

IMPLEMENTASI *PROTOTYPE WIRELESS BACKHAUL* MENGGUNAKAN *FREE SPACE OPTIC*

1st Akhmal Febrian Vito Deannova
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
vitodeannova20@gmail.com

2nd Kevin Balyan Sionader
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
kbalyan07@gmail.com

3rd Tarisa Rizka Ghaisanni Rioeh
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
line 5: alamat email atau ORCID

Perkembangan teknologi komunikasi nirkabel mendorong lahirnya solusi alternatif yang efisien, salah satunya adalah *Free Space Optic* (FSO), yaitu sistem komunikasi optik yang memanfaatkan cahaya sebagai media transmisi tanpa kabel. Teknologi ini menawarkan fleksibilitas instalasi, biaya rendah, serta kebal terhadap interferensi elektromagnetik. Namun, kinerjanya sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti intensitas cahaya dan cuaca. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem FSO sederhana menggunakan laser *continuous wave* dan sensor *Light Dependent Resistor* (LDR) berbasis mikrokontroler, dengan skema komunikasi point-to-point dan modulasi biner sederhana. Pengujian dilakukan pada berbagai kondisi waktu dan cuaca untuk mengevaluasi performa sistem. Hasil menunjukkan performa optimal terjadi pada malam hari dengan kecepatan transfer rata-rata 83,85 bps dan tingkat keberhasilan data 91,55%, sedangkan pada siang hari dan cuaca panas performa menurun menjadi 54,54 bps dan 81,25%. Jarak efektif maksimum tercapai pada 13 meter dalam kondisi minim cahaya. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem FSO yang dikembangkan memiliki potensi sebagai solusi komunikasi alternatif jarak pendek dalam lingkungan dengan intensitas cahaya terkendali.

Kata kunci: FSO, Komunikasi optik, LDR, Mikrokontroler, Transmisi data

I. PENDAHULUAN

Komunikasi berbasis jaringan kabel (*wired*) telah lama menjadi pilihan utama dalam menghubungkan berbagai perangkat, terutama di lingkungan urban dan antarbangunan. Sistem ini menawarkan kecepatan dan stabilitas tinggi, namun menghadapi tantangan besar dalam hal biaya pemasangan, pemeliharaan, dan keterbatasan ruang, khususnya di wilayah padat penduduk. Kompleksitas infrastruktur dan penataan utilitas di kota-kota besar menyulitkan penambahan jaringan kabel baru tanpa mengganggu fasilitas yang telah ada. Selain itu, jaringan kabel sangat rentan terhadap gangguan fisik akibat konstruksi, cuaca ekstrem, atau vandalisme, yang dapat menyebabkan terputusnya layanan komunikasi, seperti yang

pernah terjadi di Gunungkidul akibat kabel optik yang rusak tertimpa pohon tumbang.

Seiring dengan keterbatasan tersebut, berbagai alternatif nirkabel mulai dikembangkan. Salah satu solusi yang menjanjikan adalah teknologi *Free Space Optic* (FSO), yaitu sistem komunikasi optik yang menggunakan cahaya laser untuk mentransmisikan data tanpa kabel melalui udara. Teknologi ini unggul karena bebas dari interferensi elektromagnetik, memiliki kecepatan transmisi tinggi, dan tidak memerlukan infrastruktur fisik yang kompleks. Berbagai sistem lain seperti *microwave backhaul* dan *satellite backhaul* juga digunakan, namun masing-masing memiliki keterbatasan seperti biaya tinggi, latensi besar, dan ketergantungan pada kondisi geografis.

