

Perancangan Jaringan Hybrid Free-Space Optics dengan Next-Generation Passive Optical Network dari Point of Presence Ciwastra Menuju Kelurahan Batununggal

1st Arya Yudha Tandisau
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

tandisau@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Akhmad Hambali
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

ahambali@telkomuniversity.ac.id

3rd Rina Pudji Astuti
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

rinapudjiastuti@telkomuniversity.ac.id

Pertumbuhan kebutuhan akses internet berkecepatan tinggi di kawasan urban seperti Kelurahan Batununggal, Bandung, menghadapi hambatan infrastruktur akibat regulasi yang melarang penggunaan kabel udara. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mensimulasikan jaringan akses hybrid dengan mengintegrasikan teknologi Free-Space Optics (FSO) sebagai jalur feeder dan Next-Generation Passive Optical Network (NG-PON) sebagai jalur distribusi. Metode yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif-deskriptif dengan tahapan meliputi pemetaan jalur jaringan, perhitungan manual parameter optik, dan simulasi performansi sistem dalam berbagai kondisi lingkungan. Parameter evaluasi yang digunakan mencakup Link Power Budget (LPB), Signal to Noise Ratio (SNR), Q-Factor, dan Bit Error Rate (BER). Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem masih bekerja dalam ambang batas standar teknis, dengan nilai LPB berkisar -25 dBm hingga -25,95 dBm, SNR di atas 60 dB, Q-Factor maksimum 17,00, dan BER sebesar $2,85288 \times 10^{-7}$ hingga $4,2855 \times 10^{-65}$. Berdasarkan hasil tersebut, sistem hybrid FSO-NG-PON dinyatakan layak dan efisien untuk diterapkan pada kawasan padat penduduk yang terkendala regulasi jaringan bawah tanah.

Kata kunci: free-space optics, NG-PON, jaringan hybrid, simulasi optik, LPB, BER.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan kebutuhan layanan internet berkecepatan tinggi di kawasan perkotaan seperti Batununggal, Bandung, mengalami peningkatan yang signifikan, terutama seiring dengan pertumbuhan jumlah pengguna layanan digital. Namun, perluasan jaringan optik di wilayah tersebut mengalami hambatan karena adanya regulasi lokal, yaitu Peraturan Wali Kota Bandung No. 589 Tahun 2013 yang membatasi penggunaan kabel udara dan mewajibkan penanaman kabel optik di bawah tanah [1]. Kondisi ini memunculkan tantangan besar bagi penyedia layanan, karena penanaman kabel di wilayah padat penduduk membutuhkan biaya besar, waktu yang lama, serta berisiko mengganggu tata ruang kota.

Di tengah tantangan tersebut, pendekatan jaringan hybrid berbasis *Free-Space Optics* (FSO) dan *Next-Generation Passive Optical Network* (NG-PON) muncul sebagai solusi alternatif. FSO menawarkan konektivitas nirkabel melalui media udara bebas dengan performa optik tinggi, sementara NG-PON memungkinkan efisiensi distribusi jaringan dengan kapasitas *bandwidth* yang lebih besar dibandingkan teknologi G-PON konvensional. Kombinasi kedua teknologi ini memberikan pendekatan yang fleksibel dan efisien, terutama dalam menjawab tantangan penggelaran jalur *feeder* dan distribusi jaringan di wilayah yang terbatas lahannya.

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji pemanfaatan FSO dalam jaringan akses, terutama sebagai alternatif pengganti *fiber optic* pada jalur yang sulit dijangkau. Teknologi FSO dinilai mampu menghadirkan kecepatan tinggi tanpa harus melakukan penggalian infrastruktur, tetapi memiliki tantangan utama berupa sensitivitas terhadap kondisi atmosfer seperti hujan, kabut, dan polusi udara. Kondisi ini dapat menyebabkan redaman optik akibat hamburan dan penyerapan cahaya selama proses propagasi di atmosfer terbuka [2]. Oleh karena itu, integrasi FSO dalam sistem jaringan membutuhkan desain yang adaptif dan didukung dengan perhitungan teknis yang komprehensif, seperti analisis *Link Power Budget* (LPB) [3], *Signal to Noise Ratio* (SNR) [4], *Bit Error Rate* (BER) [5], serta *Q-Factor* [6]. Sementara itu, NG-PON sebagai kelanjutan dari G-PON menghadirkan kemampuan distribusi yang lebih besar dan efisien, dengan *split ratio* dan kapasitas *downstream* dan *upstream* yang lebih tinggi sesuai standar ITU-T G.989 [7].

