

Evaluasi Performa Transmisi Sinyal RFID UHF pada Sistem Pembayaran Tol Multi Lane Free Flow

1st Vita Putri Handayani

Fakultas Teknik Elektro,

TelkomUniversity

Jakarta, Indonesia

Email :

vitaptr@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Kamelia Quzwain

School of Electrical Engineering

Telkom, University

Jakarta, Indonesia

Email :

kquzwain@telkomuniversity.ac.id

3rd Aisyah Novfitri

School of Electrical Engineering

Telkom, University

Jakarta, Indonesia

Email :

aisyahnovf@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Teknologi *Radio Frequency Identification (RFID)* berbasis *Ultra High Frequency (UHF)* semakin banyak digunakan untuk mendukung sistem pembayaran tol tanpa henti (*Multi Lane Free Flow / MLFF*). Implementasi sistem ini menuntut kualitas transmisi sinyal yang stabil agar proses identifikasi kendaraan berlangsung cepat dan akurat. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja sinyal RFID UHF melalui analisis parameter utama, yaitu *Received Signal Strength Indicator (RSSI)*, *Packet Error Rate (PER)*, *Read Rate*, *Propagation Delay*, *Backscatter Power*, serta hubungan *Signal-to-Noise Ratio (SNR)* terhadap *Bit Error Rate (BER)*. Metode penelitian dilakukan melalui simulasi menggunakan MATLAB dan pengujian eksperimental dengan perangkat RFID reader RFD182-USB dan antena tag pasif UHF hasil fabrikasi. Hasil menunjukkan bahwa nilai RSSI menurun seiring bertambahnya jarak, yang berimplikasi pada peningkatan PER dan penurunan Read Rate. Backscatter power dan propagation delay juga memperlihatkan pola yang konsisten dengan teori propagasi sinyal. Sementara itu, simulasi SNR-BER menunjukkan bahwa kualitas komunikasi dapat dipertahankan baik jika SNR berada di atas 10 dB. Temuan ini memberikan dasar teknis untuk optimalisasi desain dan penempatan perangkat RFID UHF dalam mendukung implementasi MLFF.

Kata kunci— *RFID UHF, Evaluasi Sinyal, MLFF, RSSI, PER, BER*

I. PENDAHULUAN

Kemacetan yang terjadi di gerbang tol masih menjadi salah satu persoalan utama dalam transportasi. Proses pembayaran konvensional yang mengharuskan kendaraan berhenti mengakibatkan antrean panjang dan waktu tempuh yang tidak efisien. Penerapan *Multi Lane Free Flow (MLFF)* menawarkan solusi dengan mengizinkan kendaraan melintas tanpa berhenti, sehingga dapat memperlancar arus lalu lintas dan mengurangi konsumsi bahan bakar.

Teknologi RFID berbasis UHF dipandang paling sesuai untuk mendukung sistem MLFF karena memiliki jangkauan baca lebih jauh, kecepatan pembacaan tinggi, serta mampu mengenali banyak tag secara bersamaan [1]. Akan tetapi, kinerja sistem ini sangat bergantung pada kualitas transmisi sinyal antara *reader* dan *tag*. Faktor lingkungan, jarak, serta

interferensi elektromagnetik dapat memengaruhi performa komunikasi [2]. Oleh karena itu, evaluasi sinyal menjadi aspek penting dalam memastikan keandalan implementasi RFID pada sistem MLFF.



Gambar 1 Skema Umum Sistem RFID

Gambar 1 memperlihatkan skema umum sistem RFID yang digunakan dalam mekanisme MLFF. Dari ilustrasi ini terlihat bagaimana komunikasi berlangsung antara tag yang terpasang pada kendaraan dengan reader di infrastruktur jalan tol. Interaksi antara keduanya menghasilkan data yang dikirimkan ke sistem pusat untuk memvalidasi transaksi pembayaran. Gambar ini menjadi landasan untuk memahami alur komunikasi dasar pada sistem RFID UHF.

Keberhasilan sistem MLFF tidak hanya ditentukan oleh perangkat keras, tetapi juga kualitas sinyal yang ditransmisikan. Oleh karena itu, penelitian ini menitikberatkan pada analisis sinyal untuk mengetahui batas kinerja serta faktor yang memengaruhinya.

II. KAJIAN TEORI

RFID adalah teknologi identifikasi otomatis yang bekerja melalui gelombang elektromagnetik [3]. Pada frekuensi UHF, komunikasi dilakukan dengan mekanisme *backscatter* [4], yaitu pantulan sinyal dari tag menuju reader. Proses ini sangat dipengaruhi oleh kondisi propagasi dan performa antena tag.

Parameter-parameter yang digunakan untuk menilai kinerja sinyal antara lain RSSI yang menunjukkan kekuatan sinyal yang diterima, PER yang menggambarkan persentase kegagalan paket, serta Read Rate yang mengindikasikan jumlah pembacaan tag per detik. Selain itu, Backscatter Power merepresentasikan daya pantulan sinyal, Propagation Delay menunjukkan waktu tempuh sinyal, sementara hubungan SNR-BER digunakan untuk menilai ketahanan sistem terhadap gangguan.

