

Evaluasi Deteksi Posisi Kereta Menggunakan Radio Ranging di CBTC

Copa Riva Billah[#], Wahyu Kusuma Raharja[#]

[#] *Departemen of Electrical Engineering, Universitas Gunadarma, Jakarta, Indonesia*
E-mail: [crivabillah\[at\]gmail.com](mailto:crivabillah[at]gmail.com), [wahyukr\[at\]staff.gunadarma.ac.id](mailto:wahyukr[at]staff.gunadarma.ac.id)

ABSTRACTS

This study analyzes the performance of Radio Ranging technology in improving train position detection accuracy within the Communications-Based Train Control (CBTC) system of MRT Jakarta. The simulation-based experimental method was carried out using MATLAB, with the comparison of Radio Ranging and Tachogenerator (TG) across three operational conditions: open area, tunnel, and dense urban environment. Evaluation metrics include position deviation and Root Mean Square Error (RMSE). The results show that Radio Ranging provides better accuracy compared to TG, particularly in tunnel and dense areas, where TG tends to accumulate errors. These findings indicate that Radio Ranging can serve as a complementary method to enhance CBTC reliability and operational safety of MRT Jakarta.

Manuscript received Sep 3, 2025; revised Oct 9, 2025. accepted Dec 1, 2025. Date of publication Dec 31, 2025. International Journal, JITSi: Jurnal Ilmiah Teknologi Sistem Informasi licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License



ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis performa teknologi Radio Ranging dalam meningkatkan akurasi deteksi posisi kereta pada sistem Communications-Based Train Control (CBTC) MRT Jakarta. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental berbasis simulasi menggunakan MATLAB, dengan membandingkan Radio Ranging dan Tachogenerator (TG) pada tiga kondisi operasional: area terbuka, terowongan, dan area padat perkotaan. Evaluasi dilakukan berdasarkan deviasi posisi dan Root Mean Square Error (RMSE). Hasil menunjukkan bahwa Radio Ranging memberikan akurasi yang lebih baik dibandingkan TG, khususnya pada area terowongan dan padat, di mana TG cenderung menghasilkan error kumulatif. Temuan ini mengindikasikan bahwa Radio Ranging dapat menjadi metode pelengkap untuk meningkatkan keandalan CBTC dan keselamatan operasi MRT Jakarta.

Keywords / Kata Kunci — *Radio Ranging; CBTC; Train Position Detection; MATLAB; MRT Jakarta*

CORRESPONDING AUTHOR

Copa Riva Billah
Departemen of Electrical Engineering, Universitas Gunadarma, Jakarta, Indonesia
Email: [copa1398\[at\]gmail.com](mailto:copa1398[at]gmail.com)

1. PENDAHULUAN

Transportasi massal modern merupakan salah satu solusi utama dalam mengatasi masalah kemacetan di kota-kota besar. Jakarta, sebagai ibu kota dengan tingkat kepadatan lalu lintas yang tinggi, telah mengoperasikan sistem Mass Rapid Transit (MRT) sejak tahun 2019 melalui PT MRT Jakarta (Persero) [1]. Kehadiran MRT tidak hanya bertujuan mengurangi beban transportasi jalan raya, tetapi juga menjadi tulang punggung transportasi publik yang aman, cepat, dan efisien [2].

Keandalan sistem MRT sangat dipengaruhi oleh teknologi sistem persinyalan dan deteksi posisi kereta. PT MRT Jakarta telah menerapkan Communications-Based Train Control (CBTC), sebuah teknologi kendali kereta modern yang memungkinkan operasi otomatis, headway lebih rapat, serta kapasitas jalur yang lebih optimal [3]. Dalam sistem ini, akurasi deteksi posisi kereta menjadi faktor kritis karena kesalahan posisi dapat berdampak langsung pada keselamatan, efisiensi operasional, dan kenyamanan penumpang [4].

Metode konvensional dalam deteksi posisi kereta melibatkan perangkat seperti Tachogenerator (TG), yang menghitung jarak tempuh berdasarkan perputaran roda, serta balise, yang berfungsi sebagai titik referensi tetap di jalur [5]. TG sering kali menghasilkan error kumulatif akibat slip roda atau variasi mekanis, sedangkan balise hanya dapat memberikan koreksi pada titik-titik tertentu [6]. Akibatnya, posisi kereta di antara dua balise tidak dapat dipantau dengan presisi penuh.

