan bahwa *window* kaiser lebih unggul dalam menjaga kualitas daya sinyal terhadap daya *noise* pada jarak minimum. Pada jarak maksimum yaitu 6 meter kedua *window* telah mengalami penurunan performa yang signifikan karena pada jarak ini nilai SNR telah berada di -14 dB untuk *window* kaiser dan -16 dB untuk *window* hamming ini menandakan bahwa daya *noise* lebih besar daripada daya sinyal artinya sistem tidak mampu meredam daya *noise* yang ada.

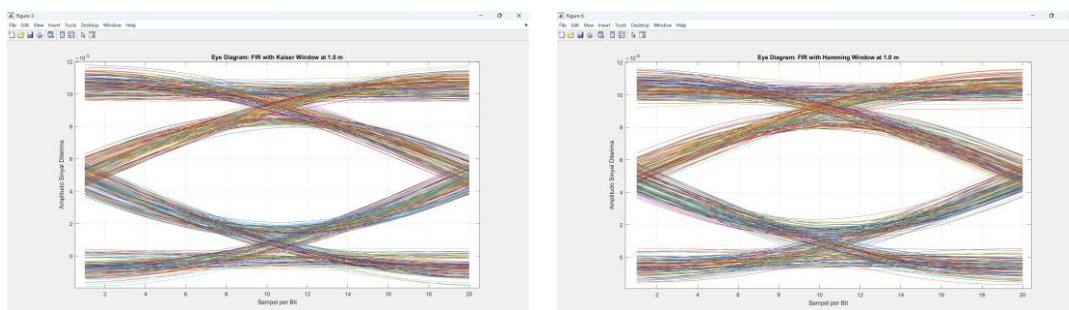
Gambar 7 merupakan grafik yang menunjukkan hasil nilai SNR dengan menggunakan *bit rate* 30 mbps, dimana pada jarak minimum untuk *window* kaiser menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan *window* hamming yaitu 17 dB sedangkan *window* hamming berada dinilai sekitar 15 dB. Ini menandakan bahwa *window* kaiser lebih optimal daripada *window* hamming dalam komunikasi Li-Fi ini. Lalu pada jarak maksimum yaitu 6 meter untuk kedua teknik *window* tersebut berada dinilai untuk *window* kaiser -14 db dan *window* hamming -16 db hal ini menandakan pada jarak maksimum kedua teknik *window* tersebut tidak optimal lagi, pada jarak ini daya

noise lebih besar daripada daya sinyal hal ini akan berarti daya sinyal semakin sulit diterima oleh penerima karena tertutup oleh daya *noise*.



Gambar 7. Hasil Nilai SNR Untuk *Window* Kaiser dan *Window* Hamming menggunakan *bit rate* 30 mbps

3.3. Eye Diagram

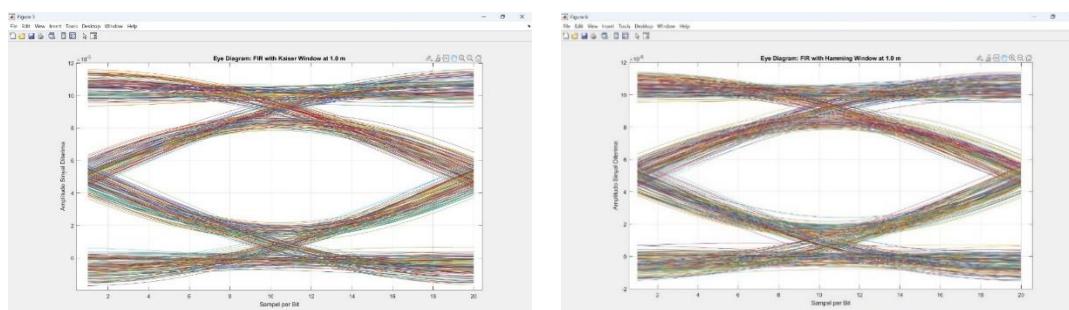


a) Eye diagram window kaiser

(b) Eye diagram window hamming

Gambar 8. Hasil Eye Diagram Untuk Kedua Window Menggunakan Bit Rate 10 mbps

Pada gambar 8 adalah gambar hasil *eye diagram* untuk kedua jenis *window* pada jarak 1 meter, dari gambar tersebut terlihat bahwa mata yang terbuka lebar ini menandakan SNR yang baik, jitter yang rendah, dan *inter-symbol-interference* (ISI) yang minimal. Ini juga menandakan sinyal digital yang diterima memiliki kualitas yang baik dan sistem komunikasi Li-Fi ini beroperasi dengan efektif dalam mempertahankan integritas sinyal, yang pada akhirnya akan menghasilkan nilai BER yang rendah dan komunikasi yang handal.



