

Desain *Free Space Optics* di Kota Bandung

1st Fidiya Lailatul Fuadiyah

Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

fidiyaaa@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Akhmad Hambali

Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

ahambali@telkomuniversity.ac.id

3rd Rizky Satria

Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

satria.riz2007@gmail.com

Abstrak — Perkembangan infrastruktur telekomunikasi di Indonesia saat ini menghadapi tantangan terkait penataan kabel *fiber optic* yang tidak beraturan di area perkotaan. Di Kota Bandung, fenomena kabel yang menjuntai tidak hanya merusak estetika kota tetapi juga menimbulkan risiko keselamatan bagi pengguna jalan. Selain itu, pembangunan jalur fisik pada daerah dengan topografi sulit memerlukan biaya yang sangat tinggi dan proses instalasi yang kompleks. Sebagai solusi, penelitian ini mengusulkan perancangan jaringan komunikasi *Free Space Optics* (FSO) sebagai media transmisi nirkabel alternatif yang menghubungkan lima Sentral Telepon Otomat (STO) di Kota Bandung. Teknologi FSO memanfaatkan pancaran cahaya inframerah untuk pengiriman data berkecepatan tinggi tanpa memerlukan kabel fisik, sehingga lebih aman dan ekonomis. Untuk mendukung keandalan operasional, selanjutnya dikembangkan *BeamWatch* sebagai *Network Management System* (NMS) untuk memantau performa jaringan secara *real-time* serta mengintegrasikan data cuaca guna memprediksi ketersediaan layanan (*availability*) berdasarkan kondisi di lokasi penelitian. Hasil pengujian menunjukkan bahwa desain jaringan FSO mampu beroperasi secara optimal pada kondisi cuaca cerah, namun sangat sensitif terhadap atenuasi hujan berat. Implementasi NMS berhasil memenuhi seluruh spesifikasi fungsional, termasuk kemampuan visualisasi prediksi performa hingga periode 14 hari ke depan dengan parameter *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), *Q-factor*, *Received Power*, *Bit Error Rate* (BER), dan *Availability*. Secara keseluruhan, integrasi desain FSO dan sistem pemantauan berbasis web memberikan solusi infrastruktur telekomunikasi yang efektif untuk wilayah perkotaan.

Kata kunci— Telekomunikasi, Kota Bandung, *Free Space Optics*, *BeamWatch*, *Network Management System*

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi telekomunikasi di Indonesia terus meningkat seiring dengan kebutuhan layanan internet berkecepatan tinggi untuk mendukung aplikasi berbasis 5G, *big data*, dan *cloud computing* [1]. Namun, pertumbuhan tersebut seringkali tidak diimbangi dengan penataan infrastruktur yang baik. Salah satu permasalahan utama pada infrastruktur telekomunikasi adalah keberadaan kabel *fiber optic* yang peletakkannya tidak beraturan, seperti menggantung di sepanjang jalan dan tiang listrik. Kondisi tersebut tidak hanya mengganggu estetika kota, tetapi juga menimbulkan risiko keselamatan bagi masyarakat.

Selain permasalahan keselamatan dan estetika, instalasi perangkat *fiber optic* juga sering mengalami berbagai kendala teknis dan ekonomi, terutama pada daerah atau wilayah yang sulit dijangkau seperti pedesaan yang memiliki kontur tanah atau topografi yang tidak beraturan, sehingga pemasangan tiang untuk kabel *fiber optic* menjadi tantangan tersendiri. Hal-hal tersebut tidak hanya sulit dalam segi teknis, tetapi memerlukan cukup banyak biaya untuk melakukan pembangunan infrastrukturnya. Proses instalasi memerlukan biaya yang tinggi, waktu yang lama, serta perawatan yang berkelanjutan. Oleh karena itu, berbagai teknologi komunikasi nirkabel telah dikembangkan sebagai alternatif, seperti sistem *microwave*, satelit, dan FSO.

Keuntungan dari memakai sistem komunikasi FSO dibandingkan dengan sistem komunikasi nirkabel lainnya adalah *bandwidth* lebar, biaya pemasangan yang lebih rendah dibandingkan dengan *fiber optic*, cara penyebarannya yang lebih cepat dan mudah yaitu melewati udara [2]. Teknologi FSO menggunakan sinar cahaya untuk mentransfer data melalui ruang bebas, menawarkan kecepatan tinggi dan keamanan data yang lebih baik, tetapi membutuhkan jalur pandang yang jelas antara pemancar dan penerima agar dapat berfungsi secara optimal [3].

Selain itu, penerapan teknologi FSO perlu didukung oleh sistem pemantauan yang andal agar kita dapat melihat seberapa baik kinerja serta dapat memperlihatkan *Service Level Agreement* (SLA) dari jaringan FSO yang telah dirancang. Untuk itu, dibutuhkan *Network Management System* (NMS) yang akan digunakan untuk melakukan pemantauan kondisi dari jaringan yang dirancang. Beberapa parameter yang dapat dipantau melalui NMS meliputi *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), *Q-factor*, *Received Power*, *Bit Error Rate* (BER), dan *Availability*.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengonfigurasi jaringan FSO sebagai alternatif pengganti kabel *fiber optic* dalam menghubungkan lima Sentral Telepon Otomat (STO) di Kota Bandung. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performansi sistem komunikasi FSO berdasarkan parameter teknis, meliputi SNR, *Q-factor*, *Received Power*, BER, dan *availability*. Penelitian ini juga bertujuan untuk menyediakan solusi komunikasi alternatif yang optimal guna meningkatkan kualitas layanan jaringan seluler di wilayah Kota Bandung. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh solusi jaringan yang lebih

efisien dan aman untuk mendukung perkembangan infrastruktur telekomunikasi di Kota Bandung.