Permasalahan utama yang diangkat dalam penelitian ini adalah kebutuhan akan solusi komunikasi alternatif yang efisien, andal, dan hemat biaya, khususnya sebagai cadangan atau pengganti jaringan kabel yang rentan terhadap kerusakan. Oleh karena itu, diperlukan sistem komunikasi nirkabel jarak pendek yang dapat diterapkan di lingkungan terbatas seperti kampus atau antarbangunan, dengan performa yang tetap stabil dalam berbagai kondisi.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem komunikasi optik nirkabel berbasis FSO dengan menggunakan laser *continuous wave* dan sensor LDR yang dikendalikan oleh mikrokontroler. Sistem dikembangkan dalam bentuk prototipe skala kecil untuk mensimulasikan komunikasi *point-to-point* antar modul *transmitter* dan *receiver*, serta mengevaluasi performanya berdasarkan jarak dan pengaruh lingkungan seperti cahaya dan cuaca. Hasil dari penelitian ini diharapkan menjadi dasar pengembangan lebih lanjut menuju solusi komunikasi optik yang dapat diterapkan secara nyata pada skala antarbangunan.

II. KAJIAN TEORI

Untuk mendukung pemahaman dan pengembangan sistem komunikasi berbasis *Free Space Optic* (FSO) dalam tugas akhir ini, dibutuhkan landasan teoritis yang kuat mengenai teknologi, metode, dan komponen yang digunakan. Kajian ini mencakup teori dasar FSO, karakteristik teknis, metode transmisi, serta penelitian-penelitian sebelumnya yang relevan..

A. Prinsip Dasar Komunikasi FSO

Komunikasi FSO bekerja dengan mentransmisikan sinyal cahaya melalui udara terbuka dari pemancar ke penerima secara langsung (*line of sight*). Cahaya yang digunakan biasanya berasal dari laser diode dan dimodulasi untuk membawa data digital. Teknologi ini memungkinkan transmisi data berkecepatan tinggi dengan latensi rendah, tanpa memerlukan kabel fisik.

B. Komponen Sistem FSO

Sistem FSO terdiri dari dua komponen utama, yaitu *transmitter* dan *receiver*. *Transmitter* menggunakan laser *diode* untuk menghasilkan sinyal optik, sementara *receiver* menggunakan sensor seperti *Light Dependent Resistor* (LDR) untuk mendeteksi intensitas cahaya dan mengubahnya menjadi sinyal listrik. Mikrokontroler seperti Arduino dan ESP32 digunakan untuk memproses sinyal, mengatur komunikasi serial, dan menganalisis performa sistem.

C. Metode Modulasi

Salah satu metode modulasi yang umum digunakan dalam sistem FSO adalah ***On-Off Keying* (OOK)**, yaitu bentuk modulasi biner di mana cahaya menyala mewakili logika '1', dan cahaya padam mewakili '0'. Metode ini sederhana dan cocok untuk sistem berbasis mikrokontroler. Alternatif lain seperti ***Pulse Position Modulation* (PPM)** dan ***Differential Phase Shift Keying* (DPSK)** menawarkan performa lebih baik dalam kondisi lingkungan yang berisik, meskipun implementasinya lebih kompleks.

D. Karakteristik Propagasi Sinyal

Sinyal optik FSO sangat bergantung pada kondisi atmosfer. Fenomena seperti redaman (*attenuation*), dispersi, turbulensi, dan divergensi sinar dapat mengganggu kestabilan transmisi. Tidak seperti gelombang radio, sinyal cahaya tidak dapat menembus rintangan fisik, sehingga *line of sight* mutlak diperlukan.

E. Keunggulan dan Keterbatasan FSO

Keunggulan FSO antara lain adalah bandwidth tinggi, tidak memerlukan lisensi frekuensi, tidak terpengaruh interferensi elektromagnetik, instalasi cepat, dan tingkat keamanan tinggi. Namun, **keterbatasannya** meliputi ketergantungan pada LOS, sensitivitas terhadap cuaca, dan kesulitan menjaga kestabilan posisi antar perangkat.

F. Teknik Peningkatan Kinerja

Untuk meningkatkan keandalan sistem FSO, beberapa teknik yang bisa digunakan antara lain: penggunaan lensa fokus, filter optik,

auto-alignment system, redundansi kanal, dan sistem pelindung cuaca. Protokol pengulangan data (*acknowledgment*) juga penting untuk memastikan integritas data.

G. Standar dan Aplikasi

Walaupun belum memiliki standar universal, FSO telah digunakan dalam berbagai aplikasi seperti komunikasi antar gedung, sistem darurat, dan komunikasi taktis militer. Standar referensi seperti **ITU-T G.652** dan **IEEE 802.15.7** sering dijadikan acuan, meski bukan khusus untuk FSO.

