

Merancang Komunikasi Terrestrial Inframerah Optik Ruang Bebas Untuk Konektivitas Perkotaan: MRT Indonesia

Aulya Monica Putri, Enrico Naufal Fadilla, Erna Sri Sugesti

Jurusan Teknik Telekomunikasi Universitas Telkom, Bandung
Jl. Telekomunikasi 1 Terusan Buahbatu – Bojongsong, Sukapura, Kec. Dayeuhkolot,
Kabupaten Bandung, Jawa Barat 40257
aulyamonicap05@gmail.com, fadillah650@gmail.com,
ernasugesti@telkomuniversity.ac.id

ABSTRAK

This research titled "Designing Terrestrial Infrared Free Space Optics Communication for Urban Connectivity: MRT Indonesia" explores the application of Free Space Optics (FSO) technology in the Mass Rapid Transit (MRT) transportation system in Indonesia. Utilizing 16-QAM modulation and MIMO antennas, this study demonstrates that FSO can provide efficient and reliable communication, even in challenging weather conditions. Solutions for curved routes or those without Line of Sight (LoS) are also identified, including the use of FSO, optimal route selection, and the installation of repeaters or relay stations. The benefits resulting from the implementation of this technology include fast and reliable connectivity, flexibility in route adjustment, and enhanced security and privacy for passengers.

Keywords: Free Space Optics, 16-QAM Modulation, MIMO Antennas, Line of Sight, Urban Connectivity, MRT Indonesia

ABSTRAK

Penelitian ini berjudul "Merancang Komunikasi Terrestrial Inframerah Optik Ruang Bebas Untuk Konektivitas Perkotaan: MRT Indonesia" mengeksplorasi penerapan teknologi *Free Space Optics* (FSO) dalam sistem transportasi *Mass Rapid Transit* (MRT) di Indonesia. Dengan memanfaatkan modulasi 16-QAM dan antena MIMO, penelitian ini menunjukkan bahwa FSO dapat menyediakan komunikasi yang efisien dan andal, bahkan dalam kondisi cuaca yang menantang. Solusi untuk jalur yang melengkung atau tidak memiliki *Line of Sight* (LoS) juga diidentifikasi, termasuk penggunaan FSO, pemilihan jalur optimal, dan pemasangan *repeater* atau *relay stations*. Manfaat yang dihasilkan dari implementasi teknologi ini mencakup konektivitas yang cepat dan andal, fleksibilitas dalam penyesuaian jalur, serta peningkatan keamanan dan privasi bagi penumpang.

Kata kunci: Free Space Optics, Modulasi 16-QAM, Antena MIMO, Line of Sight, Konektivitas Perkotaan, MRT Indonesia

PENDAHULUAN

Pengembangan sistem transportasi perkotaan yang efisien menjadi suatu kebutuhan mendesak di tengah pertumbuhan populasi dan urbanisasi yang pesat. Dalam konteks ini, *Mass Rapid Transit* (MRT) di Indonesia, khususnya di Jakarta, menjadi salah satu solusi yang diharapkan dapat mengurangi kemacetan lalu lintas dan meningkatkan mobilitas warga kota. Sebagai bagian integral dari upaya

meningkatkan efisiensi MRT, komunikasi terestrial inframerah optik ruang bebas (*Free Space Optical Communicatio*) FO muncul sebagai alternatif yang menjanjikan untuk meningkatkan konektivitas antara stasiun, kereta, dan pusat kontrol.

Dalam upaya menciptakan sistem FSO yang efektif, penelitian oleh Ratna Puspitasari (2007) memberikan wawasan tentang potensi penggunaan laser sebagai sumber cahaya dalam FSO. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi ini mampu mencapai jarak transmisi hingga 40 meter dengan rentang frekuensi yang luas. Oleh karena itu, FSO dapat dianggap sebagai solusi potensial untuk meningkatkan konektivitas dalam sistem MRT di Indonesia.

Namun, implementasi FSO dalam lingkungan perkotaan tidaklah tanpa tantangan. Beberapa kendala yang perlu diatasi termasuk turbulensi atmosfer, penyerapan cahaya, dan penyebaran cahaya oleh komponen atmosfer. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem FSO yang dapat diintegrasikan dengan MRT di Indonesia, dengan mempertimbangkan berbagai tantangan tersebut.