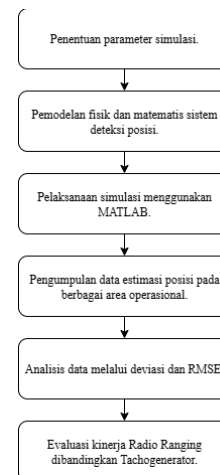
Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, teknologi Radio Ranging diperkenalkan sebagai metode pelengkap. Radio Ranging bekerja dengan mengukur waktu tempuh sinyal (time of flight) antara Vehicle Radio Set (VRS) di kereta dan Wayside Radio Side (WRS) di sepanjang jalur [7]. Dengan mekanisme ini, posisi kereta dapat dipantau secara lebih dinamis dan akurat, terutama pada area dengan potensi error tinggi seperti terowongan atau lingkungan padat dengan multipath [8].

Penelitian ini berfokus pada analisis performa Radio Ranging dalam sistem CBTC MRT Jakarta. Pendekatan simulasi berbasis MATLAB digunakan untuk mengevaluasi kinerja metode ini dibandingkan TG dalam tiga kondisi operasional utama: area terbuka, terowongan, dan area padat perkotaan [9]. Evaluasi dilakukan berdasarkan deviasi posisi dan Root Mean Square Error (RMSE) untuk menilai sejauh mana Radio Ranging dapat meningkatkan keandalan deteksi posisi [10].

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem persinyalan MRT Jakarta, serta menjadi dasar bagi pengembangan metode deteksi posisi kereta yang lebih presisi dan aman di masa depan [11].

2. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian ini disusun secara sistematis untuk menggambarkan alur penelitian dari awal hingga akhir. Gambar 1 menunjukkan tahapan penelitian yang diawali dengan penentuan asumsi dasar dan parameter simulasi, dilanjutkan dengan perancangan model fisik dan matematis yang merepresentasikan interaksi antara VRS, WRS, TG, dan balise pada sistem CBTC. Tahap berikutnya adalah pelaksanaan simulasi menggunakan MATLAB untuk memperoleh data estimasi jarak, deviasi posisi, dan error pada berbagai kondisi area operasional. Data yang terkumpul kemudian dianalisis melalui perhitungan error, distribusi deviasi, dan nilai RMSE. Hasil analisis digunakan untuk mengevaluasi kinerja Radio Ranging dibandingkan dengan Tachogenerator, sebelum akhirnya ditarik kesimpulan dan rekomendasi penelitian.



GAMBAR 1. Diagram Alur Penelitian

2.1. Parameter Dasar

Obyek utama penelitian ini adalah sistem deteksi posisi kereta berbasis *Radio Ranging*, khususnya perangkat *Vehicle Radio Set (VRS)* dan *Wayside Radio Side (WRS)* yang digunakan dalam sistem CBTC MRT Jakarta. Penelitian dilakukan secara simulatif dengan sejumlah parameter dasar. Jarak antar WRS ditetapkan sekitar 200 meter sesuai konfigurasi sistem MRT Jakarta, sementara kecepatan kereta berada pada kisaran 0 hingga 80 km/jam. Gelombang radio dianggap dipropagasikan dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Error pada TG diasumsikan bersifat kumulatif akibat slip roda dan deviasi mekanis, sedangkan balise berfungsi sebagai titik referensi tetap yang memberikan koreksi posisi absolut ketika kereta melewati lokasi tertentu.

2.2. Model Fisik dan Matematis

Model fisik menggambarkan proses pemancaran sinyal radio dari VRS ke WRS dan sebaliknya, dengan pengukuran waktu tempuh sinyal dua arah (Time of Flight). Jarak kereta dihitung berdasarkan waktu propagasi sinyal menggunakan persamaan dasar:

$$d = \frac{(T1 + T2)}{2} \times c \quad (1)$$

di mana T_1 merupakan waktu propagasi dari VRS ke WRS, T_2 adalah waktu propagasi dari WRS ke VRS, dan c adalah kecepatan gelombang radio. Untuk metode TG, perhitungan posisi dilakukan berdasarkan jumlah putaran roda yang dikonversi melalui keliling roda dengan persamaan:

$$d_{TG} = N \times \pi \times D \quad (2)$$

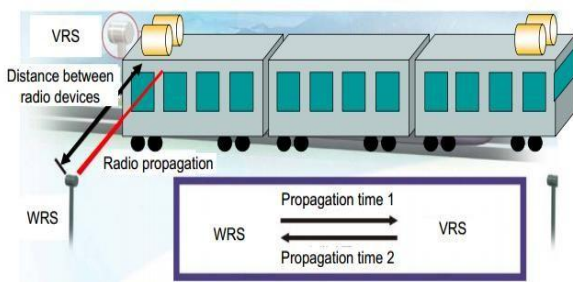
dengan N sebagai jumlah putaran roda dan D sebagai diameter roda. Evaluasi kinerja dilakukan menggunakan Root Mean Square Error (RMSE) yang menggambarkan deviasi rata-rata antara hasil estimasi posisi dengan posisi aktual jalur simulasi[12].

2.3. Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui simulasi numerik dengan perangkat lunak MATLAB. Skenario simulasi meliputi propagasi sinyal Radio Ranging berbasis ToF, estimasi jarak menggunakan TG, pencatatan data berupa hasil estimasi jarak, deviasi, serta error posisi, dan validasi perbandingan posisi terhadap jalur referensi ideal. Model di atas disimulasikan menggunakan matlab dengan listing program sebagai berikut:

Program Simulasi *Root Mean Square Error* (RMSE)

```
% Simulasi Deviasi Posisi Kereta
% Data jarak aktual (dalam meter)
jarak_aktual = [0, 200, 400, 600, 800, 1000];
% Hasil estimasi posisi dari Tachogenerator (TG)
posisi_TG = [0, 202.3, 405.8, 608.2, 812.0, 1016.7];
% Hasil estimasi posisi dari Radio Ranging
posisi_RR = [0, 199.2, 399.5, 601.1, 798.6, 999.1];
% Hitung error untuk masing-masing metode
error_TG = posisi_TG - jarak_aktual;
error_RR = posisi_RR - jarak_aktual;
% Buat tabel
T = table(jarak_aktual', posisi_TG', error_TG', posisi_RR', error_RR', ...
    'VariableNames', {'Jarak_Aktual_m', 'Posisi_TG_m', 'Error_TG_m', 'Posisi_RR_m', 'Error_RR_m'});
% Tampilkan tabel
disp('Tabel Deviasi Posisi:')
disp(T)
% Plot grafik deviasi
figure;
plot(jarak_aktual, error_TG, '-o', 'LineWidth', 2, 'Color', [0.85 0.33 0.10]); hold on;
plot(jarak_aktual, error_RR, '-s', 'LineWidth', 2, 'Color', [0.00 0.45 0.74]);
yline(0, '--k'); % Garis nol referensi
% Pengaturan grafik
title('Grafik Deviasi Posisi terhadap Jarak Aktual');
xlabel('Jarak Aktual (m)');
ylabel('Deviasi Posisi (m)');
legend('Tachogenerator (TG)', 'Radio Ranging', 'Location', 'northwest');
grid on;
```



GAMBAR 2. VRS dan WRS Pada Kereta

TABEL 1. Variabel Penelitian

Jenis Variabel	Nama Variabel	Keterangan / Deskripsi
Variable Bebas	Tipe Area Operasional	Tiga Jenis area: area terbuka, terowongan, dan area padat (kepadatan bangunan tinggi)
Variable Terikat	Akurasi Deteksi Posisi	Deviasi rata-rata hasil pengukuran terhadap posisi ideal, dinyatakan dalam satuan meter
Variabel Kontrol	Jarak antara VRS dan WRS	Diasumsikan tetap pada nilai tertentu (misalnya 100 meter) untuk menjaga konsistensi skenario

2.4. Variabel Penelitian

Penelitian ini juga melibatkan beberapa variabel penting. Variabel bebas berupa tipe area operasional yang terdiri dari area terbuka, terowongan, dan area padat. Variabel terikat berupa akurasi deteksi posisi yang dinyatakan dalam deviasi rata-rata dengan satuan meter. Variabel kontrol berupa jarak antar WRS yang ditetapkan tetap pada 200 meter untuk menjaga konsistensi simulasi.

