

Perancangan dan Analisis Komunikasi Nirkabel Pada Whoosh KCIC Antara Jalur Stasiun Padalarang dan Stasiun Tegalluar Summarecon

1st Satria Zaki Ramadhan
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

satriazakiramadhan@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Riezky Anriza Ifandhi
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

riezkyanriza@student.telkomuniversity.ac.id

3rd Sebastian Surya Darna
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

sebastiasurya@student.telkomuniversity.ac.id

4th Uke Kurniawan Usman
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

ukeusman@telkomuniversity.co.id

5th Vinsensius Sigit Widhi Prabowo
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

vinsensigitwp@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Kereta Cepat Whoosh KCIC memerlukan sistem komunikasi yang andal untuk mendukung operasional pada kecepatan yang tinggi, namun infrastruktur yang tersedia saat ini masih memiliki keterbatasan pada aspek kapasitas, cakupan, dan fleksibilitas. Penelitian ini mengusulkan perancangan dan analisis sistem LTE-R berbasis frekuensi 450 MHz pada lintasan Stasiun Padalarang dan Stasiun Tegalluar Summarecon sebagai solusi yang mampu menyediakan cakupan lebih luas dengan jumlah *site* minimal, sehingga berpotensi mengurangi biaya instalasi maupun pemeliharaan. Berdasarkan hasil perencanaan cakupan, ditetapkan lima titik lokasi penempatan *site* dengan rata-rata RSRP sebesar $-69,75$ dBm pada radius sel efektif 3,2188 km, serta nilai rata-rata SINR 32,09 dB yang menunjukkan kualitas komunikasi yang stabil. Pengujian *downlink throughput* menghasilkan rata-rata 22,08 Mbps, sementara analisis BER menunjukkan pengaruh signifikan skema modulasi terhadap keberhasilan transmisi data, di mana pada target 10^{-4} dengan SINR 32,08 dB diperoleh nilai BER untuk QPSK sebesar 10^{-6} , 16-QAM sebesar 10^{-4} , dan 64-QAM sebesar 10^{-3} . Hasil ini menegaskan pentingnya pemilihan strategi modulasi yang tepat untuk menjamin keandalan komunikasi pada operasi sebuah kereta cepat.

Kata kunci — 450 MHz, Bit Error Rate, Kereta Cepat Whoosh KCIC, LTE-R, Signal to Interference-plus-Noise Ratio.

I. PENDAHULUAN

Sistem komunikasi nirkabel berperan esensial dalam memastikan keselamatan, efisiensi, dan keandalan operasional Kereta Cepat Whoosh KCIC. Pertukaran informasi secara *real-time* antara kereta dan pusat kendali

menjadi faktor kunci dalam pengaturan lalu lintas, penanganan kondisi darurat, serta pengambilan keputusan yang presisi [1]. Namun, infrastruktur komunikasi yang digunakan saat ini masih memiliki keterbatasan dalam kapasitas, cakupan, dan fleksibilitas, khususnya dalam memenuhi kebutuhan transmisi data berkecepatan tinggi dengan latensi rendah pada kondisi mobilitas tinggi [2] [3].

Kemajuan teknologi komunikasi membuka peluang penerapan sistem yang lebih modern dan adaptif, salah satunya adalah *Long Term Evolution for Railway* (LTE-R). Teknologi ini merupakan pengembangan dari LTE yang dirancang secara khusus untuk memenuhi kebutuhan transportasi kereta, dengan keunggulan pada kapasitas *bandwidth* yang lebih besar, latensi yang sangat rendah, serta proses *handover* yang mulus [4]. LTE-R mendukung beragam layanan, meliputi komunikasi operasional dan keselamatan seperti *Train Control & Monitoring System* (TCMS), *Automatic Train Control* (ATC), *Mission Critical Push-to-Talk* (MCPTT), *Mission Critical Video* (MCVideo), dan *Mission Critical Data* (MCData), disertai layanan diagnostik, pemeliharaan berbasis *Internet of Things* (IoT), serta konektivitas penumpang [4].

Penelitian ini difokuskan pada perancangan dan analisis sistem komunikasi LTE-R menggunakan frekuensi 450 MHz di lintasan Stasiun Padalarang–Tegalluar Summarecon, dengan tujuan meningkatkan kualitas dan jangkauan sinyal, menurunkan latensi, serta menjaga kestabilan koneksi pada kondisi mobilitas tinggi. Ruang lingkup kajian dibatasi pada segmen sepanjang 32,8 km yang mencakup wilayah Kabupaten Bandung, Kota Bandung, Kota Cimahi, dan Kabupaten Bandung Barat. Analisis dilakukan berdasarkan parameter teknis meliputi *Reference Signal Received Power* (RSRP), *Signal to Interference plus Noise Ratio* (SINR), *downlink throughput*, dan *Bit Error Rate* (BER). Hasil yang

diharapkan adalah rancangan jaringan yang efisien, andal, dan berkelanjutan untuk mendukung operasional kereta cepat dengan tingkat keselamatan dan performa optimal.

II. KAJIAN TEORI

A. Kereta Cepat Whoosh KCIC

Kereta Cepat Whoosh KCIC merupakan rangkaian transportasi berteknologi maju yang terdiri dari 8 gerbong dengan total kapasitas penumpang mencapai 601 orang, terbagi dalam kelas *First*, *Business*, dan *Premium Economy*. Dengan panjang total mencapai 209,72 meter dan lebar 3,36 meter, model KCIC400AF dirancang dengan pendekatan aerodinamis dan pemanfaatan material ringan namun tahan lama, seperti paduan aluminium dan bahan komposit [2].

Lintasan operasional Whoosh KCIC meliputi rute Padalarang hingga Tegalluar Summarecon dengan panjang sekitar 32,8 kilometer dan waktu tempuh rata-rata sekitar 13 menit, yang mengindikasikan kecepatan rata-rata perjalanan 160 km/jam.