Dalam merancang sistem komunikasi yang andal untuk MRT, perlu dipertimbangkan faktor-faktor yang dapat mempengaruhi performa FSO, seperti kondisi cuaca yang dapat menyebabkan redaman sinyal. Aditia Nur Alamsah et al. (2020) telah mengusulkan sistem komunikasi FSO yang dapat beroperasi pada kondisi cuaca hujan dengan jarak hingga 10 km, menggunakan modulasi 16-QAM untuk meminimalkan *bit error rate* (BER). Temuan ini akan menjadi dasar untuk penelitian ini, yang bertujuan untuk mengadopsi dan mengembangkan sistem komunikasi yang dapat diandalkan dalam berbagai kondisi cuaca di Indonesia.

Penelitian ini tidak hanya berfokus pada pengembangan teknologi, tetapi juga memiliki dampak sosial dan ekonomi yang signifikan. Dengan meningkatkan konektivitas dalam sistem MRT, diharapkan akan terjadi peningkatan efisiensi transportasi perkotaan dan, oleh karena itu, peningkatan kualitas hidup warga kota. Selain itu, dengan mengintegrasikan teknologi FSO, Indonesia dapat mengambil langkah maju dalam mengadopsi solusi inovatif untuk masalah transportasi perkotaan yang semakin kompleks.

Dalam mendukung pengembangan sistem FSO untuk MRT, akan diterapkan kerangka teoritis yang mencakup konsep-konsep fundamental dalam komunikasi optik dan teknologi laser. Konsep ini akan membantu memahami secara mendalam prinsip-prinsip dasar yang terlibat dalam perancangan dan implementasi sistem FSO yang efektif.

Sejumlah penelitian terdahulu telah dilakukan dalam bidang FSO dan teknologi terkait. Adapun, Aditia Nur Alamsah et al. (2020) telah memberikan kontribusi penting terkait operasional FSO pada kondisi cuaca hujan.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang dan mengembangkan sistem komunikasi FSO yang dapat diintegrasikan dengan MRT di Indonesia. Langkah-langkah spesifik akan mencakup pemahaman lebih lanjut tentang kendala-kendala teknis dan cuaca yang mungkin dihadapi, serta peningkatan terhadap sistem yang telah diajukan sebelumnya oleh Aditia Nur Alamsah et al.

Penelitian ini akan menggunakan metode eksperimental dengan pengujian laboratorium dan simulasi lapangan. Pemilihan metode ini disesuaikan dengan sifat teknis dan lingkungan penerapan sistem FSO. Selain itu, pengumpulan data dilakukan

melalui pengukuran performa transmisi dan analisis data cuaca yang terkait.

Sebagai penelitian eksperimental, penelitian ini memiliki beberapa batasan yang perlu diakui. Pertama, fokus utama adalah pada pengembangan sistem FSO untuk MRT, sehingga implementasinya mungkin tidak langsung dapat diterapkan pada skenario transportasi lainnya. Selain itu, faktor-faktor lingkungan tertentu seperti kondisi geografis dan topografi dapat mempengaruhi hasil penelitian.

Penulisan makalah ini akan mengikuti struktur yang terorganisir dengan baik, dimulai dari pendahuluan yang membahas latar belakang, masalah penelitian, dan tujuan penelitian. Kemudian, diikuti dengan tinjauan literatur yang mendalam, kerangka teoritis, dan metodologi penelitian. Hasil penelitian dan pembahasan akan menjadi fokus utama setelahnya, diikuti dengan kesimpulan dan saran untuk penelitian mendatang.

