

Performance Degradation Analysis of WLAN-Based Train-to-Ground Communication in Jakarta LRT

Article History:

Received

24 February 2026

Revised

5 May 2026

Accepted

1 June 2026

**ABRAHAM DHAYAN JONATHAN, ERNA SRI SUGESTI,
BUDI PRASETYA**Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro,
Universitas Telkom, Bandung, Indonesia
Email: abrahamdhayanj@student.telkomuniversity.ac.id**ABSTRAK**

Gangguan operasional Jakarta Light Rail Transit (LRT) selama tahun 2023–2025 mengindikasikan adanya masalah terkait hilangnya sinyal dalam sistem komunikasi kereta dengan perangkat radio di permukaan. Penelitian ini menyelidiki penyebab hilangnya sinyal dengan pengujian lapangan, simulasi, dan analisis teoretis. Pengujian lapangan menunjukkan Received Signal Level (RSL) terukur sekitar -79 dBm, sementara hasil simulasi dengan Atoll dan pendekatan teoretis berkisar antara -70 hingga -65 dBm dan $-50,62$ hingga $-66,18$ dBm. Analisis coverage berdasarkan simulasi Atoll menunjukkan adanya area tanpa sinyal antar Wireless Radio Unit (WRU) yang bertetangga, menyebabkan hilangnya konektivitas selama 1.12 detik. Nilai SINR yang didapatkan berada pada rentang 2 – 8 dB menghasilkan BER hingga 10^{-2} dan PER mencapai 100% yang disimulasikan menggunakan MATLAB. Analisis doppler mengonfirmasi kondisi fading lambat, menunjukkan faktor mobilitas kereta tidak mempengaruhi.

Kata kunci: BER, Interferensi, PER, RSL, Sensitivitas Penerima, WRU

ABSTRACT

Operational disruptions on the Jakarta Light Rail Transit (LRT) during 2023–2025 indicate issues related to the signal loss between the train's communication system and surface radio devices. This research investigates the causes of signal loss through field testing, simulations, and theoretical analysis. Field testing showed a measured Received Signal Level (RSL) of approximately -79 dBm, while simulation results with Atoll and theoretical approaches ranged from -70 to -65 dBm and -50.62 to -66.18 dBm. Coverage analysis based on Atoll simulation revealed signal-free areas between adjacent Wireless Radio Units (WRUs), leading to a loss of connectivity for 1.12 second. The SINR values obtained, ranging from 2 to 8 dB, resulted in a BER of up to 10^{-2} and a PER of 100%, as simulated using MATLAB. Doppler analysis confirms slow fading conditions, showing that the train's mobility factor has no effect.

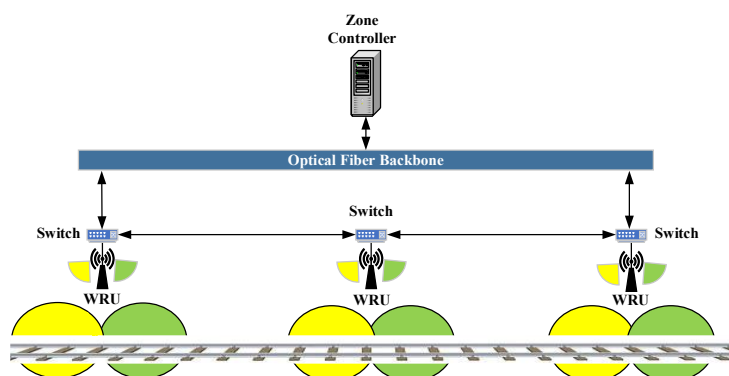
Keywords: BER, Interference, PER, Receiver Sensitivity, RSL, WRU

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



1. PENDAHULUAN

Jakarta (LRT) merupakan salah satu moda transportasi massal yang keberadaannya sangat dibutuhkan oleh masyarakat perkotaan khususnya Jakarta Area. Selain cepat dan nyaman, LRT juga menjadi solusi dalam menembus kemacetan di wilayah perkotaan. Dalam kurun waktu 2 tahun terakhir muncul masalah pada di sisi operasional Jakarta LRT. Hilangnya sinyal komunikasi antara LRT dan perangkat radio di permukaan di beberapa titik lokasi, yang berfungsi mendukung pensinyalan untuk fungsi kontrol LRT. Berdasarkan informasi yang diperoleh dari AL Hamasy, Hawaroh, Luthfiani, Team CNN dan Yuantisya **(Al Hamasy, 2023)(CNN Indonesia, 2025)(Hawaroh, 2024)(Luthfiani, 2023)(Yuantisya, 2023)**, setidaknya terdapat lima kejadian dalam kurun waktu 2023-2025. Sistem pensinyalan untuk fungsi kontrol adalah bagian penting dari sistem operasional LRT yang berfungsi untuk mengatur dan memantau kecepatan, posisi, dan *braking system* dari LRT melalui sinyal radio. Kegagalan dalam pengiriman sinyal kontrol akan berdampak pada keselamatan dan mobilitas LRT. Oleh karena itu, mengingat pentingnya peran sistem kontrol pada LRT, hilangnya sinyal komunikasi dari atau ke LRT adalah hal yang tidak dapat ditolerir. Sistem pensinyalan pada Jakarta LRT menggunakan *Terrestrial Trunked Radio – Communication-Based Train Control* (TETRA-CBTC) framework dengan menggunakan IEEE WLAN 802.11a sebagai teknologi komunikasi datanya. Sistem komunikasi radio Jakarta LRT mengimplementasikan teknologi yang dikembangkan oleh Siemens **(Siemens, 2019)** yang dinamakan AIRLINK Radio Communication System (RCS) yang berbasis WLAN. Arsitektur sistem komunikasi jaringan fisik Jakarta LRT merupakan gabungan teknologi WLAN dan Fiber Optik sebagai backbone seperti digambarkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. AIRLINK Arsitektur Sistem Komunikasi Radio LRT

Penelitian dalam beberapa tahun terakhir telah menunjukkan bahwa sebagian besar sistem komunikasi yang digunakan pada Urban Rail adalah berbasis WLAN yang beroperasi pada spektrum 2,4 GHz. Penggunaan spektrum 2,4 GHz merupakan hal yang sudah sangat umum digunakan dalam berbagai kebutuhan Industrial, Science, dan Medis (ISM) seperti yang disampaikan dalam penelitian He, IEEE, Kumar **(He, dkk, 2018)(IEEE, 2012)(Kumar, dkk, 2020)** dan rekan. Akibatnya, spektrum 2,4 GHz adalah spektrum yang sangat kotor serta menjadikan spektrum ini sangat rentan terhadap interferensi. Penelitian yang dilakukan oleh He dan We **(He, dkk, 2018)(Wen, dkk, 2018)** beserta rekan menjelaskan, bahwa perangkat *WLAN-based* yang beroperasi pada spektrum frekuensi 2,4 GHz dari penumpang LRT dan lingkungan sekitarnya, menjadi penyebab kegagalan sistem komunikasi CBTC yang ditandai dengan penurunan tingkat daya *Carrier-to-Interference* (C/I) rasio, dimana hal ini berdampak kepada naiknya nilai BER. Dalam penelitian lainnya, perangkat CCTV dan WLAN *access point* (AP) di lingkungan sekitar LRT menyebabkan interferensi pada sinyal CBTC bekerja dengan meningkatkan daya *noise floor*, menyebabkan kemacetan paket (Packet

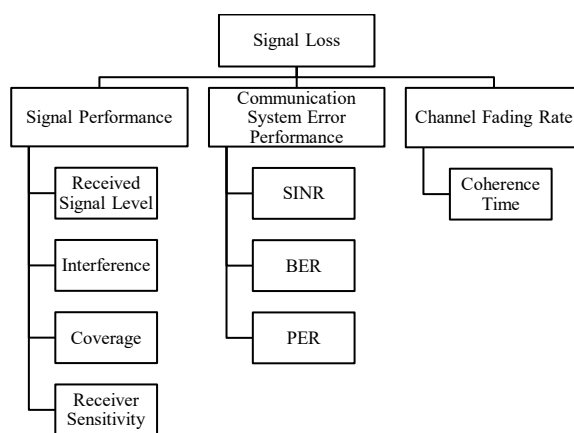
Congestion) yang berdampak pada kegagalan sinyal CBTC dikemukakan oleh kumar **(Kumar, dkk, 2020)** dan rekan. Dengan digunakannya teknologi WLAN IEEE 802.11 sebagai sebagai sistem komunikasi radio pada Jakarta LRT, menjadikan hal ini sebagai suatu implementasi baru dalam industri sistem komunikasi nirkabel kereta api (Railway Communication System) di Indonesia.

