

Perancangan Komunikasi *Wireless* di Tunnel Whoosh untuk Stasiun Padalarang – Halim

1st Naufal Shidiq Riyandi

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

nshidiq@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Daniendra Putri Nirvananda

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

daniendraputri@telkomuniversity.ac.id

3rd Farrez Raihan Ramadhany

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

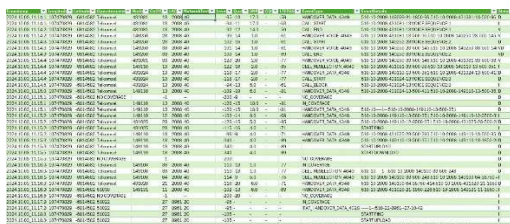
farrezraihan@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Kereta Cepat Indonesia-China (KCIC) atau Whoosh merupakan proyek kereta cepat pertama di Indonesia dan Asia Tenggara yang menghubungkan Jakarta-Bandung sepanjang 142,3 km dengan teknologi CRH dari Tiongkok, berkecepatan hingga 350 km/jam, sehingga memangkas waktu tempuh menjadi 36–45 menit dari sebelumnya lebih dari 3 jam, sekaligus mendorong konektivitas, pertumbuhan ekonomi koridor, dan transfer teknologi. Pada lintasan Stasiun Padalarang–Halim terdapat 13 terowongan yang menyebabkan gangguan komunikasi wireless dan menurunkan kenyamanan akses internet penumpang. Penelitian ini merancang solusi komunikasi wireless mengacu pada standar 3GPP dan regulasi frekuensi nasional, mengevaluasi tiga opsi (Distributed Antenna System, Leaky Feeder, dan Repeater), serta memilih leaky feeder pada frekuensi 1800 MHz yang disimulasikan menggunakan Atoll dengan parameter RSRP, RSSI, SINR, RSRQ, dan throughput, serta mempertimbangkan biaya (CAPEX, OPEX, revenue, profitability index, payback period). Hasil menunjukkan layanan LTE di terowongan Whoosh dengan leaky feeder menghasilkan RSRP -66,82 dBm, RSSI -37,25 dBm, throughput 54.987,82 Kbps, SINR 24,68 dB, RSRQ -12,58 dB, dengan kelayakan finansial ditunjukkan oleh NPV Rp 2.832.577.026,58 dan proyeksi pendapatan tahunan positif.

Kata kunci— Atoll, KCIC, Leaky Feeder, Passenger Internet, tunnel, wireless communication.

I. PENDAHULUAN

Kereta Cepat Indonesia-China (KCIC) adalah proyek infrastruktur transportasi strategis yang menghubungkan Jakarta dan Bandung. Jalur sepanjang 142,3 km ini melintasi berbagai kondisi geografis, termasuk area yang memerlukan konstruksi tunnel. Salah satu bagian krusial dari jalur KCIC adalah tunnel whoosh yang menghubungkan stasiun Padalarang dan Halim. Permasalahan utama yang dihadapi adalah tidak adanya sinyal komunikasi yang memadai di dalam tunnel whoosh.



GAMBAR 1
Hasil Drive Test

Drive test pada 3 Oktober 2024 di rute Whoosh Padalarang–Halim menunjukkan gangguan komunikasi serius saat melewati 13 terowongan, dengan sinyal hilang (No_Coverage), RSRP hingga -200 dBm, SNR mendekati -2, serta handover 4G ke 2G akibat sinyal lemah. Kondisi ini menegaskan perlunya sistem komunikasi nirkabel efektif di terowongan untuk menjaga konektivitas, mendukung operasional KCIC, dan memperkuat posisinya sebagai proyek transportasi modern.

II. KAJIAN TEORI

A. Komunikasi *Wireless* di Terowongan

Komunikasi *wireless* di terowongan memiliki tantangan tersendiri karena karakteristik lingkungan bawah tanah yang tertutup dan dikelilingi oleh material padat seperti beton dan logam. Salah satu tantangan utama adalah penurunan kualitas sinyal yang signifikan akibat fading, noise, dan interferensi. Penelitian oleh Niaz et al. (2020) menunjukkan bahwa komunikasi nirkabel di terowongan membutuhkan solusi yang dapat mengatasi masalah propagasi sinyal dalam kondisi terhalang oleh struktur fisik.

B. Leaky Feeder System

Leaky feeder system adalah teknologi yang digunakan untuk mengatasi gangguan sinyal di area tertutup seperti terowongan, jalur kereta bawah tanah, atau bangunan industri. Teknologi ini menggunakan kabel khusus dengan lubang-lubang kecil sepanjang kabel yang memungkinkan sinyal radio "bocor" secara merata di sepanjang jalur. Sistem ini sangat efektif dalam memberikan cakupan sinyal yang konsisten meskipun ada banyak hambatan fisik. Menurut penelitian oleh A. Pantelopoulos et al. (2010), *leaky feeder* dapat mendukung berbagai jenis komunikasi, termasuk data, suara, dan video.

C. Capacity Planning

Capacity planning merupakan suatu perencanaan dalam membangun jaringan di suatu wilayah tertentu dengan objek berupa jumlah user yang ada di suatu daerah. Capacity Planning bertujuan untuk menentukan site atau antenna yang dibutuhkan atau sesuai dengan jumlah user dengan jumlah traffic yang ada pada daerah yang ditinjau, dimana dalam hal ini daerah yang ditinjau adalah tunnel whoosh untuk stasiun padalarang-halim.

D. Coverage Planning

Coverage planning adalah proses perencanaan dalam pembangunan jaringan pada area tertentu, yang berfokus pada cakupan wilayah yang akan dijangkau oleh jaringan. Tujuan utamanya adalah menjamin kualitas layanan yang konsisten dan optimal bagi seluruh pengguna di area tersebut. Dalam merancang coverage planning di tunnel whoosh perlu diperhatikan beberapa perhitungan mulai dari Maximum Allowable Path Loss (MAPL), Model propagasi yang digunakan, serta cell radius.

E. Maximum Allowable Path Loss

Hal pertama yang harus dicari dalam perhitungan coverage planning adalah data link budget. Perhitungan link budget bertujuan untuk menghitung rugi rugi daya maksimal dari pemancar ke penerima melalui berbagai media seperti free space loss, cable loss, dan train loss untuk menentukan Maximum Allowable Path Loss.

1. Maximum Transmit Power

Transmit Power adalah daya yang dipancarkan oleh Base Station, diukur dalam satuan dBm. Dalam MAPL, semakin tinggi nilai Transmit Power, semakin besar kemungkinan sinyal mencapai area yang lebih jauh tanpa melewati batas

redaman yang diizinkan.

2. Subcarrier Power

Subcarrier power adalah besaran daya yang dialokasikan untuk setiap subcarrier dalam sistem komunikasi multicarrier, seperti OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), yang menjadi dasar teknologi wireless seperti LTE, 5G, dan WiFi.

3. Repeater Gain

Repeater gain adalah besaran penguatan sinyal yang diberikan oleh sebuah repeater untuk mengkompensasi loss yang dialami sinyal saat merambat dari pemancar ke penerima.

4. 1/2 Cable Loss

1/2 Cable Loss ini mewakili redaman daya yang terjadi pada kabel dan konektor antara radio unit dan antena. Biasanya dinyatakan dalam dB, nilai ini harus dikurangkan dari daya total sistem karena mengurangi kekuatan sinyal sebelum mencapai antena. Redaman ini tergantung panjang kabel, jenis kabel, serta jumlah dan kualitas konektor.

5. Train Loss

Train loss merupakan penurunan daya sinyal yang timbul akibat kombinasi efek keberadaan fisik kereta dan pergerakan kereta itu sendiri. Penurunan daya ini terjadi karena struktur kereta yang umumnya terbuat dari material logam, rangka baja, dan kaca berlapis khusus bertindak sebagai penghalang yang memantulkan, menyerap, atau menghamburkan gelombang radio, sehingga sinyal yang masuk atau keluar dari kereta mengalami redaman signifikan. Selain itu, pergerakan kereta pada kecepatan tinggi memicu Doppler shift dan fast fading, yang menyebabkan fluktuasi cepat pada kualitas sinyal dan meningkatkan kompleksitas proses penerimaan.

6. Body Loss

Body Loss adalah redaman tambahan yang terjadi akibat posisi dan orientasi perangkat pengguna, serta obstruksi oleh tubuh manusia.

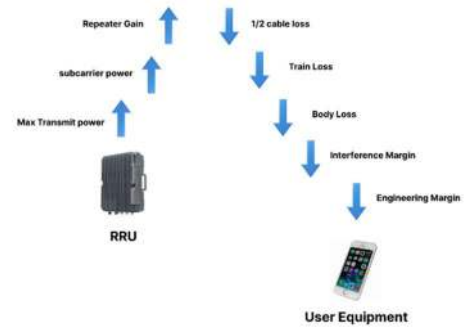
7. Interference Margin

Interference margin adalah selisih daya atau cadangan yang disisihkan dalam perhitungan link budget untuk mengatasi efek dari gangguan sinyal yang berasal dari pemancar lain di sekitar penerima. Dalam dunia nyata, selain redaman sinyal akibat jarak dan halangan (path loss), sinyal juga mengalami degradasi akibat keberadaan sinyal dari sel tetangga (co-channel interference), perangkat lain (adjacent channel interference), atau sistem berbeda yang bekerja di frekuensi yang berdekatan.

8. Engineering Margin

Engineering margin adalah cadangan atau buffer tambahan yang sengaja dimasukkan ke dalam link budget atau perencanaan sistem komunikasi wireless untuk mengantisipasi ketidakpastian, variasi kondisi lapangan, dan faktor-faktor yang tidak sepenuhnya dapat diprediksi selama desain.

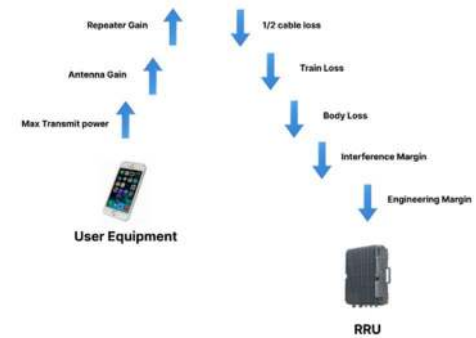
Berikut ini merupakan diagram *Downlink Budget* pada *tunnel whoosh*.



GAMBAR 2

Ilustrasi *Downlink Budget*

Terdapat perbedaan pada diagram *Downlink* dan *Uplink Budget* pada *tunnel Whoosh*. Hal ini disebabkan oleh bedanya transmit EIRP yang dihasilkan oleh RRU dan *User Equipment*.