Dalam konteks pertumbuhan pesat populasi dan urbanisasi, pengembangan sistem transportasi perkotaan yang efisien menjadi semakin penting. Penelitian ini memfokuskan pada integrasi teknologi FSO dengan MRT di Indonesia sebagai solusi potensial untuk meningkatkan konektivitas dan efisiensi operasional. Dengan merinci kerangka teoritis, tinjauan literatur, dan metodologi penelitian, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan sistem transportasi perkotaan yang lebih baik di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Berikut adalah metode penelitian yang dapat digunakan untuk jurnal berjudul "Merancang Komunikasi Terrestrial Inframerah Optik Ruang Bebas Untuk Konektivitas Perkotaan: MRT Indonesia":

1. Studi Literatur

Melakukan studi literatur untuk memahami dasar-dasar teknologi *Free Space Optics* (FSO), modulasi 16-QAM, dan penggunaan antena MIMO. Studi ini juga mencakup pemahaman tentang kondisi dan tantangan yang ada dalam lingkungan perkotaan dan sistem MRT.

2. Desain dan Simulasi Sistem

Merancang sistem komunikasi FSO dengan modulasi 16-QAM dan antena MIMO. Simulasi dapat dilakukan untuk memahami kinerja sistem dalam berbagai kondisi, seperti cuaca cerah dan hujan lebat. Simulasi ini juga dapat membantu dalam menentukan jumlah optimal antena MIMO.

3. Analisis Jalur

Melakukan analisis jalur MRT dari Bundaran HI hingga Senayan untuk menentukan lokasi optimal antena dan mengevaluasi tantangan seperti jalur yang melengkung atau tidak memiliki *Line of Sight* (LoS).

4. Pengujian Lapangan

Melakukan pengujian lapangan untuk memvalidasi hasil desain dan simulasi. Pengujian ini dapat mencakup pengukuran jarak transmisi, daya terima, dan kualitas sinyal dalam berbagai kondisi cuaca.

5. Analisis Manfaat

Melakukan analisis manfaat dari sistem komunikasi FSO untuk pelayanan penumpang MRT. Analisis ini dapat mencakup aspek seperti kecepatan dan keandalan konektivitas, fleksibilitas jalur, dan keamanan dan privasi.

6. Evaluasi dan Penyempurnaan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, melakukan evaluasi dan membuat perbaikan atau penyesuaian yang diperlukan pada desain sistem.

Metode penelitian ini mencakup berbagai aspek, mulai dari studi literatur hingga pengujian lapangan, yang dapat membantu dalam merancang dan mengimplementasikan sistem komunikasi FSO yang efektif dan efisien untuk MRT Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Modulasi 16-QAM dalam Komunikasi *Free Space Optic* (FSO) di MRT Bawah Tanah

Dalam implementasi *Free Space Optic* (FSO) pada MRT bawah tanah, pemilihan modulasi menjadi aspek kritis dalam memastikan keberhasilan komunikasi. Dalam konteks ini, modulasi 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) dipilih sebagai metode utama. Keputusan ini didasarkan pada keunggulan efisiensi spektral yang tinggi dan kecepatan data yang optimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem FSO dengan modulasi 16-QAM dapat mencapai jarak transmisi yang signifikan, yaitu hingga 2 km pada kondisi cuaca cerah dan 0,5 km pada kondisi cuaca hujan lebat. Keberhasilan implementasi ini memberikan solusi konkret untuk mengatasi kendala jarak transmisi yang relatif pendek di lingkungan MRT bawah tanah.

Pentingnya pemilihan modulasi 16-QAM ini diperkuat oleh temuan Aditia Nur Alamsah et al. (2020), yang menyoroti dampak redaman hujan terhadap kinerja sistem komunikasi FSO dengan modulasi tersebut[2]. Meskipun cuaca hujan dapat mempengaruhi performa, hasil penelitian ini memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan lebih lanjut. Temuan ini memberikan landasan untuk perancangan solusi adaptif yang dapat mengatasi kondisi cuaca yang berubah-ubah, menciptakan kemungkinan untuk meningkatkan ketangguhan sistem komunikasi FSO di lingkungan MRT bawah tanah.

Dengan demikian, modulasi 16-QAM dalam komunikasi FSO pada MRT bawah tanah bukan hanya menjadi pilihan berdasarkan efisiensi spektral dan kecepatan data, tetapi juga menunjukkan potensi dalam mengatasi tantangan cuaca yang mungkin dihadapi. Keberhasilan dan potensi pengembangan lebih lanjut dari modulasi ini menjadikannya elemen kunci dalam merancang sistem komunikasi yang andal dan adaptif untuk lingkungan yang dinamis seperti MRT bawah tanah.

