IMPLEMENTASI PROTOTIPE DAN ANALISIS SISTEM KOMUNIKASI BAWAH AIR BERBASIS LASER

A. Khaniah Salzabila Rahmat
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia
kaniiloeyy@student.telkomuniversity.ac.id

Nurmayzarah
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia
nurmayzarah@student.telkomuniversity.ac.id

Rifqi Naufal Prasetiyo
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia
rifqin@student.telkomuniversity.ac.id

Dharu Arseno
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia
darseno@student.telkomuniversity.ac.id

Akhmad Hambali
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia
ahambali@student.telkomuniversity.ac.id

Abstrak* — Komunikasi bawah air merupakan teknologi yang berperan penting dalam berbagai aplikasi kelautan, seperti pemantauan lingkungan, eksplorasi sumber daya laut, sistem keamanan maritim, dan komunikasi kendaraan bawah air. Meskipun komunikasi akustik masih menjadi teknologi yang paling banyak digunakan, metode tersebut memiliki keterbatasan berupa bandwidth yang rendah dan waktu propagasi yang tinggi sehingga kurang optimal untuk transmisi data digital berkecepatan tinggi. Penelitian ini mengimplementasikan prototipe Underwater Wireless Optical Communication (UWOC) berbasis laser hijau 532 nm menggunakan modulasi On-Off Keying (OOK) sebagai alternatif komunikasi bawah air jarak dekat. Sistem terdiri atas transmitter berbasis ESP32 dan laser hijau, media transmisi air, serta receiver yang menggunakan photodioda BPW34 dan rangkaian pengondisi sinyal. Pengujian dilakukan pada kondisi Line of Sight (LOS) menggunakan media air jernih dan air keruh dengan parameter evaluasi berupa throughput, *packet loss*, keberhasilan penerimaan data, serta analisis redaman daya optik berdasarkan Hukum Beer–Lambert. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mentransmisikan data citra secara stabil hingga jarak 125 cm pada media air jernih dan 35 cm pada media air keruh dengan nilai *packet loss* rata-rata sebesar 0%. Selain itu, hasil analisis Beer–Lambert menunjukkan bahwa peningkatan jarak propagasi dan koefisien atenuasi media menyebabkan penurunan daya optik yang diterima oleh receiver. Hasil penelitian membuktikan bahwa UWOC berbasis laser hijau berpotensi menjadi solusi komunikasi bawah air jarak dekat dengan performansi yang baik pada skala laboratorium.

***Kata kunci*— komunikasi bawah air, underwater wireless optical communication, laser hijau, on-off keying, Beer–Lambert.**

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komunikasi bawah air mendorong meningkatnya kebutuhan akan sistem komunikasi yang mampu mendukung berbagai aktivitas di lingkungan perairan, seperti pemantauan kualitas lingkungan, eksplorasi sumber daya laut, pengawasan wilayah maritim, hingga komunikasi pada wahana bawah air. Seiring berkembangnya penggunaan *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) dan *Remotely Operated Vehicle* (ROV), kebutuhan terhadap sistem komunikasi yang mampu mentransmisikan data secara cepat dan andal juga semakin meningkat [1].

Komunikasi akustik masih menjadi metode yang paling banyak digunakan pada sistem komunikasi bawah air karena mampu menjangkau jarak transmisi yang relatif jauh. Namun, karakteristik kanal akustik menyebabkan bandwidth yang tersedia terbatas dan menghasilkan *propagation delay* yang tinggi sehingga kurang sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan pertukaran data digital berkecepatan tinggi, seperti pengiriman citra maupun video [1], [4]. Selain itu, komunikasi berbasis gelombang radio juga kurang efektif diterapkan pada media air akibat redaman yang sangat besar sehingga jangkauan transmisinya menjadi terbatas [1].

