

Comparative Analysis of LCX and Bidirectional Antenna Performance in Jakarta MRT Telecommunication System

Article History:

Received

19 February 2026

Revised

1 June 2026

Accepted

14 July 2026

INDRA FIRMANSYAH KOSWARA¹, ROBBY KURNIAWAN HARAHAP^{2*}

¹Program Studi Magister Teknik Elektro, Universitas Gunadarma, Indonesia

²Program Studi Teknik Elektro, Universitas Gunadarma, Indonesia

*Email: robby_kurniawan@staff.gunadarma.ac.id

ABSTRAK

Keandalan sistem telekomunikasi sangat penting bagi operasional MRT Jakarta, khususnya komunikasi Train-to-Ground, transmisi CCTV, dan informasi penumpang. Penelitian ini membandingkan performa Leaky Coaxial Cable (LCX) dan bidirectional antenna menggunakan simulasi numerik MATLAB berbasis model propagasi empiris termodifikasi, pada frekuensi 5,2 GHz dan 5,8 GHz, jarak 10–2000 m, dengan parameter path loss, SNR, BER, dan throughput efektif. Pada jarak 2000 m dan frekuensi 5,2 GHz, LCX menghasilkan path loss 149,2255 dB, SNR -14,2586 dB, BER 0,3921, dan throughput 6,0792 Mbps, lebih baik dibandingkan bidirectional antenna dengan path loss 156,8298 dB, SNR -21,8629 dB, BER 0,4546, dan throughput 5,4543 Mbps.

Kata kunci: *Leaky Coaxial Cable, bidirectional antenna, komunikasi Train-to-Ground, model propagasi empiris termodifikasi, MRT Jakarta.*

ABSTRACT

Telecommunication system reliability is critical to the operation of the Jakarta MRT, particularly for Train-to-Ground communication, CCTV transmission, and passenger information services. This study compares the performance of Leaky Coaxial Cable (LCX) and bidirectional antennas using MATLAB-based numerical simulation founded on a modified empirical propagation model, evaluated at frequencies of 5.2 GHz and 5.8 GHz over distances of 10–2000 m, with path loss, SNR, BER, and effective throughput as the analyzed parameters. At a distance of 2000 m and a frequency of 5.2 GHz, LCX yielded a path loss of 149.2255 dB, an SNR of -14.2586 dB, a BER of 0.3921, and a throughput of 6.0792 Mbps, outperforming the bidirectional antenna, which yielded a path loss of 156.8298 dB, an SNR of -21.8629 dB, a BER of 0.4546, and a throughput of 5.4543 Mbps.

Keywords: *Leaky Coaxial Cable, bidirectional antenna, Train-to-Ground communication, modified empirical propagation model, Jakarta MRT.*

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



1. PENDAHULUAN

Perkembangan sistem transportasi massal berbasis rel, seperti Moda Raya Terpadu (MRT) Jakarta, menuntut infrastruktur telekomunikasi yang andal dan aman menjadi salah satu moda transportasi utama masyarakat Jakarta **(Narouwa, dkk, 2024)**. Hadirnya MRT diharapkan mampu menjadi alternatif transportasi yang ramah lingkungan terutama bagi para pekerja kantoran yang membutuhkan moda transportasi yang aman dan cepat **(Bagdadee, dkk, 2025)(Lin, dkk, 2022)**. Operasional MRT Jakarta yang mengandalkan headway 5 menit pada jam sibuk mensyaratkan sistem telekomunikasi dengan latensi < 100 ms untuk komunikasi Train-to-Ground **(González-plaza, dkk, 2022)(Narouwa, dkk, 2024)**, sebagaimana direkomendasikan dalam standar IEC 62280 untuk sistem kontrol kereta berbasis komunikasi (CBTC). Tanpa infrastruktur Train-to-Ground yang memadai **(González-plaza, dkk, 2022)(Zhang & Mi, 2023)**, risiko keterlambatan akibat gangguan sinyal dapat mengganggu ketepatan headway yang menjadi daya tarik utama MRT. Pembangunan sistem transportasi seperti MRT Jakarta tidak hanya menyangkut aspek kelayakan ekonomi dan keuangan, tetapi juga menjadi fondasi penting bagi kehidupan dan aktivitas ekonomi kota **(Lin, dkk, 2022)**. Hal ini bergantung pada seberapa mudah warga Jakarta dapat bermobilitas serta seberapa sering mereka dapat mengakses transportasi tersebut untuk berbagai keperluan dalam kota **(Zhang, dkk, 2024)**.

Implementasi CCTV Train-to-Ground pada fase 2 MRT Jakarta sangat krusial untuk meningkatkan keamanan dan efisiensi operasional kereta dengan memungkinkan masinis memantau kondisi peron secara langsung dan mendeteksi potensi bahaya seperti penumpang yang terlalu dekat atau objek penghalang jalur **(Ivashevsky, 2020)(Serna, dkk, 2024)**. Keberhasilan sistem ini sangat bergantung pada transmisi jaringan yang andal untuk pemantauan real-time **(Narouwa, dkk, 2024)**, yang menggunakan dua teknologi utama yaitu Leaky Coaxial Cable (LCX) dan *bidirectional antenna*. LCX memancarkan sinyal melalui kebocoran terkontrol pada kabel koaksial sehingga memberikan cakupan sinyal yang stabil sepanjang lintasan **(Chengcheng, dkk, 2020)(Liu, dkk, 2022)**, sementara *bidirectional antenna* mengandalkan radiasi elektromagnetik terarah yang rentan terhalang oleh bayangan dan tikungan, sehingga berpotensi mengganggu kualitas sinyal (Xu , dkk, 2023).