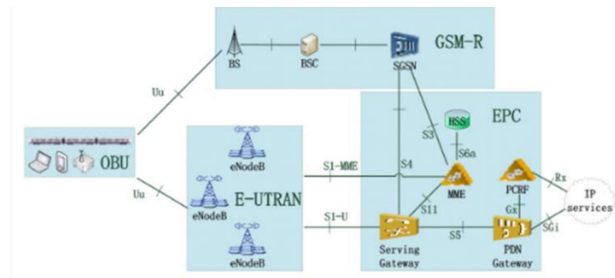
B. Komunikasi Nirkabel

Komunikasi nirkabel merupakan proses pertukaran data antar titik tanpa menggunakan media kabel, melainkan memanfaatkan gelombang elektromagnetik. Sistem ini terdiri dari elemen utama, yaitu pemancar, medium transmisi berupa udara, dan penerima. Dalam konteks sistem komunikasi sebuah kereta, tantangan utama adalah menghadapi mobilitas tinggi yang menyebabkan efek pergeseran frekuensi *Doppler* serta propagasi sinyal yang berbasis koridor dengan kondisi lingkungan beragam seperti area terbuka, terowongan, dan kawasan perkotaan yang padat [5].

Untuk menjamin kualitas dan keandalan komunikasi, perancangan jaringan harus memperhatikan model propagasi secara komprehensif, termasuk perhitungan *path loss*, *fading*, dan penetrasi sinyal ke dalam area yang sulit dijangkau. Parameter kualitas layanan seperti *latency*, *throughput*, dan tingkat kesalahan bit (BER) sangat krusial guna memenuhi kebutuhan aplikasi *real-time* dan keselamatan operasional.

C. Long Term Evolution for Railways

LTE-R adalah varian teknologi LTE yang diadaptasi khusus untuk lingkungan kereta dengan menitikberatkan pada latensi rendah, tingkat keandalan tinggi, serta dukungan terhadap berbagai jenis layanan, mulai dari multimedia hingga signaling keselamatan. Arsitektur LTE-R yang terlihat pada Gambar 1 melibatkan komunikasi antara perangkat *On-Board Unit* di dalam kereta dengan *eNodeB* yang ditempatkan di sepanjang jalur kereta, kemudian terhubung ke *core network* EPC yang mencakup elemen-elemen seperti *Mobility Management Entity* (MME), *Serving Gateway* (S-GW), dan *Packet Gateway* (P-GW). Sistem ini juga mengintegrasikan fungsi HSS, *Policy and Charging Rules Function* (PCRF), serta *IP Multimedia Subsystem* (IMS) untuk pengelolaan layanan multimedia dan kebijakan jaringan [6].



Gambar 1. Arsitektur LTE-R Pada Kereta Cepat

Dalam pengoperasian pada kecepatan tinggi, LTE-R mengutamakan mekanisme *handover* yang cepat dan deterministik untuk menjaga kelangsungan komunikasi tanpa gangguan. Optimalisasi antena *trackside*, khususnya dalam orientasi azimuth dan tilt, sangat penting untuk memastikan cakupan maksimal dengan gangguan minimal. Penggunaan spektrum frekuensi rendah di bawah 1 GHz dipilih untuk memperoleh jangkauan yang luas serta penetrasi sinyal yang efektif, terutama di terowongan dan lingkungan perkotaan. LTE-R juga dirancang agar dapat beroperasi secara paralel dengan sistem GSM-R selama masa transisi, dengan dukungan teknologi *Software-Defined Radio* (SDR) demi kompatibilitas. Selain itu, LTE-R mendukung aplikasi-aplikasi *real-time* krusial seperti *telemetry*, CCTV, dan pemantauan jalur yang memerlukan prioritas trafik dan jaminan kualitas layanan (QoS) dari subsistem PCRF dan EPC [7].

D. Coverage Planning

Perencanaan cakupan merupakan rangkaian kegiatan yang bertujuan untuk menjamin jaringan dapat menyediakan layanan dengan jangkauan luas dan kestabilan tinggi di seluruh wilayah operasionalnya. Proses ini mencakup penentuan posisi menara pemancar yang strategis serta pengelolaan sumber daya jaringan guna mengoptimalkan penyebaran sinyal. Fokus utama dari perencanaan ini adalah meminimalkan area dengan kualitas sinyal rendah yang dapat berdampak negatif pada pengalaman pengguna, sehingga cakupan sinyal dapat diperluas secara efektif dan konsisten [8].

Selain itu, perencanaan cakupan harus memperhatikan variabel lingkungan yang mempengaruhi propagasi sinyal, seperti kondisi geografis, cuaca, serta keberadaan struktur bangunan dan kepadatan penduduk. Dengan mempertimbangkan faktor-faktor ini secara komprehensif, kualitas layanan dapat dijaga tetap stabil bahkan pada area yang sulit dijangkau atau padat penduduk, sehingga memberikan koneksi yang andal dan optimal bagi pengguna. Di samping itu, aspek proyeksi pertumbuhan trafik data dan jumlah pengguna juga harus menjadi dasar dalam perencanaan, guna mengantisipasi peningkatan kebutuhan kapasitas jaringan di masa depan. Melalui pemetaan yang teliti dan perencanaan yang matang, jaringan dapat dirancang untuk mengakomodasi peningkatan tersebut secara efisien, memaksimalkan pemanfaatan infrastruktur yang ada sekaligus menjaga kualitas layanan secara berkelanjutan [8].

E. Capacity Planning

Perencanaan kapasitas merupakan suatu proses krusial dalam pengelolaan jaringan yang bertujuan untuk memastikan tersedianya kapasitas yang memadai dalam

menghadapi peningkatan volume trafik data secara berkelanjutan. Tahapan ini meliputi evaluasi menyeluruh terhadap infrastruktur yang telah ada, termasuk jumlah menara pemancar, kanal frekuensi, serta sumber daya teknis lainnya, sekaligus memperkirakan kebutuhan kapasitas di masa depan. Dengan pelaksanaan perencanaan kapasitas yang tepat, kualitas layanan dapat dipertahankan dan risiko kemacetan atau kelebihan beban jaringan yang berpotensi menurunkan pengalaman pengguna dapat diminimalisasi [9].