Masalah hilangnya sinyal pada sistem komunikasi Jakarta LRT merupakan sesuatu hal baru yang dihadapi oleh LRT saat ini. Belum adanya analisa yang komprehensif membuat masalah ini berlarut-larut berdampak pada rendahnya pencapaian kinerja operasional LRT dan kepercayaan publik terhadap LRT. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengidentifikasi dan menganalisis penyebab hilangnya sinyal dalam sistem komunikasi LRT dengan mengevaluasi parameter seperti RSL, interferensi, *coverage*, sensitivitas penerima (Receiver Sensitivity), SINR, BER, PER dan *coherence time*. Penelitian ini diharapkan dapat merekomendasikan perbaikan pada sistem komunikasi LRT kedepannya.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Desain Penelitian

Desain penelitian disusun dengan tujuan untuk melakukan investigasi terhadap parameter seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 yang dianggap berpotensi sebagai penyebab hilangnya sinyal dalam sistem komunikasi LRT. Mekanisme analisa parameter didasarkan oleh nilai yang diperoleh dari data pengukuran lapangan dan data pendukung. Data lapangan merupakan data primer yang didapatkan dari pengujian lapangan sedangkan data pendukung diperoleh dari dokumentasi user atau vendor. Dalam proses analisa, penelitian ini membandingkan hasil dari pengukuran lapangan, simulasi, dan pendekatan teoritis terhadap referensi atau standard yang telah ditentukan untuk mendapatkan kesimpulan.



Gambar 2. Parameter Penelitian

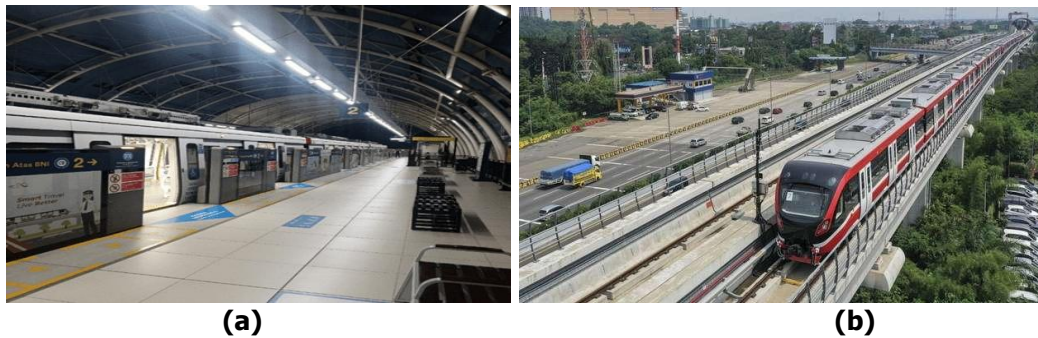
2.2 Subyek Penelitian

Subjek dalam penelitian ini merujuk kepada sistem komunikasi LRT yang didefinisikan sebagai hubungan komunikasi antara *trackside access point* (WRU) dengan LRT. Sistem komunikasi LRT menggunakan teknologi IEEE 802.11a yang beroperasi pada spektrum 5 GHz.

2.3 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan pada area stasiun dan *segment line* LRT seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. *Segment Line* TMII–Harjamukti dijadikan sebagai sampling pengujian,

dengan asumsi hal tersebut telah mewakili karakteristik lingkungan dari *segment line* yang lain.



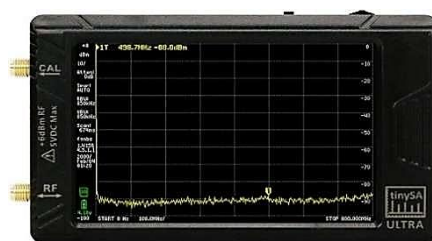
Gambar 3. Lokasi Penelitian (a) Area Stasiun (b) Lintasan Track LRT

2.4 Batasan dan Asumsi Penelitian

Disebabkan keterbatasan dalam informasi yang didapatkan, penelitian ini dilakukan dengan mengenakan asumsi dasar antara lain, semua perangkat radio LRT beroperasi dengan baik, penelitian ini tidak mencakup pada gangguan non-fisik seperti *cyber-attack* atau kesalahan sistem perangkat lunak, teknik modulasi yang dipakai oleh perangkat LRT menggunakan 64-QAM dengan tidak menggunakan fitur *adaptive modulation*, dan tidak menerapkan *channel error correction*.

2.5 Instrumen Alat Ukur dan Simulasi

Instrumen alat ukur yang digunakan dalam penelitian terdiri dari 3 diantaranya, *portable spectrum analyzer* tinySA Ultra+ ZS407 yang ditunjukkan pada Gambar 4 dengan spesifikasi *Low Noise Amplifier* (LNA) dengan rentang frekuensi pemindaian hingga 7.3 GHz serta *Wi-Fi analyzer* berbasis *android* yang digunakan dalam memindai sinyal dan aplikasi *GPS speed* berbasis *android* yang digunakan untuk mengukur kecepatan kereta secara *real-time*. Instrumen simulasi menggunakan beberapa software aplikasi diantaranya, Atoll yang digunakan sebagai *radio planning*, MATLAB untuk simulasi BER dan SINR, Ms. Excel untuk simulasi PER dan Google Earth untuk pemetaan lokasi.



Gambar 4. tinySA Ultra+ ZS407

2.6 Pengumpulan Data

2.6.1 RSL

Dalam penelitian ini, nilai RSL didapatkan dari pengukuran terhadap daya signal WRU dengan metode *scanning*, simulasi dan pendekatan teoritis. Metode *scanning* menggunakan *spectrum analyzer* dan *Wi-Fi analyzer*, sedangkan simulasi menggunakan aplikasi Atoll. Mekanisme pengukuran signal dengan metode *scanning* diawali dengan memetakan lokasi WRU menggunakan aplikasi Google Earth pada *segment line* TMII–Harjamukti. Setelah itu, dilanjutkan dengan proses *scanning* pada spektrum 5.7 GHz sesuai dengan frekuensi operasi perangkat radio LRT. Mekanisme *scanning* dilakukan pada lokasi random disekitar WRU,

yang dibagi menjadi 2 yaitu, didalam area stasiun dan sepanjang *segment line* TMII-Harjamukti dan dilakukan 1 kali pada masing-masing lokasi. Sementara itu, aplikasi Atoll digunakan sebagai alat bantu simulasi yang bertujuan untuk melihat distribusi daya RSL dari WRU dalam rentang jarak tertentu. Simulasi dengan aplikasi atoll memasukan parameter transmisi pada layer PHY sesuai dengan ketentuan dari protokol IEEE 802.11a yang dijelaskan pada Tabel 2.