Permasalahan utama dalam studi ini adalah bagaimana merancang jaringan akses yang mampu memenuhi tuntutan kapasitas *bandwidth* di kelurahan Batununggal, dengan mempertimbangkan keterbatasan infrastruktur fisik dan peraturan tata ruang kota. Selain itu, sistem yang dirancang harus mampu mempertahankan performa transmisi optik secara stabil meskipun dihadapkan pada gangguan lingkungan yang berubah-ubah. Penelitian ini juga menjawab

tantangan teknis dalam perencanaan topologi jaringan, kalkulasi redaman, dan pemodelan sistem FSO secara tepat.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mensimulasikan sistem jaringan akses *hybrid* yang menggabungkan FSO sebagai jalur *feeder* dan NG-PON sebagai jalur distribusi, dari *Point of Presence* (PoP) Ciwastra menuju Kelurahan Batununggal. Fokus utama terletak pada pembuatan desain jalur transmisi, perhitungan parameter optik kritical menggunakan pendekatan matematis dan perangkat lunak simulasi, serta pemetaan visual topologi jaringan. Dengan pendekatan ini, diharapkan solusi yang diusulkan dapat menjadi rujukan dalam implementasi jaringan akses *hybrid* di kawasan *urban* yang menghadapi tantangan geografis, teknis, dan regulatif.

II. KAJIAN TEORI

A. Jaringan Hybrid FSO dan NG-PON

Jaringan *hybrid* merupakan integrasi dari dua atau lebih teknologi jaringan yang saling melengkapi untuk meningkatkan efisiensi, fleksibilitas, dan performansi jaringan secara keseluruhan. Dalam konteks penelitian ini, jaringan *hybrid* menggabungkan *Free-Space Optics* (FSO) sebagai jalur *feeder* dan *Next-Generation Passive Optical Network* (NG-PON) sebagai jalur distribusi menuju pelanggan. Pemilihan FSO didasarkan pada kemampuannya menyediakan konektivitas nirkabel optik dengan kecepatan tinggi tanpa memerlukan penggalian fisik, sehingga sesuai untuk daerah dengan keterbatasan lahan atau regulasi infrastruktur seperti kawasan Batununggal [1], [2].

NG-PON merupakan evolusi dari teknologi G-PON yang menawarkan peningkatan kapasitas *bandwidth*, fleksibilitas arsitektur, dan efisiensi energi. Berdasarkan standar ITU-T G.989, NG-PON2 mampu mendukung kecepatan *downstream* minimal 40 Gbps dan *upstream* hingga 10 Gbps [7]. Integrasi NG-PON dalam jaringan distribusi memungkinkan jumlah *homepass* yang lebih besar serta peningkatan *split ratio* tanpa penurunan kualitas layanan yang signifikan.

B. Free-Space Optics (FSO)

FSO adalah teknologi komunikasi optik nirkabel yang menggunakan berkas cahaya (biasanya dari LASER) untuk mentransmisikan data melalui udara bebas. Keunggulan utama FSO adalah kecepatan tinggi, keamanan data, dan instalasi yang fleksibel tanpa memerlukan media fisik seperti kabel [2]. Namun, performa FSO sangat dipengaruhi oleh kondisi atmosfer, seperti hujan, kabut, debu, dan turbulensi udara, yang dapat menimbulkan redaman sinyal melalui mekanisme hamburan dan absorpsi cahaya.

C. Parameter Evaluasi Kinerja Jaringan

Untuk mengevaluasi kualitas transmisi data pada jaringan *hybrid* FSO dengan NG-PON, digunakan beberapa parameter performansi utama yang telah distandardisasi dalam sistem komunikasi optik, antara lain:

a) Link Power Budget (LPB)

Link Power Budget merupakan selisih antara daya pancar dari pemancar (*transmitter*) dan total redaman sepanjang jalur transmisi. Nilai LPB menunjukkan

apakah sinyal masih dapat diterima dengan baik oleh *receiver*. Berdasarkan standar ITU-T G.984, ambang batas minimum daya terima adalah -28 dBm [3]. Rumus LPB dapat dituliskan sebagai:

$$P_{Rx} = P_{Tx} - \text{Total loss} \quad (1)$$

Keterangan :