H. Penelitian Terkait

Beberapa studi terdahulu telah mengeksplorasi penggunaan FSO berbasis laser *diode* dan sensor LDR dengan mikrokontroler Arduino atau ESP32. Penelitian ini umumnya fokus pada perancangan sistem prototipe sederhana, pengujian dalam kondisi nyata, dan penerapan pada skenario darurat atau lingkungan yang sulit dijangkau oleh kabel.

III. METODE

A. Spesifikasi Perangkat

Tabel 1 menunjukkan spesifikasi perangkat utama yang digunakan. Sistem menggunakan laser dengan panjang gelombang 650 nm, daya pancar sebesar 100 mW (setara 20 dBm), dan daya terima berkisar -18,73 hingga 24,79 dBm, bergantung pada kondisi cuaca dan jarak.

No	Spesifikasi	Rincian
1.	Panjang Gelombang dengan nilai sebesar 650 nm	Penggunaan panjang gelombang dengan nilai sebesar 650 nm. Penggunaan panjang gelombang sangat bergantung pada kebutuhan penggunaan.
2.	Daya Pancar pada <i>Transmitter</i> sebesar 20 dBm	Penggunaan nilai daya pancar pada transmitter bergantung pada kondisi cuaca. Pada kondisi cuaca cerah menggunakan nilai -14.20 dBm sedangkan pada kondisi cuaca hujan menggunakan nilai 18.76 dBm.
3.	Laser	CW laser merupakan jenis laser yang menghasilkan cahaya secara terus menerus dan stabil. penggunaan daya pada CW Laser menjadi salah satu faktor yang dapat mempengaruhi performa sistem FSO.
4.	Daya Terima <i>Receiver</i> sebesar -18.729 dBm hingga 24.796 dBm	Daya yang dapat diterima oleh receiver sangat bergantung pada berbagai faktor seperti jarak transmisi, kondisi cuaca, dan jenis modulasi. Namun receiver FSO dapat menerima daya sekitar -18.729 hingga 24.796 dBm.

Tabel 1. Spesifikasi Sistem Komunikasi FSO

Laser CW dipilih karena stabil dan ideal untuk transmisi digital terus-menerus. Daya transmisi disesuaikan dengan kondisi cuaca untuk memastikan keterbacaan sinyal oleh penerima.

B. Prosedur Penelitian

Penelitian dilakukan dalam langkah-langkah berikut:

1. **Input Data**
Data teks dimasukkan oleh pengguna melalui antarmuka aplikasi lalu disimpan ke database cloud Supabase.
2. **Pengambilan dan Transmisi**
ESP32 mengambil data melalui jaringan Wi-Fi dan

mengirimkan data tersebut ke Arduino UNO menggunakan komunikasi serial UART.

3. Konversi dan Modulasi
Arduino UNO mengubah karakter menjadi kode ASCII, lalu menjadi biner 8-bit. Data biner tersebut dimodulasi ke dalam sinyal cahaya menggunakan metode On-Off Keying (OOK).
4. Transmisi Sinyal Optik
Sinyal optik dikirim melalui jalur LOS dari laser ke penerima di gedung lain.

5. Penerimaan dan Dekode
Arduino Nano membaca perubahan resistansi pada LDR, mengubah tegangan ke logika digital, lalu merekonstruksi biner ke karakter teks.

6. Output
Teks ditampilkan di monitor serial. Sistem diuji dalam berbagai kondisi pencahayaan dan cuaca.

C. Lokasi dan Jarak LOS

Jarak horizontal antar gedung diukur menggunakan **Google Maps** dan tinggi bangunan ditentukan dengan pengukuran langsung. Hasil pengukuran menunjukkan:

- Jarak horizontal antar gedung = 200 meter
- Tinggi Gedung TULT lantai 2 = 8 meter
- Tinggi Asrama Putra = 4 meter

Jarak lintasan LOS dihitung menggunakan persamaan Pythagoras:

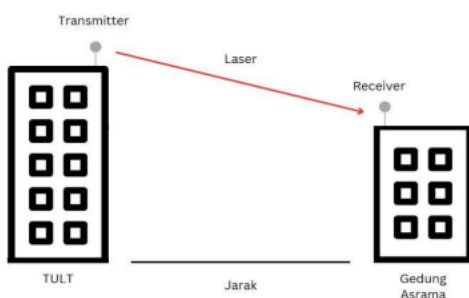
$$A = \sqrt{\text{Jarak Antar Gedung}^2 + (\text{Gedung A} - \text{Gedung B})^2}$$

$$= \sqrt{200^2 + (8 - 4)^2}$$

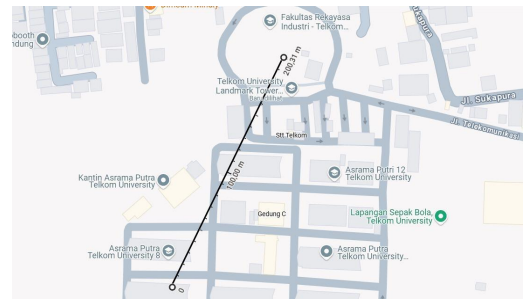
$$= \sqrt{40000 + 16}$$

$$= \sqrt{40016} \approx 200,04 \text{ meter}$$

Gambar 1 menunjukkan ilustrasi visual posisi antar gedung dan lintasan komunikasi yang digunakan:



Gambar 1. Jarak LOS antara Gedung TULT dan Gedung Asrama Putra (diukur via Google Maps)



Gambar 2. Foto lokasi fisik Gedung TULT dan Asrama (dari sudut pengujian)

- D. Pengukuran dan Persamaan
 - Daya Transmisi

Daya laser sebesar 100 mW dikonversi ke dBm menggunakan:

$$A =$$

, sehingga 100 mW menghasilkan nilai 20 dB.

B. Daya Terima Receiver

Perhitungan rugi-rugi propagasi berdasarkan model redaman jalur bebas (Free Space Path Loss):

$$L_{\text{FSO}} = 10 \log_{10} \left(\frac{A_b}{A_r} \right) + \gamma d - 10 \log_{10} (\eta_t \cdot \eta_r)$$

dan daya terima dihitung dengan:

$$P_r = P_t \cdot \eta_t \cdot \eta_r \cdot e^{-\gamma d} \cdot \left(\frac{A_r}{A_b} \right)$$

Dengan:

- $A_b A_b$ = luas pancaran sinar
- $A_r A_r$ = luas aperture penerima
- γ = redaman atmosfer
- d = jarak antar gedung
- η_t, η_r = efisiensi optik transmitter dan receiver

Sistem diuji pada pagi, siang, dan malam hari, serta pada cuaca cerah dan hujan. Validasi dilakukan dengan mengukur:

- Bit Error Rate (BER)
- Tingkat Keberhasilan Data
- Kecepatan Transfer Data (bps)
- Daya Terima (dBm)

Penyesuaian posisi transmitter dan receiver dilakukan secara presisi menggunakan alat bantu optik. Pemantauan kestabilan sinyal serta LOS dilakukan secara berkala untuk memastikan kualitas komunikasi tetap terjaga.

A. Singkatan dan Akronim

Definisikan singkatan dan akronim saat pertama kali digunakan dalam teks, bahkan setelah didefinisikan dalam abstrak. Jangan menggunakan singkatan dalam judul kecuali jika tidak dapat dihindari.

B. Persamaan

Penomoran untuk persamaan disusun berurutan. Nomor persamaan di dalam tanda kurung, harus memposisikan rata ke kanan dengan menggunakan penghentian tab kanan.

$$N = \frac{Loss_{actual} - Loss_{acceptable}}{G_{EDFA}} \quad (1)$$

Perhatikan bahwa persamaan dipusatkan menggunakan perhentian tab tengah. Pastikan bahwa simbol dalam persamaan Anda telah ditentukan sebelum atau segera setelah persamaan. Gunakan “(1)”, bukan “Persamaan. (1)” atau “persamaan (1)”, kecuali di awal kalimat: “Persamaan (1) adalah . . .”