Sebagai komparasi, data hasil *scanning* dan simulasi akan dibandingkan dengan nilai hasil dari pendekatan teoritis. Pendekatan teoritis menggunakan perhitungan yang ditentukan berdasarkan formulasi *link budget* yang ditunjukkan pada Gambar 5. Formula *link budget* dirumuskan berdasarkan pemodelan *pathloss* dan *link budget sheet*. Dalam penelitian ini, model *pathloss* yang diimplementasikan setelah melakukan proses observasi terhadap lingkungan medium propagasi LRT adalah *Free Space Loss* (FSL) yang diekspresikan oleh Balanis dan Kraus (**Balanis, 2016**)(**Kraus, 1997**) dengan,

$$L_p = 92,45 + 20 \log F_{\text{GHz}} + 20 \log d_{\text{km}} \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

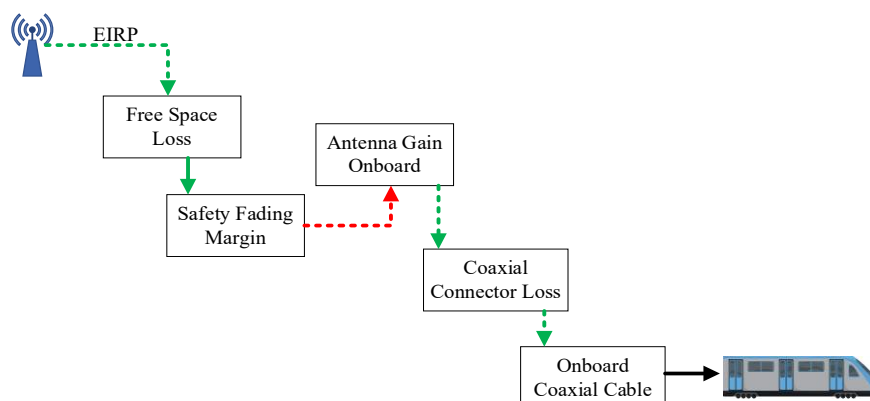
sementara itu, *link budget sheet* didapatkan dari data pendukung dokumen LRT (**LRT Jakarta, 2018**) ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Link Budget Sheet

EIRP (dBm)	Coaxial Cable Loss (dB/m)	Coaxial Connector Loss (dB)	Antenna Gain (dBi)	Onboard Coaxial Length (m)	Total Loss Onboard Coaxial Length (dB)	Trackside Coaxial Length (m)	Total Loss Trackside Coaxial Length (m)	Power Splitter Loss (dB)
36	0.58	0.15	14	5	2.9	7	4.06	3

Dengan menggunakan pendekatan formula dari Rappaport (**Rappaport, 2001**) dapat dirumuskan RSL *downlink* dengan,

$$\text{RSL (downlink) dBm} = \text{EIRP} + \text{Antenna Gain Onboard} - \text{Coaxial Connector Loss} - \text{Onboard Coaxial Cable Loss} - \text{FSL} - \text{Safety Fading Margin} \quad (2)$$



Gambar 5. Downlink Budget

2.6.2 Interference

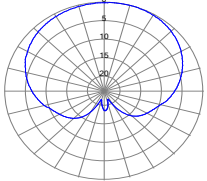
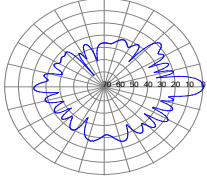
Nilai daya interferensi didefinisikan sebagai daya signal lain yang berasal dari perangkat lain disekitar WRU yang menempati kanal dan spektrum yang sama dengan WRU. Mekanisme

pengambilan data daya interferensi adalah dengan melakukan *scanning* pada spektrum frekuensi yang sama dengan RSL menggunakan Wi-Fi *analyzer*.

2.6.3 Coverage

Pengukuran coverage dilakukan bertujuan untuk mendapatkan radius servis area dari WRU. Data coverage didapatkan dari simulasi menggunakan aplikasi Atoll. Dalam simulasi dibutuhkan data parameter masukan seperti dijelaskan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Masukan Simulasi Atoll

Type Parameter	Sumber Informasi Parameter	Nilai Parameter
EIRP	Dokumen teknis LRT	36 dBm
Antenna Radion Pattern	Atoll Default Pattern	 Horizontal Pattern  Vertical Pattern
Antenna Height	Antenna's Vendor (Huber Suhner, n.d.)	42 meter
Type of antenna	Antenna's Vendor	Sectoral
Frequency Antenna – Channel Spacing	Antenna's Vendor	Band 5.7 GHz – 20 MHz
Antenna Gain	Antenna's Vendor	14 dBi
Azimuth Angle	Antenna's Vendor	0° & 180°
Antenna Mechanical Tilting	Observasi Lapangan	0°
Propagation Model	Observasi Lapangan	Free Space Loss
Link Budget Sheet	Dokumen LRT	Tabel 1
OFDM Parameters	IEEE PHY WLAN Standard 802.11	64-QAM, 256 Subcarriers, 0.75 Channel Coding rate

2.6.4 Receiver Sensitivity

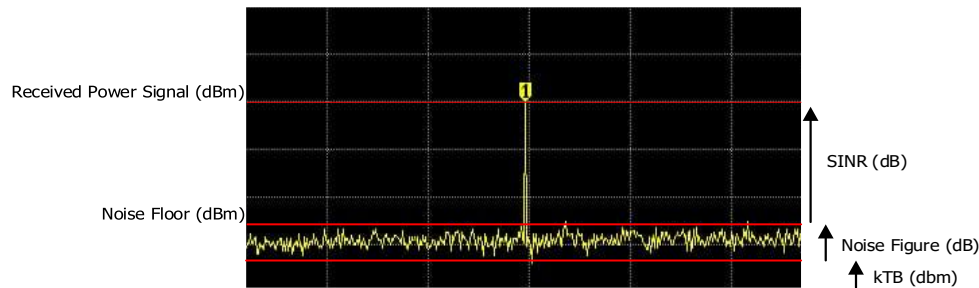
Receiver sensitivity digunakan untuk mengevaluasi nilai daya minimum untuk antenna dapat mendeteksi dan mendemodulasi simbol pada *receiver* seperti yang dijelaskan dalam penelitian studi literatur yang dilakukan oleh Farooq dan Soler (**Farooq & Soler, 2017**). Nilai ini digunakan sebagai ambang batas RSL yang dapat ditoleransi dari sisi *receiver*. *Receiver sensitivity* didapatkan dengan menggunakan studi literatur dan pendekatan teoritis. Studi literatur dilakukan untuk mencari nilai standard referensi berdasarkan karakteristik dari kondisi sistem komunikasi yang digunakan oleh LRT. Studi literatur dilakukan terhadap dokumen IEEE (**IEEE, 2012**) dan dokumen teknis LRT (**LRT Jakarta, 2018b**). Sementara itu dalam pendekatan teoritis, menghitung *receiver sensitivity* dapat menggunakan persamaan yang dikemukakan oleh lamali (**Lamali, 2023**) yaitu,

$$\text{Receiver Sensitivity (dB)} = P_n + NF + \text{SINR} \quad (3)$$

dimana P_n adalah *Thermal Noise Power*; NF adalah *noise figure* perangkat dan SINR adalah *Signal to Interference Noise*. Dalam hal ini, *Thermal Noise Power* dapat dihitung menggunakan persamaan dari Sklar dan Harris (**Sklar & Harris, 2003**) yang diekspresikan dengan,

$$P_n(\text{dB}) = kTB \quad (4)$$

k =Boltzmann's Constant 1.38×10^{-23} J/K or W/K-Hz
 T =Ambient Temperature, 290° Kelvin
 B =Bandwidth, Hz



Gambar 6. Ilustrasi Sensitivitas Penerima terhadap RSL

2.6.5 SINR (E_b/N_o)

Dalam komunikasi digital, E_b/N_o merupakan istilah lain dari *normalized signal-to-noise ratio*, juga dikenal sebagai $S/I+N$ atau SINR. Parameter SINR diperlukan sebagai indikator untuk mengukur performansi eror dari komunikasi link LRT yang dalam penelitian ini didapatkan menggunakan pendekatan teoritis dan simulasi. Nilai SINR dengan pendekatan teoritis didapatkan dengan menghitung menggunakan persamaan yang diajukan oleh Wen (**Wen, dkk, 2018**) yaitu,

$$\text{SINR (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_b}{P_n + I_o} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{B}{f_b} \right) \quad (5)$$

Dimana E_b dapat dijabarkan sebagai P_b *Power Signal* dikalikan dengan *bit time*. $1/\text{bit time}$ menghasilkan f_b *data rate*, sedangkan N_o merupakan pembagian antara P_n *Thermal Noise Power* and I_o *Interference Power* terhadap B *Bandwidth*. Sementara itu, nilai SINR yang didapatkan dari simulasi dilakukan dengan menggunakan aplikasi Atoll yaitu dengan cara memasukkan parameter yang ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil simulasi yang digunakan adalah mengambil nilai SINR *downlink*.