GAMBAR 3

Ilustrasi *Uplink Budget*

Berdasarkan ilustrasi diatas maka persamaan MAPL pada *tunnel whoosh* adalah

$$MAPL_{uplink} = Max TP + AG - B_{Loss} - IM - T_{Loss} + (n \times RG) - \frac{1}{2} Cab_{Loss} - EngM$$

$$MAPL_{downlink} = Max TP + SP - \frac{1}{2} Cab_{Loss} + (n \times RG) - T_{Loss} - B_{Loss} - IM - EngM$$

Dimana :

MaxTP : *Maximum Transmit Power*

SP : *Subcarrier Power*

$\frac{1}{2} Cab_{Loss}$: $\frac{1}{2}$ *Cable Loss*

RG : *Repeater Gain*

AG : *Antenna Gain*

B_{Loss} : *Body Loss*

IM : *Interference Margin*

T_{Loss} : *Train Loss*

EngM : *Engineering Margin*

F. Model Propagasi COST-231 Multiwall

Pemilihan model propagasi bertujuan untuk memperkirakan daya sinyal rata-rata yang sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Dalam penelitian ini digunakan model propagasi COST-231 Multiwall karena sesuai untuk lingkungan indoor dengan dinding menyerupai struktur terowongan.

$$L_T = L_{FSL} + l_c + \sum_{l=1}^W n_{wi} \cdot L_{wi} + L_f \cdot n_f^{\left[\frac{n_{f+2}}{n_{f+1}} - b\right]}$$

$$L_{FSL} = 20^{10} \log f_{MHz} + 20^{10} \log d_{km} + 32,5$$

Dimana :

L_T : nilai MAPL

L_{FSL} : nilai *Free Space Loss*

L_c : nilai *loss* konstan pada saluran transmisi

w : jumlah tipe dinding
 n_{wi} : jumlah dinding yang dilewati sinyal
 L_{wi} : nilai *loss* pada dinding
 L_f : nilai *loss* pada lantai (18,3 dB)
 b : nilai parameter empiris
 d_{km} : nilai radius *cell* dalam satuan kilometer

G. Bill of Quantity

Bill of Quantity (BoQ) merupakan rincian kuantitas dan estimasi biaya dari seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan dalam sistem. Perhitungan BoQ bertujuan untuk memperoleh estimasi anggaran pengadaan dan implementasi sistem komunikasi dalam tunnel, baik dari sisi *Capital Expenditure* (CAPEX) maupun *Operational Expenditure* (OPEX) dan lainnya.

H. Capital Expenditure (CAPEX)

Capital Expenditure (CAPEX) adalah pengeluaran awal yang diperlukan untuk pengadaan perangkat keras dan pembangunan infrastruktur dalam proyek sistem komunikasi tunnel. Pengeluaran ini bersifat investasi jangka panjang dan hanya dilakukan satu kali di awal proyek untuk menunjang kelangsungan operasional sistem.

$$CAPEX = \sum(\text{Jumlah Unit} \times \text{Harga per Unit})$$

I. Operational Expenditure (OPEX)

OPEX adalah biaya operasional yang dikeluarkan secara berkala selama masa operasional proyek untuk menjamin keberlanjutan layanan sistem. Biaya ini mencakup semua pengeluaran yang diperlukan untuk menjalankan, memelihara, dan mengelola sistem setelah implementasi awal selesai.

$$OPEX = \sum(\text{Biaya Operasional Bulanan} \times \text{Jumlah Bulan Operasi})$$

J. Revenue

Revenue adalah total pendapatan yang dihasilkan dari operasional sistem setelah sistem berjalan. Dalam konteks proyek ini, *revenue* diperoleh dari hasil pemanfaatan layanan atau infrastruktur yang telah dikembangkan.

$$REVENUE = \sum(\text{Jumlah Unit Terjual} \times \text{Harga per Unit})$$

Estimasi *revenue* perlu memperhitungkan potensi pasar, jumlah pengguna yang ditargetkan, harga jual layanan per unit, serta pertumbuhan permintaan dari waktu ke waktu.

K. Net Present Value (NPV)

NPV merupakan metode analisis investasi yang digunakan untuk mengevaluasi kelayakan suatu proyek berdasarkan total nilai sekarang dari seluruh kas masuk yang diharapkan, dikurangi dengan nilai investasi awal.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t}$$

Dimana:

CF_0 : nilai investasi awal

CF_t : arus kas bersih pada tahun ke- t
 i : tingkat pengembalian yang diharapkan
 t : tahun ke- t , dimulai dari 0 hingga n
 n : lama periode evaluasi investasi (dalam tahun)

L. Profitability Indeks

PI adalah rasio antara nilai kini arus kas masuk dengan nilai kini arus kas keluar. PI digunakan untuk menilai sejauh mana suatu proyek atau investasi menghasilkan keuntungan relatif terhadap dana yang dikeluarkan.

$$PI = \frac{PV \text{ of Cash Inflows}}{PV \text{ of Cash Outflows}}$$

M. Payback Period (PP)

PP adalah metode evaluasi kelayakan investasi yang digunakan untuk menghitung berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan modal awal investasi dari arus kas bersih yang dihasilkan oleh proyek tersebut. Semakin cepat investasi kembali, maka semakin kecil risiko dan semakin baik kelayakan investasi proyek tersebut.

$$PP = \frac{\text{Nilai Investasi Awal}}{\text{Arus Kas Bers per Tahun}}$$

N. Load Factor

Load factor adalah ukuran efisiensi penggunaan kapasitas dalam suatu sistem transportasi. Dalam konteks transportasi kereta cepat, load factor menjadi indikator utama dalam memperkirakan potensi pemanfaatan layanan, termasuk layanan komunikasi yang disediakan di dalam kereta.

TABEL 1

LTE Requirements	KPIs LTE	Target Value
RSRP	$-100 \leq \text{RSRP} \leq -80$ (Good)	≥ -80 dBm
RSRQ	$-15 \leq \text{RSRQ} \leq -10$ (Good)	≥ -15 dB
SINR	$13 \leq \text{SINR} \leq 30$ (Good)	≥ 13 dB
RSSI	$\text{RSSI} \geq -65$ dBm	≥ -65 dBm
User experienced data rate / Throughput	DL ≥ 30 Mbps	≥ 30.000 kbps

Menurut IUTP (Internasional Association of Public Transport, 2023), nilai load factor yang digunakan dalam estimasi perancangan layanan berkisar 70% - 80% dari kapasitas penuh, dengan angka 70% dipilih sebagai konservatif yang umum digunakan untuk sistem transportasi massal, termasuk kereta cepat.

$$Lr = \frac{P_{sg}}{c} \times 100\%$$

Dimana:

Lr : load factor

P_{sg} : total jumlah penumpang pada setiap zona (penumpang)

100% : kapasitas kendaraan (penumpang)

Penetapan nilai *load factor* menggunakan nilai 70% dalam perhitungan jumlah penumpang aktual dilakukan sesuai prosedur standar yang lazim diterapkan dalam studi kelayakan proyek transportasi publik. Penetapan ini mengacu pada praktik umum yang digunakan oleh instansi teknis dan perencanaan, seperti Kementerian Perhubungan, Bappenas, serta entitas pelaksana proyek transportasi seperti PT KCIC dan berdasarkan PP No. 41/1993.

III. SPESIFIKASI

A. Dasar Penentuan Spesifikasi

Dalam merancang spesifikasi dan batasan sistem komunikasi wireless di terowongan Kereta Cepat Indonesia-China (KCIC), berbagai sumber literatur dapat dijadikan acuan untuk memastikan solusi yang optimal dan sesuai regulasi. Spesifikasi ini bertujuan untuk memastikan kualitas layanan optimal sesuai standar yang diinginkan. Adapun spesifikasi

untuk perencanaan layanan adalah sebagai berikut.

1. Standar Nasional

Perancangan sistem komunikasi wireless berbasis teknologi Leaky Feeder dalam penelitian ini mengacu pada regulasi nasional yang berlaku di Indonesia, khususnya dalam aspek pemanfaatan spektrum frekuensi radio. Acuan utama yang digunakan adalah Peraturan Menteri Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2021 tentang Penggunaan Spektrum Frekuensi Radio yang dikeluarkan oleh Kementerian Komunikasi dan Informatika (KOMINFO) Republik Indonesia. Peraturan ini mengatur ketentuan mengenai alokasi, perizinan, dan penggunaan spektrum frekuensi radio untuk berbagai layanan telekomunikasi, termasuk layanan jaringan LTE 1800 MHz (Band 3) yang digunakan dalam penelitian ini.

2. Spesifikasi Layanan LTE

Layanan LTE dalam penelitian ini dirancang menggunakan teknologi LTE 1800 MHz Frequency Division Duplex (FDD) (Band 3) yang bertujuan untuk menyediakan layanan komunikasi berbasis broadband di lingkungan terowongan Whoosh KCIC Padalarang – Halim. Pemilihan LTE Band 3 ini sesuai dengan Peraturan Menteri Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2021 tentang Penggunaan Spektrum Frekuensi Radio, di mana frekuensi 1800 MHz (1710–1785 MHz uplink dan 1805–1880 MHz downlink) diperuntukkan bagi layanan LTE FDD.

Perencanaan ini mengacu pada standar internasional yang ditetapkan oleh 3rd Generation Partnership Project (3GPP), khususnya melalui dokumen 3GPP TS 36.104, TS 36.101, dan TS 36.133 yang mengatur spesifikasi performansi LTE serta Key Performance Indicators (KPI) untuk jaringan LTE. Penentuan parameter performansi mengacu pada ketentuan minimum LTE band, yang meliputi Reference Signal Received Power (RSRP), Reference Signal Received Quality (RSRQ), Received Signal Strength Indicator (RSSI), Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR), serta Throughput.

3. Standar Penilaian Net Present Value (NPV)

Penilaian kelayakan investaso dengan menggunakan metode Net Present Value (NPV) didasarkan pada prinsip bahwa suatu investasi dikatakan layak apabila menghasilkan nilai NPV positif. Semakin besar nilai NPV, semakin besar manfaat finansial yang dihasilkan bagi perusahaan.

TABEL 2

Nilai NPV	Kriteria	Keputusan Investasi
$NPV > 0$	Menguntungkan	Proyek layak dijalankan karena menghasilkan nilai tambah bersih.
$NPV = 0$	Titik impas (break-even)	Proyek boleh dipertimbangkan, tetapi tidak menambah nilai bersih.
$NPV < 0$	Merugikan	Proyek tidak layak karena menimbulkan kerugian nilai bersih.

NPV yang bernilai positif menunjukkan bahwa arus kas masuk di masa depan lebih besar dari total investasi yang dikeluarkan. Oleh karena itu, standar penilaian NPV digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan investasi.

4. Standar Penilaian Profitability Indeks (PI)

PI digunakan untuk mengukur sejauh mana suatu

investasi memberikan keuntungan relatif dibandingkan modal yang dikeluarkan. Semakin tinggi nilai PI, maka semakin besar manfaat dari investasi.

TABEL 3

Nilai PI	Kriteria	Keputusan Investasi
$PI > 1$	Menguntungkan	Proyek layak dijalankan karena memberikan manfaat lebih besar daripada investasi.
$PI = 1$	Titik impas (break-even)	Proyek boleh dipertimbangkan tetapi tidak memberikan keuntungan tambahan.
$PI < 1$	Tidak Menguntungkan	Proyek tidak layak karena arus kas masuk lebih kecil dari investasi.

Dalam standar penilaian, suatu proyek dinyatakan layak apabila memiliki nilai $PI > 1$, yang berarti nilai manfaat (arus kas masuk) lebih besar dibandingkan biaya investasi (arus kas keluar). Apabila $PI = 1$, proyek dapat dipertimbangkan namun tidak memberikan keuntungan tambahan secara finansial. Sedangkan $P < 1$ menandakan proyek tersebut tidak layak secara finansial karena nilai manfaat lebih kecil dari dana yang diinvestasikan.

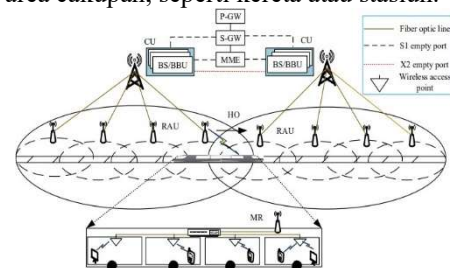
B. Alternatif Usulan Solusi

Dalam merancang sistem komunikasi wireless di Tunnel Whoosh, beberapa alternatif solusi dapat diusulkan berdasarkan spesifikasi dan batasan yang telah diterapkan. Setiap alternatif didasarkan pada studi literature dan analisis teknis dengan mempertimbangkan efisiensi biaya, kualitas layanan, dan kesesuaian dengan regulasi yang berlaku.