- P_{Rx} : Daya yang diterima oleh *receiver*.
- P_{Tx} : Daya yang dipancarkan oleh *transmitter*.
- *Total loss*: Total kehilangan daya dalam sistem.

b) Signal to Noise Ratio (SNR)

SNR adalah rasio antara daya sinyal terhadap daya gangguan (*noise*) pada sistem komunikasi. Nilai SNR yang tinggi menunjukkan kualitas transmisi yang baik. Berdasarkan standar Telkom Indonesia, nilai minimum SNR adalah 21,5 dB [4]. SNR dapat dihitung menggunakan rumus [8]:

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{Signal}}}{P_{\text{Noise}}} \right) \quad (2)$$

c) Q-Factor

Q-Factor digunakan untuk mengukur kualitas sinyal optik digital, terutama dalam konteks transmisi biner. Semakin tinggi nilai *Q-Factor*, semakin rendah tingkat kesalahan bit (*bit error*). Nilai *Q-Factor* ideal dalam komunikasi optik adalah ≥ 6 [6]. Hubungan antara *Q-Factor* dan SNR dinyatakan sebagai:

$$Q = \frac{10 \frac{SNR}{20}}{2} \quad (3)$$

d) Bit Error Rate (BER)

BER mengukur proporsi bit yang salah selama proses transmisi data. Dalam jaringan optik, standar maksimum nilai BER adalah 10^{-6} [16]. Nilai BER bergantung pada kualitas sistem, redaman, dan gangguan lingkungan. BER dapat dihitung berdasarkan *Q-Factor* dengan rumus:

Keterangan :

$$BER = \frac{\text{EXP} \left(\frac{-Q^2}{2} \right)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (4)$$

- EXP: Fungsi eksponensial, yaitu e^{nilai} .
- Q: adalah *Q-Factor*.
- π : Konstanta matematika dengan nilai 3,14.

D. Dampak Lingkungan terhadap FSO

Dalam desain sistem FSO, redaman akibat faktor lingkungan menjadi hal krusial. Hujan, kabut, dan debu dapat mengganggu propagasi cahaya LASER melalui hamburan (*scattering*) dan absorpsi (*absorption*). Untuk memperkirakan redaman akibat debu digunakan rumus berdasarkan densitas partikel dan panjang gelombang [9].

Demikian pula, intensitas hujan dapat dihitung berdasarkan referensi terhadap *rain gauge* [10].

III. METODE

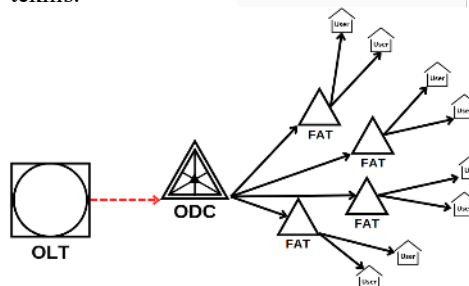
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif dengan fokus pada perancangan dan simulasi jaringan akses *hybrid* berbasis *Free-Space Optics* (FSO) dan *Next-Generation Passive Optical Network* (NG-PON) dari *Point of Presence* (PoP) Ciwastra menuju Kelurahan Batununggal. Metode ini mencakup tahapan mulai dari identifikasi masalah, pemetaan lokasi, desain jaringan, simulasi performansi jaringan optik, hingga analisis hasil berdasarkan parameter teknis.

A. Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian diawali dengan studi pustaka dan pengumpulan data lokasi dari titik awal lokasi penelitian serta pengambilan koordinat titik jaringan di lapangan. Selanjutnya dilakukan *drafting* peta jaringan menggunakan perangkat lunak pemetaan, lalu dilakukan perhitungan matematis parameter jaringan serta simulasi performansi FSO menggunakan aplikasi simulator optik. Penelitian tidak mencakup implementasi fisik sistem, melainkan fokus pada desain jalur dan analisis kelayakan teknis.