Pada sistem telekomunikasi MRT, Leaky Coaxial Cable (LCX) dan bidirectional antenna berfungsi sebagai media akses radio antara perangkat sisi jalur atau stasiun (wayside) dengan antenna wireless yang terpasang pada kereta. Media transmisi ini mendukung komunikasi Train-to-Ground, termasuk pengiriman data CCTV secara real-time dari titik pemantauan di jalur atau stasiun menuju perangkat onboard kereta, sehingga masinis dan/atau operator dapat memantau kondisi peron, jalur, maupun area operasional yang relevan secara langsung. Dalam konteks ini, LCX dan bidirectional antenna memiliki karakteristik penggunaan yang berbeda. LCX lebih sesuai diterapkan pada area tertutup seperti terowongan, kurva tajam, atau koridor sempit karena kabel ini memancarkan sinyal melalui slot atau celah radiasi sepanjang kabel, sehingga mampu menghasilkan cakupan sinyal yang lebih kontinu, merata, dan stabil di sepanjang lintasan **(Farahneh & Fernando, 2019)(Jiao, dkk, 2024)(Liu , dkk, 2022)**. Sebaliknya, bidirectional antenna lebih sesuai digunakan pada area yang relatif terbuka, seperti jalur elevated atau area stasiun tertentu, karena pola radiasinya dapat diarahkan ke dua sisi lintasan untuk membentuk cakupan komunikasi yang lebih terfokus. Namun, pada area terowongan yang berbelok, sempit, atau memiliki kondisi non-line-of-sight, penggunaan antenna terarah lebih rentan mengalami penurunan kualitas sinyal akibat shadowing, multipath, dan potensi blank spot dibandingkan LCX **(Sun, dkk, 2019)(Xu, dkk, 2023)**. Oleh karena itu, pemilihan LCX atau bidirectional antenna dalam sistem MRT perlu

disesuaikan dengan karakteristik fisik lintasan, kebutuhan cakupan sinyal, serta parameter performa komunikasi seperti path loss, SNR, BER, dan throughput.

Parameter teknis seperti *Throughput*, BER (*Bit Error Rate*), *path loss*, dan SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) adalah metrik krusial yang menentukan performa jaringan komunikasi perkeretaapian. *Throughput* mengukur laju data yang berhasil dikirim, menunjukkan efisiensi saluran untuk kontrol kereta, persinyalan, dan layanan penumpang. BER mengukur rasio kesalahan bit yang diterima, di mana BER rendah menandakan kualitas transmisi yang tinggi, sementara BER tinggi menandakan kesalahan yang sering terjadi akibat *noise* atau interferensi yang berdampak negatif pada integritas data (**Farahneh & Fernando, 2019**). Path loss menjelaskan penurunan kekuatan sinyal seiring bertambahnya jarak, sedangkan SNR membandingkan kekuatan sinyal terhadap derau latar belakang. Nilai SNR yang lebih tinggi menunjukkan kualitas penerimaan sinyal yang lebih jelas dan andal (**Arya, dkk, 2023**). Pemahaman yang mendalam tentang parameter ini sangat penting untuk menjamin komunikasi yang cepat, andal, dan berkualitas, yang merupakan fondasi dari operasional kereta api yang aman dan efisien (**González-plaza, dkk, 2022**).

Studi oleh (**Hou, dkk, 2014**) terkait *Leaky Coaxial Cable* hanya membahas keunggulan dari pengaplikasian *Leaky Coaxial Cable* di sektor perkeretaapian serta studi dari terkait *bidirectional antenna* hanya berfokus pada pembahasan desain antena multiband Bidirectional untuk integrasi LTE-R dan GSM-R. Terdapat celah penelitian dimana belum terdapat studi komprehensif yang membandingkan performa LCX dan *bidirectional antenna* di sektor perkeretaapian terutama MRT Jakarta. Eksplorasi desain antena multiband untuk aplikasi perkeretaapian pada pita frekuensi LTE dan 5G (**González-plaza, dkk, 2022**) kinerja sistem MIMO berbasis LCX pada lingkungan terowongan (**Zhang, dkk, 2020**), Keterpaduan spektrum antara sistem transportasi cerdas kereta api perkotaan dan jalan raya, serta perancangan *bidirectional antenna* untuk aplikasi WLAN pada lingkungan kereta (**Kai, dkk, 2020**). Penelitian sebelumnya umumnya membahas LCX dan *bidirectional antenna* secara terpisah, baik dari sisi karakteristik propagasi, pemodelan kanal, maupun desain antena untuk lingkungan perkeretaapian. Namun, kajian yang secara langsung membandingkan performa LCX dan *bidirectional antenna* pada konteks telekomunikasi MRT Jakarta, khususnya berdasarkan parameter path loss, SNR, BER, dan throughput pada frekuensi 5,2 GHz dan 5,8 GHz, masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk mengevaluasi performa kedua teknologi tersebut melalui simulasi MATLAB pada skenario jalur MRT.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis perbandingan performa LCX dan *bidirectional antenna* dalam konteks sistem komunikasi Train-to-Ground MRT Jakarta pada skenario jalur *elevated*. Evaluasi dilakukan melalui simulasi numerik MATLAB dengan mempertimbangkan frekuensi operasi 5,2 GHz dan 5,8 GHz. Parameter kinerja yang dianalisis meliputi path loss, Signal-to-Noise Ratio (SNR), Bit Error Rate (BER), dan throughput efektif. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran awal mengenai karakteristik performa LCX dan *bidirectional antenna* sebagai media transmisi nirkabel pada infrastruktur MRT.

2. METODE

2.1 Model Propagasi dan Simulasi Numerik

Penelitian ini menggunakan simulasi numerik berbasis MATLAB untuk membandingkan performa Leaky Coaxial Cable (LCX) dan *bidirectional antenna* pada sistem komunikasi Train-to-Ground MRT Jakarta. Simulasi dilakukan pada dua frekuensi operasi, yaitu 5,2 GHz dan 5,8 GHz, dengan jarak pengamatan 10 m hingga 2000 m. Parameter sistem yang digunakan

meliputi daya pancar 30 dBm, gain pemancar 5 dBi, gain penerima 5 dBi, bandwidth 20 MHz, suhu sistem 290 K, noise figure 6 dB, dan laju bit 10 Mbps.