2.6.6 BER

Menurut Rappaport, Sklar dan Haris (**Rappaport, 2001**)(**Sklar & Harris, 2003**), secara teoritis teknik modulasi dengan metode deteksi koheren dalam menghitung probabilitas dari *Symbol Error Rate* (SER) dari M-QAM sistem dapat diekspresikan dengan,

$$P_E = 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3E_b}{(M-1)N_o}} \right) \quad (6)$$

sehingga menurut (**Sklar & Harris, 2003**) BER dapat dituliskan dengan pendekatan,

$$P_B \approx \frac{P_E}{\log_2 M} \quad (7)$$

dimana M adalah jumlah simbol; P_E adalah *probability symbol error* dan P_B adalah *probability bit error*. Persamaan 6 dan 7 dijadikan sebagai parameter masukan untuk simulasi MATLAB ditambah dengan *channel model* dan teknik modulasi. *Channel model* yang digunakan dalam simulasi adalah *AWGN channel* sedangkan teknik modulasinya 64-QAM. Hasil dari simulasi akan ditujukan untuk mendapatkan perbandingan BER terhadap nilai SINR secara teoritis.

2.6.7 PER

BER dan PER adalah dua indikator yang berkorelasi. Menurut Pundir dan Sandhu (**Pundir & Sandhu, 2021**) PER didapatkan dengan menggunakan pendekatan,

$$\text{PER} \approx 1 - (1 - P_B)^n \quad (8)$$

dimana P_B adalah *probability bit error* dan n adalah total bit dalam satu paket data yang dikirimkan. Dalam penelitian ini, nilai PER didapatkan dengan melakukan simulasi untuk membandingkan nilai PER terhadap nilai BER yang dirumuskan dalam persamaan 8.

2.6.8 Coherence Time

Dalam penelitian ini *coherence time* digunakan sebagai parameter *channel fading rate* yang didefinisikan untuk mengukur kestabilan koneksi dilihat dalam konteks perubahan kanal komunikasi. Formula *coherence time* membutuhkan parameter maksimum *doppler spread*. Menurut (**Tripathi, dkk, 2014**) *doppler spread* dapat diekspresikan dengan,

$$f_m = \frac{v}{\lambda} \cos \theta \quad (9)$$

dimana f_m adalah maximum *doppler spread* dengan $\theta=0$; v kecepatan LRT dan λ adalah panjang gelombang. Dengan demikian, *coherence time* menurut Sklar dan Harris (**Sklar & Harris, 2003**) dapat dituliskan dengan,

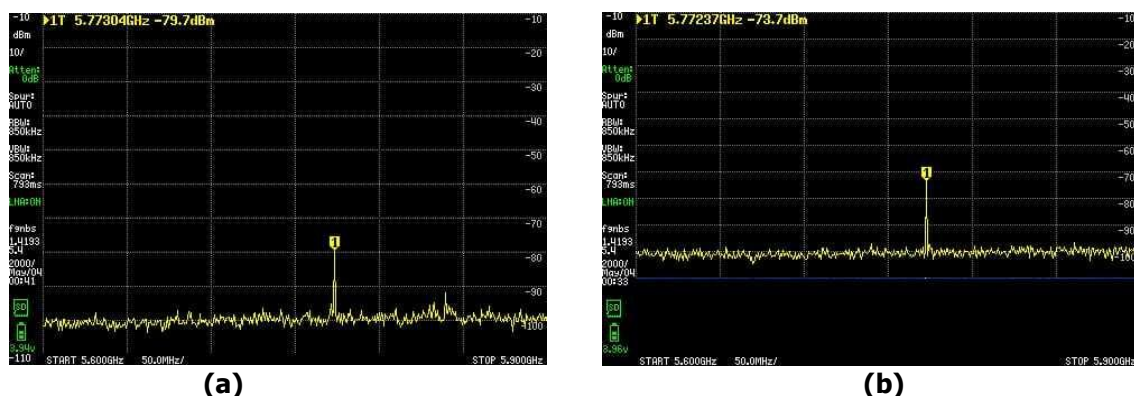
$$T_c \approx \sqrt{\frac{9}{16\pi f_m^2}} = \frac{0,423}{f_m} \quad (10)$$

Pada proses perhitungan *doppler spread* dibutuhkan data kecepatan LRT. Data kecepatan LRT diambil dengan menggunakan aplikasi GPS speed dengan mekanisme pengambilan data dilakukan tiap *segment line* TMII-Kp. Rambutan, Kp. Rambutan-Ciracas dan Ciracas-Harjamukti dengan frekuensi pengambilan sebanyak satu kali pada masing-masing *segment*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 RSL

Pada bagian ini akan diberikan hasil pengumpulan data daya signal WRU menggunakan *spectrum analyzer*, Wi-Fi *analyzer* dan simulasi menggunakan aplikasi Atoll serta perbandingan terhadap pendekatan teoritis. Hasil *scanning* menggunakan *spectrum analyzer* ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.



Gambar 7. Hasil Scanning Signal WRU (a) Area Stasiun (b) Sepanjang Segment Link TMII-Harjamukti

Hasil dari metode *scanning* yang ditunjukkan pada Gambar 7 menggunakan *spectrum analyzer* pada lokasi area stasiun sekitar WRU didapatkan nilai RSL yang terukur adalah -79.7 dBm, sedangkan pada lokasi *segment line* TMII-Harjamukti didapatkan -73.7 dBm. Sementara itu, hasil dari *scanning* menggunakan Wi-Fi *analyzer* pada area stasiun ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4 pada *segment line* TMII-Harjamukti.