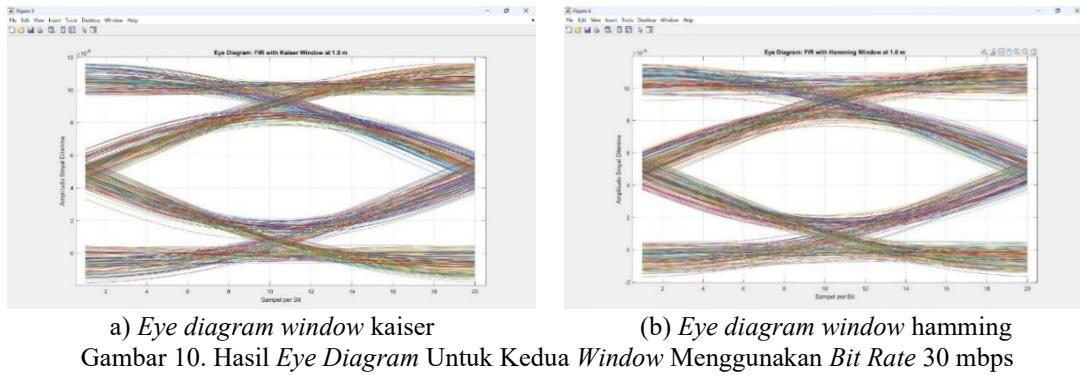
a) Eye diagram window kaiser

(b) Eye diagram window hamming

Gambar 9. Hasil Eye Diagram Untuk Kedua Window Menggunakan Bit Rate 20 mbps

Gambar 9 merupakan hasil bentuk *eye diagram* untuk kedua *window* dengan menggunakan *bit rate* 20 mbps. Gambar (a) menyajikan hasil *eye diagram* untuk implementasi *filter* dengan *window* kaiser dan gambar (b) merupakan hasil *eye diagram* untuk *window* hamming. Kedua *window* tersebut sama-sama menggunakan *bit rate* 20 mbps dan terlihat bahwa kedua gambar matanya terbuka lebar ini menandakan bahwa kedua *window* bekerja dengan baik pada jarak 1 meter dimana dalam hal ini *window* tersebut berhasil meminimalisir *inter-symbol interference* (ISI) pada sinyal yang diterima, sinyal yang diterima juga memiliki nilai SNR yang tinggi dan distorsi yang rendah. Nilai BER yang dihasilkan juga rendah menandakan bahwa sistem komunikasi Li-Fi pada jarak ini

optimal dan bisa digunakan dalam komunikasi nirkabel. Meskipun demikian, ada perbedaan pada gambar 9 terlihat adanya beberapa garis sinyal yang sedikit menjauh atau menyebar dari bentuk ideal mata yang seharusnya bersih dan tipis. Hal ini menandakan adanya ISI yang terjadi dengan menggunakan *window hamming*. Meskipun secara keseluruhan mata masih terbuka lebar dan performa masih sangat baik, penyimpangan garis ini menunjukkan bahwa *window hamming*, dalam sistem komunikasi ini kurang optimal dibandingkan kaiser dalam menekan semua gangguan.



a) Eye diagram window kaiser
b) Eye diagram window hamming
Gambar 10. Hasil Eye Diagram Untuk Kedua Window Menggunakan Bit Rate 30 mbps

Gambar 10 merupakan hasil bentuk *eye diagram* untuk kedua *window* dengan menggunakan *bit rate* 30 mbps. Gambar (a) merupakan hasil *eye diagram* untuk *window* kaiser dan gambar (b) merupakan hasil *eye diagram* untuk *window* hamming. Terlihat bahwa pada jarak minimum yaitu 1 meter ini untuk gambar 12 hasil bentuk *eye* terlihat terbuka lebar menandakan bahwa sistem memiliki *inter-symbol interference* (ISI) yang rendah. Semakin lebar dan terbuka *eye diagram*, maka semakin baik kualitas sistem karena penerima dapat lebih mudah menentukan batas keputusan untuk membedakan antara bit '1' dan '0'. Adanya berbagai warna yang tumpang tindih mencerminkan *overlay* dari banyak simbol bit yang disusun untuk memvisualisasikan semua kemungkinan transisi sinyal. Tidak terlihat adanya penutupan signifikan pada area *eye*, sehingga *noise* dan distorsi kanal dalam sistem pada jarak 1 meter ini dapat dikatakan cukup kecil. Namun, jika diperhatikan lebih lanjut pada tepi bawah, terdapat sedikit sebaran sinyal (fluktasi kecil) yang menandakan ada *noise* atau sedikit variasi amplitudo sinyal yang kemungkinan berasal dari efek kanal atau *noise* elektronik. Untuk gambar 13 menunjukkan *eye* yang terbuka cukup sempit daripada gambar 12 menandakan bahwa sistem yang *window* ini lebih rentan terhadap *noise*, serta adanya *jitter* atau ketidakpastian waktu saat transisi bit. Akibatnya, sistem dengan *window* hamming akan memiliki *q-factor* yang lebih rendah dan nilai BER yang lebih tinggi.