Langkah-langkah penelitian secara umum dapat digambarkan sebagai berikut:

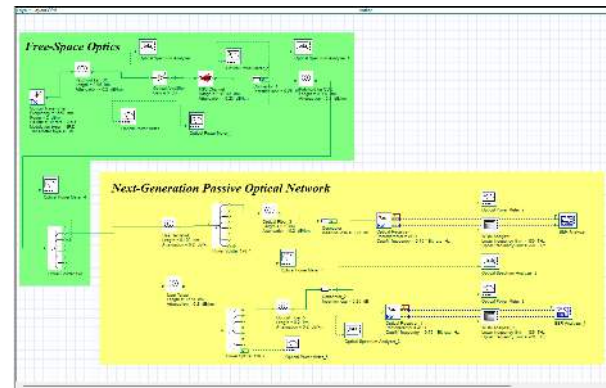
- 1) Identifikasi kebutuhan dan permasalahan jaringan eksisting.
- 2) Studi literatur dan wawancara dengan pihak terlibat
- 3) Pemetaan lokasi dan perencanaan jalur jaringan.
- 4) Perhitungan manual LPB, SNR, *Q-Factor*, dan BER.
- 5) Simulasi optik jaringan FSO dengan berbagai skenario cuaca yang telah ditetapkan.
- 6) Analisis hasil simulasi dan evaluasi parameter teknis.



GAMBAR 1
TOPOLOGI PERANCANGAN JARINGAN *HYBRID*



GAMBAR 2
PROSES PEMETAAN DI *SOFTWARE* PEMETAAN LOKASI



GAMBAR 3
SIMULASI BERDASARKAN JARAK DAN KONDISI CUACA

B. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan dalam kurun waktu Oktober 2024 hingga Juni 2025, dengan lokasi fokus pada salah satu wilayah pada Kelurahan Batununggal Bandung.

C. Sumber Daya Penelitian

Sumber daya penelitian mencakup data primer berupa hasil survei lapangan dan wawancara teknis dengan terlibat, serta data sekunder berupa literatur standar ITU-T dan studi terdahulu. Perangkat lunak yang digunakan meliputi:

- a) *Software* pemetaan lokasi (seperti AutoCAD atau Google Earth).
- b) *Software* simulasi optik.
- c) *Tools equation* untuk perhitungan matematis.
- d) Data spesifikasi teknis perangkat.

D. Teknik Pengumpulan dan Pengolahan Data

Data teknis diperoleh dari tiga sumber utama:

- 1) Wawancara Teknis: Dilakukan dengan pihak yang terlibat untuk memperoleh data spesifikasi perangkat, titik OLT-ODC-FAT, serta standar redaman jaringan.
- 2) Survei Lapangan: Dilakukan untuk mencatat koordinat titik jaringan dan jumlah tiang eksisting untuk kebutuhan *drafting* jalur.
- 3) Studi Literatur: Digunakan untuk melengkapi referensi teknis seperti nilai batas parameter performansi, karakteristik redaman atmosfer, serta standar *bandwidth* NG-PON.

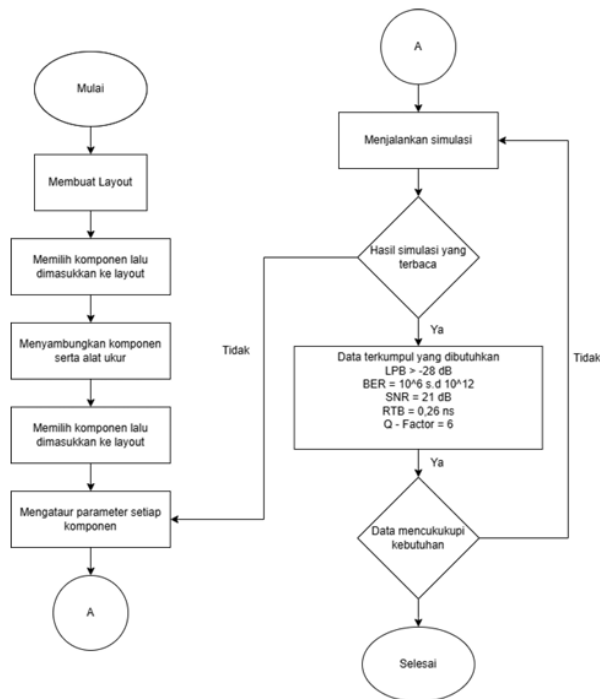
Data yang diperoleh diolah dengan:

- 1) Perhitungan manual LPB menggunakan rumus dasar optik.
- 2) Estimasi redaman cuaca berdasarkan densitas hujan dan debu dari hasil pengamatan atau referensi [9], [10].
- 3) Simulasi jaringan FSO pada berbagai kondisi cuaca (cerah, hujan, kabut, dan polusi) untuk mendapatkan nilai LPB, SNR, *Q-Factor*, dan BER.
- 4) Perbandingan hasil simulasi dengan ambang batas standar untuk menentukan kelayakan teknis.