Pelaksanaan *capacity planning* menuntut pemahaman komprehensif terhadap pola lalu lintas data dan jenis aplikasi yang digunakan oleh para pengguna jaringan. Faktor seperti konsentrasi pengguna yang tinggi dan aplikasi dengan kebutuhan *bandwidth* harus menjadi pertimbangan utama dalam perencanaan ini. Melalui pemantauan berkelanjutan atas pemakaian jaringan, operator dapat mendeteksi segmen jaringan yang mengalami tekanan berlebih dan mengambil tindakan strategis, seperti penambahan menara pemancar atau perluasan jaringan, guna mengatasi masalah kapasitas tersebut [10].

F. Drive Test

Drive test merupakan metode pengujian lapangan yang digunakan untuk mengukur dan mengevaluasi performa jaringan seluler secara langsung dengan mengumpulkan data dari berbagai lokasi operasional. Teknik ini dilakukan dengan mengendarai kendaraan yang dilengkapi perangkat pengukur khusus untuk merekam berbagai parameter jaringan seperti kualitas sinyal, kekuatan sinyal, *throughput* data, serta tingkat interferensi yang terjadi di area pengujian. Data yang diperoleh dari *drive test* sangat berharga untuk analisis kondisi jaringan secara *real-time*, terutama dalam hal cakupan sinyal dan kualitas koneksi. Melalui metode ini, area dengan sinyal lemah atau gangguan dapat diidentifikasi sehingga memungkinkan operator untuk memahami lebih mendalam kondisi lapangan yang sebenarnya serta dampaknya terhadap pengalaman pengguna [11].

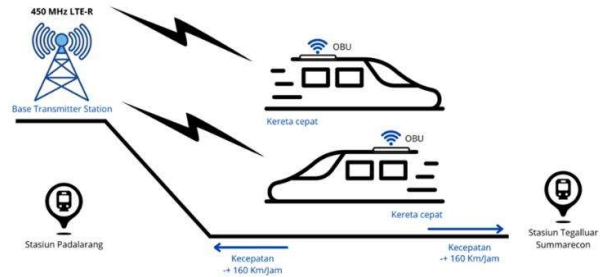
Selain sebagai alat evaluasi, *drive test* juga berperan penting dalam proses perencanaan dan optimasi jaringan. Informasi yang dikumpulkan selama pengujian dapat membantu mengungkap permasalahan teknis yang ada dan menentukan lokasi yang membutuhkan peningkatan kapasitas atau kualitas jaringan. Pengujian lapangan ini memberikan gambaran akurat mengenai performa jaringan dalam kondisi nyata, termasuk stabilitas koneksi dan kecepatan transmisi data [12].

III. METODE

A. Desain Sistem Perancangan Jaringan LTE-R

Desain sistem jaringan LTE-R untuk lintasan Whoosh KCIC antara Stasiun Padalarang dan Stasiun Tegalluar Summarecon yang tertera pada Gambar 2 dikembangkan guna mengoptimalkan komunikasi antara kereta dan pusat kendali dengan memanfaatkan teknologi LTE-R pada frekuensi 450 MHz. Sistem ini dirancang untuk menjamin konektivitas yang handal dan responsif, meskipun kereta melaju dengan kecepatan rata-rata sekitar 160 km/jam, serta mampu mengatasi berbagai tantangan lingkungan yang kompleks sepanjang jalur. Pemilihan frekuensi 450 MHz didasarkan pada kemampuannya dalam menjangkau cakupan yang luas sekaligus menembus hambatan fisik, sehingga

mendukung kebutuhan aplikasi kritis seperti transmisi suara dan data secara *real-time*.



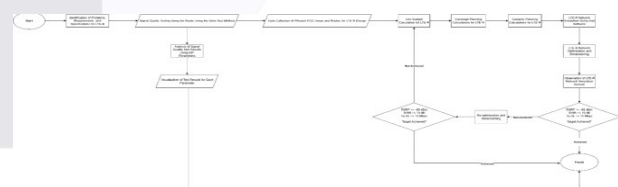
Gambar 2. Desain Sistem Perancangan LTE-R

Gambar 3 menunjukkan konfigurasi keseluruhan sistem LTE-R yang digunakan pada jalur kereta cepat Whoosh KCIC antara Stasiun Padalarang dan Stasiun Tegalluar Summarecon, yang melibatkan 5 Base Transceiver Station (site 1 hingga site 5) yang ditempatkan secara strategis. Masing-masing BTS dilengkapi dengan dua sektor guna memaksimalkan cakupan sinyal dalam dua arah berbeda, sehingga mampu mendukung konektivitas yang andal bagi kereta yang melaju dengan kecepatan rata-rata 160 km/jam. Model ini merepresentasikan infrastruktur komunikasi nirkabel yang dirancang secara khusus untuk memastikan kestabilan dan kontinuitas sinyal sepanjang lintasan operasional kereta cepat tersebut.



Gambar 3. Desain Sistem Keseluruhan

B. Flowchart Perancangan Jaringan LTE-R



Gambar 4. Flowchart Perancangan Jaringan LTE-R

Flowchart pada Gambar 4 menggambarkan langkah-langkah sistematis dalam perancangan dan evaluasi jaringan LTE-R untuk jalur kereta cepat Whoosh KCIC antara Stasiun Padalarang dan Tegalluar. Proses dimulai dengan identifikasi kebutuhan teknis dan spesifikasi sistem, dilanjutkan dengan pengukuran lapangan menggunakan metode *drive test* untuk memperoleh data kondisi sinyal aktual. Data tersebut kemudian dianalisis berdasarkan indikator kinerja utama (KPI) dan divisualisasikan guna mempermudah pemahaman performa jaringan. Selanjutnya, data ini digunakan sebagai dasar perhitungan *link budget* serta perencanaan cakupan dan

kapasitas jaringan. Proses dilanjutkan dengan simulasi jaringan menggunakan perangkat lunak Atoll, di mana hasil simulasi dievaluasi dengan mengacu pada standar target KPI. Apabila hasil simulasi belum memenuhi kriteria yang ditetapkan, dilakukan proses optimisasi dan penyesuaian secara berulang, menunjukkan pendekatan iteratif yang diterapkan untuk mencapai kinerja jaringan LTE-R yang optimal dan andal.