Model dasar path loss dihitung menggunakan pendekatan empiris Okumura-Hata yang dimodifikasi. Secara teoritis, model Okumura-Hata dan turunannya memiliki batas validitas frekuensi tertentu dan tidak secara langsung dikembangkan untuk pita 5 GHz. Oleh karena itu, pada penelitian ini model tersebut tidak digunakan sebagai prediksi absolut kanal 5 GHz, tetapi sebagai pendekatan komparatif untuk mengevaluasi perbedaan performa LCX dan *bidirectional antenna* pada parameter simulasi yang sama. Perbedaan karakteristik antara LCX dan *bidirectional antenna* direpresentasikan melalui faktor koreksi path loss, dengan LCX diasumsikan memiliki rugi propagasi yang lebih rendah karena distribusi sinyalnya berlangsung sepanjang kabel.

Daya noise dihitung berdasarkan konstanta Boltzmann, suhu sistem, bandwidth, dan noise figure. Selanjutnya, daya terima dihitung dari daya pancar, gain antena, dan path loss. Nilai SNR diperoleh dari selisih daya terima dan daya noise. BER dihitung menggunakan pendekatan modulasi BPSK pada kanal AWGN, sedangkan throughput efektif dihitung berdasarkan laju bit nominal yang dikoreksi oleh nilai BER.

Perhitungan Daya noise dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$P_N(\text{dBm}) = 10 \log_{10}(kTB \times 1000) + NF \quad (1)$$

Perhitungan Daya terima dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$P_R(\text{dBm}) = P_T + G_T + G_R - PL \quad (2)$$

Perhitungan SNR dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$SNR(\text{dB}) = P_R(\text{dBm}) - P_N(\text{dBm}) \quad (3)$$

Perhitungan BER BPSK dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{SNR_{linear}}) \quad (4)$$

Perhitungan Throughput efektif dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$Throughput = R_b(1 - BER) \quad (5)$$

Dalam simulasi, karakteristik LCX direpresentasikan melalui faktor koreksi path loss yang meningkat secara logaritmik terhadap jarak dan dibatasi hingga maksimum 8 dB. Faktor koreksi Persamaan (6) digunakan untuk merepresentasikan sifat LCX sebagai media pemancar terdistribusi, sehingga rugi propagasinya diasumsikan lebih rendah dibandingkan *bidirectional antenna* berbasis titik radiasi.

$$\Delta PL_{LCX} = 3 + 2 \log_{10}(d/0.01 + 1) \quad (6)$$

2.2 Leaky Coaxial Cable (LCX)

Leaky Coaxial Cable adalah media transmisi khusus yang beroperasi berdasarkan prinsip radiasi slot untuk menyediakan cakupan sinyal yang merata sepanjang jalur (Farahneh & Fernando, 2019). Berbeda dengan kabel koaksial konvensional, LCX memiliki serangkaian slot atau lubang yang sengaja dipotong pada lapisan luarnya, memungkinkan radiasi dan

penerimaan sinyal elektromagnetik yang terkontrol. Bentuk fisik LCX pada gambar 1 merepresentasikan LCX (*Leaky Coaxial Cable*) dipasang memanjang di sisi jalur rel sebagai media antena/kabel radiasi untuk mendukung komunikasi radio yang stabil di sepanjang lintasan kereta.



Gambar 1. Leaky Coaxial Cable (LCX)

Dalam aplikasi MRT, LCX biasanya dipasang sejajar dengan rel pada ketinggian 1,5-2 meter dengan jarak optimal 15-25 meter antara titik-titik sambungan, terutama efektif untuk area bawah tanah dengan atenuasi tinggi, lokasi tikungan tajam (jari-jari <300 meter) LCX (**Jakarta MRT, 2019**), dan segmen dengan persyaratan QoS yang ketat seperti stasiun. Karakteristik utama LCX adalah kemampuannya memancarkan sebagian energi elektromagnetik secara terkontrol sepanjang struktur kabel, sehingga distribusi sinyal dapat berlangsung sepanjang jalur pemasangan. Spesifikasi LCX yang digunakan sebagai acuan umum dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi LCX (Jakarta MRT, 2019)

Item	Specification		
Jacket Material	Nonhalogenated, fire retardant polyolefin		
Inner Conductor Material	Copper tube		
Outer Conductor Material	Copper foil		
Nominal Size	7/8 inch		
Cable Weight	0.42 kg/m		
Optimum Operating Frequency Band	150 to 500 MHz		
Cable Impedance	50 ohm $\pm$ 2 ohm		
Installation Temperature	-30°C to 60 °C		
Operating Temperature	-30°C to 80 °C		
Storage Temperature	-30°C to 80 °C		
Fire Retardancy Test Method	IEC 60332-1, IEC 60332-3C-24		
Smoke Index Test Method	IEC 61034		
Toxicity Index Test Method	IEC 60754-1, IEC 60754-2		
	Frequency	Attenuation (dB / 100 m)	Coupling Loss 95% (dB)
Electrical Performance	400 MHz	2.60	58(in the case of horizontal)
			74(in the case of vertical)

Secara struktural, LCX terdiri dari konduktor inti tembaga berdiameter 7-10 mm yang dilapisi dengan dielektrik busa polietilen ($\epsilon_r=2.3$), dilapisi dengan konduktor luar berongga yang memiliki pola slot spiral periodik (jarak $25-50\lambda$) yang menentukan karakteristik radiasi. Ketika sinyal RF dimasukkan ke dalam kabel, sekitar 2-5% energi akan melewati celah-celah ini dengan pola radiasi omnidirectional yang dapat diprediksi.