1. Solusi 1: Distributed Antenna System (DAS)

a. Deskripsi dan Gambar

Sistem Distributed Antenna System (DAS) dirancang untuk mendistribusikan sinyal komunikasi secara merata melalui penggunaan antena yang terhubung ke unit pemrosesan pusat. Proses ini melibatkan konversi sinyal dari Base Station/BBU ke Remote Antenna Unit (RAU) melalui jaringan kabel serat optik. RAU berperan sebagai penguat sinyal yang memancarkan sinyal ke perangkat pengguna di area cakupan, seperti kereta atau stasiun.



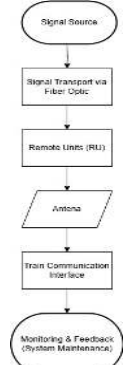
GAMBAR 4

Komponen utama pada arsitektur DAS meliputi Base Station (BS)/Baseband Unit (BBU), kabel serat optik, Remote Antenna Unit (RAU), dan User Equipment (UE). Selain itu, ada jaringan pendukung seperti Packet Gateway (P-GW), Serving Gateway (S-GW), dan Mobility Management Entity (MME) untuk mengelola koneksi dan mobilitas pengguna. Kelebihan DAS termasuk fleksibilitasnya dalam mendukung berbagai frekuensi, kemampuan mengurangi interferensi, dan kemudahan ekspansi untuk cakupan yang lebih luas. Namun, implementasinya memerlukan perencanaan mendetail untuk memastikan efisiensi jalur sinyal, lokasi antena, serta pengaturan daya yang optimal. Biaya instalasi yang tinggi sering kali menjadi tantangan utama, tetapi hal

ini sebanding dengan kualitas dan kestabilan sinyal yang dihasilkan, terutama di area dengan hambatan fisik seperti terowongan atau bangunan padat.

b. Flowchart

Flowchart di bawah ini menjelaskan alur proses kerja dari sistem Distributed Antenna System (DAS).



GAMBAR 5

Sistem ini dirancang untuk memastikan bahwa sinyal komunikasi dapat didistribusikan secara efektif di berbagai area, termasuk lingkungan kompleks seperti terowongan atau area kereta. komunikasi. Setiap komponen dalam flowchart memiliki fungsi penting untuk menjaga stabilitas komunikasi. Proses dimulai dari Signal Source sebagai sumber utama sinyal, kemudian sinyal dikirim melalui kabel serat optik (Fiber Optic) menuju Remote Units (RU). Dari RU, sinyal diteruskan ke Antena untuk disebarkan. Setelah itu, Train Communication Interface memastikan komunikasi berjalan lancar sebelum masuk ke tahap Monitoring & Feedback untuk pengawasan dan pemeliharaan sistem.

c. Tabel Solusi

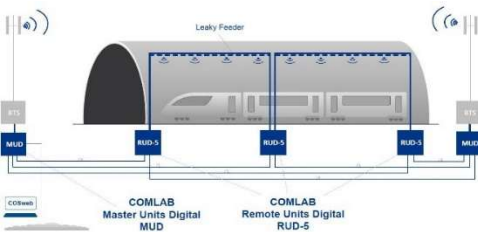
TABEL 4

Fitur	Deskripsi
Sistem Antenna	Sistem antenna terdistribusi yang memberikan cakupan sinyal secara merata di sepanjang terowongan.
Frekuensi Multiband	Mendukung frekuensi komunikasi 4G
Pemantauan Real-time	Pemantauan otomatis untuk mendeteksi gangguan dan mengoptimalkan kinerja jaringan.

2. Solusi 2: Leaky Feeder System

a. Deskripsi dan Gambar

Leaky Feeder System adalah sistem komunikasi yang menggunakan kabel leaky feeder untuk mendistribusikan sinyal di area tertutup, seperti terowongan. Sistem ini terdiri dari Base Transceiver Station (BTS), Master Units Digital (MUD), kabel leaky feeder, dan Remote Units Digital (RUD). Sinyal yang dipancarkan oleh BTS akan diperkuat oleh Master Units Digital dan diteruskan melalui kabel leaky feeder.

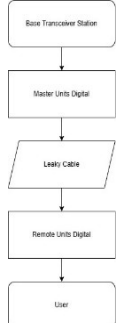


GAMBAR 6

Kabel ini memiliki lubang-lubang kecil untuk mendistribusikan sinyal secara merata ke seluruh area tertutup. Selanjutnya, sinyal akan diterima oleh *Remote Units Digital* untuk kemudian diteruskan kepada pengguna akhir. Sistem ini sangat efektif untuk menyediakan konektivitas di lingkungan yang sulit dijangkau oleh teknologi komunikasi konvensional, seperti terowongan tambang, jalur kereta bawah tanah, atau fasilitas industri tertutup. Selain itu, kabel *leaky feeder* memungkinkan penyebaran sinyal yang stabil meskipun terdapat banyak rintangan fisik.

b. Flowchart

Flowchart di bawah ini memberikan gambaran alur proses kerja dari sistem *Leaky Feeder*. Sistem ini dirancang untuk memastikan bahwa sinyal komunikasi dapat didistribusikan dengan stabil di area tertutup, seperti terowongan.



GAMBAR 7

Setiap komponen dalam flowchart memiliki peran penting untuk memastikan kelancaran komunikasi. Proses dimulai dari Base Transceiver Station (BTS) sebagai sumber sinyal utama hingga akhirnya diterima oleh pengguna akhir melalui perangkat komunikasi. Dengan alur kerja ini, sistem Leaky Feeder mampu memberikan solusi komunikasi yang andal di lingkungan yang sulit dijangkau oleh teknologi komunikasi konvensional.

c. Tabel Solusi

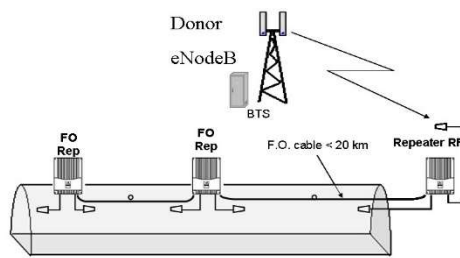
TABEL 5

Fitur	Deskripsi
Distribusi Sinyal Merata	Kabel dengan lubang kecil memungkinkan sinyal radio bocor secara konsisten sepanjang jalur.
Komunikasi Dua Arah	Mendukung komunikasi dua arah antara pengguna dan pusat kontrol.
Kompatibilitas Tinggi	Dapat digunakan untuk berbagai sistem komunikasi seperti suara, data, dan video.

3. Solusi 3: Repeater

a. Deskripsi dan Gambar

Repeater digunakan untuk memperkuat sinyal yang lemah di dalam terowongan, memastikan konektivitas yang stabil dengan biaya implementasi yang lebih rendah. Prosedur pemasangannya meliputi instalasi perangkat pada titik dengan sinyal lemah, kalibrasi untuk menghindari interferensi, dan pengaturan daya yang sesuai.

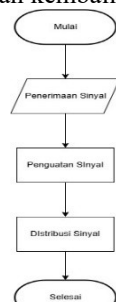


GAMBAR 8

Keunggulannya adalah biaya yang lebih hemat dan fleksibilitas, sementara kelemahannya yaitu cakupan yang tidak merata DAS atau leaky Feeder.

b. Flowchart

Flowchart ini menunjukkan alur kerja dasar sebuah repeater dalam sistem telekomunikasi. Tujuan utamanya adalah untuk memperluas jangkauan sinyal dengan cara menerima, menguatkan, dan mendistribusikan kembali sinyal tersebut.



GAMBAR 9

c. Tabel Solusi

TABEL 6

Fitur	Deskripsi
Penguat Sinyal	Meningkatkan kekuatan sinyal yang lemah untuk menjangkau area yang lebih luas.
Instalasi Sederhana	Memerlukan pemasangan perangkat kecil di sepanjang terowongan.
Hemat Biaya	Biaya implementasi dan pemeliharaan lebih rendah dibandingkan dengan DAS atau Leaky Feeder.

4. Analisis dan Pemilihan Solusi

Bab ini menganalisis dan memilih solusi terbaik berdasarkan parameter dan mekanisme seleksi yang relevan. Parameter meliputi kualitas sinyal, biaya implementasi, efektivitas sistem, waktu implementasi, dan kemudahan komunikasi. Proses seleksi dilakukan menggunakan matriks keputusan yang memberikan penilaian objektif terhadap setiap alternatif solusi berdasarkan bobot dan rating yang telah ditentukan. Data dan penilaian dalam matriks keputusan ini diperoleh dari hasil analisis jurnal yang relevan dan diskusi langsung dengan pihak KCIC (Kereta Cepat Indonesia- China). Pendekatan ini memastikan bahwa setiap solusi yang dievaluasi didasarkan pada data yang valid dan sesuai dengan kebutuhan spesifik di lapangan.

5. Biaya Implementasi

Biaya implementasi merupakan kriteria utama dalam pemilihan Solusi komunikasi wireless di terowongan. Evaluasi biaya mencakup aspek perangkat keras, seperti repeater, router 4G, dan antenna khusus yang dirancang untuk lingkungan terowongannya, serta perangkat lunak untuk memastikan integrasi sistem berjalan lancar. Selain itu, biaya instalasi di lokasi yang sulit dijangkau dan biaya pemeliharaan rutin juga menjadi bagian dari perhitungan. Solusi yang memberikan nilai RSRP dan RSRQ yang

memadai namun dengan biaya yang lebih rendah diutamakan, sehingga efisiensi anggaran tercapai tanpa mengorbankan kualitas komunikasi. Penelitian menunjukkan bahwa teknologi wireless dapat mengurangi biaya pemasangan infrastruktur kabel yang kompleks, menjadikannya alternatif yang lebih ekonomis dalam proyek besar seperti ini.

6. Efektivitas Sistem

Efektivitas sistem menjadi tolak ukur kemampuan Solusi komunikasi untuk memenuhi kebutuhan operasional di terowongan secara optimal. Dalam hal ini, kecepatan transfer data yang tinggi dan koneksi yang andal sangat penting, terutama di lingkungan yang penuh tantangan seperti terowongan yang rentan terhadap interferensi. Parameter utama seperti RSRP, RSRQ, dan RSSI digunakan untuk memastikan kekuatan dan kualitas sinyal yang mendukung komunikasi real-time.

7. Waktu Implementasi

Waktu implementasi mengacu pada durasi yang diperlukan untuk merancang, menginstal, dan mengoperasikan sistem komunikasi wireless. Faktor ini sangat penting karena keterlambatan implementasi dapat berdampak langsung pada jadwal operasional proyek. Proses ini meliputi desain sistem yang sesuai dengan spesifikasi terowongan, pemasangan perangkat keras, dan pengujian untuk memastikan sistem berfungsi optimal. Solusi yang memungkinkan waktu instalasi lebih cepat tidak hanya mempercepat penyelesaian proyek, tetapi juga mengurangi gangguan pada aktivitas kereta api yang sedang berlangsung. Kecepatan implementasi menjadi nilai tambah terutama untuk jalur strategis seperti rute antara Stasiun Padalarang dan Stasiun Halim.