II. KAJIAN TEORI

A. Konsep Dasar *Free Space Optics* (FSO)

Free Space Optics (FSO) merupakan teknologi komunikasi yang memanfaatkan ruang udara terbuka (*free space*) sebagai medium transmisinya. Sistem ini menggunakan cahaya sebagai media penghantar untuk mentransmisikan data, suara, maupun video secara bersamaan (*full-duplex*) dengan kecepatan mencapai tingkat *Gigabit Ethernet* [2]. Teknologi FSO pada dasarnya bekerja dengan memancarkan sorotan cahaya yang membawa informasi digital melalui udara dari satu titik ke titik lainnya tanpa memerlukan kabel fisik seperti *fiber optic*.



GAMBAR 1
Perangkat *Free Space Optics* (FSO)

Teknologi FSO memiliki sejumlah keunggulan yang menjadikannya alternatif dalam sistem komunikasi modern. FSO memiliki lebar pita (*bandwidth*) yang besar, sehingga mampu mentransmisikan data dengan kecepatan tinggi hingga mencapai 1–100 Gbps, tergantung pada panjang gelombang dan teknik modulasi yang digunakan. Sistem ini bersifat *full-duplex*, artinya komunikasi dua arah dapat dilakukan secara bersamaan. Sistem ini juga memiliki ketahanan yang baik terhadap interferensi gelombang radio dan tidak terpengaruh oleh sinyal elektromagnetik dari perangkat lain. Selain itu, karena tidak memerlukan kabel optik fisik, proses instalasi, perbaikan, dan pemeliharaan sistem FSO relatif mudah dilakukan.

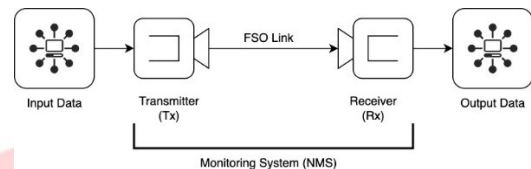
Meskipun memiliki banyak keunggulan, FSO juga memiliki keterbatasan terutama terkait kondisi atmosfer. Teknologi ini sangat bergantung pada jalur pandang langsung (*line of sight*) antara pemancar dan penerima. Faktor cuaca seperti hujan, kabut, dan salju dapat menyebabkan redaman optik yang signifikan, sehingga menurunkan daya sinyal yang diterima (PRx). Bahkan pada kondisi cerah sekalipun, fluktuasi intensitas cahaya atau sintilasi atmosferik dapat menurunkan *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) dan berdampak pada kualitas komunikasi.

B. Arsitektur Sistem Jaringan *Free Space Optics* (FSO)

Teknologi FSO menawarkan solusi komunikasi yang efisien, cepat, dan aman, terutama dalam konteks pengembangan infrastruktur jaringan di kawasan perkotaan seperti Bandung.

Sistem FSO bekerja dengan menghubungkan dua titik (*point-to-point*) menggunakan sinar LASER melalui *free space* tanpa memerlukan kabel fisik. Sistem ini terdiri dari pemancar (*transmitter*) dan penerima (*receiver*) yang

dipasang dengan saling berhadapan dengan kondisi *line of sight*, yaitu jalur pandang langsung antara pemancar dan penerima tanpa adanya penghalang. Kondisi *line of sight* sangat penting dalam pengimplementasian FSO. Kota Bandung yang merupakan daerah dengan mayoritas gedung tinggi menjadi salah satu tantangan dalam pengimplementasiannya, sehingga penempatan perangkat FSO untuk Kota Bandung yang ideal adalah berada di atas gedung tinggi, menara, atau titik tertinggi lainnya agar jalur LOS tetap terbuka.



GAMBAR 2
Blok Diagram Sistem Komunikasi FSO

Gambar diatas merupakan arsitektur dasar sistem jaringan FSO yang terdiri dari empat komponen utama yaitu *input data*, *transmitter* (pemancar), *receiver* (penerima), dan *output data*.

a. *Input Data*

Input data merupakan proses memasukan data atau informasi yang akan dikirimkan melalui jaringan. Data tersebut dapat berasal dari perangkat pengguna.

b. *Transmitter*

Transmitter berfungsi untuk mengubah sinyal elektrik menjadi sinyal optik. *Transmitter* akan memancarkan sinyal optik tersebut melalui udara bebas kepada *receiver*.

c. *FSO Link*

FSO Link merupakan jalur utama untuk melakukan proses transmisi sinyal cahaya pada sistem komunikasi FSO dari *transmitter* menuju *receiver*. Sistem transmisi ini memperhatikan *line of sight* (LOS), yaitu jalur transmisi sinyal langsung tanpa ada halangan diantara *transmitter* dan *receiver*.

d. *Receiver*

Receiver berfungsi sebagai penerima sinyal optik dan mengubahnya kembali menjadi sinyal elektrik sehingga dapat diproses oleh perangkat penerima.

e. *Output Data*

Output data merupakan data yang berhasil diterima dan telah diterima oleh perangkat pengguna.

f. *Monitoring System*

Monitoring system yang digunakan adalah NMS untuk memantau dan mengelola performa transmisi data sistem FSO.

C. Parameter Performa FSO

Pengukuran spesifikasi dilakukan dengan tahapan simulasi dan pemantauan performa. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak untuk menguji koneksi antar STO yang dapat memperoleh nilai daya sinyal yang diterima (*received power*), kualitas sinyal (*Q-factor*), rasio sinyal terhadap derau (*Signal-to-Noise-Ratio/SNR*), serta tingkat kesalahan bit (*Bit Error Rate/BER*).

Parameter-parameter ini mengacu pada salah satu standar internasional yaitu *International Telecommunication Union – Telecommunication* (ITU-T), khususnya ITU-T G.957 untuk sistem transmisi optik. Pemantauan performa SLA dilakukan melalui NMS yang menampilkan hasil prediksi secara *real-time* berdasarkan kondisi cuaca terkini terhadap 18 Link simulasi.

a. Pengukuran dan Verifikasi Spesifikasi *Free Space Optic (FSO)*

a. *Received Power*

Received Power merupakan parameter yang digunakan untuk menghitung daya sinyal yang diterima pada sistem komunikasi FSO. Pengukuran parameter ini berfungsi untuk memastikan bahwa *receiver* dapat menerima sinyal yang dipancarkan oleh *transmitter* agar dapat terjalin sebuah komunikasi yang baik. Daya sinyal yang diterima tersebut dapat dihitung dengan mengetahui nilai daya yang dipancarkan dan total nilai *loss*, sehingga menghasilkan persamaan 1 [3].