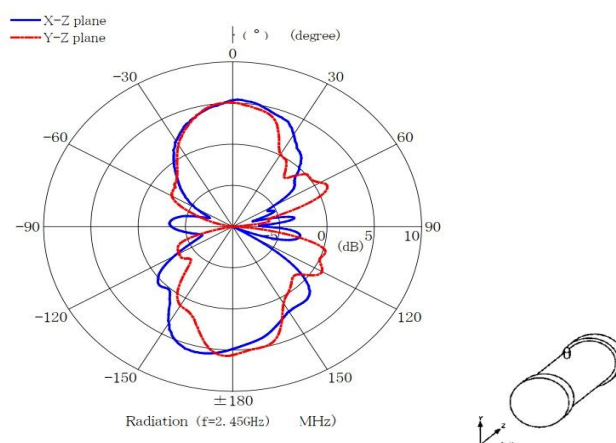
2.3 Bidirectional antenna

Bidirectional antenna adalah komponen dalam sistem telekomunikasi berbasis kereta api yang dirancang khusus untuk mentransmisikan dan menerima sinyal secara efektif sepanjang jalur rel. Berbeda dengan antenna omnidirectional, jenis antenna ini memiliki pola radiasi yang terfokus pada dua arah utama, dengan lebar beam horizontal tipikal 60-90 derajat dan lebar beam vertikal 30-45 derajat, sehingga menghasilkan cakupan sinyal yang lebih terarah dan efisien sepanjang koridor rel. Antena ini umumnya berbentuk array panel dengan gain 8-12 dBi dan rasio depan-belakang lebih dari 20 dB, yang berfungsi untuk meminimalkan gangguan dari arah yang tidak diinginkan. Wujud fisik dan penempatan *bidirectional antenna* seperti pada gambar 2.



Gambar 2. Bidirectional antenna

Kinerja *bidirectional antenna* dipengaruhi oleh daya pemancar, konfigurasi array, dan karakteristik bahan substrat. Model propagasi untuk berbagai antenna ini harus memperhitungkan faktor-faktor seperti atenuasi atmosfer, difraksi oleh struktur jembatan layang, dan kerugian akibat vegetasi. Pola radiasi *bidirectional antenna* dapat dilihat pada Gambar 3. Gambar tersebut menunjukkan karakteristik pancaran dua arah yang digunakan untuk mengarahkan cakupan sinyal sepanjang koridor rel. Pola radiasi ini berbeda dengan LCX, karena LCX memancarkan sinyal secara terdistribusi sepanjang kabel, sedangkan *bidirectional antenna* mengandalkan pancaran terarah dari titik pemasangan tertentu.



Gambar 3. Bidirectional Antenna Radiation Pattern (Jakarta MRT, 2019).

Tabel 2, *bidirectional antenna* yang digunakan memiliki material utama aluminium dengan rentang frekuensi kerja 2,4 GHz hingga 2,5 GHz dan impedansi 50 ohm. Antena ini memiliki nilai VSWR 2,0 atau kurang, sehingga masih berada dalam batas yang umum digunakan untuk menjaga efisiensi transmisi sinyal. Dari sisi performa radiasi, antena memiliki gain 5,5 dB dengan lebar berkas horizontal 60° dan vertikal 55°, yang menunjukkan bahwa antena dirancang untuk memancarkan sinyal secara terarah pada dua sisi lintasan. Selain itu, spesifikasi IPX7 menunjukkan ketahanan terhadap paparan air, sedangkan standar IEC61373 Category 1 Class A menunjukkan bahwa antena memenuhi persyaratan ketahanan terhadap getaran dan guncangan pada lingkungan perkeretaapian. Bagian N.P. menggunakan material stainless, sehingga mendukung ketahanan mekanik dan keandalan pemasangan pada sistem telekomunikasi MRT.

Tabel 2. Bidirectional Antenna Specifications (Jakarta MRT, 2019).

No	Contents	Rating
1	Material	Aluminium
2	Radio frequency	2.4 GHz to 2.5 GHz
3	Impedance	50 ohm
4	VSWR	2.0 or less
5	Gain	5.5 dB
6	Beam width	Horizontal: 60°; Vertical 55°
7	IP code	IPX7
8	Anti-Vibration, Anti-Shock	IEC61373 Category 1 Class A
9	N.P.	Stainless

2.4 Pengumpulan dan Analisis Data

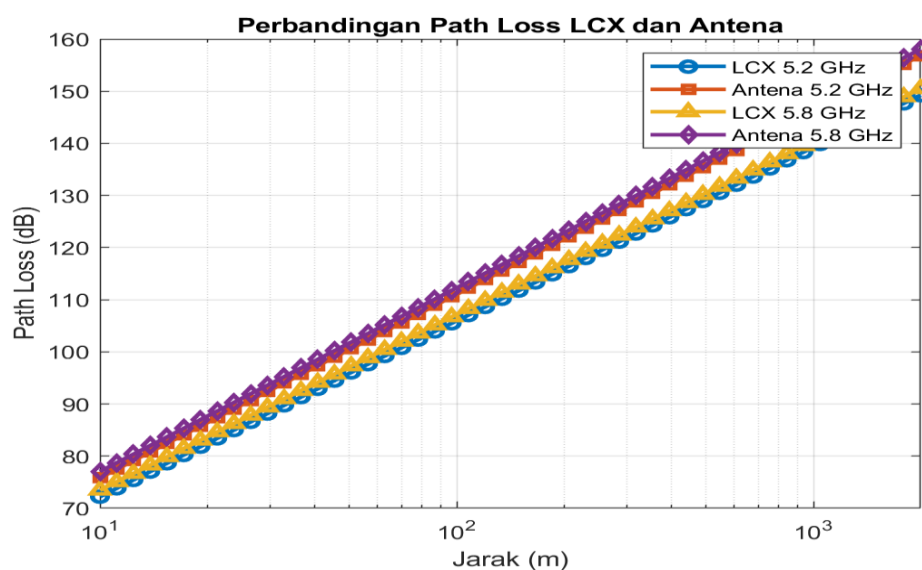
Data penelitian diperoleh dari hasil simulasi numerik MATLAB untuk dua konfigurasi media transmisi, yaitu LCX dan *bidirectional antenna*. Simulasi dilakukan pada skenario jalur elevated MRT Jakarta dengan frekuensi operasi 5,2 GHz dan 5,8 GHz. Jarak antara pemancar dan penerima divariasikan dari 10 m hingga 2000 m. Setiap skenario menghasilkan nilai path loss, daya terima, SNR, BER, dan throughput efektif (**Samad, dkk, 2023**). Data hasil simulasi kemudian dikompilasi ke dalam tabel dan grafik untuk membandingkan performa LCX dan *bidirectional antenna*. Perbandingan dilakukan berdasarkan perubahan jarak dan frekuensi operasi. Dengan demikian, analisis difokuskan pada pengaruh jarak dan frekuensi terhadap penurunan kualitas sinyal dan kapasitas throughput efektif.