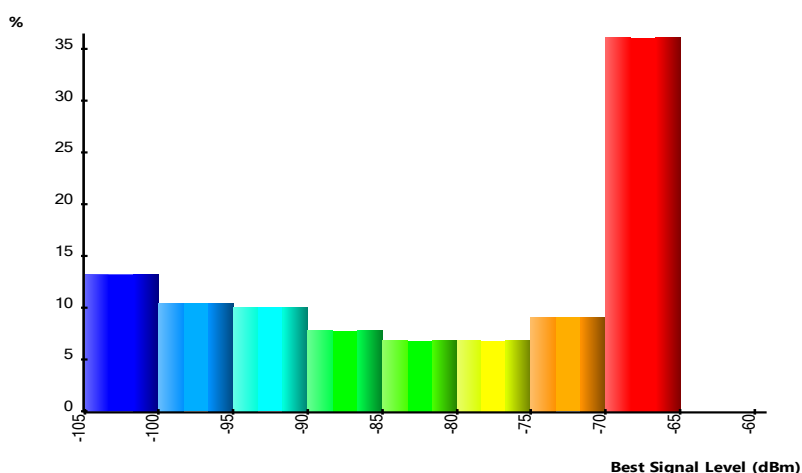
Tabel 3. Hasil Scanning Wi-Fi Analyzer Area Stasiun

MAC Address	Alokasi Kanal	Frekuensi Tengah (Bandwidth)	Power (dBm)
3C:52:1A:0F:64:4E	CH 153 (155)	5765 MHz (80 MHz)	-79 dBm
10:08:1D:7B:69:38	CH 161	5805 MHz (20 MHz)	-85 dBm
10:08:1D:7B:69:39	CH 161	5805 MHz (20 MHz)	-86 dBm
E8:C7:4F:2A:F8:10	CH 153 (155)	5765 MHz (80 MHz)	-87 dBm
1C:61:2F:D2:38:C9	CH 157	5785 MHz (20 MHz)	-90 dBm
1C:61:2F:D2:38:C8	CH 157	5785 MHz (20 MHz)	-90 dBm

Tabel 4. Hasil Scanning Wi-Fi Analyzer Segment Line TMII-Harjamukti

MAC Address	Alokasi Kanal	Frekuensi Tengah (Bandwidth)	Power (dBm)
3C:52:1A:0F:66:91	CH 157 (155)	5785 MHz (80 MHz)	-80 dBm
5E:C8:31:9C:06:F6	CH 149 (155)	5745 MHz (80 MHz)	-82 dBm
3C:52:1A:0F:66:49	CH 157 (155)	5785 MHz (80 MHz)	-94 dBm

Hasil pengukuran daya WRU menggunakan aplikasi Wi-Fi *analyzer* terukur nilai sebesar -79 dBm dengan alamat MAC 3C:52:A1:0F:64:4E pada area stasiun ditunjukkan pada Tabel 3, sedangkan menggunakan aplikasi Wi-Fi *analyzer*, RSL yang terukur adalah -80 dBm dengan alamat MAC 3C:52:A1:0F:66:91 pada lokasi *segment line* TMII-Harjamukti. Setelah itu, dilakukan proses simulasi menggunakan aplikasi Atoll yang hasilnya digambarkan dalam diagram pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil Distribusi RSL dengan Aplikasi Atoll

Merujuk kepada Gambar 8, didapatkan rentang RSL terbesar berada pada -70 to -65 dBm dengan persentase 36.11%. Sebagai pembandingan dari kedua metode yang sudah dilakukan, dilakukan perhitungan dengan pendekatan teoritis menggunakan persamaan 2 yang hasilnya digambarkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Perhitungan dengan Pendekatan Teoritis

Jarak Antara WRU ke Kereta (km)	FSL (dB)	Fading Margin (dB)	RSL sebelum Fading Margin (downlink) (dBm)	Total RSL + Fading Margin (downlink) (dBm)	RSL Downlink (dBm)
0.06	83.13	30	-36.18	-66.18	-66.18
0.05	81.55	30	-34.60	-64.60	-64.60
0.04	79.61	30	-32.66	-62.66	-62.66
0.03	77.11	30	-30.16	-60.16	-60.16
0.02	73.59	30	-26.64	-56.64	-56.64
0.01	67.57	30	-20.62	-50.62	-50.62

Dari Tabel 5 didapatkan bahwa range nilai RSL berkisar antara -50.62 dBm sampai -66.18 dBm dengan radius jarak 10–60 meter dari WRU. Dalam menentukan nilai RSL dengan pendekatan teoritis, perhitungan dengan menggunakan persamaan 2 menggunakan rentang radius maksimum yang bisa dijangkau oleh WRU seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9 yaitu 10 meter sampai dengan 50 meter.

Oleh karena itu, dari hasil yang diperoleh dari metode *scanning*, simulasi dan pendekatan teoritis menunjukkan bahwa, hasil RSL memiliki nilai yang saling mendekati. Secara umum indikator level daya RSL berada dalam kategori sinyal yang baik seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 6. Observasi yang dilakukan terhadap karakteristik lingkungan medium propagasi sinyal LRT menggambarkan sebagai *Line of Sight* (LOS). Karakteristik LOS memungkinkan sinyal merambat tanpa adanya hambatan yang menyebabkan sinyal terdistribusi dengan sangat baik.

Tabel 6. Wi-Fi Signal Indicator

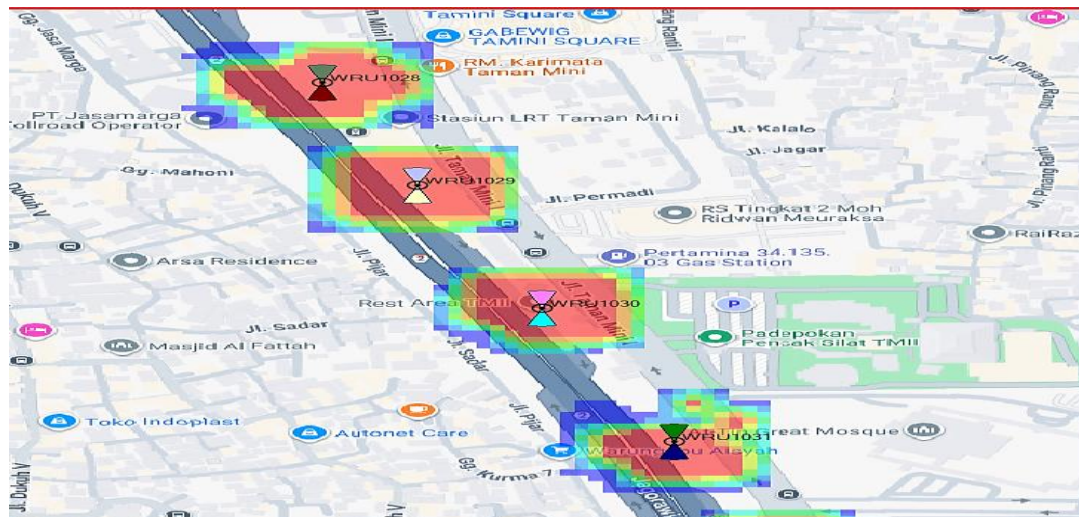
RSL (dBm)	Signal Indicator
> -60	Strong
-60 to -80	Good
-90 to -110	Poor
< -110	Unstable / Very Poor

3.2 Inteference

Berdasarkan hasil *scanning* menggunakan Wi-Fi *analyzer* total daya interferensi merupakan gabungan penjumlahan dari sinyal dalam kanal yang sama dengan WRU. Merujuk kepada Tabel 3 dan Tabel 4 hasil dari total daya interference pada area stasiun adalah -80.15 dBm, sedangkan pada *segment line* TMII-Harjamukti didapatkan -81.73 dBm. Dari kedua hasil ini didapatkan nilai rata-rata daya interferensi sebesar -80.87 dBm.