Sebagai alternatif, teknologi *Underwater Wireless Optical Communication* (UWOC) memanfaatkan cahaya sebagai media transmisi sehingga mampu menyediakan laju data yang lebih tinggi dibandingkan komunikasi akustik pada komunikasi jarak dekat [1], [4]. Salah satu sumber cahaya yang banyak digunakan adalah laser hijau 532 nm karena memiliki karakteristik propagasi yang lebih baik di dalam air, divergensi berkas yang sempit, serta intensitas optik yang tinggi sehingga mampu meningkatkan kualitas penerimaan sinyal [2]. Meskipun demikian, performansi sistem UWOC masih dipengaruhi oleh fenomena absorpsi dan hamburan (*scattering*) cahaya yang menyebabkan intensitas sinyal optik terus menurun selama proses propagasi di dalam media air [3].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem komunikasi optik bawah air menggunakan berbagai teknik modulasi dan sumber cahaya. Dong *et al.* berhasil mengimplementasikan sistem komunikasi bawah air berbasis laser menggunakan modulasi *Pulse Position Modulation* (PPM) dengan laju transmisi mencapai 15 Mbps [2]. Namun, penelitian tersebut lebih

berfokus pada peningkatan teknik modulasi dan belum mengevaluasi implementasi sistem untuk pengiriman data digital berupa teks maupun citra pada kondisi media air yang berbeda. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa karakteristik media air memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kualitas komunikasi optik akibat meningkatnya atenuasi dan hamburan cahaya [3].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengimplementasikan prototipe sistem komunikasi bawah air berbasis laser hijau 532 nm menggunakan modulasi *On-Off Keying* (OOK). Sistem dirancang menggunakan ESP32 sebagai pengendali transmitter dan receiver dengan photodioda BPW34 sebagai sensor penerima cahaya. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini tidak hanya mengimplementasikan prototipe komunikasi optik bawah air, tetapi juga mengevaluasi performansi sistem pada media air jernih dan air keruh melalui parameter *throughput*, *packet loss*, keberhasilan penerimaan data, serta analisis redaman daya optik berdasarkan Hukum Beer–Lambert. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan sistem komunikasi optik bawah air berbiaya rendah pada skala laboratorium.

II. KAJIAN TEORI

Bagian ini memaparkan landasan teoretis dan prinsip dasar yang mendasari perancangan serta analisis prototipe sistem komunikasi nirkabel bawah air. Pemahaman mengenai karakteristik transmisi optik dalam medium cair serta fenomena fisik yang memengaruhi propagasi gelombang sangat krusial untuk mengevaluasi performansi sistem secara keseluruhan. Teori-teori mendasar tersebut dijabarkan secara terstruktur pada subbab berikut.

A. Underwater Wireless Optical Communication (UWOC)

Underwater Wireless Optical Communication (UWOC) merupakan teknologi komunikasi nirkabel bawah air yang memanfaatkan cahaya sebagai media transmisi informasi. Dibandingkan komunikasi akustik, UWOC menawarkan bandwidth yang lebih besar sehingga mampu mendukung transmisi data berkecepatan tinggi pada komunikasi jarak dekat. Namun, kualitas komunikasi optik bawah air dipengaruhi oleh karakteristik media, seperti absorpsi, hamburan (*scattering*), serta kondisi *Line of Sight* (LOS) antara transmitter dan receiver [1], [4]. Pada penelitian ini, sistem UWOC menggunakan laser hijau dengan panjang gelombang 532 nm sebagai sumber cahaya untuk mentransmisikan data digital melalui media air [2].

B. Modulasi *On-Off Keying* (OOK)

On-Off Keying (OOK) merupakan salah satu teknik modulasi digital yang merepresentasikan data biner melalui kondisi nyala dan mati pada sumber cahaya. Pada metode ini, kondisi laser menyala merepresentasikan logika 1, sedangkan laser padam merepresentasikan logika 0. Metode OOK dipilih karena memiliki implementasi yang sederhana, mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler, serta sesuai untuk pengembangan prototipe komunikasi optik bawah air berbasis laser.

C. Photodioda BPW34 dan ESP32

Pada sisi receiver, photodioda BPW34 berfungsi sebagai sensor yang mengubah energi cahaya menjadi sinyal listrik. Sinyal yang dihasilkan kemudian dikondisikan menggunakan rangkaian komparator sebelum diproses oleh ESP32 sebagai data digital. ESP32 digunakan sebagai pengendali utama pada sisi transmitter maupun receiver karena mampu melakukan komunikasi serial, mengendalikan proses modulasi, serta memproses data hasil penerimaan secara real-time.

D. Throughput, *Packet Loss*, dan Hukum Beer–Lambert

Evaluasi performansi sistem dilakukan menggunakan parameter *throughput* dan *packet loss*. *Throughput* menunjukkan kecepatan efektif sistem dalam mentransmisikan data dari transmitter menuju receiver, sedangkan *packet loss* menyatakan persentase paket data yang gagal diterima selama proses komunikasi. Selain itu, penelitian ini menggunakan Hukum Beer–Lambert untuk menganalisis pengaruh redaman optik terhadap daya cahaya yang diterima receiver. Berdasarkan hukum tersebut, daya optik yang diterima akan menurun secara eksponensial seiring bertambahnya jarak propagasi maupun koefisien atenuasi media air [3].

III. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan merancang dan mengimplementasikan prototipe sistem *Underwater Wireless Optical Communication* (UWOC) berbasis laser hijau 532 nm. Tahapan penelitian meliputi perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, implementasi sistem komunikasi, serta pengujian performansi prototipe berdasarkan parameter yang telah ditentukan.

A. Perancangan Sistem

Sistem komunikasi bawah air yang dikembangkan terdiri atas tiga bagian utama, yaitu transmitter, media transmisi, dan receiver. Pada sisi transmitter, ESP32 digunakan sebagai pengendali utama untuk mengirimkan data digital yang dimodulasikan menggunakan metode On-Off Keying (OOK) menuju laser hijau 532 nm melalui rangkaian driver laser. Cahaya laser yang membawa informasi kemudian merambat melalui media air menuju sisi receiver.

Pada sisi receiver, photodioda BPW34 berfungsi mendeteksi cahaya laser dan mengubahnya menjadi sinyal listrik. Sinyal tersebut selanjutnya diproses oleh rangkaian komparator LM393 sebelum dibaca oleh ESP32 sebagai data digital. Data yang berhasil diterima kemudian dikirimkan ke website receiver sehingga informasi dapat ditampilkan dan dipantau secara real-time.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Komunikasi Bawah Air Berbasis Laser

Gambar 1 menunjukkan diagram blok sistem komunikasi bawah air berbasis laser yang terdiri atas website transmitter, ESP32 transmitter, driver laser, media transmisi air, photodioda BPW34, rangkaian komparator, ESP32 receiver, dan website receiver.

B. Implementasi Sistem

Implementasi prototipe dilakukan dengan mengintegrasikan seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak sesuai rancangan sistem. Perangkat transmitter terdiri atas ESP32, driver laser, dan laser hijau 532 nm, sedangkan perangkat receiver terdiri atas photodioda BPW34, rangkaian komparator LM393, dan ESP32. Selain itu, sistem dilengkapi website transmitter untuk pengiriman data dan website receiver untuk menampilkan data hasil penerimaan.

Data yang dikirimkan pada penelitian ini berupa teks dan citra. Pada proses pengiriman citra, data dikonversi ke dalam format Base64 dan dibagi menjadi beberapa bagian (chunk) sebelum dikirim secara bertahap melalui sistem komunikasi optik.

C. Skenario Pengujian

Pengujian dilakukan menggunakan testbed skala laboratorium pada kondisi Line of Sight (LOS), yaitu transmitter dan receiver ditempatkan saling berhadapan tanpa adanya penghalang. Media transmisi yang digunakan terdiri atas air jernih dan air keruh. Tujuan pengujian adalah mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengirimkan data teks dan citra serta menganalisis pengaruh jarak dan kondisi media terhadap performansi komunikasi.

Pengujian dilakukan dalam dua skenario. Skenario pertama menggunakan media air jernih dengan variasi jarak 45 cm, 75 cm, dan 125 cm. Pada setiap variasi jarak dilakukan pengiriman sebanyak 40 data untuk memperoleh hasil pengukuran yang konsisten. Skenario kedua membandingkan performansi sistem pada media air jernih dan air keruh dengan jarak tetap 35 cm untuk mengetahui pengaruh tingkat kekeruhan terhadap kualitas penerimaan sinyal.

D. Parameter Pengujian

Parameter yang digunakan untuk mengevaluasi performansi sistem meliputi throughput, packet loss, dan daya optik terima berdasarkan Hukum Beer–Lambert. Throughput digunakan untuk mengetahui kecepatan efektif pengiriman data dari transmitter ke receiver, sedangkan packet loss digunakan untuk menghitung persentase paket data yang gagal diterima selama proses komunikasi.

Perhitungan throughput menggunakan Persamaan (1).

$$Througput = \frac{Jumlah\ bit\ data\ diterima}{Waktu\ Penerimaan} \quad (1)$$

dengan Throughput merupakan kecepatan efektif transmisi data dalam satuan bit per second (bps), jumlah bit data diterima adalah total data yang berhasil diterima oleh receiver, dan waktu penerimaan adalah durasi yang dibutuhkan selama proses penerimaan data.