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

Keterangan:

P_{Rx} : Daya yang diterima
 P_{Tx} : Daya yang ditransmisikan
 Total Loss : Total kehilangan daya sistem

b. *Q-factor*

Q-factor adalah sebuah parameter yang menentukan kualitas dari performansi sistem komunikasi, baik atau buruk. Nilai minimum *Q-factor* yang baik untuk *fiber optic* adalah ≥ 6 . Nilai *Q-factor* dapat dicari menggunakan persamaan 2 [4].

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

Keterangan:

Q : *Quality Factor*
 SNR : rasio sinyal terhadap *noise* (dB)

c. *Signal-to-Noise-Ratio (SNR)*

Signal to Noise Ratio bertujuan untuk mengetahui kualitas sinyal informasi yang diterima pada suatu sistem komunikasi. Semakin besar nilai SNR maka dapat dikatakan sistem komunikasi tersebut mendapatkan kualitas sinyal yang baik [18]. Secara matematis, SNR dapat dihitung dengan persamaan 3 [3].

$$SNR = \frac{I_p}{2qB(I_p + I_D)M^x + 4K_B T B F_n / R_L M^{-2}} \quad (3)$$

Keterangan:

TABEL 1
Keterangan SNR

Simbol	Deskripsi	Satuan
I_p	Arus primer	Ampere
I_D	Arus gelap	Ampere
q	Satuan unit elektron	Coulomb (C)
B	Bandwidth	Hertz (Hz)
M	Faktor multiplikasi fotodetektor APD	-
x	Indeks excess noise	-
K_B	Konstanta Boltzmann	Joule/Kelvin (J/K)
T	Suhu di fotodetektor	Kelvin (K)
F_n	Noise figure	-
R_L	Resistensi fotodetektor	Ohm (Ω)

d. *Bit Error Rate (BER)*

Bit Error Rate merupakan sebuah parameter untuk menghitung tingkat kesalahan bit data yang diterima dari jumlah total bit yang dikirimkan karena mengalami distorsi atau gangguan [8]. Sebagai contoh transmisi memiliki BER 10^{-9} berarti 1.000.000.000-bit dikirimkan maka jumlah maksimum bit yang eror adalah satu. Sehingga jika BER bernilai tinggi, maka dapat dikatakan bahwa terjadi gangguan pada proses transmisi atau kerusakan pada peralatan yang digunakan. BER dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 4 [3].

$$BER = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-Q^2/2}}{Q} \quad (4)$$

Keterangan:

BER : *Bit Error Rate*
 Q : *Quality Factor*

b. Pengukuran dan Verifikasi Spesifikasi *Service Level Agreement (SLA)*

Pengukuran dan verifikasi *Service Level Agreement (SLA)* dilakukan untuk memastikan bahwa sistem FSO yang dirancang memenuhi kriteria performa jaringan yang telah ditetapkan. Verifikasi SLA pada penelitian ini dilakukan berdasarkan parameter performa fisik *link* optik yang dimonitor melalui NMS, yaitu *Signal-to-Noise Ratio (SNR)*, *Q-factor*, *Received Power (PRx)*, *Bit Error Rate (BER)*, serta *service availability*. Pada penelitian ini, SLA difokuskan pada evaluasi performa layanan jaringan secara umum berdasarkan parameter fisik dan ketersediaan layanan (*service availability*), tanpa membedakan jenis pengguna atau tingkat layanan tertentu.

Service availability merupakan parameter yang menunjukkan probabilitas layanan dapat beroperasi dengan baik dalam periode waktu tertentu. Menurut ITU-T E.800, nilai *service availability* dapat dihitung menggunakan Persamaan 5 [5].

$$Availability = \frac{MTTF}{MTBF} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan:

MTTF : Mean Time to Failure

MTBF : Mean Time Between Failures

Dalam implementasi sistem ini, nilai *service availability* diperoleh melalui hasil simulasi dan *monitoring* parameter fisik jaringan FSO, yaitu *Received Power (PRx)*, *Bit Error Rate (BER)*, *Q-factor*, dan *Signal-to-Noise Ratio (SNR)*. Parameter-parameter tersebut dipantau menggunakan NMS berbasis web untuk menilai *link* FSO berada dalam kondisi layak operasi. Sistem dikatakan memenuhi SLA apabila seluruh parameter berada dalam batas standar yang telah ditentukan dan nilai *availability* yang dihasilkan mencapai target minimum sebesar $\geq 99,0\%$, sehingga kualitas layanan jaringan dapat dikategorikan baik dan andal.

D. *Machine Learning* untuk *Monitoring* dan Prediksi Performa Jaringan

Machine Learning (ML) merupakan pendekatan komputasi yang memungkinkan sistem untuk mempelajari pola dari data historis dan menghasilkan prediksi tanpa memerlukan pemodelan matematis secara eksplisit. Dalam sistem komunikasi modern, ML banyak dimanfaatkan untuk analisis performa jaringan, *monitoring* kondisi *link*, serta prediksi kualitas layanan berdasarkan parameter-parameter jaringan [6]. Pendekatan ini sangat relevan untuk sistem *Free Space Optics (FSO)* karena performa *link* FSO sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan cuaca yang bersifat dinamis serta nonlinier, sehingga sulit dimodelkan menggunakan metode analitis konvensional.

Machine Learning dapat digunakan sebagai bagian dari sistem *monitoring* prediktif, dengan analisis data historis dimanfaatkan untuk memperkirakan kondisi sistem di masa mendatang serta meningkatkan keandalan operasional. Oleh karena itu, integrasi ML dalam *monitoring* performa jaringan menjadi pendekatan yang sesuai untuk sistem komunikasi yang dipengaruhi oleh banyak variabel dinamis.