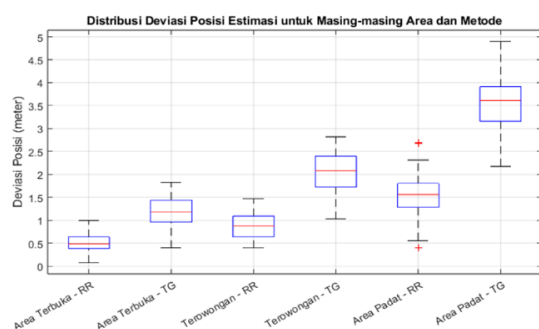
2.5. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan menghitung deviasi posisi, memvisualisasikan distribusi error dalam bentuk boxplot, serta menghitung nilai RMSE. Hasil perhitungan kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik yang membandingkan performa metode TG dan Radio Ranging pada masing-masing area operasional. Seluruh proses analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB dengan dukungan spreadsheet numerik untuk memastikan hasil yang sistematis dan terukur.

3. Hasil Dan Pembahasan

Hasil penelitian ini diperoleh dari simulasi berbasis MATLAB yang membandingkan performa metode Radio Ranging dengan Tachogenerator (TG) dalam sistem deteksi posisi kereta berbasis CBTC pada MRT Jakarta. Analisis difokuskan pada tiga kondisi operasional: area terbuka, terowongan, dan area padat.

3.1. Hasil Simulasi Deviasi Posisi



GAMBAR 3. Boxplot Distribusi Deviasi Posisi pada Area Terbuka, Terowongan, dan Area Padat

Simulasi menunjukkan bahwa Radio Ranging memiliki deviasi posisi yang lebih kecil dibandingkan dengan TG pada seluruh kondisi. Pada area terbuka, deviasi Radio Ranging rata-rata hanya sekitar 0,5 meter, sedangkan TG mencapai lebih dari 1 meter. Pada terowongan, akurasi Radio Ranging tetap terjaga dengan deviasi sekitar 0,9 meter, sedangkan TG meningkat hingga 2 meter akibat efek multipath dan slip roda. Pada area padat, error Radio Ranging masih dalam kisaran 1,5 meter, jauh lebih baik dibandingkan TG yang mencapai lebih dari 3 meter. Gambar 3 memperlihatkan distribusi deviasi posisi berdasarkan simulasi pada tiga kondisi operasional.

Boxplot menunjukkan median, kuartil, serta penyebaran error untuk masing-masing metode. Dari gambar terlihat bahwa Radio Ranging lebih stabil dengan sebaran deviasi yang sempit, sedangkan TG menunjukkan variasi error yang lebih besar terutama di area padat.

3.2. Perbandingan RMSE

Untuk memperkuat analisis, dilakukan perhitungan Root Mean Square Error (RMSE). Nilai RMSE menggambarkan tingkat deviasi rata-rata terhadap posisi aktual. Berikut ini tabel 2 menampilkan hasil perhitungan RMSE untuk masing-masing metode pada tiga jenis area operasional.

TABEL 2. Perbandingan RMSE Radio Ranging dan TG pada Tiga Area Operasional

Area Operasional	RMSE Radio Ranging (m)	RMSR TG (m)
Area Terbuka	0.52	1.25
Terowongan	0.91	2.03
Area Padat	1.48	3.42

3.3. Pembahasan

Hasil pada Gambar 3. dan Tabel 2. menegaskan konsistensi keunggulan Radio Ranging. Nilai deviasi maupun RMSE Radio Ranging berada pada kisaran 0,5–1,5 m, lebih rendah dibanding TG yang berada pada kisaran 1,2–3,5 m. Temuan ini membuktikan bahwa Radio Ranging dapat menjaga akurasi estimasi posisi di bawah ambang batas safety buffer ± 3 m.

Integrasi Radio Ranging ke dalam sistem CBTC MRT Jakarta dapat meningkatkan keandalan deteksi posisi. TG tetap relevan sebagai sensor utama, namun kelemahannya dalam menghadapi slip roda dan akumulasi error dapat dikompensasi oleh Radio Ranging. Balise berperan sebagai titik koreksi tetap sehingga keseluruhan sistem mampu menjaga posisi kereta dengan presisi tinggi pada semua area operasi.