C. Perhitungan Uplink Link Budget LTE-R

Tabel 1. Perhitungan Uplink Link Budget

LINK BUDGET LTE-R (UPLINK)		
Transmitter	Value	Calculation
OBU TX Power (dBm)	23	A
OBU Gain (dBi)	2	B
Body Loss (dB)	1	C
EIRP (dBm)	24	D = A+B-C
Total Subcarrier (20 MHz BW)	1200	Total RB*12
Receiver	Value	Calculation
eNb Noise Figure (dB)	2.2	E
Thermal Noise (dBm)	-100.9669292	F = k*T*BW
SINR (dB)	-9	G
Receiver Sensitivity (dBm)	-107.7669292	H = E+F+G
Interference Margin (dB)	3	I
Fading Margin (dB)	3	J
Penetration Loss (dB)	12	K
Feeder Loss (dB)	1	L
eNb Gain (dBi)	18	M
MAPL (dB)	130.7669292	O = D-H-I-J-K-L+M

D. Perhitungan Downlink Link Budget LTE-R

Tabel 2. Perhitungan Downlink Link Budget

LINK BUDGET LTE-R (DOWNLINK)		
Transmitter	Value	Calculation
eNb TX Power (dBm)	45	A
eNb Gain (dBi)	18	B
Feeder Loss (dB)	1	C
EIRP (dBm)	62	D = A+B-C
Total Subcarrier (20 MHz BW)	1200	Total RB*12
Receiver	Value	Calculation
OBU Noise Figure (dB)	7	E
Thermal Noise (dBm)	-100.9669292	F = k*T*BW
SINR (dB)	-9	G
Receiver Sensitivity (dBm)	-102.9669292	H = E+F+G
Interference Margin (dB)	6	I
Fading Margin (dB)	5	J
Penetration Loss (dB)	12	K
Body Loss (dB)	0	L
OBU Gain (dBi)	0	M
MAPL (dB)	141.9669292	O = D-H-I-J-K-L+M

E. Subcarrier Spacing (15 KHz)

Tabel 3. Subcarrier Spacing for 15 kHz

Subcarrier Spacing (15 kHz)	
Bandwidth	Total Resource Block
1.4 MHz	6
3 MHz	13
5 MHz	25
10 MHz	50
15 MHz	75
20 MHz	100

F. Pathloss Model Propagasi Okumura-Hatta

Tabel 4. Pathloss for Okumura-Hatta Model

PATH LOSS (Okumura-Hatta)	
a(hR) > OBU Height Antenna Factor (m)	5.646050227
Frekuensi (MHz)	450
hT > eNodeB Antenna Height (m)	30
hR > OBU height (m)	4.05
d > Jarak antara eNodeB dengan OBU (km)	3.218816695
PATH LOSS (dB) >> Open Area	104.8113294

G. Total Site Calculation

Tabel 5. Total Site Calculation

TOTAL SITE CALCULATION	
Parameter	Value
Panjang Area Jalur Kereta (km)	32,8
Cell Radius per Site (2-Sectoral) (km)	6,4376
Total Site (2-Sectoral)	5

H. Parameter Teknis RSRP Perancangan LTE-R

Pengukuran RSRP digunakan untuk menilai kekuatan sinyal yang diterima oleh sistem komunikasi LTE-R pada jalur Whoosh KCIC antara Stasiun Padalarang dan Stasiun Tegalluar Summarecon. Kekuatan sinyal yang memadai di setiap titik sangat krusial untuk menjaga kestabilan komunikasi antara kereta dan stasiun pangkalan, sekaligus memastikan kualitas transmisi suara dan data bagi pengguna. Parameter ini juga menjadi indikator penting dalam mengevaluasi apakah infrastruktur jaringan yang direncanakan sudah mencakup seluruh area dengan cakupan sinyal yang memadai untuk mendukung komunikasi suara dan data secara optimal [13].

Persamaan dalam pengukuran parameter teknis beserta range kategori parameter teknis RSRP tertera pada Persamaan 1 dan Tabel 6 dibawah ini.

$$RSRP = RSSI_{dBm} - 10 \log(12 \times N) \quad (1)$$

Tabel 6. KPI Parameter RSRP

PARAMETER RSRP (dBm)	Kategori
-40 ≤ RSRP < -85	Excellent
-86 ≤ RSRP < -90	Good
-91 ≤ RSRP < -100	Fair
-101 ≤ RSRP < -110	Poor

I. Parameter Teknis SINR Perancangan LTE-R

Parameter *Signal-to-Noise and Interference Ratio* mengukur perbandingan antara kekuatan sinyal yang diterima dengan tingkat interferensi dan kebisingan di lingkungan sepanjang jalur Whoosh KCIC. Pengukuran SINR sangat penting untuk menilai kualitas jaringan dalam kondisi gangguan yang mungkin timbul, seperti interferensi dari jaringan lain atau faktor lingkungan. Nilai SINR yang tinggi sangat dibutuhkan guna memastikan keandalan komunikasi, khususnya dalam mendukung operasional kereta

cepat yang mengandalkan transmisi data dan kontrol yang akurat serta tepat waktu [14].