Pada penelitian ini, ML digunakan sebagai bagian dari sistem *monitoring* dan prediksi performa jaringan FSO yang diintegrasikan dengan *Network Management System (NMS)*. Model ML memproses data hasil simulasi performa *link* FSO, seperti *Signal-to-Noise Ratio (SNR)*, *Received Power (PRx)*, *Bit Error Rate (BER)*, dan *Q-factor*, untuk menghasilkan prediksi kondisi jaringan. Hasil prediksi tersebut kemudian divisualisasikan melalui NMS berbasis web sehingga dapat membantu proses evaluasi performa jaringan secara lebih informatif dan terstruktur.

Melalui integrasi ML, khususnya *Random Forest* dengan NMS, sistem yang dirancang tidak hanya mampu menampilkan kondisi jaringan secara statis, tetapi juga memberikan gambaran prediktif mengenai performa *link* FSO. Pendekatan ini diharapkan dapat membantu proses evaluasi jaringan serta pengambilan keputusan terkait kelayakan dan keandalan *link* FSO berdasarkan hasil prediksi parameter performa yang dihasilkan oleh model ML.

E. Standar dan Regulasi Produk

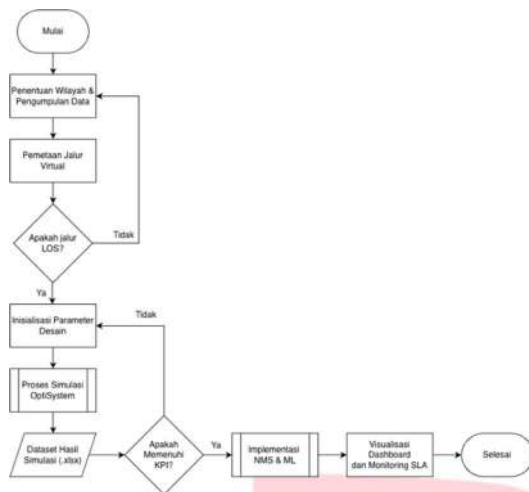
Penerapan berbagai standar teknis pada sistem bertujuan memastikan bahwa perangkat dan proses pengujian dilakukan secara konsisten, aman, serta sesuai dengan ketentuan internasional. Standar-standar ini juga menjadi acuan dalam merancang parameter kinerja, menentukan batas kemampuan perangkat, serta mengevaluasi kualitas layanan agar sistem dapat beroperasi secara andal pada berbagai kondisi atmosfer.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kuantitatif dengan pendekatan simulasi dan analisis performansi sistem komunikasi optik. Objek penelitian berupa jaringan *Free Space Optics (FSO)* yang dirancang untuk menghubungkan lima Sentral Telepon Otomat (STO) di Kota Bandung sebagai alternatif pengganti kabel *fiber optic*. Perancangan dan evaluasi sistem dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak *OptiSystem*, sedangkan hasil performansi jaringan divisualisasikan menggunakan *Network Management System (NMS)*.

A. Perancangan Sistem Jaringan *Free Space Optics*

Dalam merancang sistem jaringan FSO di Kota Bandung, diperlukan pendekatan sistematis agar desain yang dihasilkan tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga mampu memenuhi target performa yang diinginkan. Oleh karena itu, proses perancangan dilakukan melalui beberapa tahapan yang terstruktur, mulai dari pengumpulan data lokasi, penentuan parameter desain, hingga proses simulasi dan evaluasi performa jaringan.



GAMBAR 3
Diagram Alur Sistem

Diagram alur diatas menggambarkan alur kerja dalam proses perancangan sistem jaringan FSO di Kota Bandung. Setiap tahapan berperan penting dalam memastikan bahwa sistem FSO yang dirancang memiliki jalur transmisi yang optimal, memiliki jalur pandang langsung (*line of sight*), dan sesuai dengan kondisi geografis Kota Bandung yang memiliki karakteristik topografi dan urbanisasi tertentu.

Tahap perancangan diawali dengan persiapan yang meliputi penentuan area wilayah serta pengumpulan data data geografis di Kota Bandung. Jalur transmisi kemudian ditentukan secara virtual menggunakan perangkat lunak peta digital untuk mengevaluasi ketersediaan kondisi *line-of-sight* (LoS) antara sisi pemancar dan penerima. Jalur yang memenuhi persyaratan LoS selanjutnya dianalisis melalui simulasi menggunakan perangkat lunak *OptiSystem* untuk memperoleh dataset performansi jaringan.

Data hasil simulasi diuji berdasarkan standar *Key Performance Indicator* (KPI), yaitu nilai BER dan *Q-factor*. Apabila hasil simulasi tidak memenuhi kriteria yang ditetapkan, dilakukan optimasi kembali pada parameter desain. Namun, apabila hasil telah memenuhi standar, data tersebut diintegrasikan ke dalam NMS berbasis *machine learning* untuk mendukung proses prediksi dan pemantauan kualitas jaringan secara *real-time* berdasarkan data cuaca.

B. Topologi Desain *Free Space Optics*

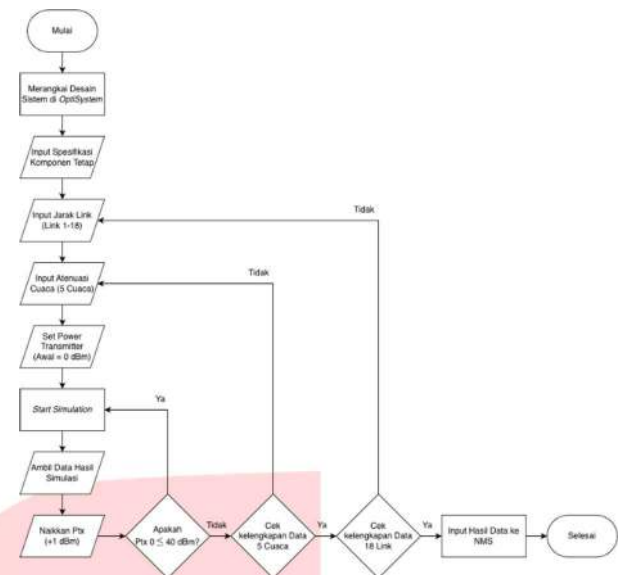
Dalam perencanaan desain jaringan FSO, salah satu langkah utama yang dilakukan adalah merancang topologi jaringan untuk menghubungkan lima Sentral Telepon Otomat (STO) dan menentukan kebutuhan hop di antara titik-titik tersebut.