2.5 Spesifikasi Teknis Perangkat Transmisi

Spesifikasi teknis perangkat transmisi yang digunakan dalam simulasi terdiri dari Leaky Coaxial Cable (LCX) yang tercantum dalam Tabel 1 dan *bidirectional antenna* yang dapat dilihat dalam Tabel 2. Spesifikasi teknis LCX dan *bidirectional antenna* yang digunakan dalam naskah ini merujuk pada dokumen teknis MRT Jakarta. Namun, karena spesifikasi perangkat pada dokumen tersebut tidak sepenuhnya merepresentasikan konfigurasi 5 GHz yang disimulasikan, parameter perangkat pada penelitian ini digunakan sebagai acuan karakteristik umum, sedangkan simulasi difokuskan pada evaluasi komparatif performa LCX dan *bidirectional antenna* pada frekuensi 5.2 GHz dan 5.8 GHz. Oleh karena itu, hasil simulasi perlu dipahami sebagai kajian awal berbasis model numerik, bukan sebagai hasil pengukuran langsung terhadap perangkat aktual. Sementara itu, *bidirectional antenna* memiliki pola radiasi dua arah dan dipasang di titik-titik strategis sepanjang jalur MRT untuk mengoptimalkan cakupan sinyal (Hilary, dkk, 2021). Perangkat LCX dipasang sejajar dengan rel kereta api, sedangkan *bidirectional antenna* diposisikan pada titik tertentu di sepanjang jalur elevated dengan orientasi pancaran yang diarahkan mengikuti koridor lintasan (Saleem, dkk, 2018). Parameter operasional yang digunakan meliputi daya pemancar 30 dBm, gain antenna 5 dBi, lebar pita 20 MHz, dan laju bit 10 Mbps. Simulasi pada penelitian ini difokuskan pada skenario jalur elevated dengan parameter jarak dan frekuensi yang divariasikan. Pembatasan skenario ini dilakukan agar hasil simulasi konsisten dengan data yang disajikan pada bagian hasil dan pembahasan. Hasil simulasi ini bertujuan untuk menyediakan data perbandingan dan representatif antara teknologi LCX dan *bidirectional antenna* dalam mendukung komunikasi nirkabel di MRT.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi dilakukan menggunakan skrip MATLAB yang menghitung path loss, daya terima, SNR, BER, dan throughput efektif untuk LCX dan *bidirectional antenna*. Parameter simulasi meliputi frekuensi 5.2 GHz dan 5.8 GHz, jarak 10–2000 m, daya pancar 30 dBm, gain pemancar dan penerima 5 dBi, bandwidth 20 MHz, noise figure 6 dB, dan laju bit 10 Mbps. BER dihitung menggunakan pendekatan BPSK pada kanal AWGN, sedangkan throughput efektif dihitung berdasarkan Persamaan (5).

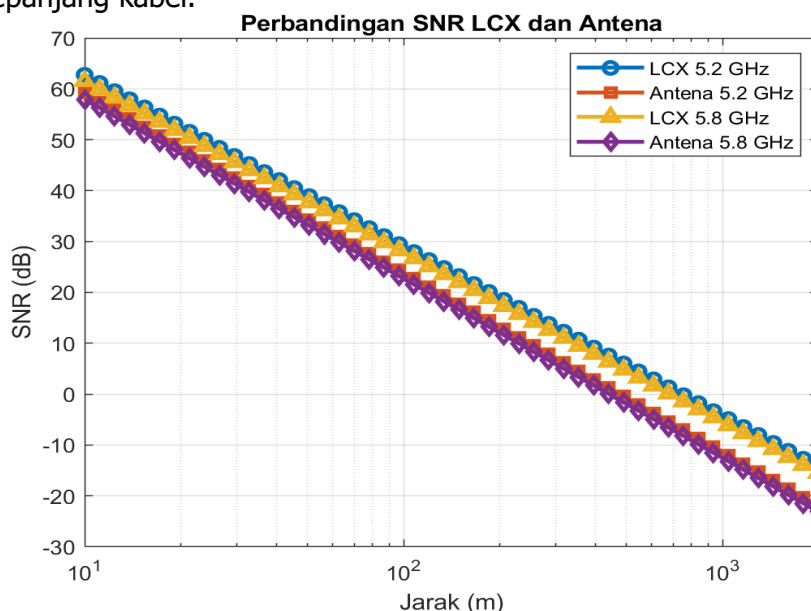


Gambar 4. Path Loss

Tabel 3 Hasil Simulasi *Path Loss* (dB)