3.4 Headings

Gunakan style heading dalam template ini secara langsung. Style sudah diformat sedemikian rupa sehingga memberikan jarak heading yang sesuai.

4. Kesimpulan

Penelitian ini telah melakukan evaluasi terhadap kinerja metode *Radio Ranging* dibandingkan dengan *Tachogenerator* (TG) dalam sistem deteksi posisi kereta pada CBTC (*Communications-Based Train Control*) MRT Jakarta. Hasil simulasi berbasis MATLAB menunjukkan bahwa metode *Radio Ranging* memiliki akurasi posisi yang lebih tinggi dibandingkan TG di seluruh kondisi operasional. Deviasi posisi untuk *Radio Ranging* berkisar antara 0,5–1,5 meter, sedangkan TG menunjukkan deviasi lebih besar yaitu 1,2–3,5 meter. Nilai RMSE juga memperlihatkan keunggulan *Radio Ranging* dengan hasil yang lebih rendah di setiap area: 0,52 m pada area terbuka (dibandingkan 1,25 m untuk TG), 0,91 m pada terowongan (dibandingkan 2,03 m untuk TG), dan 1,48 m pada area padat (dibandingkan 3,42 m untuk TG).

Integrasi antara *Radio Ranging*, TG, dan Balise terbukti mampu menjaga akurasi posisi tetap berada di bawah safety buffer ± 3 meter, sehingga meningkatkan keandalan sistem deteksi posisi dan keselamatan operasi kereta.

Secara keseluruhan, kontribusi utama penelitian ini adalah memberikan pembuktian kuantitatif bahwa teknologi *Radio Ranging* dapat berfungsi sebagai metode pelengkap yang efektif dalam sistem CBTC, terutama pada lingkungan urban dengan tingkat interferensi tinggi seperti MRT Jakarta. Hasil ini memperkuat dasar teknis untuk pengembangan sistem CBTC generasi berikutnya yang lebih presisi dan efisien, serta memberikan rekomendasi praktis bagi industri transportasi perkotaan dalam meningkatkan keselamatan dan optimasi kapasitas jaringan rel berbasis komunikasi.

Temuan penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembangan kebijakan dan perancangan sistem kontrol kereta berbasis komunikasi di Indonesia, sekaligus memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan keandalan dan keamanan transportasi publik modern.

REFERENSI

- [1] PT MRT Jakarta, *Laporan Tahunan 2023*, Jakarta: PT MRT Jakarta (Persero), 2023.
- [2] Pemerintah Provinsi DKI Jakarta, “Jakarta MRT sebagai solusi transportasi perkotaan,” *Jakarta Smart City*, 2019.
- [3] IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements, IEEE Std 1474.1-2004, 2004.
- [4] Z. Wang, J. Sun, and Q. Liu, “Safety analysis of CBTC systems based on formal verification,” *Journal of Rail Transport Planning & Management*, vol. 20, pp. 100–118, 2021.
- [5] H. Chen and Y. Liu, “Research on train positioning technology in CBTC system,” *2018 Chinese Automation Congress (CAC)*, pp. 4730–4735, 2018.
- [6] X. Zhang, T. Tang, and Z. Liu, “Error analysis of tachometer-based train localization and correction by balise,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 19, no. 11, pp. 3627–3636, Nov. 2018.
- [7] H. Zhang, C. Liu, and S. Su, “Application of radio ranging in train positioning for CBTC system,” *International Conference on Smart Rail Transportation (ICSRT)*, pp. 45–50, 2019.
- [8] J. Li, W. Wu, and K. Wang, “Radio-based train positioning under multipath environment,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 115321–115330, 2021.
- [9] M. R. A. Kadir and T. M. H. Taufik, “Simulation of train localization system using MATLAB/Simulink,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2084, 2021.
- [10] S. Basak, A. Bhattacharya, and R. Roy, “Performance evaluation of CBTC train positioning using ranging-based methods,” *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 14, no. 12, pp. 1534–1544, Dec. 2020.
- [11] Y. Zhao, L. Chen, and D. Yuan, “Enhancing train localization accuracy in CBTC systems with hybrid radio and balise methods,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 6, pp. 5272–5284, June 2021.
- [12] Schnieder, L. (2021). *Communications-based train control (CBTC)*. Springer Berlin Heidelberg.