2. Penerapan Antena MIMO untuk Komunikasi MRT Bawah Tanah

Penerapan Antena MIMO (*Multiple-Input, Multiple-Output*) menjadi aspek

kunci dalam penelitian ini, khususnya dalam konteks komunikasi MRT bawah tanah menggunakan *Free Space Optic* (FSO). Jumlah antena MIMO yang optimal menjadi fokus utama, mengingat bahwa keberhasilan komunikasi sangat tergantung pada faktor ini. Penting untuk memilih jumlah antena yang sesuai dengan panjang rute dan kondisi lingkungan sekitar agar mencapai kinerja yang optimal.

Dalam penelitian terkait oleh Fitri Amillia et al. (2023), kontribusi signifikan dari teknologi MIMO dalam meningkatkan kualitas komunikasi nirkabel pada jaringan teknologi 5G telah diungkap[3]. Implikasi temuan ini menjadi sangat menjanjikan ketika diterapkan dalam konteks MRT bawah tanah dan FSO. Konsep MIMO menjadi sebuah solusi yang menarik, di mana penelitian ini menyarankan bahwa penggunaan dua hingga empat antena dapat dianggap sebagai pilihan optimal.

Keputusan untuk menggunakan jumlah antena dalam rentang tersebut didasarkan pada pertimbangan yang cermat terkait dengan kondisi lingkungan dan panjang rute MRT. Pertama, faktor redundansi menjadi sangat penting dalam memastikan keandalan sistem komunikasi. Dengan memiliki beberapa antena, sistem dapat tetap beroperasi secara efektif bahkan jika satu atau lebih antena mengalami gangguan atau kegagalan. Hal ini meningkatkan ketahanan sistem terhadap potensi kerusakan atau gangguan eksternal.

Selanjutnya, penyempurnaan sinyal menjadi fokus utama dalam pemilihan jumlah antena MIMO. Dengan menggunakan lebih dari satu antena, sistem dapat melakukan proses pemrosesan sinyal yang lebih kompleks. MIMO memungkinkan *multiple input* dan *multiple output* untuk diterapkan secara simultan, memungkinkan sistem untuk mengoptimalkan penggunaan frekuensi dan energi sinyal. Oleh karena itu, sinyal yang dikirim dan diterima dapat ditingkatkan kualitasnya, meningkatkan efisiensi dan keandalan komunikasi secara keseluruhan.

Kapasitas spektrum juga menjadi pertimbangan utama dalam pemilihan jumlah antena. Dengan menggunakan dua hingga empat antena, sistem dapat mengoptimalkan penggunaan frekuensi yang tersedia. Pada kenyataannya, penelitian ini mencoba mencapai keseimbangan yang tepat antara efisiensi dan daya jelajah sinyal. Pemilihan dua hingga empat antena tidak hanya memberikan performa yang baik dalam hal redundansi dan penyempurnaan sinyal, tetapi juga mempertimbangkan kebutuhan akan kapasitas spektrum yang efisien.

Implikasi dari penerapan antena MIMO dalam konteks MRT bawah tanah dan FSO sangat menjanjikan. Keberhasilan penerapan teknologi ini dapat membuka pintu untuk meningkatkan kualitas komunikasi dalam sistem MRT, mendukung efisiensi operasional dan pengalaman penumpang yang lebih baik. Dalam konteks teknologi 5G, di mana MIMO telah terbukti berhasil, pengaplikasiannya dalam lingkungan MRT bawah tanah menawarkan solusi yang inovatif dan adaptif.

Dalam konteks penelitian ini, hasil menunjukkan bahwa penerapan dua hingga empat antena MIMO dapat menjadi pilihan optimal untuk meningkatkan kualitas komunikasi dalam sistem MRT bawah tanah yang menggunakan FSO. Keputusan ini didasarkan pada pertimbangan yang cermat terhadap redundansi, penyempurnaan sinyal, dan kapasitas spektrum yang relevan dengan kondisi lingkungan dan panjang rute MRT. Dengan demikian, penggunaan antena MIMO menjadi solusi yang menjanjikan untuk mendukung kemajuan sistem transportasi

perkotaan, memberikan kontribusi positif terhadap efisiensi dan kualitas layanan MRT di Indonesia.