3.3 Coverage

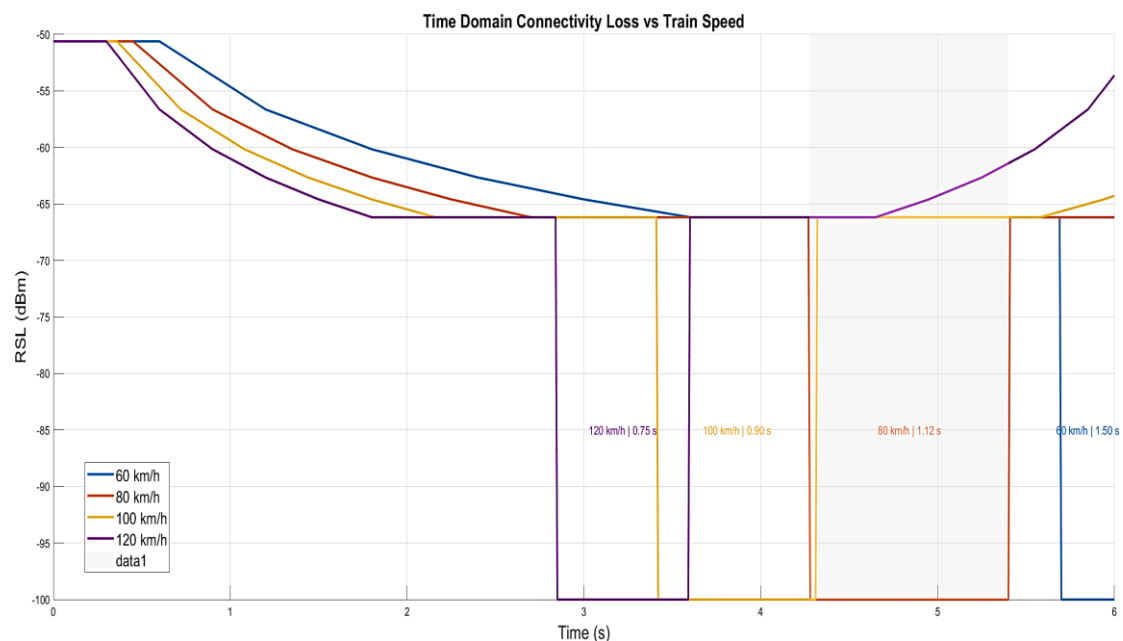
Pemetaan dengan menggunakan Google Earth didapatkan total 41 WRU sepanjang *segment line* TMII-Harjamukti. Jika merujuk kepada simulasi yang dilakukan menggunakan aplikasi Atoll didapatkan cakupan area dari WRU dengan mengambil 4 sampel WRU seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Cakupan area WRU

Gambar 9 memperlihatkan bahwa maksimum radius daya pancar dari WRU sebesar 50 meter. Warna yang diperlihatkan dalam simulasi menunjukan level daya sinyal WRU seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 8.

Merujuk kepada spesifikasi teknis dari LRT yang dikeluarkan oleh PT INKA (**INKA, 2024**), dimana 1 trainset memiliki total panjang 90 meter. Sementara itu, menurut informasi dokumen teknis LRT (**LRT Jakarta, 2018a**) rata-rata jarak antar 2 WRU yang bertetangga adalah sebesar 215 meter. Dengan total maksimum jangkauan jarak antar 2 WRU bertetangga 100 meter, hal ini menyisakan ruang tanpa sinyal sebesar 115 meter. Oleh karena itu, dengan mengurangi 115 meter dengan total panjang kereta 90 meter didapatkan area tidak terjangkau sinyal (*Blank Spot*) kereta sejauh 25 meter. Merujuk hasil pengujian kecepatan rata-rata LRT yang didapatkan adalah 80.3 km/jam maka, didapatkan 1.12 detik LRT berada pada area *blank spot*. Adapun diagram time-domain connectivity terhadap kecepatan kereta ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Time-Domain Connectivity Loss vs Train Speed

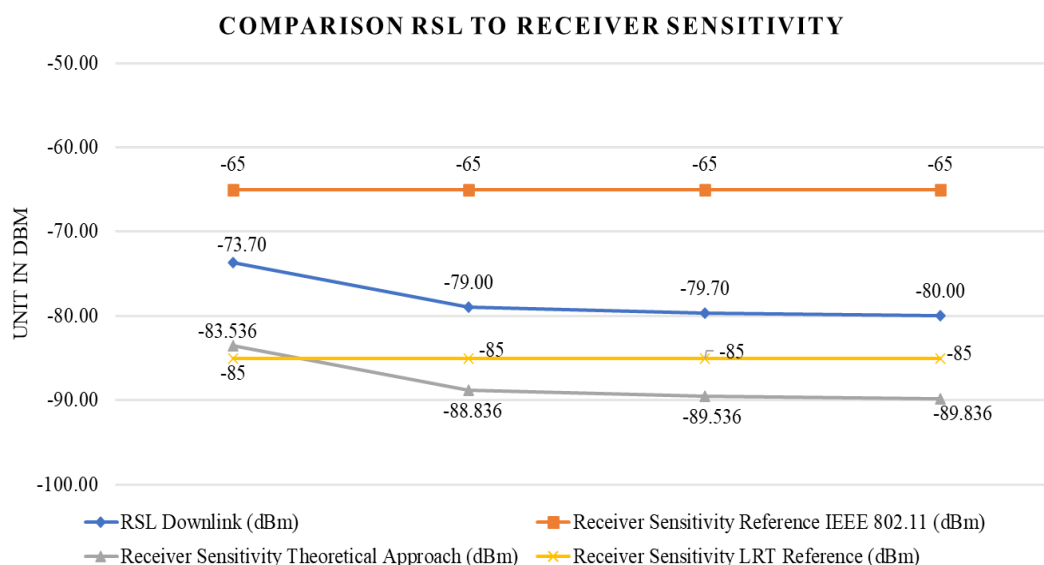
3.4 Receiver Sensitivity

Studi literatur yang dilakukan terhadap IEEE (**IEEE, 2012**) menunjukkan bahwa PHY OFDM IEEE 802.11 menspesifikasikan sensitivitas minimum input penerima diukur pada kondisi rasio PER 10% atau kurang, ketika panjang PSDU 1000 octets pada antenna konektor yaitu sebesar -65 dBm, merujuk kepada level modulasi yang digunakan pada perangkat LRT 64-QAM seperti ditunjukkan pada Tabel 7. Disamping itu, studi literatur yang dilakukan terhadap dokumen LRT (**LRT Jakarta, 2018b**) menunjukkan nilai sensitivitas penerima minimum yang ditentukan adalah -85 dBm lebih kecil daripada IEEE PHY OFDM 802.11, hal ini disebabkan karena sensitivitas penerima dari LRT diukur berdasarkan spesifikasi perangkat Airlink radio yang digunakan oleh LRT sedangkan PHY OFDM IEEE 802.11 didasarkan pada pendekatan teoritis yang mengacu pada kondisi tertentu.

Tabel 7. Modulation Dependent-Parameters OFDM PHY WLAN 802.11

Modulation	Coding rate	Minimum sensitivity (dBm) (20 MHz channel spacing)	Coded bits per subcarrier	Coded bits per OFDM symbol	Data bits per OFDM symbol	Data rate (Mb/s) (20 MHz channel spacing)
BPSK	1/2	-82	1	48	24	6
BPSK	3/4	-81	1	48	36	9
QPSK	1/2	-79	2	96	48	12
QPSK	3/4	-77	2	96	72	18
16-QAM	1/2	-74	4	192	96	24
16-QAM	3/4	-70	4	192	144	36
64-QAM	2/3	-66	6	288	192	48
64-QAM	3/4	-65	6	288	216	54

Dengan didapatkannya nilai *Thermal Noise Power* sebesar -94.95 dBm menggunakan persamaan 4 dan mengambil nilai *bandwidth system* WRU 80 MHz yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4 serta *noise figure* perangkat radio *receiver* yang menurut spesifikasi Huber Suhner (**Huber Suhner, n.d.**) berkisar 2.7 dB dan nilai SINR yang didapatkan dari Tabel 8, maka didapatkan hasil komparasi RSL pengukuran aktual terhadap referensi dan pendekatan teoritis menggunakan persamaan 4 yang ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Perbandingan RSL terhadap Sensitivitas Penerima

Gambar 11 menunjukkan bahwa nilai *receiver sensitivity* yang didapatkan dari pendekatan teoritis mendekati dengan referensi acuan yang ditentukan oleh LRT namun, keduanya masih lebih rendah jika dibandingkan dengan referensi standard dari PHY OFDM IEEE 802.11. Begitu juga dengan nilai RSL menunjukkan lebih rendah daripada referensi standard PHY OFDM IEEE 802.11.