Persamaan dalam pengukuran parameter teknis beserta *range* kategori parameter teknis SINR tertera pada Persamaan 2 dan Tabel 7 dibawah ini.

$$SINR = \frac{S}{I + N} \quad (2)$$

Tabel 7. KPI Parameter SINR

PARAMETER SINR (dB)	Kategori
≥ 20	<i>Excellent</i>
$0 \leq SINR < 10$	<i>Good</i>
$-10 \leq SINR < 0$	<i>Bad</i>
$-20 \leq SINR < -10$	<i>Very Bad</i>

J. Parameter Teknis *Throughput Downlink* Perancangan LTE-R

Throughput merupakan ukuran kapasitas jaringan dalam mentransfer data di jalur antara Stasiun Padalarang dan Stasiun Tegalluar Summarecon, yang penting untuk menilai kecepatan transfer data perangkat kereta cepat. Pengujian *throughput* diperlukan untuk memastikan dukungan optimal terhadap aplikasi operasional seperti pemantauan kereta, pelacakan posisi, dan kontrol sistem. Tingginya *throughput* menjamin sistem LTE-R mampu menangani volume data besar tanpa mengurangi kualitas layanan komunikasi [15].

Standar performa dalam parameter teknis berdasarkan KRNA beserta *range* kategori parameter teknis *Throughput* tertera pada Tabel 8 Dan Tabel 9 dibawah ini.

Tabel 8. Standar Parameter Teknis *Throughput*

Parameter	Standar <i>Throughput</i> KRNA
<i>Railway Specific Advantages of LTE-R System, Throughput-focused</i>	Maksimum 75 Mbps; Memastikan (minimum) rata-rata <i>throughput</i> sekitar 40 Mbps sisi <i>downlink</i> dan 20 Mbps sisi <i>uplink</i> ; kondisi <i>bandwidth</i>

Tabel 9. KPI Parameter *Throughput*

PARAMETER THROUGHPUT (Mbps)	Kategori
≥ 20	<i>Excellent</i>
$10 \leq THROUGHPUT < 20$	<i>Good</i>
$1 \leq THROUGHPUT < 10$	<i>Normal</i>
$0,5 \leq THROUGHPUT < 1$	<i>Fair</i>
$\leq 0,5$	<i>Poor</i>

K. Parameter Teknis BER Perancangan LTE-R

Bit Error Rate (BER) mengukur frekuensi kesalahan bit selama transmisi data dan menjadi indikator utama kualitas

komunikasi jaringan. Dalam konteks sistem kereta cepat, pengujian BER bertujuan meminimalkan kesalahan transmisi untuk menjaga akurasi dan keandalan komunikasi antara perangkat kereta dan stasiun pangkalan. Tingkat BER yang rendah sangat krusial karena kesalahan data dapat berdampak negatif pada sistem kontrol dan keselamatan operasional, sehingga memastikan pengiriman informasi yang tepat waktu dan akurat sepanjang jalur kereta cepat [16].

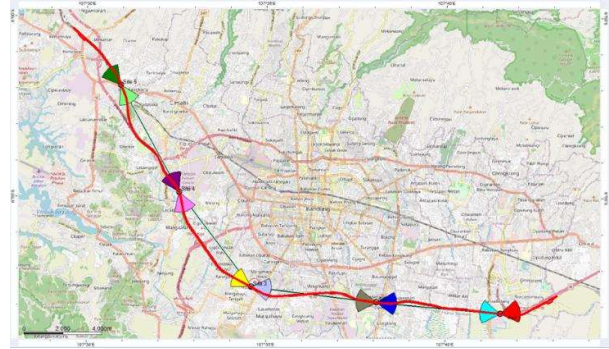
Pada Tabel 10 tertera standar teknis dari target BER dengan mempertimbangan modulasi QPSK, 16-QAM- dan 64-QAM.

Tabel 10. Targert Standar Teknis BER pada SINR

Modulasi LTE-R	Target BER
QPSK	$\leq 10^{-4}$
16-QAM	
64-QAM	

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pemilihan Lokasi *Site*



Gambar 5. Penempatan Lokasi *Site*

Perencanaan infrastruktur jaringan LTE-R pada jalur antara Stasiun Padalarang dan Stasiun Tegalluar Summarecon didasarkan pada hasil *coverage planning* yang menunjukkan kebutuhan lima *site* untuk memastikan cakupan sinyal yang optimal sesuai standar teknis. Lokasi *site* tersebut ditentukan dengan koordinat geografis yang presisi, mencakup area strategis mulai dari 2,8 km barat Stasiun Tegalluar hingga Desa Gadobangkong di Kecamatan Ngamprah, sehingga mendukung penyediaan layanan komunikasi yang andal sepanjang lintasan kereta cepat. Penentuan titik koordinat ini memberikan dasar yang akurat untuk simulasi dan analisis jaringan guna mengoptimalkan performa LTE-R pada jalur tersebut.

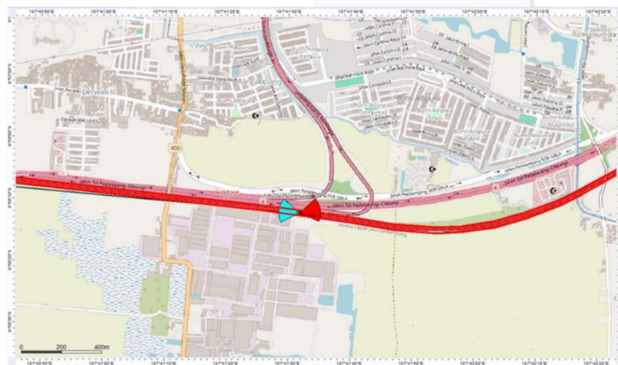
Pada Tabel 11 menunjukkan titik koordinat pada setiap penempatan *site* perancangan jaringan LTE-R.