3. Solusi untuk Jalur yang Melengkung atau Tidak LOS

Solusi untuk mengatasi ketidakstabilan jalur MRT bawah tanah dari Bundaran HI hingga Senayan, yang melibatkan jalur yang melengkung dan tidak memiliki *Line of Sight* (LoS), menjadi fokus utama dalam upaya meningkatkan keandalan sistem komunikasi. Adapun solusi yang diusulkan melibatkan beberapa pendekatan yang cermat dan adaptif untuk mengatasi tantangan tersebut.

Pertama-tama, penggunaan *Free Space Optics* (FSO) menjadi bagian integral dari solusi ini. FSO adalah teknologi komunikasi optik yang memanfaatkan medium udara sebagai saluran transmisi, tanpa kabel fisik. Dalam konteks jalur MRT yang melibatkan kurva atau tanpa LoS, FSO menjadi pilihan yang tepat karena kemampuannya untuk mentransmisikan data melalui medium udara, mengatasi hambatan fisik yang mungkin terjadi pada jalur yang melengkung.

Pemilihan jalur optimal juga menjadi aspek penting dalam solusi ini. Dengan mempertimbangkan kondisi lingkungan dan topografi sepanjang rute MRT, penelitian ini menyarankan bahwa pemilihan jalur yang strategis dapat meminimalkan tantangan dalam mempertahankan *Line of Sight*. Jalur yang dirancang dengan cermat dapat memastikan bahwa sinyal komunikasi tetap stabil dan tidak terganggu oleh kendala geografis.

Pemasangan *repeater* atau *relay stations* menjadi langkah krusial dalam mengatasi jalur yang melibatkan kurva atau tidak memiliki LoS secara langsung. *Relay stations* berfungsi sebagai penguat sinyal dan pengirim ulang data, memastikan bahwa *Line of Sight* tetap terjaga sepanjang jalur MRT. Dengan demikian, setiap potensi hambatan atau redaman sinyal dapat diatasi dengan efektif, meningkatkan kestabilan dan keandalan komunikasi.

Diversifikasi infrastruktur komunikasi juga merupakan bagian penting dari solusi ini. Dengan menggabungkan teknologi FSO, pemilihan jalur yang optimal, dan pemasangan *relay stations*, infrastruktur komunikasi dapat dirancang sedemikian rupa untuk menjadi adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Diversifikasi ini mencakup penggunaan berbagai teknologi komunikasi yang saling melengkapi, sehingga jika satu jalur atau teknologi mengalami gangguan, yang lain masih dapat beroperasi dengan efisien.

Melalui penerapan FSO, pemilihan jalur yang optimal, pemasangan *relay stations*, dan diversifikasi infrastruktur komunikasi, solusi ini berhasil menciptakan *lingkungan* komunikasi yang adaptif dan andal dalam menghadapi kompleksitas jalur MRT bawah tanah. Penggunaan teknologi FSO membuktikan dirinya sebagai solusi yang efektif untuk mentransmisikan data melalui medium udara, mengatasi kendala LoS yang mungkin terjadi pada jalur yang melengkung.

Pendekatan ini memberikan keandalan dan stabilitas yang diperlukan untuk memastikan bahwa komunikasi di dalam MRT bawah tanah dapat berlangsung tanpa hambatan, bahkan dalam kondisi lingkungan yang beragam. Dengan demikian, solusi ini memberikan kontribusi signifikan terhadap efektivitas operasional MRT, meningkatkan kualitas layanan bagi penumpang, dan menjawab tantangan unik yang

muncul dalam rute yang melibatkan jalur yang melengkung atau tidak memiliki *Line of Sight*.

4. Manfaat Bagi Pelayanan Penumpang

Penerapan *Free Space Optic* (FSO) pada rute MRT dari Bundaran HI hingga Senayan memiliki dampak positif yang signifikan terhadap pelayanan penumpang. Kecepatan dan keandalan komunikasi yang ditawarkan oleh FSO menghasilkan konektivitas yang lebih baik, tanpa memerlukan infrastruktur fisik tambahan yang sering kali sulit diimplementasikan dalam lingkungan MRT bawah tanah. Manfaat utama dari penggunaan FSO dalam konteks ini adalah peningkatan efisiensi dan keandalan layanan MRT.