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

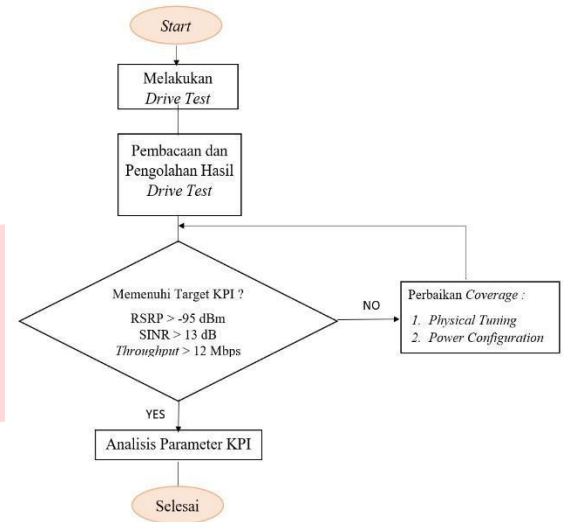
Bagian ini berisi paparan objektif peneliti terhadap hasil-hasil penelitian berupa penjelasan dan analisis terhadap penemuan-penemuan penelitian, penjelasan serta penafsiran dari data dan hubungan yang diperoleh, serta pembuatan generalisasi dari penemuan. Apabila terdapat hipotesis, maka pada bagian ini juga menjelaskan proses pengujian hipotesis beserta hasilnya.

Hasil penelitian harus disajikan secara jelas dan sistematis supaya mudah dibaca dan dipahami. Penyajian hasil penelitian dapat dilakukan dengan cara deskriptif (naratif), menggunakan tabulasi, tabel atau grafik, atau dengan menggunakan gabungan dua atau ketiganya secara sekaligus. Penggunaan ketiga cara tersebut disesuaikan dengan jenis data dan sejauh mana deskripsi data akan dijelaskan. Misalnya, pada awal peneliti memaparkan narasi temuannya, kemudian didukung dengan sajian data dalam bentuk tabulasi, tabel atau grafik. Peneliti juga menyajikan

data-data hasil penelitian, kemudian didukung grafik dilanjutkan deskripsi naratif [10 pts]. Berikan kemungkinan pengembangan atau penelitian ke depan terkait penelitian ini

A. Gambar

Gambar dinomori secara berurutan. Letak penulisannya di bawah gambar disertai dengan penjelasan. Contoh: Gambar 1(A)



GAMBAR 1
(A)

B. Tabel

Tabel dinomori secara berurutan. Letak penulisannya di atas tabel yang dijelaskan. Contoh: Tabel 1(a)

TABEL 1
(A)

Kepala a Tabel	Kepala Kolom Tabel		
	Subjudul kolom tabel	Anak judul	Anak judul
copy	More table copy ^a		

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian, sistem *Free Space Optic* (FSO) yang dikembangkan telah berhasil memenuhi sebagian besar tujuan, khususnya dalam komunikasi *point-to-point* dengan jalur *Line of Sight* (LOS) yang jelas. Pengujian menunjukkan tingkat keberhasilan transmisi data rata-rata di atas 80%, dengan performa tertinggi sebesar 91,55% pada pengujian malam hari. Integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak, termasuk pengiriman data melalui *Supabase*, berjalan baik tanpa kendala. Evaluasi pengguna terhadap perangkat lunak juga menunjukkan hasil positif dengan mayoritas responden menilai sistem dalam kategori “baik” dan “sangat baik”.

Namun, daya pancar *transmitter* yang hanya mencapai 6,99 dBm belum memenuhi target spesifikasi sebesar 20 dBm, yang menyebabkan keterbatasan jarak efektif transmisi, sehingga masih perlu pengembangan lebih lanjut. Meskipun demikian, sistem ini telah menunjukkan potensi untuk dikembangkan lebih lanjut menuju aplikasi nyata komunikasi FSO antar gedung.

REFERENSI

Direkomendasikan menggunakan *reference management tools (mendeley)*, format style menggunakan IEEE. Contoh penulisan referensi IEEE Style:

Print References

●Book

- Book Author(s). Book title. Location: Publishing company, year, pp.