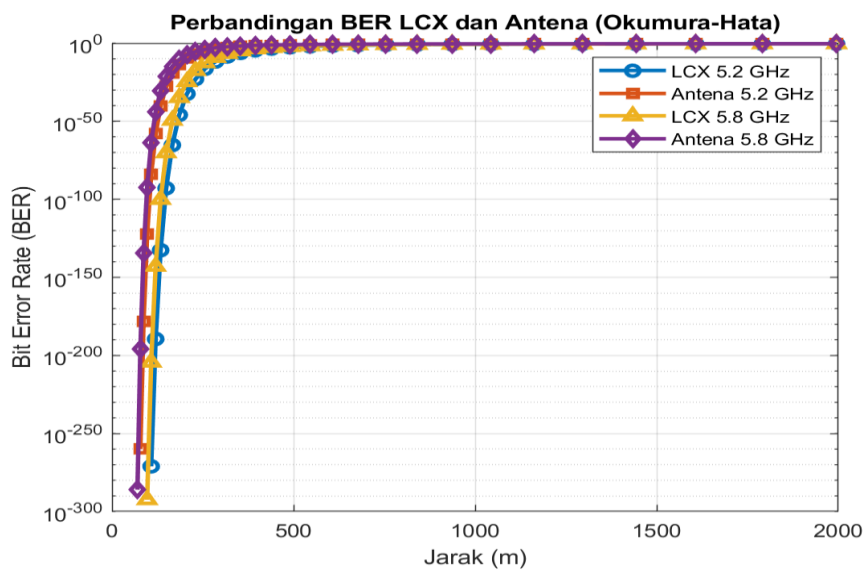
Distance (m)	Path Loss LCX 5,2 GHz	Path Loss Antena 5,2 GHz	Path Loss LCX 5,8 GHz	Path Loss Antena 5,8 GHz
10	72.2106	75.8127	73.4470	77.0490
100	105.4775	110.5343	106.7138	111.7707
500	128.9383	135.3355	130.1747	136.5719
1000	139.8644	146.9094	141.1007	148.1457
2000	149.2255	156.8298	150.4619	158.0662

Gambar 4 dan Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai path loss meningkat seiring bertambahnya jarak untuk seluruh konfigurasi. Pada frekuensi 5.2 GHz, path loss LCX meningkat dari 72.2106 dB pada jarak 10 m menjadi 149.2255 dB pada jarak 2000 m, sedangkan *bidirectional antenna* meningkat dari 75.8127 dB menjadi 156.8298 dB. Pola serupa juga terjadi pada frekuensi 5.8 GHz, dengan nilai path loss yang sedikit lebih tinggi dibandingkan 5.2 GHz. Hasil ini menunjukkan bahwa LCX memiliki rugi propagasi yang lebih rendah dibandingkan *bidirectional antenna* pada seluruh jarak pengamatan karena karakteristik pemancaran sinyalnya lebih terdistribusi sepanjang kabel.

**Gambar 5. *Signal-to-Noise Ratio* (SNR)****Tabel 4. Hasil Simulasi *Signal-to-Noise Ratio* (dB)**

Jarak (m)	SNR LCX 5,2 GHz	SNR Antena 5,2 GHz	SNR LCX 5,8 GHz	SNR Antena 5,8 GHz
10	62.7563	59.1542	61.5199	57.9179
100	29.4895	24.4326	28.2531	23.1962
500	6.0286	-0.3686	4.7922	-1.6049
1000	-4.8974	-11.9424	-6.1338	-13.1788
2000	-14.2586	-21.8629	-15.4949	-23.0993

Gambar 5 dan Tabel 4 menunjukkan bahwa SNR menurun seiring peningkatan jarak. Pada jarak 10 m, SNR LCX pada 5.2 GHz mencapai 62.7563 dB, sedangkan *bidirectional antenna* sebesar 59.1542 dB. Pada jarak 2000 m, SNR LCX turun menjadi -14.2586 dB, sementara *bidirectional antenna* turun lebih rendah menjadi -21.8629 dB. Penurunan ini menunjukkan bahwa peningkatan path loss berdampak langsung terhadap penurunan kualitas sinyal. LCX tetap memberikan SNR yang lebih tinggi dibandingkan *bidirectional antenna* karena rugi propagasinya lebih rendah pada skenario simulasi yang digunakan.

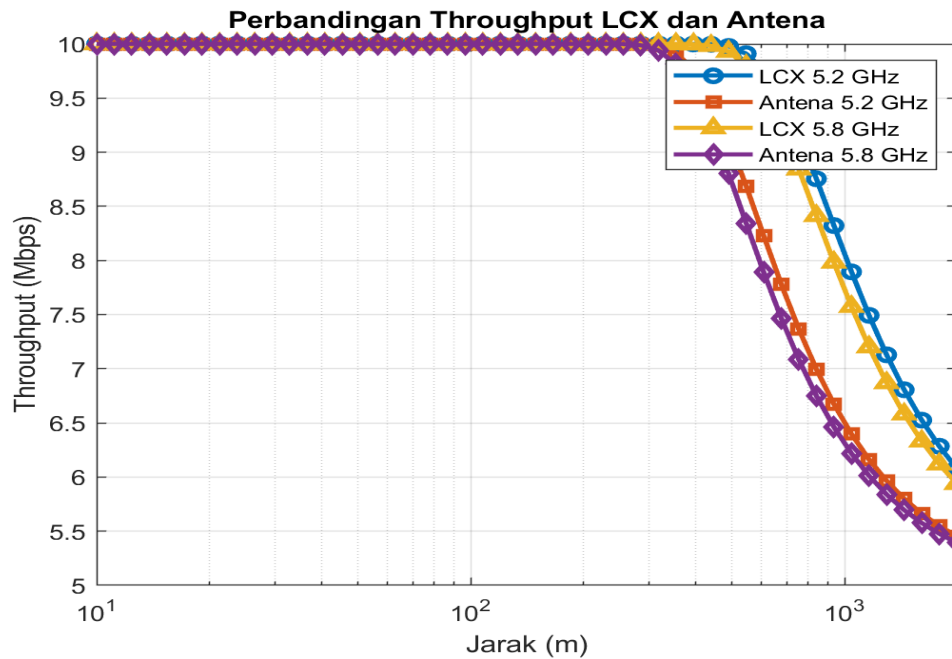


Gambar 6. Bit Error Rate (BER)