8. Kemudahan Komunikasi

Kriteria Seleksi	Bobot	DAS		Leaky Feeder		Repeater	
		Rating	Nilai Bobot	Rating	Nilai Bobot	Rating	Nilai Bobot
Kualitas Sinyal	25%	4	1.00	5	1.25	3	1.00
Biaya Implementasi	15%	3	0.45	3	0.45	3	0.45
Efektifitas Sistem	10%	3	0.30	4	0.40	3	0.30
Waktu Implementasi	20%	4	0.80	2	0.40	3	0.60
Kemudahan Komunikasi	30%	3	0.90	5	1.50	2	0.60
Total Nilai	100%		3.45		4.00		2.95
Peringkat			2		1		3
Lanjutan			Tidak		Ya		Tidak

GAMBAR 10

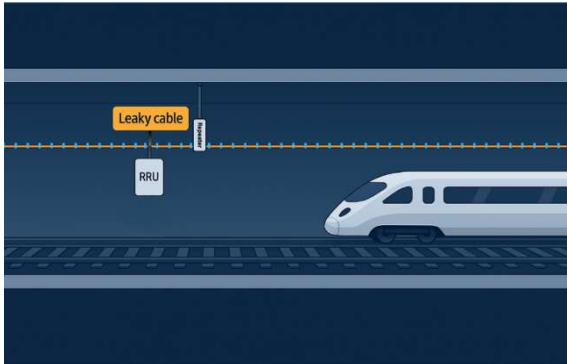
Kemudahan komunikasi berfokus pada sejauh mana sistem dapat mendukung kenyamanan penumpang melalui interaksi yang efektif antara petugas layanan, pusat informasi, dan sistem kontrol. Sistem komunikasi yang baik harus menyediakan antarmuka yang sederhana, mudah diakses oleh penumpang, serta mampu menyampaikan informasi secara cepat dan tanpa gangguan.

Berdasarkan hasil matriks keputusan, solusi leaky feeder dipilih sebagai alternatif terbaik dengan skor tertinggi sebesar 4.00. Solusi ini unggul dalam kualitas sinyal dan kemudahan komunikasi yang merupakan kebutuhan utama pada terowongan KCIC meskipun membutuhkan waktu implementasi yang sedikit lebih lama. Alternatif DAS dan Repeater tidak dilanjutkan karena skornya lebih rendah dan tidak memenuhi kebutuhan secara optimal.

IV. METODE

Perancangan Komunikasi *Wireless* di *Tunnel Whoosh* ini menggunakan teknologi *Leaky Feeder System* bertujuan untuk menyediakan koneksi internet yang cepat dan stabil selama

berada di dalam *tunnel* Whoosh. Teknologi *Leaky Feeder System* dipilih sebagai alternatif dalam perancangan ini karena kemampuannya untuk mendistribusikan sinyal radio secara merata melalui kabel koaksial khusus yang dirancang agar dapat "bocor" sinyal ke lingkungan sekitarnya sepanjang jalur kabel tersebut[8].



GAMBAR 11

Gambar berikut menunjukkan lokasi simulasi jaringan yang difokuskan pada lintasan antara Stasiun Padalarang hingga Stasiun Halim dan hasil drive test menggunakan G-Net Track Pro dengan pemetaan titik-titik uji sinyal. Jalur merah dengan gradasi warna yang mengikuti lintasan rel menandakan variasi kualitas sinyal di sepanjang rute. Secara visual, warna merah dan kuning yang umumnya menunjukkan kualitas sinyal yang rendah



GAMBAR 12

A. Rancangan Implementasi Sistem

Dalam merancang komunikasi *wireless* di *tunnel* whoosh, kami melakukan simulasi yang mencerminkan bagaimana sistem komunikasi dapat dirancang agar tetap optimal meskipun dalam kondisi tertutup, di mana metode komunikasi konvensional berbasis antenna makro tidak efektif.

Gambar diatas menunjukkan lokasi simulasi jaringan yang difokuskan pada lintasan antara Stasiun Padalarang hingga Stasiun Halim dan hasil drive test menggunakan G-Net Track Pro dengan pemetaan titik-titik uji sinyal. Jalur merah dengan gradasi warna yang mengikuti lintasan rel menandakan variasi kualitas sinyal di sepanjang rute. Secara visual, warna merah dan kuning yang umumnya menunjukkan kualitas sinyal yang rendah.

B. Menghitung Coverage Planning

Langkah pertama yang dibutuhkan dalam menghitung *coverage planning* yaitu mencari data yang dibutuhkan untuk perhitungan *Link Budget* dan mencari nilai *Maximum Allowable Path Loss* (MAPL) Setelah mendapat kedua nilai tersebut, nilai radius cell dan diameter cell dapat dicari.

Untuk memperoleh nilai MAPL ini, dilakukan proses perhitungan yang disebut link budget, yaitu analisis menyeluruh terhadap seluruh penguatan dan pelemahan sinyal yang terjadi sepanjang jalur transmisi, mulai dari pemancar

hingga ke penerima.

TABEL 7
Downlink Budget Tunnel 7

Parameters	Value
Max Transmit Power (dBm)	46,02
Subcarrier Power	23,01
1/2" Cable Loss/100m (dB)	20,6
Repeater Gain/185m (dBm)	40
Jumlah Repeater	23
Rx Noise Figure	7
Interference Margin (dB)	4
UE antenna Gain(dB)	0,2
Train Loss (dB)	10
Body Loss (dB)	3
Engineering Margin (dB)	3
Panjang Tunnel (m)	4478
EIRP	-13,438
Receiver Sensitivity (dBm)	-107
Min. Signal Reception Strength (dBm)	-103
MAPL	153,562

Setelah mendapat data yang dibutuhkan untuk perhitungan Link Budget, didapat nilai MAPL *downlink* dengan menggunakan persamaan 2.11 sebesar 73,562 dB. Terdapat perbedaan parameter untuk *downlink budget* dan *uplink budget*. Hal ini terjadi karena *leaky cable* tidak terdapat antenna gain disebabkan oleh transmisi sinyal elektromagnetik langsung pada kabel coaxial yang dilukai sedangkan pada *User Equipment* terdapat antenna gain karena transmisi sinyal elektromagnetik menggunakan antenna.

TABEL 8

CAPEX TUNNEL 1 - 12	Jumlah	Harga Satuan (Rp)	Subtotal (Rp)
Hardware			
RUD-5 / BDA (Repeater)	126	Rp 40.000.000,00	Rp 5.040.000.000,00
Leaky Feeder Cable (RLKW-1/2, 5)	51	Rp 39.900.000,00	Rp 2.034.900.000,00
RRU (LTE, Comba CriticalPoint 70)	51	Rp 111.000.000,00	Rp 5.661.000.000,00
Power Splitter / Combiner	57	Rp 2.118.870,00	Rp 120.775.590,00
Grounding Kit	99	Rp 472.000,00	Rp 46.728.000,00
DIN Connector	379	Rp 69.000,00	Rp 26.151.000,00
Cable Tray (5m/batang)	3009	Rp 650.000,00	Rp 1.955.850.000,00
Weatherproofing Kit	195	Rp 732.000,00	Rp 142.740.000,00
Heat Shrink Tube	191	Rp 164.000,00	Rp 31.324.000,00
Labeling Kit	18	Rp 1.065.000,00	Rp 19.170.000,00
Wall/Pole Bracket	48	Rp 762.000,00	Rp 36.576.000,00
RF Jumper Cable	186	Rp 829.000,00	Rp 154.194.000,00
Spectrum Analyzer	12	Rp 7.742.500,00	Rp 92.910.000,00
VSWR Meter	12	Rp 588.000,00	Rp 7.056.000,00
Signal Generator	12	Rp 21.800.000,00	Rp 261.600.000,00
Crimping Tool	12	Rp 1.886.889,00	Rp 22.642.668,00
Multimeter	32	Rp 4.835.429,00	Rp 154.733.728,00
Cable Measuring Tools	13	Rp 2.574.968,50	Rp 33.474.590,50
PSU + Battery	25	Rp 4.000.000,00	Rp 100.000.000,00
Software			
Atoll License	One Time	Rp 175.000.000	Rp 175.000.000
G-Net Track Pro	One Time	Rp 175.000,00	Rp 175.000,00
TOTAL			Rp 15.941.825.576,50

TABEL 9
Uplink Budget Tunnel 7

Parameters	Value
Max Transmit Power (dBm)	24
Antenna Gain	0,2
1/2" Cable Loss/100m (dB)	20,6
Repeater Gain (dBm)	36,99

Jumlah Repeater	24
Coupling Loss (dB)	51
Rx Noise Figure	2,2
Interference Margin (dB)	1,18
Train Loss (dB)	10
Body Loss (dB)	3
Engineering Margin (dB)	3
Panjang Tunnel (m)	4478
EIRP	24,2
Receiver Sensitivity (dBm)	-111,8
Min. Signal Reception Strength (dBm)	-75,912
MAPL	102,602

Setelah data *uplink budget* didapat dan dihitung menggunakan persamaan 2.10. Didapat nilai MAPL *uplink* pada *tunnel 7* sebesar 84,112 dB.

C. Menghitung Cell Radius

Cell radius dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.12 dan persamaan 2.13. Berikut ini merupakan perhitungan *cell radius* di *tunnel 7*.

1. Cell Radius Uplink

$$\begin{aligned}
 102,602 &= 20^{10} \log 1785 + 20^{10} \log d_{km} + 32,5 + 12 + (8 \times 2) \\
 &\quad + 0 \times 18,3 \left(\frac{1+2}{1+1} \right)^{0,46} \\
 -3,329677538 \times 10^{13} &= 20^{10} \log d_{km} \\
 -3,1752795 &= \log d_{km} \\
 0,0006679139282 &= d_{km} \\
 0,6679139282 &= d_m
 \end{aligned}$$

2. Cell Radius Downlink

$$\begin{aligned}
 153,562 &= 20^{10} \log 1885 + 20^{10} \log d_{km} + 32,5 + 12 + (8 \times 2) \\
 &\quad + 0 \times 18,3 \left(\frac{1+2}{1+1} \right)^{0,46} \\
 -3,353918827 \times 10^{13} &= 20^{10} \log d_{km} \\
 -3,275311355 &= \log d_{km} \\
 0,0005305039782 &= d_{km} \\
 0,5305039782 &= d_m
 \end{aligned}$$

Setelah dilakukan perhitungan, didapat nilai *cell radius uplink* sebesar 0,667913982 meter dan nilai *cell radius downlink* sebesar 0,5305039782 meter.

D. Realisasi CAPEX

Perhitungan dilakukan berdasarkan kebutuhan teknis lapangan dan standar instalasi untuk memastikan cakupan sinyal yang optimal di seluruh lintasan. Estimasi ini mencakup seluruh perangkat utama, perlengkapan pendukung, serta infrastruktur instalasi, dengan jumlah dan harga satuan yang disesuaikan dengan panjang lintasan.

Tabel 6. Rincian Biaya CAPEX

Total biaya yang ditampilkan merupakan hasil penjumlahan dari seluruh kebutuhan komponen sistem yang telah disesuaikan dengan panjang tiap tunnel, kebutuhan teknis lapangan, serta satuan harga masing-masing alat untuk mendukung implementasi sistem komunikasi pada tunnel

E. Penentuan Kuantitas Perangkat

Perencanaan jumlah perangkat disusun berdasarkan pendekatan teknis dan kebutuhan operasional jaringan komunikasi di dalam lingkungan terowongan kereta cepat (high-speed railway tunnel). Penetapan jumlah setiap item tidak dilakukan secara arbitrer, melainkan mempertimbangkan

sejumlah faktor teknis seperti panjang lintasan, kebutuhan distribusi sinyal yang merata, keamanan sistem komunikasi, dan kemudahan dalam instalasi serta pemeliharaan.