3.4. Pembahasan

Secara keseluruhan dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa *window* kaiser menghasilkan nilai BER yang lebih rendah daripada *window* hamming baik dari jarak 1 meter sampai 6 meter. Untuk nilai SNR pada *window* kaiser menghasilkan nilai yang lebih tinggi daripada *window* hamming mulai dari jarak 1 meter sampai 6 meter. Untuk hasil *eye diagram* dapat dilihat bentuk *eye diagram* dari *window* kaiser lebih jernih pada *bit rate* 10 mbps dan 20 mbps daripada *window* hamming. Namun, *eye diagram* untuk *window* kaiser pada *bit rate* 30 mbps terlihat adanya beberapa *trace* (jejak sinyal) yang keluar dari *area mata* terutama di kiri bawah ini menandakan pada *bit rate* ini *window* kaiser belum mampu memfilter sinyal sepenuhnya karena masih adanya *trace* yang keluar ini menandakan adanya *inter-symbol interference* (ISI), *error decoding*, dan adanya *noise*. Secara keseluruhan *window* kaiser lebih unggul daripada *window* hamming.

Secara teori *window* kaiser lebih baik dari pada *window* hamming karena *window* kaiser merupakan *window* yang fleksibel sebab parameter α bisa diatur dan disesuaikan dengan keinginan sedangkan *window* hamming merupakan *window* yang telah ditetapkan nilai-nilainya sehingga *window* ini tidak seflexible *window* kaiser. Dan dari hasil penelitian sebelumnya bahwa penggunaan *window* kaiser lebih baik daripada *window* lainnya karena *window* kaiser memiliki pita transisi terkecil, respon frekuensi ideal, dan redaman *stop band* yang diinginkan dapat diatur menggunakan parameter α dan dari hasil penelitian juga menunjukkan bahwa dari enam jenis *window* function yang digunakan dalam perancangan filter FIR low pass—yaitu Rectangular, Bartlett, Hamming, Hanning, Tukey, dan Kaiser—masing-masing memiliki karakteristik performa yang berbeda. *Window Hamming* menghasilkan nilai *leakage factor* paling rendah yaitu 0.04%, serta memiliki *relative side lobe* paling kecil yaitu -41.7 dB, menjadikannya efektif dalam mereduksi gangguan dari frekuensi di luar jalur utama. Namun, Kaiser *window* unggul dalam hal *transition band* karena menunjukkan penyempitan paling tajam antara *passband* dan