Tabel 11. Titik Koordinat Penempatan *Site*

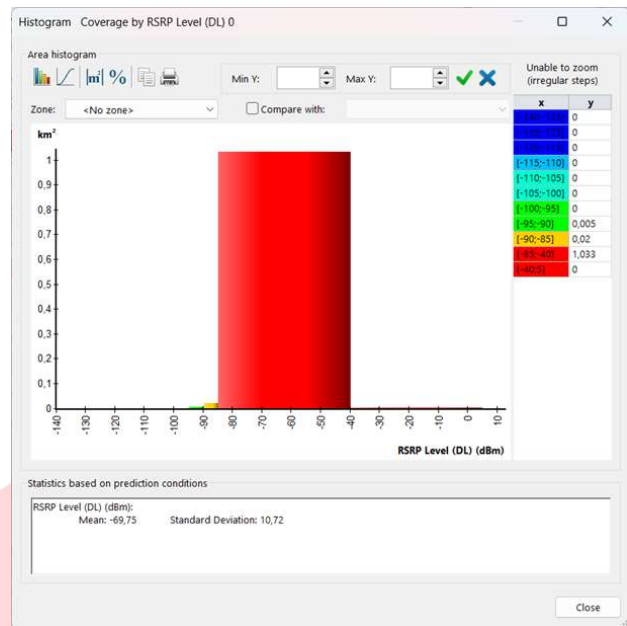
No.	Deskripsi Lokasi Site (Titik Kordinat)
1.	2,8 kilometer sebelah barat Stasiun Tegalluar Summarecon (-6.969692323856701, 107.69044331221313)
2.	440 meter ke barat dari Jalan Kopo Sayati (-6.964933045035015, 107.63448278921658)
3.	Wilayah Kopo (-6.958121734365268, 107.57640447365704)
4.	Wilayah Sukahaji, Kota Cimahi (-6.914296396526385, 107.54287972248771)
5.	Desa Gadobangkong, Kecamatan Ngamprah (-6.865090154521008, 107.5157026760103)

B. Hasil Pengujian Simulasi RSRP

Pada Gambar 6 dan Gambar 7 menggambarkan distribusi nilai RSRP sepanjang jalur antara Stasiun Padalarang dan Stasiun Tegalluar Summarecon dengan skema warna yang bervariasi dari merah hingga biru. Warna merah menandakan area dengan kekuatan sinyal sangat baik, sedangkan warna biru dan hijau menunjukkan sinyal yang lebih rendah namun masih memadai untuk komunikasi. Analisis histogram menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah memiliki nilai RSRP antara -85 dBm hingga -40 dBm, dengan rata-rata sebesar -69,75 dBm dan deviasi standar 10,72 dB, yang mengindikasikan kualitas sinyal yang stabil dan memuaskan di sepanjang jalur. Dengan penempatan lima *site* secara merata, cakupan jaringan berhasil didistribusikan secara optimal. Hasil ini menegaskan efektivitas perencanaan dan pengoptimalan jaringan, di mana faktor-faktor seperti kondisi topografi dan interferensi telah diakomodasi dengan baik, sehingga tidak ditemukan area dengan sinyal lemah atau *blind spot*. Kondisi ini menunjukkan kesiapan jaringan untuk mendukung operasional kereta cepat dengan tingkat keandalan yang tinggi.



Gambar 6. Hasil Visualisasi Parameter RSRP



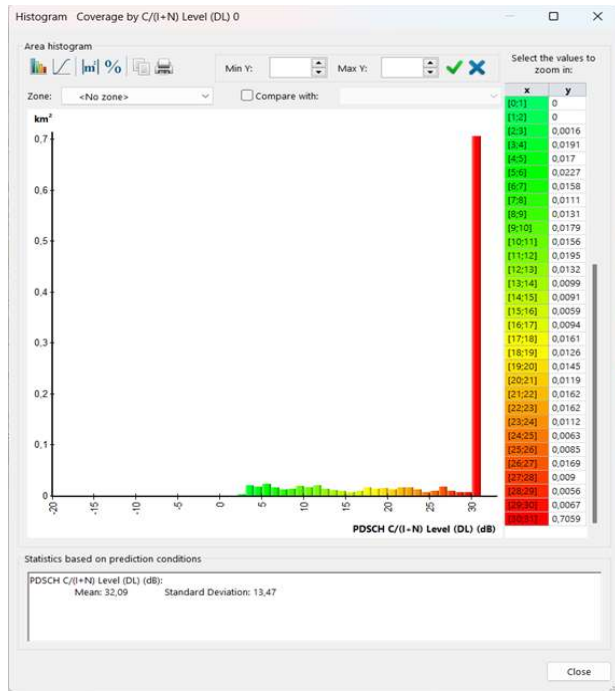
Gambar 7. Histogram Distribusi Persebaran RSRP

C. Hasil Pengujian Simulasi SINR

Pada Gambar 8 dan Gambar 9 memperlihatkan hasil prediksi distribusi nilai *Coverage by PDSCH C/(I+N) Level* (DL) pada jalur antara Stasiun Padalarang dan Stasiun Tegalluar Summarecon. Histogram ini memetakan rasio antara kekuatan sinyal (C) dengan gangguan serta *noise* (I+N) dalam jaringan LTE-R, dengan sumbu horizontal menunjukkan nilai C/(I+N) dalam dB dan sumbu vertikal merepresentasikan luas area terdampak dalam kilometer persegi. Berdasarkan simulasi, sebagian besar nilai C/(I+N) berada dalam rentang 3 dB hingga 31 dB, dengan puncak distribusi pada 31 dB yang menunjukkan area dengan kualitas sinyal paling optimal dan stabil. Rata-rata nilai C/(I+N) tercatat sebesar 32,09 dB dengan deviasi standar 13,47 dB, menggambarkan variasi kualitas sinyal di sepanjang rute. Temuan ini mengindikasikan bahwa mayoritas jalur memiliki kualitas sinyal yang kuat dan mendukung komunikasi yang stabil, meskipun terdapat beberapa area dengan nilai C/(I+N) lebih rendah akibat adanya interferensi dan *noise*.