F. Realisasi OPEX

Estimasi ini mencakup pengeluaran rutin seperti gaji teknis, pemeliharaan sistem, pemantauan dan peningkatan berkala, serta konsumsi daya listrik selama masa operasional. Total biaya operasional ini dapat disesuaikan berdasarkan kebijakan pemeliharaan, jumlah teknis yang dilibatkan, dan kebutuhan penyesuaian sistem secara berkala sesuai kondisi lapangan.

TABEL 10
Rincian Biaya OPEX

Element	Jumlah	Harga	Periode Month	Total
Gaji Teknis	12	Rp5.800.000	12	Rp835.200.000
Maintenance	1	Rp3.500.000	4	Rp14.000.000
Listrik	12	Rp1.800.000	12	Rp1.800.000
TOTAL				Rp851.000.000

Pada tahap selanjutnya itu menggunakan metode depreciation (SLD). Rumus yang digunakan untuk menghitung penyusutan tahunan adalah:

$$Depreciation = \frac{INVESTMENT\ COST - RESIDU}{YEARS}$$

$$Depreciation = \frac{11.011.425.577 - 1.101.142.557}{5} = 1.982.056.604$$

Aset diasumsikan mengalami penyusutan merata sepanjang umur manfaatnya, dengan proyeksi kenaikan biaya operasional sebesar 5% per tahun mengikuti inflasi selama 5 tahun kedepan. Estimasi biaya ini mencakup seluruh perubahan biaya operasional dan alokasi penyusutan, sedangkan potensi pendapatan dari layanan jaringan privat wireless dihitung melalui skema harga bertingkat berdasarkan kapasitas layanan.

G. Proyeksi Revenue

TABEL 11
Annual Ticket

	Ekonomi	Bisnis	First	Total/Tahun
	Rp225.000	Rp450.000	Rp600.000	
Jumlah user	24087	1215	781	9389880
Total	Rp5.419.575.000	Rp546.750.000	Rp468.600.000	Rp2.316.573.000.000

Pendapatan yang menjadi dasar perhitungan proyeksi revenue dalam perancangan sistem komunikasi wireless pada tunnel Whoosh berasal dari pendapatan tiket penumpang Kereta Cepat Whoosh. Tiket penumpang diklasifikasikan ke dalam tiga kelas layanan, yaitu kelas ekonomi, kelas bisnis, dan *First Class*. Data jumlah penumpang diambil dari load factor sebesar 70% yang berarti jumlah penumpang dihitung sebesar 70% dari kapasitas maksimum kereta

Dari total pendapatan tersebut, pihak operator atau pemilik jaringan *leaky feeder* mengambil 1% sebagai proyeksi pendapatan untuk mendukung biaya investasi, pengoperasian, dan pemeliharaan sistem komunikasi di tunnel. Pengambilan angka 1% ini mengacu pada standar umum di industri transportasi, di mana alokasi untuk sistem pendukung seperti ICT dan jaringan komunikasi radio berkisar antara 0,5% hingga 1,5% dari pendapatan utama.

H. Proyeksi Pajak Pengembangan

Pendapatan bersih dihitung dari selisih antara pendapatan dan biaya operasional (OPEX), dikurangi depresiasi aset, serta pajak sebesar 10%. Proyeksi ini memberikan gambaran realistis tentang potensi keuntungan bersih yang dapat diperoleh dari pengoperasian sistem komunikasi selama 5 tahun, setelah seluruh biaya operasional dan kewajiban pajak terpenuhi.

TABEL 12
Proyeksi Revenue

Period (years)	Total Transaction	Annual Income
First year	9.389.880	Rp23.165.730.000
Second year	9.859.374	Rp23.397.387.300
Third year	10.352.343	Rp23.631.361.173
Fourth year	10.869.960	Rp23.867.674.785
Fifth year	11.956.956	Rp24.106.351.533
Total		Rp118.168.504.791

TABEL 13

Periode (years)	EBITDA	EBIT	Tax10%	NetIncome
First year	Rp22.314.730.000	Rp19.445.201.396	Rp1.944.520.140	Rp17.500.681.257
Second year	Rp22.503.837.300	Rp19.634.308.696	Rp1.963.430.870	Rp17.670.877.827
Third year	Rp22.693.133.673	Rp19.823.605.069	Rp1.982.360.507	Rp17.841.244.562
Fourth year	Rp22.882.535.910	Rp20.013.007.306	Rp2.001.300.731	Rp18.011.706.575
Fifth year	Rp23.071.955.714	Rp20.202.427.110	Rp2.020.242.711	Rp18.182.184.399

Hasil proyeksi ini memperlihatkan bahwa investasi sistem komunikasi pada tunnel ini layak secara finansial, mendukung keberlanjutan operasional jangka panjang.

I. Net Present Value

TABEL 14
Hasil NPV Selama 5 Tahun

Year (t)	Net Cash Flow (CfT)	Discount Factor (i = 10%)	Present Value
0	-Rp 15.941.825.577,00	1	-Rp 15.941.825.576,50
1	Rp17.500.681.257	0,909	Rp15.908.119.262,26
2	Rp17.670.877.827	0,826	Rp14.596.145.084,78
3	Rp17.841.244.562	0,751	Rp13.398.774.666,29
4	Rp18.011.706.575	0,683	Rp12.301.995.590,97
5	Rp18.182.184.399	0,62	Rp11.272.954.327,41
Total			Rp51.536.163.355,21

$$NPV = \frac{15.941.825.577}{(1 + 10\%)^1}$$

Perhitungan untuk tahun kedua hingga kelima dilakukan dengan cara yang sama, yaitu mengalikan arus kas bersih (Net Cash Flow) setiap tahun dengan faktor diskonto masing-masing tahun. Hasil akumulasi present value dari seluruh arus kas selama 5 tahun akan menghasilkan total nilai sekarang sebesar RP67.477.988.931,71. Setelah dikurangi investasi awal sebesar 15.941.825.576,50, diperoleh NPV sebesar Rp51.536.163.355,21.

Nilai NPV yang positif ini menunjukkan bahwa proyek investasi sistem komunikasi tunnel layak dilaksanakan sesuai dengan spesifikasi, karena mampu menghasilkan pengembalian yang lebih besar dari nilai investasi awal serta melebihi tingkat diskonto 10% yang ditetapkan.

J. Profitability Indeks (PI)

$$PI = \frac{67.477.988.931,71}{15.941.825.576,50} = 4,233$$

Berdasarkan spesifikasi yang telah ditetapkan kriteria kelayakan investasi dinyatakan terpenuhi apabila Profitability Index (PI) > 1. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai PI pada proyek ini sebesar 4,233, yang berarti setiap Rp1 investasi akan menghasilkan kembali Rp4,233 dalam bentuk arus kas masuk. Dengan demikian, proyek perancangan sistem komunikasi tunnel ini dinyatakan layak secara finansial karena memenuhi standar kelayakan yang telah ditetapkan, di mana arus kas masuk lebih besar dari nilai investasi awal.

K. Payback Period (PP)

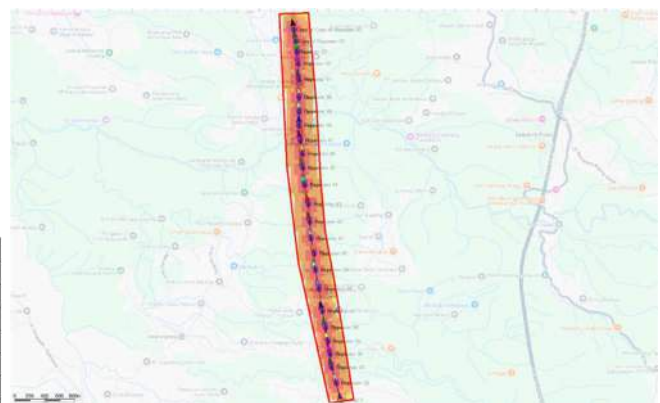
$$PP = \frac{15.941.825.576,50}{13.495.597.786,34} \approx 1,2 \text{ tahun}$$

Berdasarkan metode rata-rata arus kas, waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan investasi awal sebesar Rp15,9 miliar adalah sekitar 1,2 tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa proyek perancangan sistem komunikasi *tunnel* mampu mengembalikan modal sebelum umur proyek selesai (5 tahun).

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Cell Planning Pada Aplikasi Atoll

Dalam skenario ini, perencanaan dilakukan dengan menempatkan komponen Leaky Cable (kabel bocor) dan Repeater sepanjang jalur terowongan. Leaky cable digunakan untuk mentransmisikan sinyal secara merata dalam ruang tertutup seperti terowongan, sedangkan repeater berfungsi untuk memperkuat sinyal agar jangkauan dan kualitasnya tetap terjaga pada area yang lebih jauh atau mengalami redaman tinggi.

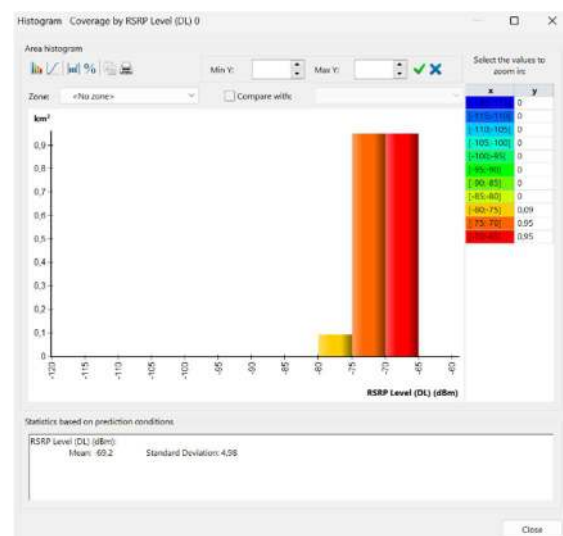


GAMBAR 13

Hasil simulasi divisualisasikan dalam bentuk peta coverage serta histogram yang memberikan gambaran distribusi kekuatan sinyal di area layanan. Gambar berikut menunjukkan hasil perencanaan penempatan leaky cable dan repeater pada *Atoll* untuk *tunnel* 7.

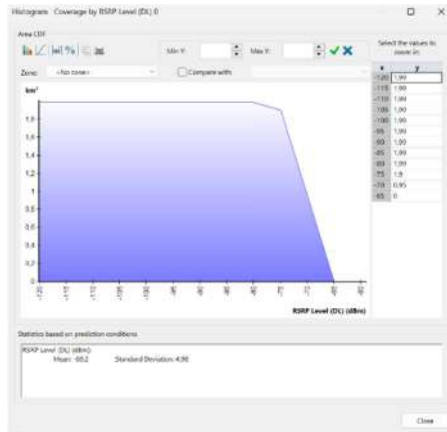
B. Parameter RSRP

Setelah dilakukan konfigurasi sistem distribusi sinyal melalui teknologi *leaky cable* dan *repeater*, proses simulasi propagasi sinyal dilanjutkan untuk mengevaluasi kekuatan sinyal referensi atau RSRP (Reference Signal Received Power) yang diterima oleh perangkat pengguna (*user equipment*) di sepanjang lintasan terowongan. Evaluasi dilakukan menggunakan dua pendekatan visual, yaitu histogram distribusi RSRP dan kurva CDF RSRP.