stopband, serta menawarkan fleksibilitas melalui parameter α yang dapat disesuaikan untuk mengontrol redaman di stopband [12].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan untuk komunikasi Li-Fi dalam ruangan untuk *filter FIR window* kaiser menunjukkan performa yang lebih baik daripada *window hamming*. Keunggulan ini ditunjukkan dari hasil simulasi bahwa penggunaan *window kaiser* menghasilkan nilai BER yang lebih rendah dan SNR yang lebih tinggi dibandingkan *window hamming*. Ini menunjukkan sistem Li-Fi dengan menggunakan *window kaiser* lebih tahan terhadap gangguan dan *noise*. Bentuk *eye diagram* yang dihasilkan *window kaiser* didapat bukaan mata yang lebih bersih tanpa banyak penyimpangan *trace* (jejak sinyal) menandakan kualitas sinyal yang lebih baik, jitter rendah, serta kesalahan transmisi yang minimal dibandingkan *window hamming*. Untuk penelitian selanjutnya dapat mengevaluasi performa *filter* ini pada berbagai skenario modulasi yang lebih kompleks seperti OFDM dan QAM untuk meningkatkan kapasitas sistem Li-Fi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Razzaq, N. Mubeen, and F. Qamar, “Design and Analysis of Light Fidelity Network for Indoor Wireless Connectivity,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 145699–145709, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3119361.
- [2] A. F. Yilmaz and I. Myderrizi, “Increasing indoor Li-Fi system efficiency using light reflective materials and lenses,” *J. Eng. Res.*, no. October, pp. 0–5, 2024, doi: 10.1016/j.jer.2024.10.014.
- [3] M. A. Arfaoui *et al.*, “Measurements-Based Channel Models for Indoor LiFi Systems,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 20, no. 2, pp. 827–842, 2021, doi: 10.1109/TWC.2020.3028456.
- [4] A. Sharma, S. Kaur, and H. Rana, “Investigation of Li-Fi system performance under the influence of ambient noise and external white light,” *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, vol. 23, no. 11–12, pp. 543–553, 2021, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/358947578>
- [5] R. Alindra, P. S. Priambodo, and K. Ramli, “Review of Orthogonal Frequency Division Multiplexing-Based Modulation Techniques for Light Fidelity,” *J. Low Power Electron. Appl.*, vol. 13, no. 3 p.46, Jul. 2023. doi: 10.3390/jlpea13030046.
- [6] A. M. Damerdash, D. Abdelhameed, M. Aly, E. M. Ahmed, and M. A. Ahmed, “Energy efficiency assessment of power electronic drivers and LED lamps in Li-Fi communication systems,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 7648–7662, 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.10.112.
- [7] A. F. Athab, “Implementation of Li-Fi Technology in Smart Home Systems : Development and Analysis of a Prototype for Enhanced Wireless Communication,” *Journal of Al-Qadisiyah for Computer Science and Mathematics*, vol. 16, no. 4, pp. Comp 13-20, Dec, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.29304/jqcsm.2024.16.41771>
- [8] B. Aydin and Ç. Duman, “Examination of OOK modulation schemes in Li-Fi systems,” *Optik (Stuttgart)*, vol. 270, no. July, pp. 0–2, 2022, doi: 10.1016/j.ijleo.2022.169996.
- [9] Y. Y. Won, S. M. Yoon, and D. Seo, “Ambient led light noise reduction using adaptive differential equalization in Li-Fi wireless link,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 21, no. 4, pp. 1–17, 2021, doi: 10.3390/s21041060.
- [10] H. A. Fadhil, F. H. Alattar, and T. A. Fadil, “Feasibility study of using various optical filters in conjunction with indoor visible light communication system,” *Opt. Appl.*, vol. 53, no. 4, pp. 511–522, 2023, doi: 10.37190/oa230401.
- [11] X. Li, Z. Ghassemlooy, S. Zvánovec, and P. A. Haigh, “A 40 mb/s vlc system reusing an existing large led panel in an indoor office environment,” *Sensors*, vol. 21, no. 5, pp. 1–16, 2021, doi: 10.3390/s21051697.
- [12] I. A. Sulaiman, H. M. Hassan, M. Danish, M. Singh, P. K. Singh, and M. Rajoriya, “Design, comparison and analysis of low pass FIR filter using window techniques method,” *Mater. Today Proc.*, vol. 49, pp. 3117–3121, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.952.
- [13] M. A. Mahmoud, K. Rahouma, and K. Sayd, “Design and Implementation of Light Fidelity Communication Systems,” *J. Adv. Eng. Trends*, vol. 42, no. 1, pp. 173–180, 2022, doi: 10.21608/jaet.2021.79269.1113.
- [14] G. K. Agordzo, H. Ammah, and S. Adjei, “A Design of a low-pass FIR filter using Hamming Window Functions in Matlab,” *Comput. Eng. Intell. Syst.*, vol. 11, no. 2 June, 2020, doi: 10.7176/ceis/11-2-04.

-
- [15] K. Avci, “Fractional Kaiser Window with Application to Finite Impulse Response Digital Filter Design,” *IEEE Access*, vol. 12, no. October, pp. 155549–155563, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3484930.
 - [16] H. M. Radzi *et al.*, “Reduction of Bit Error Rate using Guard Interval Measurements for 5G Network,” *J. Adv. Res. Des.*, vol. 126, no. 1, pp. 42–52, 2025, doi: 10.37934/ard.126.1.4252.
 - [17] M. Ali and A. Ali, “Characteristics of Optical Channel for Underwater Optical Wireless Communication System,” *IOSR J. Electr. Electron. Eng. Ver. I*, vol. 10, no. 2, pp. 2278–1676, 2016, [Online]. Available: www.iosrjournals.org
 - [18] F. Aftab, M. N. U. Khan, and S. Ali, “Light fidelity (Li-Fi) based indoor communication system,” *Int. J. Comput. Networks Commun.*, vol. 8, no. 3, pp. 21–31, 2016, doi: 10.5121/ijcnc.2016.8302.