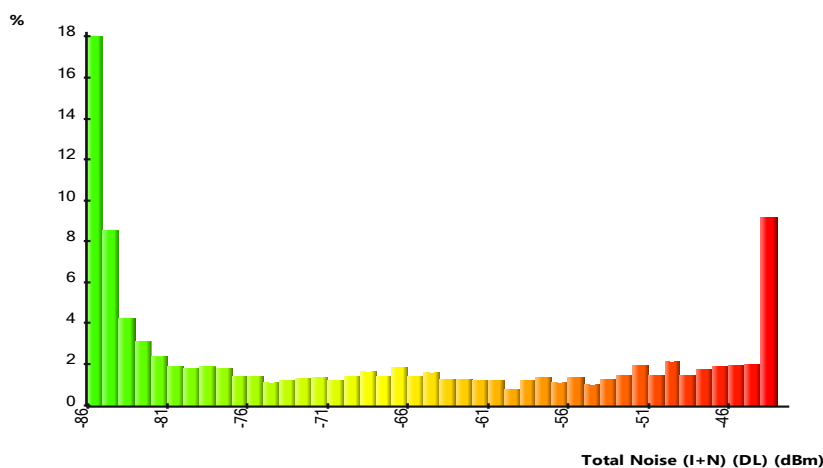
3.5 SINR, BER dan PER

Dalam pembahasan ini akan diberikan perbandingan antara SINR dengan BER serta BER dengan PER. Berikut diberikan hasil perhitungan SINR dengan pendekatan teoritis berdasarkan nilai rata-rata daya penginterferensinya yang dijabarkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil SINR berdasarkan Rata-Rata Interference Power

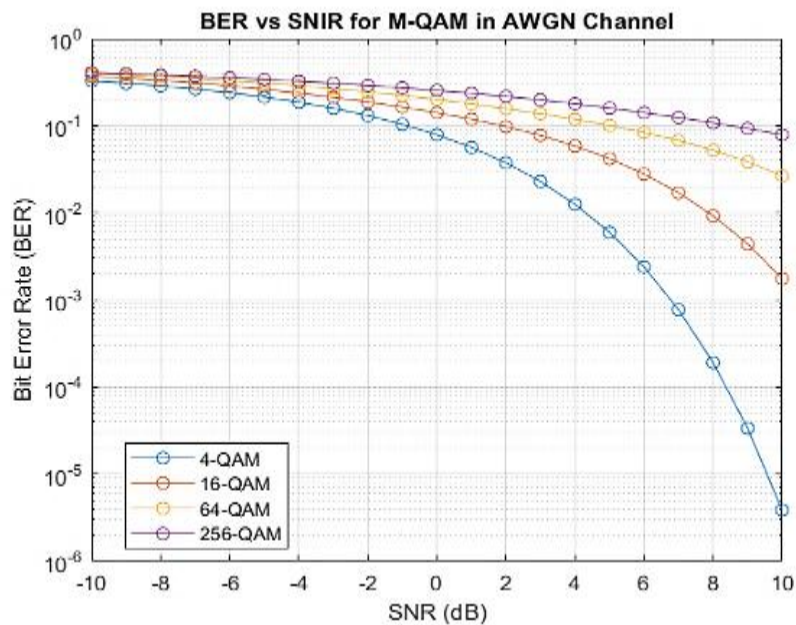
Bandwidth (MHz)	Data Rate (Mbps)	RSL Downlink (dBm)	Thermal Noise Power Receiver (dBm)	Average Power Signal Co-Channel Interference (dBm)	Normalized SINR Downlink (Eb/No) (dB)
80	54	-73.7	-94.95	-80.87	8.71
80	54	-79	-94.95	-80.87	3.41
80	54	-79.7	-94.95	-80.87	2.71
80	54	-80	-94.95	-80.87	2.41

Dari Tabel 8 menunjukkan bahwa nilai SINR berada pada rentang 2.41 dB sampai 8.71 dB dengan mengambil data nilai RSL pengukuran lapangan. Sebagai perbandingan, hasil dari simulasi Atoll ditunjukkan oleh Gambar 12 dengan nilai SINR tertinggi berkisar -43 dB sampai -44 dB dengan persentase 9.18% dari total keseluruhan *coverage*.

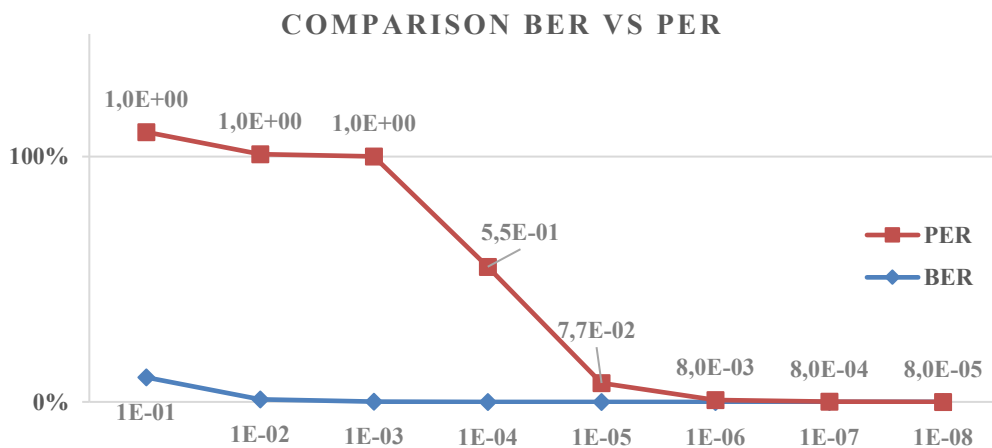


Gambar 12. SINR Downlink

Dari dua hasil ini menunjukkan bahwa nilai SINR dikategorikan rendah yang mengindikasikan bahwa ratio perbandingan antara daya noise dan interference lebih besar dari signal WRU. Hal ini tentu akan berdampak kepada nilai BER yang diperlihatkan korelasinya dengan menggunakan simulasi MATLAB ditunjukkan oleh Gambar 13 (a).



(a)



(b)

Gambar 13. Grafik Perbandingan (a) SINR vs BER (b) BER vs PER

Mengacu kepada nilai perhitungan SINR pada Tabel 8, maka dari hasil simulasi SINR tersebut terhadap BER, menunjukkan rentang nilai BER berada pada 4×10^{-2} sampai dengan 15×10^{-2} yang ditunjukkan pada Gambar 13 (a). Sementara itu, merujuk kepada referensi standard PHY OFDM IEEE 802.11 yang didasarkan kepada *modulation dependent-parameters* dimana pengukuran sensitivitas minimum pada rasio PER 10% atau kurang ketika panjang PSDU 1000 bytes yang ditunjukkan pada Tabel 7, maka persamaan 8 dapat dihitung dengan memasukkan $n=1000$ octets atau 8000 bits dengan nilai BER yang bervariasi, didapatkan nilai PER sebesar 100% untuk rentang nilai BER 4×10^{-2} sampai dengan 15×10^{-2} yang ditunjukkan pada Gambar 12 (b).