GAMBAR 14

Histogram menunjukkan distribusi area layanan berdasarkan kekuatan sinyal RSRP setelah dilakukan konfigurasi sistem. Dari grafik terlihat bahwa mayoritas batang histogram terkonsentrasi pada rentang -70 dBm hingga -60 dBm, yang menandakan bahwa sebagian besar area layanan memiliki daya sinyal referensi yang cukup kuat hingga sangat baik. Nilai mean RSRP tercatat sebesar $-69,2$ dBm, dan standar deviasi sebesar $4,98$, yang berarti penyebaran sinyal cukup seragam dan tidak menunjukkan variasi ekstrem antar lokasi pengukuran.

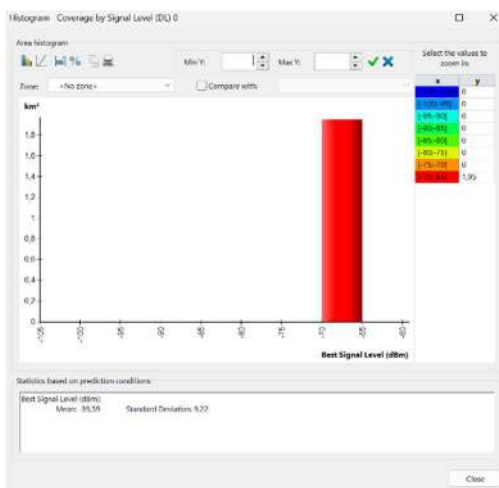


GAMBAR 15

Grafik CDF RSRP memperlihatkan sebaran kumulatif kekuatan sinyal referensi (RSRP) setelah dilakukan konfigurasi sistem *leaky cable* dan *repeater*. Dari kurva CDF terlihat bahwa hampir seluruh area layanan berada pada rentang RSRP di atas -80 dBm, yang mengindikasikan cakupan sinyal kuat dan stabil dalam ruang terbatas menurut standar 3GPP. Nilai mean RSRP sebesar $-69,2$ dBm dengan deviasi standar $4,98$ menunjukkan bahwa kekuatan sinyal tersebar secara merata dan terkendali di sepanjang jalur.

C. Parameter RSSI

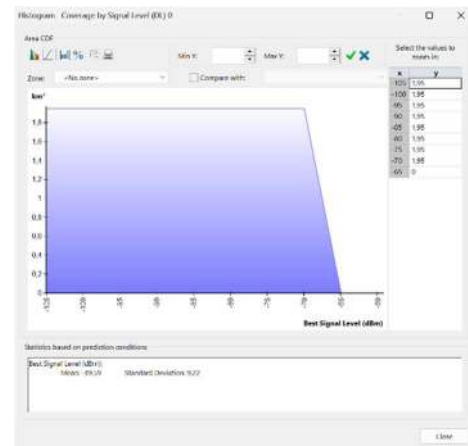
Setelah dilakukan konfigurasi *Leaky Cable* dan *Repeater*, dilanjutkan dengan proses simulasi propagasi sinyal untuk mengetahui kekuatan total sinyal yang diterima oleh perangkat pengguna (*user equipment*) sepanjang terowongan. Hasil simulasi kemudian divisualisasikan dalam bentuk histogram dan grafik CDF untuk parameter RSSI (*Received Signal Strength Indicator*).



GAMBAR 16

Grafik Histogram pada menunjukkan distribusi area terhadap nilai RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) sepanjang lintasan terowongan Whoosh setelah dilakukan konfigurasi *leaky cable* dan *repeater*. Terlihat bahwa sebagian

besar area layanan berada pada rentang RSSI sekitar $-39,59$ dBm, yang ditunjukkan oleh batang histogram dominan pada rentang -40 hingga -35 dBm. Nilai ini mengindikasikan bahwa sinyal total yang diterima dari semua sumber (termasuk sinyal utama dan interferensi) berada dalam kategori sangat kuat untuk jaringan LTE.

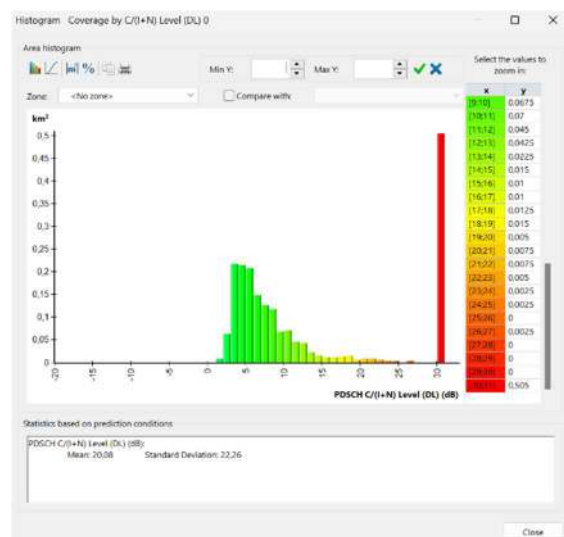


GAMBAR 17

Grafik *Cumulative Distribution Function* (CDF) menunjukkan sebaran kumulatif nilai RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) terhadap luas area sepanjang terowongan Whoosh. Terlihat bahwa hampir seluruh area layanan (sekitar $1,95$ km²) menerima sinyal dengan kekuatan lebih baik dari -70 dBm, dengan sebagian besar nilai berada di kisaran -40 dBm hingga -35 dBm. Dengan demikian, grafik ini membuktikan bahwa implementasi *leaky cable* dan *repeater* mampu menghasilkan cakupan sinyal total yang optimal dan merata pada jaringan LTE di lingkungan tertutup seperti terowongan Whoosh, serta mendukung kebutuhan komunikasi yang andal dan berkualitas tinggi.

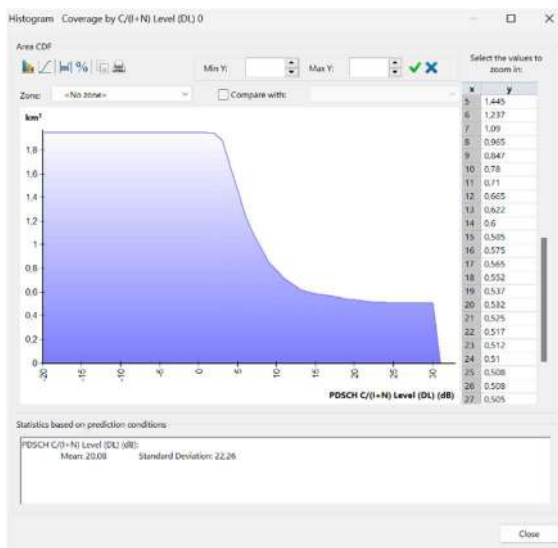
D. Parameter SINR

Setelah konfigurasi *Leaky Cable* dan *Repeater* diterapkan, dilakukan proses simulasi lanjutan untuk menganalisis parameter SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) sebagai indikator kualitas sinyal terhadap gangguan dan noise. Parameter ini sangat penting dalam evaluasi performa jaringan karena secara langsung memengaruhi kapasitas throughput dan kualitas layanan. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk histogram dan grafik CDF yang menunjukkan sebaran nilai SINR di sepanjang area layanan dalam terowongan.



GAMBAR 18

Dari grafik histogram sebagian besar area layanan memiliki nilai SINR yang berada dalam kategori baik hingga sangat baik, dengan distribusi histogram yang dominan pada rentang hijau (positif). Grafik Nilai rata-rata (mean) SINR yang diperoleh dari simulasi adalah 20,08 dB.



GAMBAR 19

Berdasarkan grafik CDF pada gambar sebagian besar area layanan memiliki nilai SINR yang tinggi dan stabil. Sekitar 80% area tercakup dengan SINR di atas 10 dB, dan lebih dari 50% area memiliki SINR di atas 20 dB, yang menandakan kualitas sinyal sangat baik. Kurva yang menurun tajam menunjukkan distribusi SINR yang merata dan konsisten, mencerminkan kinerja sistem propagasi yang efektif dalam mengatasi tantangan komunikasi di dalam terowongan. Hal ini menunjukkan bahwa jaringan LTE yang dirancang mampu memberikan konektivitas yang andal dan mendukung layanan data secara optimal.

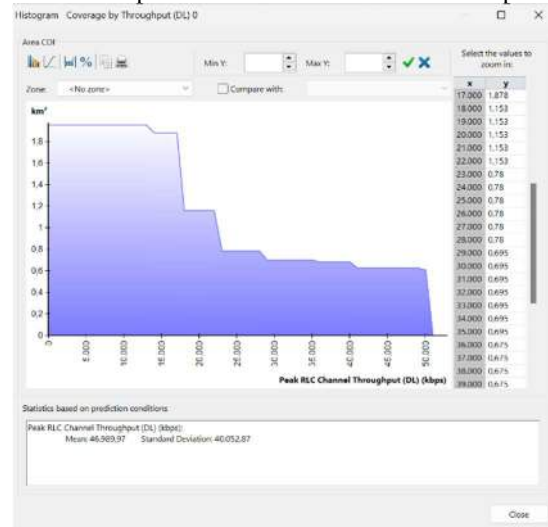
E. Parameter Throughput

Sebagai parameter yang merepresentasikan kapasitas transfer data aktual yang dapat dicapai oleh pengguna akhir, throughput menjadi indikator penting dalam menilai kinerja jaringan secara menyeluruh. Oleh karena itu, setelah konfigurasi Leaky Cable dan Repeater diterapkan, dilakukan simulasi untuk mengetahui seberapa besar nilai Peak RLC Channel Throughput yang dapat dicapai sepanjang terowongan. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk histogram distribusi throughput serta grafik CDF yang menunjukkan proporsi area yang mencapai tingkat throughput tertentu.



GAMBAR 20

Berdasarkan hasil simulasi histogram pada gambar sebagian besar area layanan mampu mencapai *throughput* yang tinggi, ditunjukkan oleh dominasi warna hijau dan biru yang menandakan kecepatan transmisi data di atas 20 Mbps.



GAMBAR 21

Grafik CDF pada gambar menggambarkan distribusi kumulatif *Throughput* terhadap area layanan sepanjang lintasan terowongan Whoosh. Terlihat bahwa sebagian besar area mencakup throughput di atas 20 Mbps, ditunjukkan dengan kurva yang mulai menurun secara signifikan pada titik *throughput* di atas 20.000 kbps. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar pengguna akan mendapatkan pengalaman transfer data yang cepat dan stabil.

Dengan rata-rata throughput mencapai 46.059,87 kbps dan standar deviasi sebesar 40.052,87 kbps, hasil ini menunjukkan bahwa sistem jaringan LTE yang dikonfigurasi dengan *leaky cable* mampu mendukung kapasitas data tinggi di lingkungan tertutup seperti terowongan.

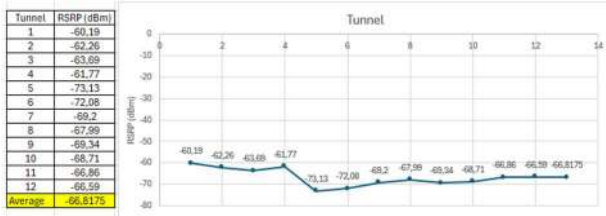
F. Parameter RSRQ

Pada Tunnel 7, hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai RSRP (*Reference Signal Received Power*) berada pada -69,2 dBm, dan RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) berada pada -39,68 dBm. Dengan menggunakan bandwidth LTE sebesar 10 MHz, maka jumlah *Resource Block* (RB) adalah 50 RB. Berdasarkan rumus pada Bab 2.4.2, Nilai RSRQ sebesar -12,50 dB ini termasuk dalam kategori cukup menurut standar 3GPP LTE, di mana RSRQ dianggap baik jika berada di atas -10 dB, cukup antara -10 hingga -15 dB, dan buruk jika lebih kecil dari -15 dB. Meski nilai RSRP dan RSSI tergolong sangat baik, nilai RSRQ yang lebih rendah menunjukkan kemungkinan adanya interferensi atau noise yang mempengaruhi kualitas sinyal referensi relatif terhadap total daya yang diterima. Namun demikian, karena RSRQ masih berada dalam batas toleransi jaringan LTE, performa layanan data pada Tunnel 7 tetap dapat dianggap cukup layak.