Gambar 8. Hasil Visualisasi Parameter SINR



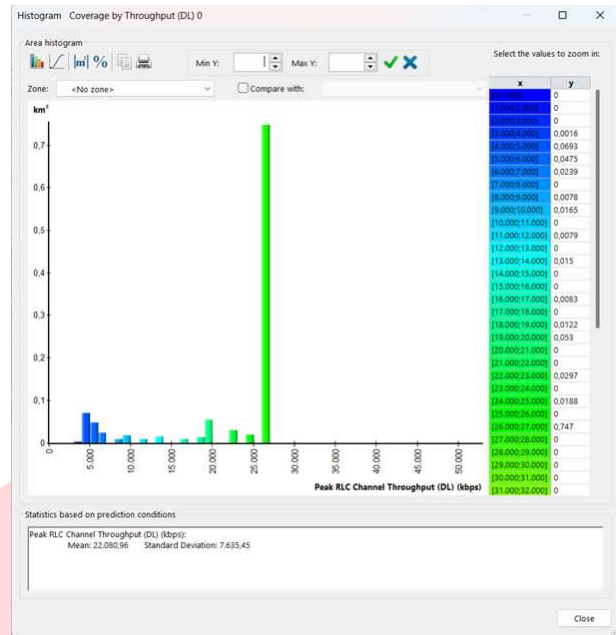
Gambar 9. Histogram Distribusi Persebaran SINR

D. Hasil Pengujian Simulasi Downlink Throughput

Gambar 10 dan Gambar 11 memperlihatkan hasil prediksi distribusi *throughput downlink* sepanjang jalur antara Stasiun Padalarang dan Stasiun Tegalluar Summarecon. Histogram tersebut menampilkan nilai *Peak RLC Channel Throughput* (DL) dalam satuan kbps pada sumbu horizontal, serta luas area terdampak dalam kilometer persegi pada sumbu vertikal. Simulasi menunjukkan bahwa sebagian besar area memiliki *throughput* antara 3.000 hingga 27.000 kbps, dengan puncak utama sekitar 27.000 kbps yang menandakan kecepatan data tinggi di sebagian besar wilayah. Rata-rata *throughput* tercatat sebesar 22.081 kbps dengan deviasi standar 7.635 kbps, menggambarkan variasi performa jaringan di sepanjang rute. Meskipun sebagian kecil area menunjukkan kecepatan yang lebih rendah, terdapat titik-titik dengan performa sangat baik, mencerminkan efektivitas optimasi jaringan. Temuan ini menegaskan bahwa kapasitas jaringan secara umum memadai untuk mendukung komunikasi data stabil, meskipun peningkatan di beberapa titik diperlukan untuk memastikan kualitas layanan yang konsisten di seluruh jalur.



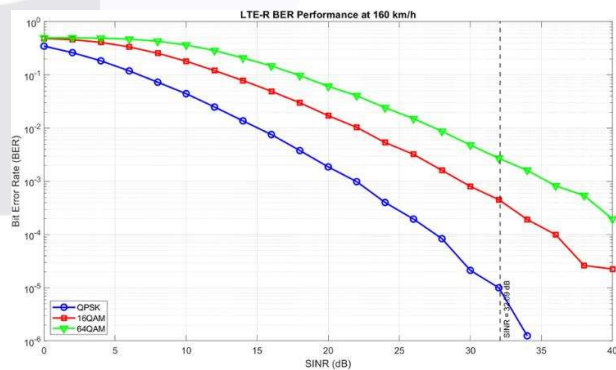
Gambar 10. Hasil Visualisasi Parameter *Throughput*



Gambar 11. Histogram Distribusi Persebaran *Throughput*

E. Hasil Pengujian Simulasi BER

Gambar 12 menampilkan hasil simulasi *Bit Error Rate* (BER) terhadap *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio* (SINR) pada jalur antara Stasiun Padalarang dan Stasiun Tegalluar Summarecon dengan modulasi QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM. Simulasi ini dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB. Grafik memperlihatkan rentang SINR dari 0 hingga 40 dB dan BER dari 10^0 hingga 10^{-6} , termasuk penanda nilai SINR 32,09 dB yang diperoleh dari simulasi Atoll sebelumnya. Terlihat bahwa modulasi dengan orde lebih tinggi cenderung menghasilkan BER yang lebih tinggi pada nilai SINR yang sama, dan hubungan antara BER dan SINR tidak sepenuhnya linear terutama saat SINR melewati 20 dB. Hasil ini memberikan gambaran penting mengenai performa modulasi yang berbeda dalam kondisi jaringan LTE-R pada lintasan kereta cepat tersebut.



Gambar 12. Grafik BER Terhadap SINR

V. KESIMPULAN

Sebagai rangkuman dari kajian mendalam mengenai perancangan dan analisis sistem komunikasi nirkabel LTE-R pada jalur Kereta Cepat Whoosh KCIC antara Stasiun Padalarang dan Stasiun Tegalluar Summarecon, dapat