Perhitungan packet loss menggunakan Persamaan (2).

$$Packet\ Loss = (\frac{Jumlah\ paket\ hilang}{Jumlah\ paket\ dikirim}) \times 100\% \quad (2)$$

dengan Jumlah paket hilang menyatakan banyaknya paket yang tidak diterima oleh receiver, sedangkan Jumlah paket dikirim merupakan total paket yang dikirimkan oleh transmitter.

Selain itu, analisis redaman cahaya dilakukan menggunakan Hukum Beer-Lambert [3] yang dinyatakan pada Persamaan (3).

$$Pr = Pt\, e^{-cd} \quad (3)$$

dengan Pr merupakan daya optik yang diterima receiver, Pt merupakan daya optik yang dipancarkan transmitter, c adalah koefisien atenuasi media, dan d adalah jarak propagasi cahaya di dalam air.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil pengujian dan analisis performansi prototipe sistem komunikasi bawah air berbasis laser yang telah direalisasikan. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mentransmisikan data digital berupa teks dan citra melalui media air menggunakan laser hijau 532 nm. Analisis performansi difokuskan pada pengaruh variasi jarak transmisi dan kondisi media air berdasarkan parameter *throughput*, *packet loss*, serta daya optik terima menggunakan pendekatan Hukum Beer–Lambert.

A. Analisis Pengaruh Jarak Transmisi terhadap Performansi Sistem

Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi jarak transmisi terhadap performansi sistem komunikasi bawah air berbasis laser. Pengujian dilaksanakan pada kondisi *Line of Sight* (LOS) dengan variasi jarak 35 cm, 45 cm, 75 cm, dan 125 cm. Pada setiap variasi jarak dilakukan pengiriman data berupa citra untuk memperoleh nilai *throughput* pada sisi transmitter dan receiver. Hasil pengujian digunakan untuk mengevaluasi kestabilan performansi sistem terhadap perubahan jarak transmisi.

Tabel 1. Rata-rata Throughput Payload Data Citra pada Berbagai Variasi Jarak

Jarak	TX Payload Photo Avg (bps)	RX Payload Photo Avg (bps)
35 cm	809,25	810,82
45 cm	807,38	809,87
75 cm	809,51	811,89
125 cm	809,65	811,88

Berdasarkan Tabel 1, nilai rata-rata *throughput* payload data citra pada sisi transmitter dan receiver menunjukkan hasil yang relatif stabil pada seluruh variasi jarak transmisi. Nilai *throughput* transmitter berada pada rentang 807,38–809,65 bps, sedangkan nilai *throughput* receiver berada pada rentang 809,87–811,89 bps. Seluruh nilai *throughput* receiver berada di atas kriteria minimum penerimaan sebesar 700 bps, sehingga menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan kualitas transmisi data pada seluruh jarak pengujian.

Perbedaan nilai *throughput* antara sisi transmitter dan receiver relatif kecil, yang mengindikasikan bahwa proses komunikasi optik berlangsung secara konsisten meskipun jarak transmisi ditingkatkan hingga 125 cm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa intensitas cahaya laser yang diterima

oleh photodioda BPW34 masih berada pada tingkat yang memadai untuk mendukung proses deteksi sinyal dan penerimaan data secara optimal. Keandalan sistem selanjutnya dianalisis melalui parameter *packet loss* untuk memastikan bahwa paket data yang dikirim dapat diterima dengan baik pada setiap variasi jarak transmisi.

Tabel 2. Hasil Rata-rata Packet Loss pada Berbagai Variasi Jarak Transmisi.

Jarak	Packet Loss Avg (%)	Keberhasilan Data
35 cm	0,00	20 dari 20
45 cm	0,00	20 dari 20
75 cm	0,00	20 dari 20
125 cm	0,00	20 dari 20

Berdasarkan Tabel 2, seluruh pengujian pada variasi jarak transmisi menghasilkan nilai rata-rata *packet loss* sebesar 0,00%. Nilai tersebut berada di bawah kriteria maksimum yang ditetapkan, yaitu ≤ 1%, sehingga menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan keandalan transmisi data pada seluruh jarak pengujian.

Selain menghasilkan nilai *packet loss* sebesar 0,00%, seluruh paket data yang dikirim juga berhasil diterima oleh sisi receiver dengan tingkat keberhasilan 20 dari 20 pada setiap variasi jarak. Hasil ini menunjukkan bahwa proses transmisi berlangsung tanpa kehilangan paket data, sehingga sistem memiliki tingkat reliabilitas yang baik pada media air jernih hingga jarak transmisi 125 cm.