G. Rekapitulasi Hasil dan Analisis Setelah Dilakukan Perancangan

Hasil dari perancangan dibentuk dalam suatu tabel serta grafik untuk memudahkan membaca dan menganalisis perbandingan saat *drive test* dan solusi yang diusulkan. Grafik RSRP dapat dilihat pada gambar berikut.

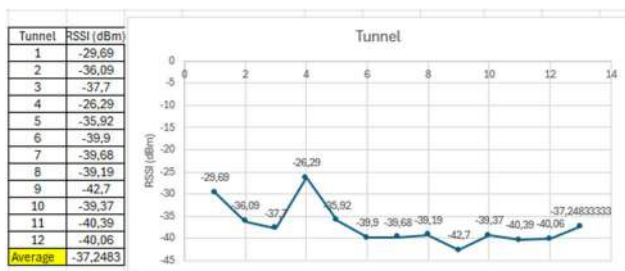
Hasil pengukuran RSRP (*Reference Signal Received Power*) dari *drive test* pada Bab 1.1 menunjukkan nilai rata-rata sebesar -133,67 dBm, yang mencerminkan kualitas sinyal yang sangat lemah di area pengujian.



GAMBAR 22

Sebagai perbandingan, setelah dilakukan simulasi jaringan menggunakan teknologi *leaky cable*, nilai rata-rata RSRP meningkat secara signifikan menjadi -66,82 dBm. Peningkatan ini menandakan bahwa kualitas sinyal menjadi jauh lebih baik, masuk ke dalam kategori sinyal yang baik hingga sangat baik, mengingat RSRP di kisaran -60 hingga -70 dBm umumnya menjamin kestabilan layanan jaringan, termasuk untuk layanan data dan suara. Perbandingan ini memperlihatkan efektivitas penggunaan teknologi *leaky cable* dalam mendistribusikan sinyal secara merata di lingkungan terowongan yang sebelumnya sulit dijangkau oleh sinyal konvensional. Dengan demikian, teknologi ini terbukti mampu mengatasi permasalahan sinyal lemah yang ditemukan pada hasil pengukuran awal.

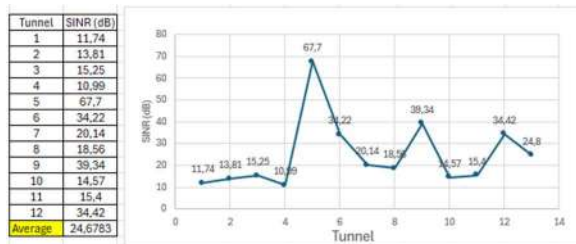
Grafik keseluruhan untuk parameter RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) dapat dilihat pada gambar berikut.



GAMBAR 23

Berdasarkan data yang diperoleh dari *drive test* pada Bab 1.1, nilai rata-rata RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) dari hasil *drive test* adalah sebesar -73,23 dBm. Nilai ini menunjukkan kualitas sinyal yang lemah hingga sangat lemah, karena umumnya sinyal yang berada di bawah -70 dBm sudah tergolong tidak optimal untuk layanan komunikasi yang stabil. Sebaliknya, hasil simulasi jaringan menggunakan teknologi *leaky cable* menunjukkan peningkatan yang sangat signifikan, dengan rata-rata nilai RSSI sebesar -37,25 dBm. Ini berarti sinyal yang dihasilkan melalui simulasi tergolong sangat kuat dan berada dalam kategori optimal untuk kualitas layanan LTE.

Grafik keseluruhan untuk parameter SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) dapat dilihat pada gambar berikut.

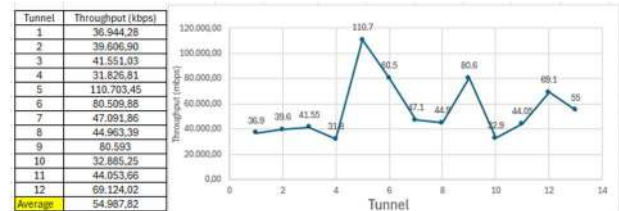


GAMBAR 24

Berdasarkan data hasil *drive test* pada Bab 1.1, nilai rata-rata SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) dari hasil *drive test* adalah sebesar 4,12 dB, yang mencerminkan kualitas sinyal yang cukup rendah. Nilai SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) yang berada di bawah 5 dB umumnya menunjukkan kondisi jaringan yang penuh gangguan

(*noise*) dan tidak ideal untuk transfer data yang stabil, terutama pada jaringan LTE. Sebaliknya, hasil simulasi jaringan menggunakan teknologi *leaky cable* menunjukkan rata-rata SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) sebesar 24,68 dB, yang mengindikasikan kualitas sinyal yang sangat baik. SINR di atas 20 dB biasanya menjamin kinerja jaringan yang optimal, memungkinkan kecepatan tinggi, latensi rendah, dan reliabilitas layanan yang tinggi.

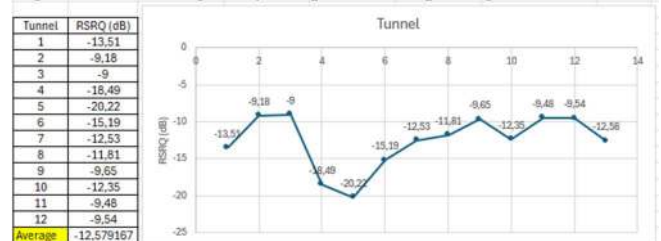
Grafik keseluruhan untuk parameter Throughput dapat dilihat pada gambar berikut.



GAMBAR 25

Berdasarkan data *throughput* yang diperoleh dari hasil simulasi, rata-rata nilai throughput mencapai 54.987,82 kbps, yang menunjukkan performa jaringan yang cukup baik untuk mendukung layanan data. Hal ini mengindikasikan bahwa teknologi distribusi sinyal *leaky cable* yang digunakan dalam simulasi mampu memberikan cakupan dan performa yang baik di lingkungan yang tertutup seperti terowongan. Dengan demikian, simulasi ini berhasil membuktikan efektivitas solusi teknis yang diimplementasikan dan menunjukkan bahwa sistem mampu mendukung komunikasi data dengan kecepatan yang memadai dan stabil.

Grafik keseluruhan untuk parameter RSRQ (*Reference Signal Received Quality*) dapat dilihat pada gambar berikut.



GAMBAR 26

Berdasarkan data yang diperoleh, nilai rata-rata RSRQ (*Reference Signal Received Quality*) dari hasil *drive test* adalah sebesar -15,08 dB, sedangkan hasil simulasi jaringan menunjukkan rata-rata RSRQ sebesar -12,58 dB. Perbedaan nilai ini menunjukkan bahwa hasil simulasi memiliki kualitas sinyal yang lebih baik dibandingkan dengan kondisi nyata di lapangan. Dengan peningkatan nilai RSRQ dalam hasil simulasi, dapat disimpulkan bahwa teknologi *leaky cable* memberikan dampak positif dalam meningkatkan kualitas sinyal, mengurangi interferensi, dan memperbaiki pengalaman pengguna secara keseluruhan. Hal ini semakin memperkuat efektivitas dari solusi teknis yang diimplementasikan dalam skenario simulasi jaringan.

TABEL 15

Tunnel	Panjang (m)	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	RSSI (dBm)	SINR (dB)	Throughput (kbps)
1	1,885	-60,19	-13,51	-29,69	11,74	36,944,28
2	1,052	-62,26	-9,18	-36,09	13,81	39,606,90
3	735	-63,69	-9	-37,7	15,25	41,551,03
4	1,315	-61,77	-18,49	-26,29	10,99	31,826,81
5	190	-73,13	-20,22	-35,92	67,7	110,703,45
6	437	-72,08	-15,19	-39,9	34,22	80,509,88
7	4,478	-69,2	-12,53	-39,68	20,14	47,091,86
8	1,285	-67,99	-11,81	-39,19	18,56	44,963,39
9	608,06	-69,34	-9,65	-42,7	39,34	80,593
10	2,190	-68,71	-12,35	-39,37	14,57	32,885,25
11	208	-66,86	-9,48	-40,39	15,4	44,053,66
12	1,230	-66,59	-9,54	-40,06	34,42	69,124,02
Average		-66,8175	-12,57916667	-37,24863333	24,67833333	57,093,37

Rekapitulasi hasil simulasi berbentuk tabel dan lebih rinci dibandingkan grafik dapat dilihat pada tabel berikut.

Berdasarkan tabel hasil pengukuran dan analisis parameter

jaringan LTE pada 12 segmen terowongan, dapat disimpulkan bahwa seluruh Key Performance Indicator (KPI) yang menjadi acuan performa jaringan telah terpenuhi. Evaluasi dilakukan terhadap lima parameter utama, yaitu RSRP, RSRQ, RSSI, SINR, dan Throughput, dengan hasil rata-rata sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil pengukuran, nilai rata-rata RSRP adalah -66,82 dBm, yang telah memenuhi standar KPI LTE yaitu minimal ≥ -80 dBm. Hal ini membuktikan bahwa kekuatan sinyal secara umum berada dalam kategori baik. Sebagai contoh, pada Tunnel 1 (1.885 meter) diperoleh RSRP -60,19 dBm yang menunjukkan kekuatan sinyal sangat baik. Pada Tunnel 7 (4.478 meter) yang merupakan tunnel terpanjang, RSRP tercatat -69,2 dBm. Nilai tersebut masih jauh di atas ambang KPI dan membuktikan bahwa sinyal tetap kuat meskipun menempuh panjang jalur yang lebih besar. Nilai RSRP ini membuktikan desain sistem sudah mampu mendistribusikan sinyal secara konsisten hingga ke tunnel yang paling panjang.
2. Nilai rata-rata RSRQ yang diperoleh sebesar -12,58 dB, yang masih memenuhi standar KPI jaringan LTE, yaitu lebih besar dari -15 dB. Hal ini menandakan bahwa secara umum kualitas sinyal di seluruh area terowongan masih stabil dan layak untuk mendukung decoding sinyal LTE. Sebagai contoh, pada Tunnel 2 dengan panjang 1.052 meter, nilai RSRQ yang diperoleh sebesar -9,18 dB menunjukkan kualitas sinyal yang sangat baik karena minimnya interferensi. Sebaliknya, pada Tunnel 7 dengan panjang 4.478 meter, nilai RSRQ menurun menjadi -12,53 dB, yang secara teknis dapat diterima karena panjang jalur yang lebih besar menyebabkan akumulasi noise lebih tinggi. Namun, nilai ini tetap berada di atas batas KPI, sehingga jaringan tetap berjalan stabil. Dengan demikian, kualitas sinyal secara umum tetap stabil dan dapat mendukung proses decoding sinyal dengan baik.
3. Berdasarkan hasil pengukuran, nilai rata-rata RSSI sebesar -37,24 dBm, yang tergolong sangat kuat dan berada dalam rentang ideal untuk jaringan LTE di lingkungan tertutup (-50 dBm hingga -30 dBm). Sebagai bukti, pada Tunnel 1 diperoleh nilai RSSI sebesar -29,69 dBm, menunjukkan kekuatan sinyal yang sangat kuat karena penempatan repeater dan leaky feeder lebih rapat. Sedangkan pada Tunnel 7, nilai RSSI sebesar -39,59 dBm masih berada dalam kategori kuat dan memenuhi standar, meskipun panjang jalur lebih besar menyebabkan redaman lebih signifikan. Hasil ini membuktikan bahwa sistem distribusi sinyal melalui leaky feeder telah dirancang dengan baik untuk menjaga kekuatan sinyal sepanjang jalur.
4. SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) menunjukkan kualitas sinyal bersih dari gangguan noise dan interferensi. Semakin tinggi nilai SINR, semakin baik kualitas jaringan. Dari hasil pengukuran, nilai rata-rata SINR sebesar 24,68 dB, yang termasuk kategori sangat baik karena telah melampaui batas KPI LTE yaitu lebih dari 20 dB. Sebagai contoh, pada Tunnel 9, diperoleh nilai SINR tertinggi yaitu 39,34 dB, menandakan kualitas sinyal sangat bersih dan stabil akibat desain distribusi sinyal yang optimal. Sebaliknya, pada Tunnel 1, SINR yang diperoleh adalah 11,74 dB, lebih rendah karena adanya interferensi lebih besar. Namun demikian, secara

keseluruhan semua nilai SINR masih memenuhi standar layanan LTE dan menunjukkan jaringan beroperasi dengan baik di seluruh tunnel.