GAMBAR 4

Topologi Desain *Free Space Optics*

C. Alur Kerja Sistem Simulasi *Free Space Optics*

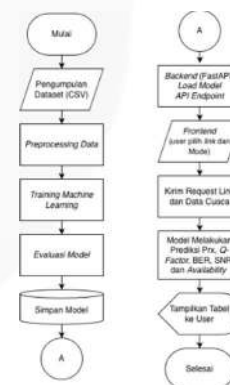


GAMBAR 5

Diagram Alur Sistem *Free Space Optics*

Diagram alur di atas merepresentasikan tahapan sistem simulasi FSO menggunakan perangkat lunak simulasi optik. Proses dimulai dengan perancangan skema sistem (*system design*) yang melibatkan penyusunan komponen-komponen utama, antara lain *Optical Transmitter*, kanal FSO (*FSO Channel*), *Optical Spectrum Analyzer*, *Optical Power Meter*, *Optical Receiver*, serta *Bit Error Rate (BER) Analyzer*. Setelah rangkaian terbentuk, tahap selanjutnya adalah menginput spesifikasi teknis komponen yang bersifat tetap (*fixed parameters*) sebagai acuan dasar simulasi. Ini dari pengujian sistem dilakukan menggunakan metode sweeping parameter dengan struktur perulangan bersarang (*nested loop*).

D. Alur Kerja *Network Management System*



GAMBAR 6

Diagram Alur *Network Management System*

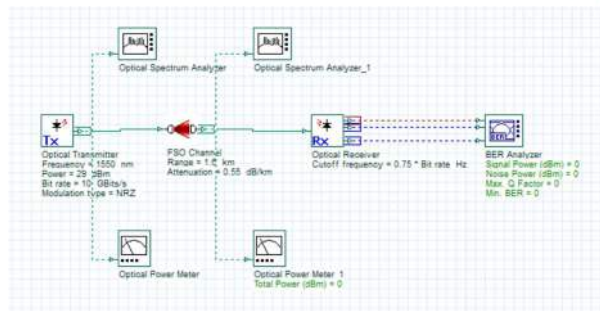
Proses kerja sistem diawali dengan pengumpulan *dataset* dari hasil simulasi *OptiSystem* dalam format CSV. Data tersebut kemudian masuk ke tahap *preprocessing data* untuk proses pembersihan dan normalisasi agar siap digunakan dalam fase *training machine learning*. Setelah model terbentuk, dilakukan evaluasi model untuk memastikan tingkat akurasi prediksi performansi jaringan sudah sesuai standar sebelum akhirnya dilakukan simpan model.

Di sisi operasional, *backend* (FastAPI) berfungsi untuk melakukan *load model* dan menyediakan *API Endpoint*

sebagai jalur komunikasi data. Melalui *frontend*, pengguna dapat berinteraksi dengan memilih *link* (dari 18 *link* yang tersedia) serta mode pemantauan. Saat pengguna mengirimkan permintaan (kirim *request*), sistem secara otomatis mengambil data cuaca *real-time* sebagai input tambahan. Input tersebut diolah oleh model prediksi untuk menghasilkan estimasi nilai PRx, *Q-factor*, SNR, BER, dan *Availability*. Hasil akhir dari proses ini ditampilkan ke *user* dalam bentuk tabel interaktif pada *dashboard* NMS sebagai acuan dalam pemantauan performa SLA.

E. Implementasi Sistem

Pada tahap implementasi, digunakan perangkat lunak simulasi optik untuk merancang, menganalisis, dan mensimulasikan performa teknis dari sistem FSO. Perangkat lunak ini berfungsi untuk menentukan kinerja sistem FSO berdasarkan parameter jarak, atenuasi, serta karakteristik perangkat seperti daya transmisi dan sensitivitas penerima. Selain itu, perangkat lunak ini juga membantu dalam proses optimasi elemen optik, seperti laser *transmitter* dan *photodetector receiver*, sehingga sistem dapat bekerja secara optimal pada berbagai kondisi lingkungan.



GAMBAR 7

Simulasi Sistem *Free Space Optics*

Proses implementasi diawali dengan pemilihan spesifikasi perangkat FSO, mencakup jarak maksimum transmisi, *transmission power*, *receiver sensitivity*, dan *bandwidth*. Selanjutnya dilakukan penentuan titik *transceiver* (node FSO) menggunakan koordinat menara telekomunikasi di Kota Bandung dengan mempertimbangkan *line of sight* dan ketinggian bangunan. Tahap berikutnya adalah pelaksanaan simulasi menggunakan perangkat simulasi optik untuk memperoleh parameter utama seperti *Link power budget*, *Bit Error Rate* (BER), dan *Q-factor* pada berbagai kondisi cuaca. Hasil simulasi tersebut kemudian digunakan untuk menghitung *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) guna menilai kekuatan sinyal di sisi penerima.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Sistem *Free Space Optics* (FSO)

Pengujian dilakukan dengan menyusun skenario simulasi yang merepresentasikan berbagai kondisi lingkungan dan parameter teknis, seperti variasi daya pancar (PTx), kondisi cuaca, jarak antar *node*, serta nilai atenuasi kanal. Selain itu, pengujian juga mencakup evaluasi performa model prediksi yang digunakan pada NMS untuk melakukan klasifikasi kondisi cuaca dan analisis kualitas *link* berdasarkan hasil simulasi. Setiap tahapan pengujian disusun untuk menilai efektivitas, akurasi, dan konsistensi sistem secara menyeluruh, sehingga hasil akhirnya dapat menggambarkan kinerja jaringan FSO dan kemampuan NMS dalam

memvisualisasikan serta memprediksi perubahan kualitas komunikasi secara *real-time*.