3.6 Coherence Time

Dalam menentukan *coherence time* diperlukan nilai *max doppler spread* seperti yang ditunjukkan pada persamaan 10. Pada penelitian ini, nilai *max doppler spread* yang

didapatkan dari persamaan 9 yaitu dengan memasukkan nilai kecepatan kereta maksimum dari pengukuran tiap *segment line* yang menggunakan aplikasi GPS Speed yaitu 79 km/jam, 80 km/jam dan 82 km/jam, menghasilkan kecepatan rata-rata adalah 80.3 km/jam. Oleh karena itu, dengan penerapan skema modulasi 64-QAM dimana bit simbol termodulasi sebesar 6 dan *data rate* 54 Mbps yang ditunjukkan pada Tabel 7, didapatkan *symbol rate* sebesar 9,000,000 simbol/detik, sehingga periode simbol didapatkan 0.0001 milidetik. Sehingga nilai *coherence time* yang didapatkan seperti ditunjukkan dalam Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Coherence Time berdasarkan Kecepatan LRT

Frekuensi WRU (GHz)	Lambda (meter)	Kecepatan LRT (km/jam)	Maksimum Doppler Spread (Hz)	Doppler Shift (GHz)	Coherence Time (millisecond)
5.7	0.05	79	416.94	5.700000417	1.01
5.7	0.05	80	422.22	5.700000422	1.00
5.7	0.05	82	432.78	5.700000433	0.98

Dari Tabel 9 menunjukkan bahwa periode simbol lebih kecil daripada *coherence time*, sehingga hal ini mengkonfirmasi kanal komunikasi mengalami *slow fading*.

4. KESIMPULAN

Nilai RSL dari 3 metode yakni pengukuran lapangan, simulasi dan pendekatan teoritis berada pada range -50.88 dBm sampai -80 dBm. Hal ini menunjukkan bahwa LRT menerima sinyal dengan kondisi baik. Dalam analisis coverage, LRT mengalami *connectivity loss* selama 1.12 detik. Hal ini terjadi karena penggunaan spektrum frekuensi tinggi dari IEEE 802.11a 5 GHz menyebabkan daya pancar WRU menjadi terbatas. Diperlukan adanya penyesuaian penempatan WRU sehingga area coverage antar 2 WRU yang bertetangga saling overlapping untuk menghindari adanya *blank spot*. Nilai RSL yang lebih rendah daripada *receiver sensitivity* menyebabkan akurasi perangkat dalam mendeteksi simbol menjadi buruk. Sementara itu, merujuk kepada hasil SINR yang rendah, hal ini disebabkan karena ratio perbandingan daya *noise* dan *co-channel interference* lebih besar dari pada sinyal WRU. Nilai SINR yang rendah menyebabkan nilai BER tinggi. Hal ini diperkuat dengan penggunaan tingkat modulasi yang tinggi berdampak kepada probabilitas kesalahan antar simbol juga semakin tinggi. BER yang tinggi berimbas kepada naiknya PER yang mencapai 100%. Kerusakan paket menyebabkan terjadinya proses retransmisi paket sehingga hal ini menaikkan *latency* pada sistem komunikasi LRT. Dalam analisa *small scale fading*, kanal komunikasi mengalami *slow fading*, hal ini menandakan kestabilan konektivitas karena perubahan kondisi kanal yang lambat dibanding dengan periode simbolnya sehingga tidak mempengaruhi performansi dari sistem komunikasi LRT.

DAFTAR RUJUKAN

- Al Hamasy, A. I. (2023). *Gangguan Sinyal, Perjalanan LRT Jabodebek Telat Satu Jam*. Kompas. <https://www.kompas.id/baca/metro/2023/10/18/gangguan-sinyal-perjalanan-lrt-jabodebek-sempat-terlambat-satu-jam>
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory Analysis And Designs: Fourth Edition*. John Wiley & Sons, Inc.
- CNN Indonesia. (2025). *Sempat Gangguan, LRT Jabodebek Kembali Beroperasi Normal*.

- CNN. <https://www.cnnindonesia.com/ekonomi/20250106163130-92-1184288/sempat-gangguan-lrt-jabodebek-kembali-beroperasi-normal>
- Farooq, J., & Soler, J. (2017). Radio Communication for Communications-Based Train Control (CBTC): A Tutorial and Survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 19(3), 1377–1402. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2661384>
- Hawaroh, N. (2024). *LRT Jabodebek Alami Gangguan Pada Senin Siang, 18 Perjalanan Terlambat hingga 30 Menit*. Tribunnews. <https://www.tribunnews.com/bisnis/2024/04/01/lrt-jabodebek-alami-gangguan-pada-senin-siang-18-perjalanan-terlambat-hingga-30-menit>
- He, X., Li, J., Wang, Y., Yang, X., Wang, W., & Luo, T. (2018). Research on co-frequency interference of CBTC signal based on IEEE 802.11. *2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications, ICC 2018*, 1309–1313. <https://doi.org/10.1109/CompComm.2018.8780626>
- Huber Suhner. (n.d.). *Sencity Spot-S Wi-Fi Antenna*. <https://www.hubersuhner.com/en/shop/product/antennas/antennas/vehicles/84002818/sencity-rail-antenna>
- IEEE. (2012). Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. In *IEEE Std 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007)* (Vol. 2012, Issue March). <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6178209>
- INKA, P. (2024). *INKA Product*. <https://www.inka.co.id/produk/lrt-jabodebek>
- Kraus, J. D.-. (1997). *Antennas: Second Edition* (2nd ed.). Tata McGraw-Hill.
- Kumar, K. S., Hui Lee, Y., & Meng, Y. S. (2020). Spectrum Survey in 2.4 GHz ISM Band for a MRT Station Located in Singapore. *2020 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium), USNC/URSI 2020 - Proceedings*, (pp. 75–76). <https://doi.org/10.23919/USNC/URSI49741.2020.9321685>
- Lamali, R. (2023). *5G Network RF Planning – Link Budget Basics*. <https://www.techplayon.com/5g-network-rf-planning-link-budget-basics/>
- Li, M., Wang, H. S., & Fan, Y. (2014). Test and analysis on the interference from Wi-Fi signals to the CBTC systems. *Applied Mechanics and Materials*, 543–547, 2526–2530. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.543-547.2526>
- LRT Jakarta. (2018a). *Airlink Radio Communication System Design*. <https://doi.org/10.37358/rc.59.08.7954>
- LRT Jakarta. (2018b). *Airlink Radio Communication System Link Budget*.
- Luthfiani, D. (2023). *Baru 2 Hari Diresmikan LRT Jabodebek Alami Gangguan, Deretan*

- Masalah Sejak Uji Coba*. Tempo. <https://www.tempo.co/arsip/baru-2-hari-diresmikan-lrt-jabodebek-alami-gangguan-deretan-masalah-sejak-uji-coba--150001>
- Pundir, M., & Sandhu, J. K. (2021). Journal of Network and Computer Applications A Systematic Review of Quality of Service in Wireless Sensor Networks using Machine Learning: Recent Trend and Future Vision. *Journal of Network and Computer Applications*, 188(August 2020), 103084. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103084>
- Rappaport, T. (2001). *Wireless Communications: Principles and Practice* (Second).
- Siemens. (2019). *Optimal performance with the world 's leading*. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:ae0a4c2a-efbf-4931-8f73-1fad62b1b60/broschuere-trainguard-mt-e.pdf>
- Sklar, B., & Harris, F. (2003). *Digital communication: Fundamentals and Applications* (M. L. Taub (ed.); Third). Pearson.
- Tripathi, N., J. H. R. (2014). *Cellular Communications_ A Comprehensive and Practical Guide* (IEEE Press (ed.); Vol. 17). John Wiley & Sons, Inc.
- Wen, T., Constantinou, C., Chen, L., Tian, Z., & Roberts, C. (2018). Access Point Deployment Optimization in CBTC Data Communication System. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(6), 1985–1995. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2747759>
- Yuantisya, M. (2023). *Baru 2 Hari Diresmikan LRT Jabodebek Alami Gangguan, Ini Catatan YLKI untuk Menhub dan PT KAI*. Tempo. <https://www.tempo.co/arsip/baru-2-hari-diresmikan-lrt-jabodebek-alami-gangguan-ini-catatan-ylki-untuk-menhub-dan-pt-kai-149330>