E. Teknik Pengumpulan dan Pengolahan Data

Simulasi jaringan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak optik yang mampu memodelkan skenario FSO berdasarkan input daya Tx, redaman lingkungan, jarak, dan panjang gelombang (1550 nm). Simulasi dilakukan

dalam beberapa skenario cuaca yang merepresentasikan kondisi ekstrem dan ideal. Untuk setiap skenario, output berupa nilai LPB, SNR, *Q-Factor*, dan BER dianalisis dan dibandingkan dengan standar teknis.



GAMBAR 4
FLOWCHART ALUR PERANCANGAN

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi Jaringan Hybrid FSO–NG-PON

Penelitian ini menghasilkan desain jaringan akses *hybrid* yang menggabungkan *Free-Space Optics* (FSO) sebagai jalur *feeder* dan *Next-Generation Passive Optical Network* (NG-PON) sebagai jalur distribusi dari *Point of Presence* (PoP) Ciwastra menuju Kelurahan Batununggal. Setelah pemetaan lokasi dan pembuatan denah jaringan, dilakukan simulasi performansi optik terhadap jalur FSO dalam beberapa skenario lingkungan, mencakup cuaca cerah, hujan ringan, hujan berat, kabut tebal, dan lingkungan berpolusi.

Simulasi dilakukan untuk dua kondisi jarak: pengguna terdekat (0.102 Km) dan pengguna terjauh (0.673 Km). Parameter yang dievaluasi adalah *Link Power Budget* (LPB), *Bit Error Rate* (BER), *Signal to Noise Ratio* (SNR), dan *Q-Factor*. Seluruh hasil simulasi dikomparasikan terhadap nilai ambang batas standar yang telah ditentukan.

B. Analisis LPB (Link Power Budget)

Dari hasil simulasi, nilai LPB menunjukkan bahwa daya terima di sisi *receiver* masih berada di atas ambang batas minimum -28 dBm dalam semua skenario yang disimulasikan. Pada skenario cuaca cerah, nilai LPB terbaik tercatat sebesar -25,196 dBm (*user* terdekat) dan terburuk sebesar -25,704 dBm (*user* terjauh). Bahkan pada kondisi ekstrem seperti hujan berat dan kabut tebal, nilai LPB tetap berada di kisaran -25 dBm.

TABEL 1
RINCIAN PARAMETER LPB

Rugi-Rugi	Volume	Nilai Atenuasi	Total
Cuaca Cerah	2.41813 Km	0.23 dB/km	0.5561 dB
Cuaca Hujan Berat		19.2 dB/Km	46.428 dB
Cuaca Kabut Tebal		2.37 dB/Km	5.730 dB
Lingkungan Berpolusi		15.5 dB/Km	37.418 dB
Feeder			
Fiber optic 1	50 meter	0.2 dB/Km	0.01 dB
Fiber optic 2	9 meter	0.2 dB/Km	0.0018 dB
Connector 1	1 pcs	0.25 dB	0.25 dB
Distribusi			
Connector 2	1 pcs	0.25 dB	0.25 dB
Splitter 1:8	2 pcs	11 dB	22 dB
Distribusi			
Drop Wire	200 meter	0.2 dB/Km	0.04 dB
User Terdekat	102 meter	0.2 dB/Km	0.0204 dB
User Terjauh	673 meter	0.2 dB/Km	0.1346 dB
Gain			
Cuaca Cerah		0 dB	
Cuaca Hujan Berat		43 dB	
Cuaca Kabut Tebal		3 dB	
Lingkungan Berpolusi		34 dB	
Transmitter		2 dan 5 dBm	

TABEL 2
PERHITUNGAN MATEMATIS LPB SECARA MANUAL

Kondisi Cuaca/ Lingkungan	Jarak User	Power	Rx Output (dBm)
Cerah	Terdekat	5 dBm	-22.1283
	Terjauh		-22.2425
Hujan Berat	Terdekat		-21.0002
	Terjauh		-21.1144
Kabut	Terdekat		-20.3022
	Terjauh		-20.4146
Polusi	Terdekat		-20.9902
	Terjauh		-21.1044