Example:

[1] W.K. Chen. *Linear Networks and Systems*. Belmont, CA: Wadsworth, 1993, pp. 123-35.

●Book Chapters

- Author(s). "Chapter title" in Book title, edition, volume. Editors name, Ed. Publishing location: Publishing company, year, pp.

Example:

[1] J.E. Bourne. "Synthetic structure of industrial plastics," in *Plastics*, 2nd ed., vol. 3. J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp.15-67.

●Article in a Journal

- Author(s). "Article title". Journal title, vol., pp, date.

Example:

[1] G. Pever. "Infrared Nation." *The International Journal of Infrared Design*, vol. 33, pp. 56-99, Jan. 1979.

Electronic References

●Books

- Author. (year, Month day). Book title. (edition). [Type of medium]. Vol. (issue). Available: site/path/file [date accessed].

Example:

[1] S. Calmer. (1999, June 1). *Engineering and Art. (2nd edition)*. [On-line]. 27(3). Available: www.enggart.com/examples/students.html [May 21, 2003].

●Journal

- Author. (year, month). "Article title." Journal title. [Type of medium]. Vol. (issue), pages. Available: site/path/file [date accessed].

Example:

[1] A. Paul. (1987, Oct.). "Electrical properties of flying machines." *Flying Machines*. [Online]. 38(1), pp. 778-998. Available: www.flyingmachjourn/properties/fly.edu [Dec. 1, 2003].

●World Wide Web

Author(s)*. "Title." Internet: complete URL, date updated* [date accessed].

Example:

[1] M. Duncan. "Engineering Concepts on Ice". Internet: www.iceengg.edu/staff.html, Oct. 25, 2000 [Nov. 29, 2003].

[1] Detik. (2024). "Hujan Angin di Gunungkidul, Rumah Rusak, Jaringan Internet Kominfo Putus" Internet: <https://www.detik.com/jogja/berita/d-7233987/hujan-angin-di-gunungkidul-rumah-rusak-jaringan-internet-kominfo-putus>

[an-angin-di-gunungkidul-rumah-rusak-jaringan-internet-kominfo-putus](https://www.detik.com/jogja/berita/d-7233987/hujan-angin-di-gunungkidul-rumah-rusak-jaringan-internet-kominfo-putus), [Oct 01, 2024].

[2] Setyowati, E. (2001). "Teknologi dan Pertumbuhan Ekonomi". *Jurnal Ekonomi Pembangunan: Kajian Masalah Ekonomi dan Pembangunan*, 2(2), 2001.

[3] Technowriters. (2024). "Panduan Utama untuk Memahami Wired dalam Dunia Teknologi Modern." Technowriters.

[4] Idris, A. K., Basit, A., & Manzoor, S, "Optimal Microwave Wireless Backhaul Link Design Using a Massive MIMO for 5G HetNet-Practical Deployment Scenario. *Wireless Personal Communications*." Internet: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11277-021-08742-3>, [Oct. 01, 2024.]

[5] Wikipedia contributors, "Free-space optical communication. In Wikipedia, The Free Encyclopedia." Internet:

https://en.wikipedia.org/wiki/Free-space_optical_communication, [Oct. 01, 2024]

[6] Hughes Network Systems, "Satellite Cellular Backhaul: Reaching Further with a Lower Cost-per-Bit Solution." Internet: <https://www.hughes.com/sites/hughes.com/files/2022-03/Hughes-SatCellBackhaul.pdf>, [Oct. 01, 2024]

[7] A. Raza et al., "Laser Diode Characteristics for FSO", *Journal of photonics*, vol.34, no. 2, [2021].

[8] N. Alam, "Photodetector for Visible Light Communication", *Sensors*, vol. 21, no. 3, pp. 989, [2021].

[9] S. A. Teli, "Modulation Techniques for FSO Systems", *IEEE Photonics Journal*, vol. 14, no. 1, [2022].

[10] M. Dewantara, et al., "Kinerja Komunikasi Optik di Berbagai Cuaca", *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 17, no. 2, [2023].