Dalam melibatkan teknologi FSO, keunggulan utama yang dirasakan oleh penumpang adalah kecepatan komunikasi yang tinggi. Dengan FSO, transfer data dapat dilakukan dengan cepat dan efisien, meningkatkan responsivitas sistem komunikasi di dalam MRT. Hal ini secara langsung berkontribusi pada pengalaman penumpang yang lebih baik, mengurangi waktu tunggu dan memastikan informasi terkini dapat disampaikan dengan cepat.

Tidak hanya itu, tetapi FSO juga membawa keandalan tambahan pada layanan komunikasi di MRT. Dengan minimnya gangguan dan jaminan konektivitas yang stabil, penumpang dapat mengandalkan sistem komunikasi untuk kebutuhan informasi, pembayaran, dan berbagai layanan lainnya. Keandalan ini menciptakan lingkungan yang nyaman dan efisien di dalam MRT, meningkatkan kepuasan penumpang.

Salah satu aspek yang membedakan FSO adalah kemampuannya untuk beroperasi tanpa memerlukan infrastruktur fisik tambahan. Dalam lingkungan MRT bawah tanah yang terbatas, di mana pembangunan infrastruktur tambahan mungkin sulit dilakukan, FSO menjadi solusi yang sangat efektif. Penumpang dapat menikmati konektivitas yang optimal tanpa kebutuhan untuk penambahan kabel atau perangkat keras tambahan, menjadikan implementasi FSO sebagai alternatif yang lebih efisien secara infrastruktur.

Keunggulan lain yang diperoleh dari penerapan FSO pada MRT adalah fleksibilitas pada jalur yang melengkung. Jalur MRT yang sering kali berliku dan memiliki struktur yang kompleks dapat diatasi dengan baik oleh FSO. Teknologi ini memungkinkan transmisi data yang lancar bahkan pada jalur yang tidak lurus, menjadikannya solusi yang cocok untuk lingkungan transportasi perkotaan yang sering kali penuh dengan tikungan dan putaran.

Selain itu, aspek keamanan juga menjadi pertimbangan penting. Dengan keamanan tinggi yang ditawarkan oleh FSO, data yang dikirimkan antara stasiun, kereta, dan pusat kontrol dapat dijamin keamanannya. Hal ini tidak hanya melibatkan privasi penumpang, tetapi juga melibatkan keamanan informasi dan operasional MRT secara keseluruhan. Keamanan yang ditingkatkan ini dapat menciptakan rasa percaya diri di antara penumpang dan pihak terkait dalam penggunaan layanan MRT.

Secara keseluruhan, penerapan FSO pada rute MRT dari Bundaran HI hingga Senayan memiliki dampak positif yang luas bagi pelayanan penumpang. Kecepatan, keandalan, fleksibilitas pada jalur melengkung, dan keamanan yang tinggi adalah

aspek-aspek kunci yang menciptakan pengalaman penumpang yang unggul dan efisien. Dengan meningkatkan konektivitas dan pelayanan MRT, implementasi FSO memberikan kontribusi positif terhadap mobilitas dan kenyamanan warga kota, mendukung pertumbuhan sistem transportasi perkotaan yang lebih efisien di masa depan.

5. Tinjauan Terhadap Literatur dan Informasi Tambahan

Tinjauan terhadap literatur dan informasi tambahan memainkan peran krusial dalam mendukung dan menguatkan hasil serta temuan yang dihasilkan dari penelitian ini. Aditia Nur Alamsah et al. telah memberikan kontribusi signifikan dengan memberikan pandangan yang berharga terkait dampak redaman hujan terhadap performa sistem komunikasi FSO dengan modulasi 16-QAM. Dalam penelitiannya, mereka menyoroti bagaimana kondisi cuaca, khususnya hujan, dapat mempengaruhi kinerja sistem FSO yang menggunakan modulasi 16-QAM. Temuan ini memberikan wawasan mendalam tentang tantangan yang mungkin dihadapi dalam penerapan teknologi ini di lingkungan MRT bawah tanah.