B. Analisis Pengaruh Kondisi Media Air terhadap Performansi Sistem

Pengujian pada kondisi media air dilakukan untuk menganalisis pengaruh karakteristik media terhadap performansi sistem komunikasi bawah air berbasis laser. Pengujian dilakukan menggunakan dua kondisi media, yaitu air jernih dan air keruh, dengan jarak transmisi tetap sebesar 35 cm. Pemilihan jarak tersebut didasarkan pada hasil pengujian sebelumnya yang menunjukkan bahwa sistem masih mampu melakukan komunikasi secara stabil pada kedua kondisi media. Analisis dilakukan berdasarkan parameter *throughput* dan *packet loss* untuk mengevaluasi kualitas transmisi data pada masing-masing media.

Tabel 3. Perbandingan Performansi Sistem pada Media Air Jernih dan Air Keruh

Media	Jarak Maksimum	RX Throughput (bps)	Packet Loss (%)	Keterangan
Air Jernih	125 cm	810,82	0,00	Memenuhi Kriteria
Air Keruh	35 cm	811,02	0,00	Memenuhi Kriteria

Berdasarkan Tabel 3, sistem masih mampu melakukan komunikasi optik pada media air jernih maupun air keruh pada jarak 35 cm dengan nilai *throughput* dan *packet loss* yang memenuhi kriteria performansi. Meskipun nilai *throughput* pada kedua kondisi media relatif serupa, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem pada media air keruh tidak lagi mampu mempertahankan komunikasi ketika jarak transmisi ditingkatkan menjadi 45 cm, 75 cm, dan 125 cm. Hal tersebut mengindikasikan bahwa kondisi media tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performansi pada jarak pendek, namun mulai membatasi kemampuan transmisi ketika jarak propagasi bertambah.

Tabel 4. Jarak Maksimum yang Memenuhi Kriteria Performansi

Media	Jarak yang Memenuhi Kriteria	Throughput	Packet Loss
Air jernih	35 cm, 45 cm, 75 cm, 125 cm	>= 700 bps	<= 1%
Air keruh	35 cm	>= 700 bps	<= 1%

Berdasarkan Tabel 4, sistem memenuhi kriteria performansi pada media air jernih hingga jarak maksimum pengujian, yaitu 125 cm, dengan nilai *throughput* ≥700 bps dan *packet loss* ≤1%. Sebaliknya, pada media air keruh sistem hanya memenuhi kriteria pada jarak 35 cm, sedangkan pada jarak yang lebih jauh komunikasi tidak lagi memenuhi kriteria pengujian. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kekeruhan media membatasi jangkauan komunikasi sistem meskipun pada jarak pendek performansi yang dihasilkan masih memenuhi kriteria yang ditetapkan.

Perbedaan batas jangkauan komunikasi pada kedua kondisi media menunjukkan bahwa karakteristik media berpengaruh terhadap propagasi cahaya laser selama proses transmisi. Untuk menjelaskan fenomena tersebut secara teoritis, dilakukan analisis daya optik terima menggunakan pendekatan Hukum Beer–Lambert pada subbab berikutnya.

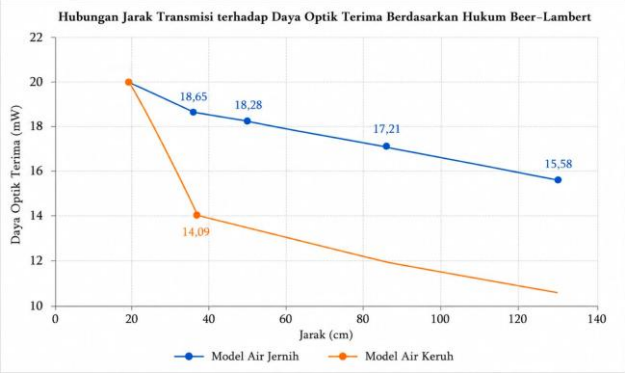
C. Analisis Daya Optik Terima Berdasarkan Hukum Beer–Lambert

Analisis daya optik terima dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh jarak transmisi dan kondisi media terhadap pelemahan daya optik pada sistem komunikasi bawah air berbasis laser. Perhitungan dilakukan menggunakan pendekatan Hukum Beer–Lambert untuk memperkirakan daya optik yang diterima oleh photodioda berdasarkan karakteristik media dan jarak propagasi cahaya. Hasil perhitungan tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian sistem guna mengetahui kesesuaian antara pendekatan teoritis dan performansi prototipe yang telah direalisasikan.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Daya Optik Terima Berdasarkan Hukum Beer–Lambert