Pengujian dilakukan menggunakan perangkat lunak *OptiSystem* dengan memasukkan variasi daya pancar (*Tx Power*) mulai dari 0 hingga 40 dBm. Setiap skenario pengujian disesuaikan dengan kondisi cuaca berdasarkan nilai atenuasi standar, yaitu 0,23 dB/km untuk cuaca cerah, 6,27 dB/km untuk hujan ringan, 9,64 dB/km untuk hujan sedang, 19,2 dB/km untuk hujan berat, dan 0,55 dB/km untuk kondisi berkabut. Seluruh parameter tersebut diterapkan pada setiap *link* dalam topologi jaringan, sehingga total 18 *link* diuji secara menyeluruh dengan memperhatikan jarak aktual masing-masing *link*. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi performa FSO secara komprehensif pada seluruh kondisi atmosfer yang mungkin terjadi di lingkungan operasional.

Output utama yang dihasilkan berupa nilai *Received Power* (PRx), *Bit Error Rate* (BER), dan *Q-factor*, yang kemudian dicatat untuk keperluan analisis. Seluruh hasil tersebut diinterpretasikan untuk melihat bagaimana performa jaringan FSO berubah pada setiap kondisi cuaca.

TABEL 2
Rangkuman Hasil Pengujian Sistem *Free Space Optics* (FSO)

No	Spesifikasi	Rata-Rata Nilai					Nilai Standar	Tercapai / Tidak Tercapai
		Cuaca Cerah	Cuaca Hujan Ringan	Cuaca Hujan Sedang	Cuaca Hujan Berat	Cuaca Berkabut		
1	<i>Received Power</i>	-23,97	-23,94	-23,88	-23,90	-24,08	-28	Tercapai
2	<i>Q-factor</i>	7,81	7,70	7,66	7,95	7,83	6	Tercapai
3	<i>Signal-to-Noise Ratio (SNR)</i>	20,94	20,98	20,93	21,08	20,87	20	Tercapai
4	<i>Bit Error Rate (BER)</i>	$1,43 \times 10^{-13}$	$5,78 \times 10^{-13}$	$6,93 \times 10^{-13}$	$4,39 \times 10^{-13}$	$9,74 \times 10^{-14}$	1×10^{-9}	Tercapai

Berdasarkan tabel perbandingan spesifikasi dan realisasi pada berbagai kondisi cuaca, dapat disimpulkan bahwa kinerja sistem komunikasi tetap stabil dan memenuhi standar yang ditetapkan. Nilai *Received Power* yang diperoleh berada pada kisaran -23,88 hingga -24,08 dBm. Meskipun nilai tersebut lebih rendah dibandingkan standar, sistem tetap dinyatakan memenuhi kriteria karena daya terima masih berada dalam batas operasional perangkat dan tidak mengganggu kualitas layanan secara keseluruhan. Pada parameter *Q-factor*, seluruh kondisi cuaca menunjukkan nilai antara 7,66 hingga 7,95, yang berarti berada jauh di atas standar minimum 6. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas sinyal tetap terjaga meskipun terjadi variasi kondisi atmosfer seperti hujan dan kabut.

Parameter *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) menunjukkan hasil yang konsisten dan memadai, yaitu sekitar 20,87 hingga 21,08 dB, sedikit lebih tinggi dari nilai standar 20 dB. Kondisi ini menggambarkan bahwa tingkat gangguan *noise* terhadap sinyal tidak signifikan, sehingga sistem tetap dapat beroperasi secara optimal. Selain itu, parameter *Bit Error Rate* (BER) menunjukkan performa yang sangat baik dengan nilai berkisar antara 10^{-13} hingga 10^{-14} , jauh lebih kecil dari standar 10^{-9} . Hasil tersebut menunjukkan tingkat kesalahan bit sangat rendah dan tidak menimbulkan gangguan terhadap kualitas transmisi data.

Secara keseluruhan, seluruh parameter yang diuji menunjukkan hasil yang memenuhi standar, sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem komunikasi mampu berfungsi dengan baik dalam berbagai kondisi cuaca, termasuk hujan

ringan, sedang, berat, maupun keadaan berkabut. Kinerja yang stabil ini menggambarkan bahwa sistem memiliki ketahanan yang baik terhadap perubahan kondisi atmosfer.

Berdasarkan hasil perancangan jaringan, seluruh *link* FSO yang dirancang memenuhi kondisi LOS. Jalur transmisi antar *hop* tidak terhalang oleh objek seperti bangunan tinggi, pepohonan, maupun kontur geografis. Dengan terpenuhinya kondisi tersebut, seluruh *link* FSO yang dirancang memenuhi persyaratan LOS untuk digunakan sebagai jalur transmisi antar STO.

Penentuan jarak *link* pada perancangan sistem FSO dilakukan berdasarkan hasil perhitungan *link power budget*, dengan tujuan memastikan daya terima masih berada di atas sensitivitas *receiver* pada berbagai kondisi atmosfer. Jarak *link* yang dipilih berada dibawah jarak maksimum yang masih memenuhi kriteria *link power budget*, sehingga sistem memiliki kecukupan daya untuk beroperasi secara andal.

Selain itu, hasil perhitungan menunjukkan bahwa meskipun terjadi peningkatan redaman atmosfer pada kondisi cuaca buruk, seluruh *link* masih menghasilkan daya terima dan parameter performansi sistem yang memenuhi batas minimum yang dipersyaratkan. Dengan demikian, jarak *link* yang dipilih dinilai layak secara teknis dan mampu mendukung operasional sistem FSO pada kondisi cuaca yang bervariasi.