Tabel 5. Hasil Simulasi Bit Error Rate (BER)

Jarak (m)	BER LCX 5,2 GHz	BER Antena 5,2 GHz	BER LCX 5,8 GHz	BER Antena 5,8 GHz
10	0	0	0	0
100	0	5.1515e-123	3.7357e-293	4.2755e-93
500	0.0023	0.0876	0.0070	0.1199
1000	0.2105	0.3603	0.2426	0.3782
2000	0.3921	0.4546	0.4061	0.4606

Gambar 6 dan Tabel 5 menunjukkan bahwa BER meningkat ketika jarak bertambah dan SNR menurun. Pada jarak 500 m, BER LCX pada 5.2 GHz sebesar 0.0023, sedangkan *bidirectional antenna* sebesar 0.0876. Pada jarak 2000 m, BER LCX meningkat menjadi 0.3921, sedangkan *bidirectional antenna* mencapai 0.4546. Hasil ini menunjukkan bahwa LCX memiliki tingkat kesalahan bit yang lebih rendah dibandingkan *bidirectional antenna*. Dengan demikian, LCX lebih mampu mempertahankan kualitas transmisi digital pada jarak menengah hingga jauh.



Gambar 7. Throughput

Tabel 6. Hasil Simulasi Throughput Efektif (Mbps)

Jarak (m)	Throughput LCX 5,2 GHz (Mbps)	Throughput Antena 5,2 GHz (Mbps)	Throughput LCX 5,8 GHz (Mbps)	Throughput Antena 5,8 GHz (Mbps)
10	10	10	10	10
100	10	10	10	10
500	9.9768	9.1236	9.9296	8.8013
1000	7.8951	6.3968	7.5740	6.2178
2000	6.0792	5.4543	5.9389	5.3942

Gambar 7 dan Tabel 6 menunjukkan bahwa throughput efektif menurun seiring meningkatnya BER. Pada jarak 10 m dan 100 m, seluruh konfigurasi masih menghasilkan throughput mendekati 10 Mbps. Namun, pada jarak 500 m hingga 2000 m, perbedaan performa mulai terlihat. Pada jarak 2000 m, throughput LCX pada 5,2 GHz sebesar 6,0792 Mbps, sedangkan *bidirectional antenna* sebesar 5,4543 Mbps. Pada frekuensi 5,8 GHz, LCX menghasilkan throughput 5,9389 Mbps, sedangkan *bidirectional antenna* sebesar 5,3942 Mbps. Hasil ini memperlihatkan bahwa LCX lebih stabil dalam mempertahankan kapasitas transmisi efektif dibandingkan *bidirectional antenna*.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa LCX memberikan performa yang lebih baik dibandingkan *bidirectional antenna* pada skenario jalur elevated MRT Jakarta. Keunggulan LCX terlihat dari nilai path loss yang lebih rendah, SNR yang lebih tinggi, BER yang lebih kecil, dan throughput efektif yang lebih besar pada seluruh jarak pengamatan. Perbedaan performa semakin terlihat pada jarak menengah hingga jauh, terutama mulai 500 m hingga 2000 m. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik LCX sebagai media pemancar terdistribusi lebih sesuai untuk komunikasi yang membutuhkan cakupan kontinu sepanjang lintasan, sedangkan *bidirectional antenna* lebih sensitif terhadap peningkatan jarak dan penurunan kualitas kanal. Namun, karena simulasi ini menggunakan model propagasi empiris termodifikasi, hasil yang

diperoleh perlu dipahami sebagai evaluasi komparatif awal dan masih memerlukan validasi lebih lanjut melalui pengukuran lapangan atau pemodelan kanal yang lebih rinci.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini membandingkan kinerja Leaky Coaxial Cable (LCX) dan *bidirectional antenna* pada sistem komunikasi Train-to-Ground MRT Jakarta menggunakan simulasi numerik MATLAB berbasis model propagasi empiris termodifikasi. Evaluasi dilakukan pada frekuensi 5,2 GHz dan 5,8 GHz dengan parameter kinerja berupa path loss, Signal-to-Noise Ratio (SNR), Bit Error Rate (BER), dan throughput efektif. Hasil simulasi menunjukkan bahwa LCX memberikan performa yang lebih baik dibandingkan *bidirectional antenna* pada seluruh jarak pengamatan. Pada jarak 2000 m dan frekuensi 5,2 GHz, LCX menghasilkan path loss sebesar 149,2255 dB, lebih rendah dibandingkan *bidirectional antenna* sebesar 156,8298 dB. Dari sisi kualitas sinyal, LCX menghasilkan SNR sebesar -14,2586 dB, sedangkan *bidirectional antenna* menghasilkan SNR sebesar -21,8629 dB. LCX juga menghasilkan BER sebesar 0,3921 dan throughput sebesar 6,0792 Mbps, sedangkan *bidirectional antenna* menghasilkan BER sebesar 0,4546 dan throughput sebesar 5,4543 Mbps. Kinerja LCX yang lebih baik dipengaruhi oleh karakteristik distribusi sinyal sepanjang kabel, sehingga penurunan kualitas sinyal dapat lebih terkendali dibandingkan sistem antena titik. Dengan demikian, LCX dapat menjadi pilihan yang lebih sesuai untuk mendukung komunikasi MRT yang membutuhkan cakupan-berkelanjutan, seperti komunikasi Train-to-Ground, transmisi CCTV, dan sistem informasi penumpang. Keterbatasan penelitian ini adalah penggunaan model propagasi empiris termodifikasi pada pita 5 GHz yang belum divalidasi dengan pengukuran lapangan MRT Jakarta. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu melibatkan pengukuran kanal aktual atau simulasi ray tracing 3D berbasis geometri lintasan untuk memperoleh estimasi performa yang lebih representatif.