disimpulkan bahwa perencanaan jaringan dimulai dengan perhitungan Link Budget yang cermat untuk menentukan batas redaman sinyal maksimum (MAPL), yakni 130,77 dB untuk uplink dan 141,97 dB untuk downlink, yang mencakup pertimbangan daya transmisi, gain antena, noise figure, sensitivitas penerima, dan margin terhadap interferensi serta fading. Model propagasi Okumura-Hata pada frekuensi 450 MHz berhasil memprediksi path loss sebesar 104,81 dB pada radius efektif 3,22 km, yang berada dalam batas MAPL, menjamin cakupan sinyal yang memadai. Konfigurasi antena 2-sektoral diterapkan untuk mengoptimalkan jangkauan dan mengurangi interferensi, dengan lima site strategis yang menutup seluruh koridor 32,8 km tanpa blind spot, yang lokasi koordinatnya ditetapkan secara tepat untuk menunjang simulasi dan analisis jaringan. Simulasi parameter teknis seperti RSRP menunjukkan rata-rata sinyal sebesar -69,75 dBm dengan cakupan stabil dan konsisten, sementara nilai SINR rata-rata 32,09 dB mengindikasikan kualitas sinyal yang kuat dan interferensi yang terkelola dengan baik. Throughput downlink mencapai rata-rata 22 Mbps, mencerminkan kapasitas data yang memadai untuk operasional kereta cepat, meskipun beberapa titik memerlukan peningkatan performa. Simulasi Bit Error Rate (BER) yang dikorelasikan dengan SINR pada modulasi QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM memperlihatkan peningkatan BER pada modulasi dengan orde lebih tinggi, dengan BER terbaik pada QPSK sebesar 10^{-6} pada SINR 32,09 dB, menandakan pentingnya pemilihan modulasi yang tepat untuk menjaga kualitas komunikasi. Secara keseluruhan, pendekatan perancangan ini menjamin infrastruktur LTE-R yang efisien, handal, dan siap mendukung kebutuhan komunikasi kritis sepanjang jalur Kereta Cepat Whoosh KCIC yang kuat dan interferensi yang terkelola dengan baik. Throughput downlink mencapai rata-rata 22 Mbps, mencerminkan kapasitas data yang memadai untuk operasional kereta cepat, meskipun beberapa titik memerlukan peningkatan performa. Simulasi Bit Error Rate (BER) yang dikorelasikan dengan SINR pada modulasi QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM memperlihatkan peningkatan BER pada modulasi dengan orde lebih tinggi, dengan BER terbaik pada QPSK sebesar 10^{-6} pada SINR 32,09 dB, menandakan pentingnya pemilihan modulasi yang tepat untuk menjaga kualitas komunikasi. Secara keseluruhan, pendekatan perancangan ini menjamin infrastruktur LTE-R yang efisien, handal, dan siap mendukung kebutuhan komunikasi kritis sepanjang jalur Kereta Cepat Whoosh KCIC.

VI. REFERENSI

- [1] B. Sitorus, "Strategi Kompetitif Penyediaan Angkutan Lanjutan Kereta Cepat Jakarta- Bandung Dalam Meningkatkan Minat Pengguna," vol. 8, no. 2, 2024.
- [2] I. T. Nasional and I. T. Nasional, "Tinjauan Prasarana Kereta Cepat Indonesia China (KCIC) di Stasiun Tegalluar," pp. 276–281, 2024.
- [3] M. M. Raffi and S. Widiyanesti, "Analisis Faktor Kepuasan Pelanggan pada Kualitas Layanan : Studi Kereta Cepat Indonesia Cina (KCIC)," vol. 11, no. 5, pp. 4325–4332, 2024.
- [4] A. K. Arya *et al.*, "Shark-fin antenna for railway communications in LTE-R, LTE, and lower 5G frequency bands," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 167, pp. 83–94, 2020.
- [5] R. Chen, W. X. Long, G. Mao, and C. Li, "Development trends of mobile communication systems for railways," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 3131–3141, 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2859347.
- [6] R. He *et al.*, "High-Speed Railway Communications," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 11, no. september, pp. 49–58, 2016.
- [7] L. M. Silalahi, I. U. V. Simanjuntak, S. Budiyo, F. A. Silaban, A. D. Rochendi, and G. Osman, "Analysis of Lte 900 Implementation to Increase Coverage and Capacity of 4g Lte Network On Telkomsel Provider," *Proc. Conf. Broad Expo. to Sci. Technol. 2021 (BEST 2021)*, vol. 210, no. Best 2021, pp. 166–172, 2022, doi: 10.2991/aer.k.220131.028.
- [8] "Atoll Radio Frequency Planning & Optimisation Software | Forsk." Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.forsk.com/atoll-overview>
- [9] R. Daffa, R. R. Saedudin, and M. Fathinuddin, "Analisis Performansi Jaringan 4G Lte Dengan Metode Drive Test Pada Gedung Xyz," *JIPi (Jurnal Ilm. Penelit. dan Pembelajaran Inform.)*, vol. 9, no. 2, pp. 548–557, 2024, doi: 10.29100/jipi.v9i2.4554.
- [10] A. K. Arya, S. Han, and S. Kim, "Review of Antennas for Railway Communications," *J. Electromagn. Eng. Sci.*, vol. 23, no. 2, pp. 90–100, 2023, doi: 10.26866/jees.2023.2.r.148.
- [11] A. Yuhane, D. Chandra, S. Nabilla, D. N. Ilham, and H. Setiawan, "Optimizing throughput value through re-examining of 4G LTE infrastructure link budgets: A Case Study in Lubuk Kilangan," *J. Informatics Telecommun. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 461–472, 2024, doi: 10.31289/jite.v7i2.10829.
- [12] H. Prasetyo, D. Putra Setiawan, and S. Sa'idah, "LTE Network Optimization on Telkom University Area," *eProceedings Eng.*, vol. 11, no. 6, pp. 5902–5907, 2024, [Online]. Available: <https://openlibrarypublications.telkomuniversity.ac.id/index.php/engineering/article/view/24703>
- [13] L. Ling, W. Shuangyou, Z. Hongwei, and H. Jiayi, "Research on Multi-frequency Network Optimization Strategy for LTE-R System in High-Speed Railway Scenario," *J. Eng. Syst.*, vol. 1, no. 2, pp. 62–72, 2023, doi: 10.62517/jes.202302212.
- [14] M. Yaser, "Improving SINR 4G / LTE Femtocell in the Coexisting Network," vol. 14, no. 03, pp. 124–127, 2023.
- [15] M. F. A. Al-Amri and B. K. J. Al-Shammari, "An overview of Doppler effect deviation in high mobility communication systems," in *AIP Conference Proceedings*, 2024. doi: 10.1063/5.0238108.
- [16] F. Abrishamkar and E. Biglieri, "Overview of wireless communications," *Ieee Milcom*, vol. 3, pp. 900–905, 1994, doi: 10.1017/cbo9780511841224.002.