TABEL 3
PERBANDINGAN LPB TIAP KONDISI BERDASARKAN SIMULASI

Kondisi Cuaca/ Lingkungan	Jarak User	Power	Rx Output (dBm)
Cerah	Terdekat	2 dBm	-25.842
	Terjauh		-25.957
Hujan Berat	Terdekat	5 dBm	-25.710
	Terjauh		-25.824
Kabut	Terdekat		-25.015
	Terjauh		-25.129
Polusi	Terdekat		-25.763
	Terjauh		-25.877

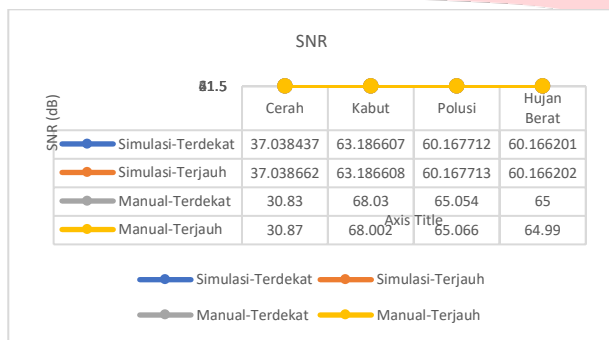
Hasil ini menunjukkan bahwa sistem FSO yang dirancang masih layak digunakan sepanjang redaman atmosfer tidak melebihi 20 dB/km. Estimasi ini didasarkan pada nilai redaman hujan dan debu yang dihitung menggunakan parameter sensor dan literatur [9], [10].

C. Analisis SNR

SNR pada sistem *hybrid* ini menunjukkan stabilitas pada kisaran 37,038437 hingga 65.066 dB di semua skenario. Nilai ini jauh di atas batas minimum 21,5 dB yang direkomendasikan oleh Telkom Indonesia [4], sehingga menjamin kestabilan transmisi optik.

TABEL 4
ANALISIS HASIL SNR

Metode Perhitungan	Kondisi Cuaca/Lingkungan	T _x	Gain (dB)	User Terdekat (dB)	User Terjauh (dB)
Simulasi	Cerah	2	0	37.038437	37.0386
Manual				30.83	30.87
Simulasi	Hujan Berat	5	43	60.166201	60.166202
Manual				65	64.99
Simulasi	Kabut	5	3	63.186607	63.186608
Manual				68.03	68.002
Simulasi	Berpolusi	5	34	60.167712	60.167713
Manual				65.054	65.066



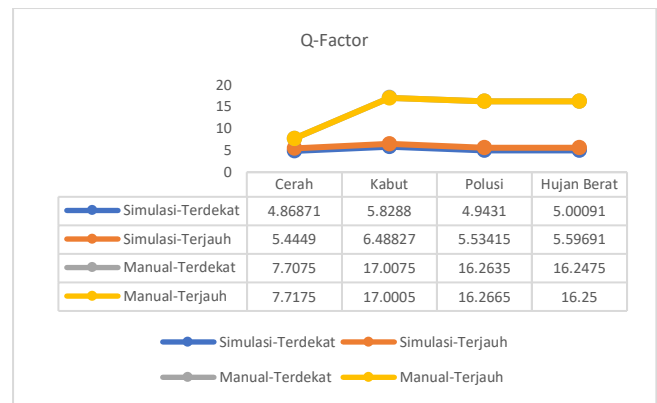
GAMBAR 5
GRAFIK PERBANDINGAN SNR

D. Analisis Hasil Q-Factor

Q-Factor hasil simulasi yang diperoleh berkisar antara 4,86871 hingga 6,48827 dan 7,7075 hingga 17,0075 untuk *Q-Factor* berdasarkan perhitungan manual. Meskipun ada beberapa situasi yang tidak mencapai angka ideal 6, namun nilainya masih berada dalam rentang yang baik, mengingat *Q-Factor* dipengaruhi langsung oleh nilai BER dan kualitas kanal optik.