DAFTAR RUJUKAN

- Arya, A. K., Han, S., & Kim, S. (2023). Review of Antennas for Railway Communications. *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 23(2), 90–100. <https://doi.org/10.26866/jees.2023.2.r.148>
- Bagdadee, A. H., Al Mamoon, I., Dewi, D. A., Varadarajan, V., Zhang, L., & Mondal, A. U. (2025). Advancing sustainability in urban transportation: A solar-powered metro rail system. *PLOS ONE*, 20(3), e0320016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0320016>
- Chengcheng, L., Xin, Y., Hongli, Z., Siyu, L., & Hongwei, W. (2020). Measurement-based Fading Model with Leaky Coaxial Cables for Urban Rail Transit in Tunnels. *2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*, 1285–1286. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF35879.2020.9329747>
- Farahneh, H., & Fernando, X. (2019). *The Leaky Feeder , a Reliable Medium for Vehicle to Infrastructure Communications*. 1–16. <https://doi.org/10.3390/asi2040036>
- González-plaza, A., Cantarero, R. G., Banda, R. B. A., & Rodríguez, C. B. (2022). *applied sciences 5G Based on MNOs for Critical Railway Signalling Services: Future Railway Mobile Communication System*.

- Hilary, C., Nkimbeng, S., Wang, H., & Park, I. (2021). *Coplanar waveguide-fed bidirectional same-sense circularly polarized metasurface-based antenna*.
- Hou, Y., Tsukamoto, S., Ariyoshi, M., Kobayashi, K., Kumagai, T., & Okada, M. (2014). Performance comparison for 2 by 2 MIMO system using single leaky coaxial cable over WLAN frequency band. *2014 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/APSIPA.2014.7041735>
- Ivashevsky, M. R. (2020). VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS FOR RAILWAY TRANSPORT. *World of Transport and Transportation*, 17(5), 298–314. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-5-298-314>
- JAKARTA MRT, J. M. R. T. (2019). *Technical Specification for TEL – LCX Cable*. JAKARTA MRT.
- Jiao, K., Song, M., Tang, X., Dong, S., & Xiong, S. (2024). Two-Dimensional Differential Positioning with Global Navigation Satellite System Signal Frequency Division Relay Forwarding to Parallel Leaky Coaxial Cables in Tunnel. *Applied Sciences*, 14(22), 10288. <https://doi.org/10.3390/app142210288>
- Kai, L. S., Mahyeddin, M. E., Majid, H. A., Latif, M. F. A., & Padel, M. A. (2020). Bidirectional antenna for 2.4-GHz WLAN application inside train. *Journal of Advanced Industrial Technology and Application*, 1(1), 31–37.
- Lin, D., Broere, W., & Cui, J. (2022). Metro systems and urban development: Impacts and implications. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 125, 104509. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104509>
- Liu, P., Feng, J., Ge, W.-Z., Wang, H., Liu, X., Wang, D., Song, T., & Chen, J. (2022). A System-Level Performance Evaluation for a 5G System under a Leaky Coaxial Cable MIMO Channel for High-Speed Trains in the Railway Tunnel. *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics11081185>
- Narouwa, M., Mendiboure, L., Badis, H., Maaloul, S., Mechali Molla, D., Berbineau, M., & Langar, R. (2024). Enabling Network Technologies For Flexible Railway Connectivity. *IEEE Access*, 12, 151532–151553. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3479879>
- Saleem, A., Zhang, F., Wang, M., Yin, X., & Zheng, G. (2018). *Proficiency of Leaky Coaxial Cable-Based MIMO System Using Radiated Field Distribution*. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5016847>
- Samad, A., Choi, S., Kim, C., & Choi, K. (2023). Wave Propagation Modeling Techniques in Tunnel Environments: A Survey. *IEEE Access*, 11(December 2022), 2199–2225. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3233877>

- Serna, A. A., Yu, X., & Saniie, J. (2024). AI-Based Security Surveillance and Hazard Detection for Train Platform Safety. *2024 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, 185–190. <https://doi.org/10.1109/eIT60633.2024.10609931>
- Sun, L., Hou, Y., Li, Y., Zhang, Z., & Feng, Z. (2019). An Open Cavity Leaky-Wave Antenna With Vertical-Polarization Endfire Radiation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation, PP*, 1. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2902662>
- Xu, T., Xu, M., Lu, H., & Cai, X. (2023). A Printed Dipole Array with Bidirectional Endfire Radiation for Tunnel Communication. *Sensors*, *23*(22), 9137. <https://doi.org/10.3390/s23229137>
- Zhang, H., Zhan, B., & Ouyang, M. (2024). Enhancing accessibility through rail transit in congested urban areas: A cross-regional analysis. *Journal of Transport Geography*, *115*, 103791. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103791>
- Zhang, J., Liu, L., Han, B., Li, Z., Zhou, T., Wang, K., Wang, D., Ai, B., Zhang, J., Liu, L., Han, B., Li, Z., Zhou, T., Wang, K., Wang, D., & Ai, B. (2020). Concepts on Train-to-Ground Wireless Communication System for Hyperloop: Channel, Network Architecture, and Resource Management. *Energies* *2020*, Vol. *13*, *13*(17). <https://doi.org/10.3390/EN13174309>
- Zhang, R., & Mi, G. (2023). Research on Train-to-Train Communication Resource Allocation for Urban Rail Transport. *Journal of Physics: Conference Series*, *2491*(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2491/1/012009>