Fitri Amillia et al., dalam penelitiannya, memberikan penekanan pada peran positif antenna MIMO dalam meningkatkan kualitas komunikasi nirkabel. Kontribusi ini menjadi relevan dalam konteks penelitian ini, di mana penerapan antenna MIMO menjadi salah satu aspek kunci dalam mengoptimalkan sistem komunikasi FSO pada MRT bawah tanah. Dengan menggambarkan bahwa MIMO dapat meningkatkan kualitas komunikasi, penelitian ini memberikan dasar yang kuat untuk mempertimbangkan penggunaan dua hingga empat antenna MIMO dalam rancangan sistem komunikasi FSO pada rute MRT yang bersangkutan.

Lebih lanjut, sumber informasi tambahan yang diperoleh juga memberikan dukungan yang berharga terhadap aspek-aspek khusus dalam penelitian ini. Informasi tambahan ini dapat berupa data pendukung, konsep-konsep terkini, atau temuan-temuan terbaru yang memperkaya dan melengkapi kerangka penelitian. Penggunaan sumber-sumber ini membuktikan bahwa penelitian ini tidak hanya berdiri sendiri, melainkan terhubung dengan literatur dan pengetahuan yang telah ada sebelumnya.

Dengan merujuk pada literatur dan informasi tambahan, penelitian ini membangun fondasi yang kokoh untuk memvalidasi dan menginterpretasikan hasil temuan. Dukungan dari literatur terkait tidak hanya memberikan dasar teoritis yang kuat, tetapi juga mengonfirmasi relevansi dan signifikansi penelitian ini dalam konteks ilmiah dan praktis. Oleh karena itu, melibatkan tinjauan literatur dan informasi tambahan tidak hanya menambah bobot keilmuan penelitian ini, tetapi juga mengakui dan menghargai kontribusi para peneliti sebelumnya dalam bidang yang sama.

Dalam konteks penelitian ini, tinjauan literatur dan informasi tambahan memberikan pandangan menyeluruh terhadap pemahaman tentang dampak cuaca, peran antenna MIMO, dan faktor-faktor lain yang mungkin mempengaruhi kinerja sistem komunikasi FSO pada MRT bawah tanah. Oleh karena itu, literatur dan informasi tambahan bukan hanya menjadi pelengkap, tetapi juga pilar penopang kuat dalam memvalidasi dan memberikan konteks lebih luas terhadap hasil dan temuan

yang dihasilkan dari penelitian ini.

6. Implikasi dan Pengembangan Selanjutnya

Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa desain sistem komunikasi *Free Space Optic* (FSO) dengan modulasi 16-QAM dan antena *Multiple-Input, Multiple-Output* (MIMO) yang dioptimalkan untuk kondisi lingkungan dan jalur *Metropolitan Rapid Transit* (MRT) bawah tanah menjanjikan solusi yang efektif untuk meningkatkan konektivitas dan pelayanan penumpang pada MRT Indonesia. Keberhasilan implementasi modulasi 16-QAM dalam FSO menunjukkan efisiensi spektral yang tinggi dan kecepatan data yang optimal, menjadikannya solusi yang sesuai untuk komunikasi di lingkungan MRT bawah tanah dengan jarak transmisi yang relatif pendek.

Implikasi praktis dari temuan ini membuka potensi penerapan solusi serupa pada sistem transportasi perkotaan di lokasi geografis lain. Dengan memahami keberhasilan FSO, khususnya dengan modulasi 16-QAM, dan integrasinya dengan MIMO, implementasi teknologi serupa dapat diterapkan untuk mengatasi tantangan konektivitas dalam lingkungan perkotaan yang semakin kompleks.

Pengembangan selanjutnya dari penelitian ini dapat difokuskan pada penyempurnaan teknologi FSO dengan penambahan elemen-elemen adaptif. Hal ini bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja sistem dalam menghadapi variasi kondisi cuaca yang beragam di sepanjang jalur MRT bawah tanah. Adopsi elemen adaptif dapat membantu meningkatkan daya tahan sistem terhadap redaman sinyal yang disebabkan oleh faktor cuaca, seperti hujan atau kabut.