TABEL 5
ANALISIS HASIL *Q-FACTOR*

Metode Perhitungan	Kondisi Cuaca/Lingkungan	T _x	Gain (dB)	User Terdekat	User Terjauh
Simulasi	Cerah	2	0	4.86871	5.4449
Manual				7.7075	7.7175
Simulasi	Hujan Berat	5	43	5.00091	5.59691
Manual				16.2475	16.25
Simulasi	Kabut	5	3	5.8288	6.48827
Manual				17.0075	17.0005
Simulasi	Berpolusi	5	34	4.9431	5.53415
Manual				16.2635	16.2665



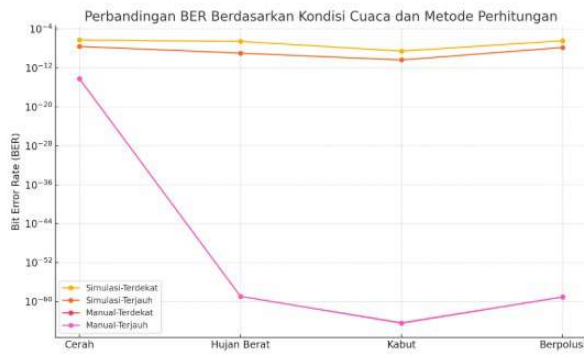
GAMBAR 6
GRAFIK PERBANDINGAN *Q-FACTOR*

E. Analisis Bit Error Rate (BER)

Nilai BER yang diperoleh dari simulasi berkisar antara $2,85288 \times 10^{-7}$ hingga $4,2855 \times 10^{-65}$. Seluruh nilai tersebut masih berada di bawah ambang batas 10^{-6} , menandakan bahwa tingkat kesalahan transmisi data masih dapat ditoleransi secara sistemik. Hasil ini mengindikasikan bahwa transmisi data masih dapat berjalan stabil meskipun terjadi gangguan ringan akibat lingkungan.

TABEL 6
ANALISIS HASIL BER

Metode Perhitungan	Kondisi Cuaca/Lingkungan	T _x	Gain (dB)	User Terdekat (dB)	User Terjauh (dB)
Simulasi	Cerah	2	0	5.61634×10^{-7}	2.59164×10^{-8}
Manual				6.5218×10^{-15}	6.0372×10^{-15}
Simulasi	Hujan Berat	5	43	2.85288×10^{-7}	1.09099×10^{-8}
Manual				1.1679×10^{-59}	1.1679×10^{-59}
Simulasi	Kabut	5	3	2.79106×10^{-9}	4.34117×10^{-11}
Manual				3.6261×10^{-65}	4.2855×10^{-65}
Simulasi	Berpolusi	5	34	3.84435×10^{-7}	1.56366×10^{-8}
Manual				8.5659×10^{-60}	8.9959×10^{-60}



GAMBAR 7
GRAFIK PERBANDINGAN BER

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mensimulasikan sistem jaringan akses *hybrid* yang mengintegrasikan teknologi *Free-Space Optics* (FSO) sebagai jalur *feeder* dan *Next-Generation Passive Optical Network* (NG-PON) sebagai jalur distribusi dari *Point of Presence* (PoP) Ciwastra menuju Kelurahan Batununggal. Berdasarkan hasil pemetaan lokasi dan simulasi optik, sistem yang dirancang mampu memenuhi standar teknis transmisi data dalam berbagai kondisi lingkungan, termasuk cuaca ekstrem seperti hujan lebat dan kabut tebal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai *Link Power Budget* (LPB) tetap berada di atas ambang batas minimum -28 dBm jika mengacu pada standar ITU-T, dengan nilai terbaik mencapai -25,015 dBm untuk LPB dari simulasi dan LPB terbaik yakni 20,3022 jika berdasarkan perhitungan manual. Selain itu, parameter performansi lainnya seperti *Bit Error Rate* (BER), *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), dan *Q-Factor* juga menunjukkan hasil yang memuaskan, jika mengacu pada hasil simulasi nilai BER terendah sebesar 4.34117×10^{-11} dan 3.6261×10^{-65} jika berdasarkan perhitungan manual nilai SNR stabil di kisaran 60 dB dengan perolehan nilai 63.186608 dB jika berdasarkan simulasi dan 65.066 dB jika berdasarkan perhitungan manual, dan *Q-Factor* mencapai maksimum 6,488 berdasarkan hasil simulasi dan maksimum 17,00 jika berdasarkan perhitungan manual, ini mengartikan masih terdapat beberapa kondisi nilai *Q-Factor* tidak optimal jika berdasarkan simulasi.