Evaluasi kelayakan sistem FSO juga dilakukan berdasarkan hasil perhitungan *link power budget* dan parameter performansi sistem, yaitu *received power* (PRx), *signal-to noise ratio* (SNR), *Q-factor*, dan *bit error rate* (BER). Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai PRx pada seluruh *link* berada di atas sensitivitas *receiver*, baik pada perhitungan teoretis maupun hasil simulasi. Selain kecukupan daya, kualitas sinyal yang diterima juga memenuhi kriteria performansi sistem. Nilai SNR dan *Q-factor* berada di atas batas minimum, serta nilai BER berada di bawah batas maksimum yang diperbolehkan. Meskipun terjadi penurunan performansi pada kondisi cuaca dengan redaman tinggi, sistem masih mampu mempertahankan kualitas transmisi yang dapat diterima. Hal ini menunjukkan bahwa dari sisi *link power budget*, sistem FSO yang dirancang layak untuk diimplementasikan secara teknis.

Kelayakan implementasi sistem FSO dari sisi kapasitas ditinjau berdasarkan kemampuan kapasitas transmisi perangkat FSO yang digunakan. Perangkat FSO pada perancangan ini memiliki kapasitas maksimum hingga 10 Gbps sesuai dengan spesifikasi teknis, yang setara dengan kapasitas jaringan *fiber optic* pada level akses atau *backhaul*.

Dalam perancangan ini, sistem FSO difungsikan sebagai media transmisi antar Sentral Telepon Otomat (STO), sehingga berperan sebagai jaringan *backhaul* lokal dan bukan sebagai jaringan akses langsung ke pengguna. Dengan fungsi tersebut, kapasitas 10 Gbps dinilai mencukupi untuk mengakomodasi kebutuhan lalu lintas data antar STO serta mendukung kualitas layanan jaringan secara keseluruhan.

Seluruh *link* FSO dirancang dengan kapasitas transmisi yang seragam, sehingga tidak terjadi ketidakseimbangan kapasitas antar link yang berpotensi menimbulkan hambatan aliran data. Meskipun *fiber optic* memiliki keunggulan dalam hal kapasitas maksimum dan ketahanan terhadap kondisi cuaca, FSO menawarkan keunggulan dalam fleksibilitas *deployment*, waktu instalasi yang cepat, serta kemampuan menyediakan kapasitas tinggi tanpa penarikan kabel fisik.

Dengan mempertimbangkan karakteristik tersebut, sistem FSO dinilai layak digunakan sebagai alternatif, jalur cadangan (*backup*), maupun jalur redundan terhadap jaringan *fiber optic*. Meskipun memiliki keterbatasan terhadap kondisi cuaca dan kebutuhan LOS, FSO tetap memiliki potensi untuk dikembangkan dan dimanfaatkan sebagai bagian dari solusi jaringan transmisi di masa mendatang.

B. Pengujian *Network Management System* (NMS)

Fokus utama pengujian diarahkan untuk memvalidasi bahwa fungsi-fungsi krusial sistem, seperti *monitoring* status *link*, visualisasi topologi, serta prediksi performa jaringan berbasis kondisi cuaca, dapat beroperasi dengan benar pada kondisi operasional yang sesungguhnya. Rangkaian pengujian dilakukan dalam lingkungan jaringan dengan konektivitas internet stabil guna memastikan kelancaran komunikasi API ke sumber data cuaca dan *backend* prediksi, serta mencakup uji kompatibilitas pada berbagai perangkat dan peramban.

Secara spesifik, evaluasi dibagi menjadi dua tahap utama yaitu pengujian fitur pemantauan *real-time* yang mengintegrasikan data dari API Open-Meteo untuk menampilkan parameter lingkungan dan *availability* FSO, serta pengujian validasi fitur prediksi performa dengan rentang waktu bervariasi (saat ini, 24 jam, 5 hari, hingga 14 hari). Analisis hasil pengujian ini bertujuan untuk membuktikan konsistensi integrasi arsitektur sistem dalam menyajikan parameter teknis seperti PRx, BER, SNR, dan *availability* secara akurat. Hasil akhir dari tahapan ini menjadi tolak ukur kesiapan sistem NMS *BeamWatch* dalam mendukung operasional *monitoring* dan mitigasi jaringan FSO di wilayah Kota Bandung.

Dari pengujian yang dilakukan, seluruh tab prediksi berhasil menampilkan dipilih. sesuai dengan durasi waktu yang dipilih. Nilai rata-rata *availability* juga tampil sebagai informasi ringkasan performa, dan selama interaksi menggunakan tombol prediksi tidak ditemukan adanya error.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa *backend* prediksi bekerja secara konsisten dan data yang diterima berhasil divisualisasikan dengan baik. Hal ini membuktikan bahwa integrasi arsitektur antara *frontend*, API, dan model prediksi telah berjalan sesuai spesifikasi. Informasi yang ditampilkan tersebut membantu operator dalam menilai risiko penurunan kualitas layanan FSO pada periode mendatang.

TABEL 3
Rangkuman Hasil Pengujian *Network Management System* (NMS)

No	Spesifikasi	Realisasi	Terpenuhi / Tidak Terpenuhi
1	Sistem mampu menampilkan data cuaca realtime dari API	Data cuaca tampil lengkap & realtime	Terpenuhi
2	Sistem dapat menampilkan <i>availability</i> <i>Link</i> FSO pada tiap STO	<i>Availability</i> tampil sesuai <i>Link</i> yang dipilih	Terpenuhi
3	Sistem dapat menampilkan prediksi harian performa <i>Link</i>	Grafik harian tampil berdasarkan API cuaca	Terpenuhi
4	Sistem mampu memvisualisasikan prediksi hingga 14 hari	Prediksi 24 jam, 5 hari, 14 hari berjalan normal	Terpenuhi
5	Sistem menampilkan topologi antar STO pada peta	Network map berjalan dan interaktif	Terpenuhi