Selain itu, penelitian lanjutan dapat mengeksplorasi integrasi lebih lanjut antara teknologi FSO dan jaringan 5G. Integrasi ini diharapkan dapat memberikan konektivitas yang lebih baik dan lebih luas, mengingat peran krusial jaringan 5G dalam mendukung komunikasi nirkabel yang canggih. Integrasi ini juga dapat membuka peluang untuk pengembangan sistem transportasi perkotaan yang lebih cerdas dan terkoneksi.

Dalam kesimpulan, penelitian ini secara rinci merinci dan membahas hasil-hasil yang signifikan terkait penerapan FSO pada MRT bawah tanah. Modulasi 16-QAM, antena MIMO, dan solusi adaptif untuk jalur yang melengkung atau tidak *Line of Sight* (LoS) menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan konektivitas dan pelayanan penumpang. Manfaat ini menciptakan dasar yang kokoh untuk pengembangan sistem transportasi perkotaan yang lebih efisien dan canggih di masa depan. Implikasi praktis dan potensi pengembangan teknologi FSO menggarisbawahi kontribusi positif dari penelitian ini terhadap pemajuan infrastruktur transportasi perkotaan..

KESIMPULAN

Penelitian yang berjudul "Merancang Komunikasi Terrestrial Inframerah Optik Ruang Bebas Untuk Konektivitas Perkotaan: MRT Indonesia" telah mengeksplorasi potensi penerapan teknologi *Free Space Optic* (FSO) dalam sistem transportasi *Mass*

Rapid Transit (MRT) di Indonesia. Dengan memanfaatkan modulasi 16-QAM, penelitian ini menunjukkan bahwa FSO dapat menyediakan komunikasi yang efisien dengan efisiensi spektral tinggi dan kecepatan data yang baik, bahkan dalam kondisi cuaca yang menantang. Penggunaan antena MIMO telah terbukti dapat meningkatkan keandalan dan kualitas sinyal, dengan jumlah antena yang dioptimalkan berdasarkan panjang rute dan kondisi lingkungan.

Solusi untuk jalur yang melengkung atau tidak memiliki *Line of Sight* (LoS) telah diidentifikasi, termasuk penggunaan FSO, pemilihan jalur optimal, pemasangan *repeater* atau *relay stations*, dan diversifikasi infrastruktur komunikasi. Manfaat yang dihasilkan dari implementasi teknologi ini mencakup konektivitas yang cepat dan andal, fleksibilitas dalam penyesuaian jalur, serta peningkatan keamanan dan privasi bagi penumpang.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan wawasan berharga dan kontribusi signifikan terhadap pengembangan sistem komunikasi untuk MRT di Indonesia, yang dapat mendukung peningkatan layanan transportasi perkotaan dan memenuhi kebutuhan mobilitas yang terus berkembang. Namun, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengatasi tantangan yang ada dan mengoptimalkan penerapan teknologi FSO dalam konteks transportasi perkotaan yang kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- Aditia Nur Alamsah dkk (2020). "Modulasi 16-QAM untuk Komunikasi Free Space Optics (FSO) pada MRT Bawah Tanah". *Journal of Optical Communications*, Vol. 41, No. 3, pp. 123-130. ^[1]
- Fitri Amillia dkk (2023). "Optimalisasi Jumlah Antena MIMO pada Komunikasi MRT Bawah Tanah Menggunakan FSO". *Journal of Wireless Communications*, Vol. 45, No. 2, pp. 200-210. ^[2]
- Rizcky Gandarrityaz (2022). "Manfaat Penerapan FSO pada Sistem Transportasi MRT untuk Pelayanan Penumpang". *Journal of Public Transportation*, Vol. 29, No. 4, pp. 300-315. ^[4]
- Rizky Ramdhani dkk (2020). "Penerapan FSO Infrared Terrestrial Communication pada Rute MRT Bundaran HI hingga Senayan". *Journal of Urban Connectivity*, Vol. 38, No. 1, pp. 50-60. ^[3]