Temuan ini mengindikasikan bahwa penggunaan FSO sebagai pengganti kabel *feeder* sangat mungkin diterapkan pada wilayah padat penduduk dengan keterbatasan infrastruktur fisik, khususnya yang terhambat oleh peraturan tata ruang seperti yang berlaku di Kota Bandung. Selain keunggulan teknis, desain ini juga memberikan efisiensi dari sisi biaya dan estetika, karena tidak memerlukan penggalian tanah untuk pemasangan kabel bawah tanah. Integrasi dengan NG-PON pada jalur distribusi turut meningkatkan efisiensi jaringan secara keseluruhan, mengingat kemampuan teknologi ini dalam melayani lebih banyak pelanggan melalui rasio *splitting* yang lebih besar. Dengan demikian, sistem *hybrid* FSO dengan NG-PON yang dirancang dalam penelitian ini dapat menjadi solusi inovatif dan adaptif untuk pengembangan jaringan akses di kawasan *urban*, khususnya dalam menghadapi keterbatasan ruang, regulasi, dan tuntutan *bandwidth* yang terus meningkat.

REFERENSI

- [1] Republik Indonesia, "Peraturan Walikota (Perwali) Kota Bandung Nomor 589 Tahun 2013 tentang Penyelenggaraan Saluran *Fiber optic* Bersama Bawah Tanah," pp. 1–9, 2013, Accessed: Oct. 19, 2024. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/170687/perwali-kota-bandung-no-589-tahun-2013>
- [2] H. Y. Ahmed, M. Zeghid, A. N. Khan, dan S. A. Abd El-Mottaleb, "Fuzzy Logic-Based Performance Enhancement of FSO Systems Under Adverse Weather Conditions," *Photonics*, vol. 12, no. 5, Art. no. 495, May 2025.
- [3] R. Firdaus, R. A. I. Asyari, dan E. Indarto, "Optical network design for 4G LTE," *arXiv preprint arXiv:2203.12309*, Mar. 2022. doi: 10.48550/arXiv.2203.12309
- [4] S. Fitri, S. Aulia, dan Aprinal Adila Asril, J. Teknik Elektro, P. Negeri Padang, and J. Limau Manih Padang, "Perancangan Dan Pengukuran Performansi Jaringan Fiber To The Home Dengan Teknologi Gigabit Passive Optical Network Menggunakan Optisystem Di Kelurahan Surau Gadang," vol. 11, 2021.
- [5] A. A. Anis, C. B. M. Rashidi, A. K. Rahman, S. A. Aljunid, and N. Ali, "Analysis of the effect of BER and *Q-Factor* on *Free-Space Optics* communication system using diverse wavelength technique," in *EPJ Website of Conferences*, vol. 162, p. 01024, 2017, doi: 10.1051/epjconf/201716201024.
- [6] Z. N. Karimah, A. Hambali, and Suwandi "Analisis Perbandingan Kinerja Mach-Zehnder berdasarkan Ragam Format Modulasi pada Jaringan FTTH," *Jurnal ELKOMIKA* |, vol. 5, pp. 2338–8323, 2017.
- [7] ITU-T, *40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Definitions, abbreviations and acronyms*, ITU-T Recommendation G.989, Oct. 2015. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989-201510-I/en>
- [8] R. F. Adiati, A. Kusumawardhani, dan H. Setijono, "Analisis Parameter *Signal to Noise Ratio* dan *Bit Error Rate* dalam *Backbone* Komunikasi *Fiber optic* Segmen Lamongan-Kebalen," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 6, no. 2, pp. A233–A237, 2017, doi: 10.12962/j23373520.v6i2.28284.
- [9] T. Subekti, A. F. Isnawati, and D. Zulherman, "Optimization *Free-Space Optics* (FSO) Design with Kim Model Using Space Diversity," *Jurnal Infotel*, vol. 11, no. 3, pp. 93–98, Aug. 2019, doi: 10.20895/infotel.v11i3.444.
- [10] Hordofa, T.H., & Liu, J. (2025). Speed and Direction Control of DC Motor Using Arduino UNO Microcontroller. *Open Access Library Journal*, 12(3), e13007.