5. Throughput menggambarkan kecepatan aktual jaringan dalam mentransmisikan data dari perangkat ke jaringan. Nilai rata-rata throughput yang diperoleh sebesar 57.093 Kbps (57 Mbps), jauh melebihi standar minimum KPI LTE untuk layanan multimedia di area tertutup yaitu 30 Mbps. Sebagai contoh, pada Tunnel 7, throughput tercatat sebesar 47.091 Kbps (47 Mbps). Hal ini konsisten dengan nilai SINR yang juga sangat baik, sehingga throughput yang dihasilkan pun maksimal. Sedangkan pada Tunnel 1, throughput yang dicapai sebesar 36.944 Kbps (36 Mbps), masih memenuhi standar minimum meskipun lebih rendah karena dipengaruhi oleh SINR yang lebih kecil. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa hubungan antara RSRP, SINR, dan throughput sudah sejalan dengan teori komunikasi, di mana semakin kuat dan bersih sinyal, maka semakin besar kapasitas data yang dapat dihantarkan.

H. Rekapitulasi Perbandingan Hasil Drive Test dan Hasil Simulasi

Perbandingan ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana hasil simulasi yang telah dirancang mampu menggambarkan kondisi jaringan secara nyata di lapangan, khususnya dalam aspek kekuatan sinyal, kualitas sinyal, serta kapasitas kecepatan data. Parameter yang dibandingkan meliputi RSRP, RSRQ, RSSI, SINR, dan Throughput, dengan mengacu pada standar Key Performance Indicator (KPI) yang telah ditetapkan sebagai acuan kelayakan performa jaringan LTE.

I.

Tabel berikut memperlihatkan hasil rekapitulasi secara ringkas antara hasil Drive Test, hasil Simulasi, target KPI, dan kesimpulan capaian terhadap standar yang berlaku.

TABEL 16

Parameter	Hasil Drive Test	Hasil Simulasi	Target KPI	Kesimpulan
RSRP (dBm)	-133,67	-66,82	≥ -80 dBm	Memenuhi Target KPI
RSRQ (dB)	-15,08	-12,58	≥ -15 dB	Memenuhi Target KPI
RSSI (dBm)	-73,23	-37,24	≥ -65 dBm	Memenuhi Target KPI
SINR (dB)	4,12	24,68	≥ 13 dB	Memenuhi Target KPI
Throughput (kbps)	NO COVERAGE	57.093,37	≥ 30.000 kbps	Memenuhi Target KPI

Analisis Perbandingan Hasil Drive Test dan Hasil Simulasi Terhadap Target KPI Berdasarkan hasil rekapitulasi yang telah disajikan, dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi jaringan LTE dengan menggunakan teknologi Leaky Feeder secara umum telah memenuhi seluruh parameter Key Performance Indicator (KPI) yang menjadi acuan kinerja jaringan. Parameter yang dievaluasi mencakup RSRP, RSRQ, RSSI, SINR, dan Throughput.

1. Pada hasil simulasi, nilai rata-rata RSRP (Reference Signal Received Power) yang diperoleh sebesar -66,82 dBm telah memenuhi standar KPI yaitu minimal ≥ -80 dBm. Hal ini membuktikan bahwa secara perencanaan, kekuatan sinyal yang tersebar di sepanjang terowongan sudah berada dalam kondisi yang sangat baik. Sebaliknya, hasil Drive Test menunjukkan nilai RSRP yang sangat rendah yaitu -133,67 dBm, yang menandakan terdapat banyak area blankspot atau hilangnya cakupan sinyal yang signifikan di lapangan.
2. Untuk parameter RSRQ (Reference Signal Received Quality), hasil simulasi mencatat nilai -12,58 dB, yang juga telah memenuhi KPI lebih dari -15 dB, sementara

hasil Drive Test menghasilkan -15,08 dB, nyaris menyentuh batas KPI tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa kualitas sinyal pada pengukuran lapangan kurang stabil akibat adanya interferensi dan noise yang cukup signifikan di lingkungan pengukuran.

3. Pada aspek RSSI (Received Signal Strength Indicator), hasil simulasi mencatat nilai rata-rata -37,24 dBm yang jauh lebih baik dibandingkan standar KPI ≥ -65 dBm. Namun demikian, hasil Drive Test menunjukkan nilai -73,23 dBm yang menandakan kekuatan sinyal di lapangan tergolong lemah dan di bawah standar cakupan optimal untuk layanan LTE.
4. Parameter SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) juga memperlihatkan perbedaan signifikan antara hasil simulasi dan hasil pengukuran lapangan. Nilai simulasi menunjukkan 24,68 dB, yang telah melebihi standar KPI ≥ 13 dB dan menggambarkan kualitas sinyal yang sangat baik secara teori. Namun, hasil Drive Test hanya mencatat 4,12 dB, menandakan kualitas sinyal di lapangan sangat rentan terhadap gangguan interferensi maupun noise yang tinggi.
5. Pada aspek Throughput, hasil simulasi berhasil mencapai 57.093,37 Kbps, jauh melebihi KPI minimum 30.000 Kbps yang dibutuhkan untuk mendukung layanan data LTE secara optimal. Sebaliknya, pada hasil Drive Test tidak ditemukan data throughput karena kondisi NO COVERAGE yang terjadi di sebagian besar area pengukuran, sehingga kecepatan data tidak dapat tercatat.

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan perancangan komunikasi wireless di tunnel Whoosh rute Halim–Padalarang, solusi leaky feeder dipilih karena mampu meminimalisasi efek fading, noise, dan interferensi sehingga memastikan layanan LTE optimal, dengan hasil simulasi melampaui standar KPI 3GPP (RSRP ≥ -80 dBm, RSRQ ≥ -15 dB, RSSI ≥ -65 dBm, SINR ≥ 13 dB, Throughput ≥ 30.000 kbps). Kombinasi leaky cable dan repeater meningkatkan RSRP menjadi -66,82 dBm dari -133,67 dBm, RSSI menjadi -37,25 dBm dari -73,23 dBm, throughput hingga 54.987,82 Kbps, SINR menjadi 24,68 dB dari 4,12 dB, dan RSRQ menjadi -12,58 dB dari -15,08 dB, seluruhnya memenuhi KPI. Estimasi biaya implementasi pada seluruh tunnel mencakup CAPEX sebesar Rp 9.489.394.729, OPEX Rp 1.102.775.000, dengan potensi pendapatan Rp 6.472.652.040 per tahun dari pemakaian data penumpang, serta proyeksi Break Even Point tercapai dalam dua tahun. Dibangun telah memenuhi aspek fungsionalitas dan performa yang dibutuhkan, serta memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut guna mendukung fitur tambahan seperti integrasi chatbot, pengiriman notifikasi waktu nyata, serta peningkatan pada aspek keamanan dan skalabilitas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Telkomsel, "Annual Report Telkomsel," Jakarta, 2024.
- [2] M. A. E.-s. a. M. R. S. Ayman Elnashar, "Coverage and Capacity Planning of 4G Networks," dalam *Design, Deployment and Performance of 4G-LTE Networks: A Practical Approach, First Edition*, John Wiley & Sons, Ltd., 2014, pp. 350-444.
- [3] P. V. R. F. A. M. W. Kuldeep S. Gill, "CHANNEL IMPAIRMENTS INSIDE A TUNNEL Channel Impairments Inside a Tunnel," *Performance Analysis of High Speed Trains*, p. 2, 2017.
- [4] S. Nurhaliza, *Analisis Layanan Kualitas Jaringan 4G di Kota Pekanbaru dengan G-Net Track*, vol. 1, 2022.
- [5] A. & D. A. Hikmaturokhman, *Distributed Antenna System 4G LTE Planning for Subway Tunnel of Mass Rapid Transit in Jakarta*, 2018.
- [6] W. e. a. Ali, *Seamless mobility under a dedicated distributed antenna system for high-speed rail networks*, no. IEEE Transactions on Vehicular Technology 69.12, 2020.
- [7] W. a. W. W. Song, "Research on frequency switching algorithm based on distributed antenna system," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2383, no. IOP Publishing, 2022.
- [8] X. F. Hasan Farahneh, "The Leaky Feeder, a Reliable Medium for Vehicle to Infrastructure Communications," *Appl. Syst. Innov*, vol. 2, p. 36, 2019.
- [9] I. T. Union, *Handbook on Telecommunication for Disaster Relief and Mitigation*, Geneva: ITU, 2014.
- [10] I. o. E. a. E. Engineers, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," dalam *IEEE Standard 802.11*, 2020.
- [11] Kementerian Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia, Peraturan Menteri Komunikasi dan Informatika No. 13 Tahun 2019 tentang Penggunaan Spektrum Frekuensi Radio untuk Kepentingan Telekomunikasi Khusus, 2019.
- [12] International Telecommunication Union, "Short Range Narrow-band Digital Radiocommunication Transceivers – PHY and MAC Layer for Communications in Noisy Environments," dalam *ITU-T G.9959*, Geneva, 2012.
- [13] W. Bhumi., "Pembangunan Kereta Cepat Jakarta-Bandung: Memaknai Konsultasi Publik dan Partisipasi Masyarakat Dalam Pengadaan Tanah," vol. 2, p. 2, oktober 2022.
- [14] PT Kereta Cepat Indonesia-China (KCIC), "Laporan Tahunan Proyek Kereta Cepat Jakarta-Bandung," KCIC, Jakarta, 2022.
- [15] R. & W. T. Saputra, "Analisis Implementasi Sistem Komunikasi Nirkabel pada Infrastruktur Kereta Cepat di Indonesia," *Jurnal Transportasi Indonesia*, pp. 123-135.
- [16] PT Kereta Cepat Indonesia China, "Laporan Studi Kelayakan KCJB," KCIC, Jakarta, 2021.
- [17] B. P. P. Nasional, *Pedoman Evaluasi Proyek KPBU Bidang Transportasi*, 2022.
- [18] Kementerian Perhubungan RI, *Kajian Efisiensi Operasional Transportasi Massal Perkotaan*, 2023.
- [19] M. D. A. F. K. H. M. & I. A. Atmadja, "Leaky Feeder as a VoIP Transmission Medium," *West Science Interdisciplinary Studies*, vol. 2, p. 10, 2024.