Media	Jarak (cm)	Jarak (m)	α (m^{-1})	Pt (mW)	Pr (mW)	Intensitas Tersisa (%)
Air jernih	35	0,35	0,20	20,00	18,65	93,24
Air keruh	35	0,35	1,00	20,00	14,09	70,47
Air jernih	45	0,45	0,20	20,00	18,28	91,39
Air jernih	75	0,75	0,20	20,00	17,21	86,07
Air jernih	125	1,25	0,20	20,00	15,58	77,88

Berdasarkan Tabel 5, hasil perhitungan menggunakan Hukum Beer–Lambert menunjukkan bahwa daya optik yang diterima (*Pr*) menurun seiring bertambahnya jarak propagasi dan meningkatnya koefisien atenuasi media. Pada media air jernih dengan koefisien atenuasi 0,20 m^{-1}, daya optik yang diterima berkurang dari 18,65 mW pada jarak 35 cm menjadi 15,58 mW pada jarak 125 cm, sehingga intensitas cahaya yang tersisa menurun dari 93,24% menjadi 77,88%. Sementara itu, pada media air keruh dengan koefisien atenuasi 1,00 m^{-1} dan jarak 35 cm, daya optik yang diterima hanya sebesar 14,09 mW atau 70,47% dari daya awal. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar nilai koefisien atenuasi maupun jarak transmisi, semakin besar pelemahan daya optik yang diterima, sehingga kemampuan sistem dalam mempertahankan kualitas komunikasi juga menurun.



Gambar 2. Hubungan jarak transmisi terhadap daya optik yang diterima berdasarkan Hukum Beer–Lambert pada media air jernih dan air keruh.

Berdasarkan Gambar 2, terlihat bahwa daya optik yang diterima (*Pr*) mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak transmisi. Pada media air jernih, penurunan daya berlangsung secara bertahap hingga mencapai 15,58 mW pada jarak 125 cm. Sebaliknya, media air keruh menunjukkan laju penurunan yang lebih besar akibat nilai koefisien atenuasi yang lebih tinggi, sehingga pada jarak 35 cm daya optik yang diterima hanya sebesar 14,09 mW. Hasil tersebut menunjukkan bahwa karakteristik media transmisi berpengaruh terhadap pelemahan sinyal optik. Semakin besar koefisien atenuasi media, semakin cepat daya optik yang diterima berkurang, sehingga jangkauan komunikasi sistem menjadi lebih terbatas.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, sistem komunikasi optik menggunakan laser hijau 532 nm dan photodioda mampu melakukan pengiriman data pada media air jernih maupun air keruh. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan nilai throughput yang relatif stabil pada seluruh variasi jarak pengujian, serta menghasilkan nilai *packet loss* sebesar 0% sehingga seluruh data berhasil diterima tanpa kehilangan paket. Analisis menggunakan Hukum Beer–Lambert menunjukkan bahwa daya optik yang diterima menurun seiring bertambahnya jarak transmisi dan meningkatnya koefisien atenuasi media.

Dengan demikian, jarak transmisi dan karakteristik media memberikan pengaruh terhadap pelemahan sinyal optik serta jangkauan komunikasi sistem.

REFERENSI

[1] Z. Li et al., “Recent Progress on Underwater Wireless Communication Technologies,” Journal of Marine Science and Engineering, vol. 13, no. 8, 2025.
[2] B. Dong, Y. Yang, K. Sun, C. Wang, Z. Zeng, and H. Zhang, “Research on Underwater Wireless Dynamic Optical Communication System Based on PPM Modulation,” Frontiers in Physics, vol. 11, Art. no. 1195052, 2023, doi: 10.3389/fphy.2023.1195052.
[3] A. Ugolini, F. Poli, D. Croce, and S. Mangione, “Channel Characterisation for Underwater Optical Wireless Vertical Links,” IET Optoelectronics, vol. 19, no. 1, Art. no. e70007, Jun. 2025, doi: 10.1049/ote2.70007.
[4] C. Fang, S. Li, Y. Wang, and K. Wang, “High-Speed Underwater Optical Wireless Communication with Advanced Signal Processing Methods Survey,” Photonics, vol. 10, no. 7, Art. no. 811, 2023.