[11] S. Choudhury, et al., "Experimental FSO System for Campus Link", *IEEE Commun. Lett.*, vol. 25, no. 6, pp. 1234-1238, [2021].

[12] A. Kartika, et al., "Rancang Bangun Sistem FSO Berbasis Arduino", *Seminar Nasional Teknologi Elektro*, [2022].

[13] 4Gon Solutions. (n.d.). "Introduction to free space optics." Internet: https://www.4gon.co.uk/solutions/introduction_to_free_space_optics.php, [Des 19, 2024]

[14] Cadence. (2020). "What is signal-to-noise ratio and how to calculate it."Internet:

<https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-what-is-signal-to-noise-ratio-and-how-to-calculate-it>, [Des 19, 2024]

[15] PPID Universitas Udayana. (n.d.). "Power link budget: Pengertian dan parameter." Internet: https://ppid.unud.ac.id/img/admin/page_attc/425cf7aba23b53f0db805571dc5d9502.pdf, [Des 19, 2024]

[16] Robotics Instiper Jogja. (n.d.). "LiDAR sensor: Photo detector dan receiver dalam LiDAR" Internet:

<https://robotics.instiperijogja.ac.id/post/LiDARsensor>, [Des 19, 2024]

[17] ScienceAlert. (n.d.). "What are lasers and how do they actually work." Internet:

<https://www.sciencealert.com/what-are-lasers-and-how-do-they-actually-work>, [Des 19, 2024]

[18] Telkom University. (n.d.). "Power link budget: Pengertian & parameter." Internet:

<https://dte.telkomuniversity.ac.id/power-link-budget-pengertian-parameter/>, [Des 19, 2024]

[19] Keiser, G. (2010). "Optical Fiber Communications (4th ed.). New York: McGraw-Hill." Internet:

<https://www.mheducation.com/highered/product/optical-fiber-communications-keiser/M9780073380711.html>

[20] Hecht, E. (2017). Optics (5th ed.). Boston: Pearson Education. Internet:

<https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/optics/P200000003689>

[21] Saleh, B. E. A., & Teich, M. C. (2007). Fundamentals of Photonics (2nd ed.). New York: Wiley-Interscience. Internet:

<https://www.wiley.com/en-us/Fundamentals+of+Photonics%2C+2nd+Edition-p-9780471358329>

[22] Agrawal, G. P. (2012). Fiber-Optic Communication Systems (4th ed.). New Jersey: Wiley. Internet:

<https://www.wiley.com/en-us/Fiber+Optic+Communication+Systems%2C+4th+Edition-p-9781118017211>

[23] Malik, A., & Singh, P. (2015). "Free Space Optics: Current Applications and Future

Challenges." International Journal of Optics, 2015, 1–7. Internet:

<https://www.hindawi.com/journals/ijo/2015/945483/>, [Des 19, 2024]

[24] Xu, Z., & Sadler, B. M. (2008). "Ultraviolet Communications: Potential and State-of-the-Art." IEEE Communications Magazine, 46(5), 67–73. Internet:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/4524212>, [Des 19, 2024]

[25] Arnon, S. (2010). "Optimization of Urban Optical Wireless Communication Systems." IEEE Transactions on Wireless Communications, 9(5), 1590–1599. Internet:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/5459200>, [Des 19, 2024]

[26] Z. Hu, W. Lu, dan M. L. Chan, "Free-space optical communication using red laser diode and photodiode," Journal of Optical Communications, vol. 27, no. 4, pp. 246–250, 2006.

[27] I. Ahamed et al., "Free Space Laser Communication Using Modern Laser Diodes," International Journal of Research Publication and Reviews, vol. 4, no. 3, pp. 741–744, 2023.

[28] M. A. Hossain et al., "Portable FSO Node for Emergency Communication in Disaster Zones," in Proceedings of the IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), 2020.

[29] M. Fikri dan S. Rahmawati, "Perancangan Sistem Komunikasi FSO Berbasis ESP32 dan Cloud Database," Jurnal Teknologi Informasi dan Komunikasi, vol. 8, no. 2, pp. 115–122, 2023.