Berdasarkan serangkaian pengujian yang telah dilaksanakan, dapat disimpulkan bahwa seluruh spesifikasi utama yang ditetapkan telah berhasil dipenuhi dan berfungsi dengan baik. Dengan terpenuhinya standar tersebut, Sistem Web NMS *BeamWatch* dinyatakan siap digunakan untuk mendukung operasional *monitoring* serta mitigasi jaringan FSO di lingkungan Kota Bandung.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, perhitungan, dan simulasi sistem *Free Space Optics* (FSO) yang telah dilakukan, tugas akhir ini telah berhasil melakukan perancangan dan simulasi sistem FSO sebagai media transmisi antar Sentral Telepon Otomat (STO) di Kota Bandung. Evaluasi performansi sistem dilakukan melalui perhitungan *Link Power Budget* dan simulasi menggunakan perangkat lunak simulasi optik dengan parameter utama berupa *received power* (PRx), *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), *Q-Factor*, dan *Bit Error Rate* (BER) pada 5 kondisi cuaca yaitu cerah, hujan ringan, hujan sedang, hujan berat, dan berkabut.

Berdasarkan hasil perhitungan *Link Power Budget* dan simulasi, diperoleh bahwa pada seluruh kondisi cuaca yang dianalisis, didapatkan nilai *received power* (PRx) berada di atas batas sensitivitas *receiver* yang dipersyaratkan, yaitu ≥ -28 dBm. Hal ini menunjukkan bahwa sistem FSO yang dirancang masih mampu beroperasi secara andal meskipun terjadi peningkatan redaman atmosfer.

Parameter *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) menunjukkan bahwa seluruh link FSO memiliki nilai SNR ≥ 20 dB pada semua kondisi cuaca yang dianalisis. Nilai SNR mengalami penurunan seiring meningkatnya atenuasi atmosfer akibat hujan dan kabut, namun penurunan tersebut tidak menyebabkan degradasi kualitas sinyal di bawah batas minimum yang dipersyaratkan. Kesesuaian tren nilai SNR antara hasil perhitungan dan simulasi menunjukkan bahwa sistem FSO yang dirancang memiliki ketahanan yang baik terhadap variasi kondisi atmosfer.

Hasil evaluasi *Q-Factor* menunjukkan bahwa seluruh link FSO menghasilkan nilai *Q Factor* ≥ 6 , baik pada perhitungan *Link Power Budget* maupun pada hasil simulasi. Nilai *Q-Factor* yang diperoleh menunjukkan kualitas sinyal optik yang baik dan tingkat distorsi sinyal yang rendah. Meskipun terjadi penurunan nilai *Q-Factor* pada kondisi cuaca dengan redaman tinggi, seperti hujan berat, sistem tetap mampu mempertahankan performansi yang memenuhi standar kelayakan operasional.

Berdasarkan hasil analisis *Bit Error Rate* (BER), seluruh link FSO pada berbagai kondisi cuaca menghasilkan nilai BER yang lebih kecil dari batas maksimum yang diperbolehkan, yaitu $\leq 1 \times 10^{-9}$. Nilai BER yang rendah menunjukkan bahwa tingkat kesalahan bit pada sistem sangat kecil dan masih berada dalam kategori andal. Hasil simulasi menghasilkan nilai BER yang konsisten dengan hasil perhitungan *Link Power Budget*, sehingga dapat disimpulkan

bahwa kualitas transmisi data tetap terjaga meskipun terjadi peningkatan redaman akibat kondisi cuaca ekstrem.

Hasil perhitungan dan simulasi sistem FSO selanjutnya diolah pada *Network Management System* (NMS) *BeamWatch*, yang mampu menampilkan visualisasi performansi jaringan, kondisi cuaca, serta prediksi performansi link hingga 14 hari ke depan menggunakan model *machine learning*. Berdasarkan hasil pengujian, sistem mampu mencapai tingkat *availability* hingga $\geq 99\%$ sesuai dengan target perancangan.

Berdasarkan hasil pengujian *usability* oleh responden pengguna, sistem NMS *BeamWatch* memperoleh nilai rata-rata 89,3% pada aspek antarmuka pengguna, 90,1% pada aspek pengalaman pengguna, dan 91,8% pada aspek keandalan sistem. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem NMS yang dirancang berada pada kategori sangat baik dan layak digunakan sebagai alat bantu *monitoring* dan perencanaan jaringan FSO.

REFERENSI

- [1] A. Fayad, I. Pelle, and B. Sonkoly, "Harnessing Free Space Optics for Efficient 6G Fronthaul Networks: Challenges and Opportunities," *Engineering Reports*, vol. 7, no. 3, Mar. 2025, doi: 10.1002/eng2.70051.
- [2] G. I. Zuhdy, K. Sujatmoko, and D. M. Saputri, "Perancangan dan Analisis Sistem Komunikasi Free Space Optic pada Telkom University dan PT Telkomsel Regional Jawa Barat," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 8, no. 1, Feb. 2021.
- [3] D. Dania, A. Hambali, dan R. Satria, "Perancangan Dan Analisis Sistem Komunikasi Free Space Optics Untuk Layanan Seluler Di Margahayu Raya," *e-Proceeding Telkom University Open Library*, 2025.
- [4] J. S. Tarigan, E. S. Sugesti, and R. P. Astuti, "Analisis Perancangan jaringan backhaul serat optik untuk layanan komunikasi LTE penumpang kereta cepat Jakarta-Surabaya sub Pekalongan-Cepu," Apr. 01, 2022.
- [5] G. Riovaldy and S. Sembiring, "Analisis Efisiensi Cloud Computing di Universitas Advent Indonesia dengan Metode Rma (Reability, Maintainability, & Availability)," *jig.rivierapublishing.id*, Apr. 2025, doi: 10.58344/jig.v3i4.307.
- [6] F. J. Boge and M. Poznic, "Machine Learning and the Future of Scientific Explanation," *Journal for General Philosophy of Science*, vol. 52, no. 1, pp. 171–176, Mar. 2021, doi: 10.1007/s10838-020-09537-z.