Tabel 1 Parameter Sistem

Parameter	Nilai yang Digunakan	Keterangan
Frekuensi	915 MHz	Frekuensi UHF standar RFID.
Daya pancar reader	28 dBm	Batas maksimum transmisi.
Jarak simulasi	1-10 meter	Jarak antara reader dan tag
Modulasi	BPSK & ASK	komparasi performa BER
Energi per bit	1	Dinormalisasi untuk analisis rasio
Noise	0,5	Sebagai basis untuk rasio E_b dan N_0
Threshold probabilitas	0,5	Batas minimal pembacaan dianggap berhasil
Skala Sigmoid	3	Mengatur tingkat kemiringan fungsi probabilitas

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa setiap parameter memiliki peran berbeda dalam menggambarkan kualitas komunikasi. Misalnya, RSSI dan PER lebih menekankan pada kekuatan sinyal dan tingkat keberhasilan pengiriman data, sedangkan SNR-BER digunakan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh noise terhadap tingkat kesalahan bit.

III. METODE

Penelitian ini berfokus pada evaluasi sinyal RFID UHF dengan tujuan mengetahui performa transmisi berdasarkan beberapa parameter utama. Tahapan penelitian dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu simulasi dan pengujian langsung. Pada tahap simulasi, pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB [5]. Proses ini digunakan untuk menganalisis perilaku parameter seperti *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), *Packet Error Rate* (PER), *Read Rate*, *Backscatter Power*, serta hubungan antara *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) dengan *Bit Error Rate* (BER). Dengan simulasi, pola dasar dari setiap parameter dapat diketahui dalam kondisi terkontrol, sehingga memudahkan untuk memahami kecenderungan perubahan sinyal ketika dipengaruhi oleh jarak maupun gangguan.

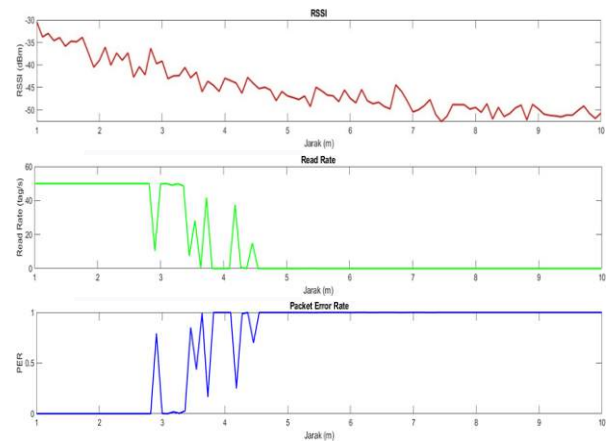
Tahap berikutnya adalah pengujian eksperimental yang dilakukan dengan menggunakan perangkat RFID reader RFD182-USB serta antenna tag pasif UHF yang telah

difabrikasi. Pengujian dilaksanakan pada jarak bervariasi mulai dari 0,5 meter hingga 5 meter. Setiap jarak pengukuran menghasilkan data terkait nilai RSSI, PER, Read Rate, Propagation Delay, dan Backscatter Power. Data yang diperoleh dari pengujian ini digunakan untuk menguji konsistensi hasil simulasi dengan kondisi nyata di lapangan.

Dengan mengombinasikan hasil dari simulasi dan pengujian langsung, penelitian ini menyajikan analisis komprehensif mengenai karakteristik sinyal RFID UHF. Pendekatan ini memungkinkan perbandingan antara hasil teoretis dan data empiris sehingga dapat diketahui batas kinerja sistem serta faktor-faktor yang memengaruhi reliabilitas komunikasi RFID pada skenario pembayaran tol berbasis MLFF.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

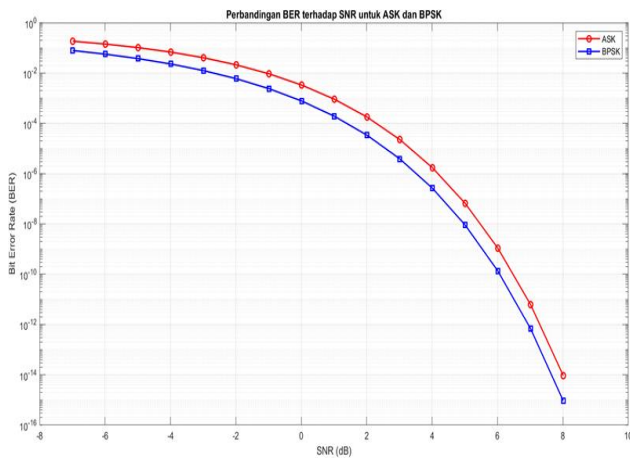
Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai RSSI menurun seiring dengan bertambahnya jarak. Pada jarak dekat, sinyal yang diterima cukup kuat sehingga PER rendah dan Read Rate tinggi. Namun, pada jarak di atas empat meter, penurunan RSSI menjadi signifikan yang berimplikasi pada meningkatnya PER dan menurunnya Read Rate [6].



Gambar 2 Grafik RSSI, Read Rate, PER

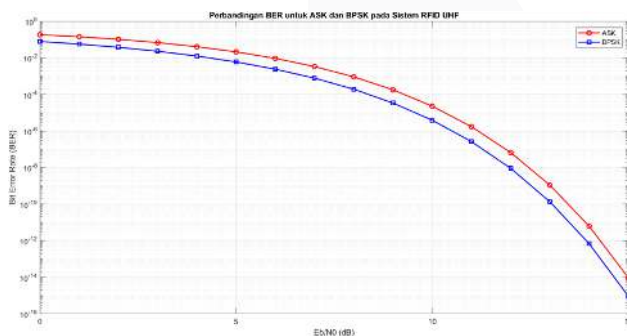
Hasil pada Gambar 2 menegaskan bahwa jarak operasional efektif sistem RFID UHF berada pada rentang tertentu, di mana kualitas sinyal masih mampu menjaga stabilitas komunikasi. Analisis lebih lanjut terhadap backscatter power menunjukkan bahwa daya pantulan sinyal menurun seiring dengan meningkatnya jarak. Pada jarak 0,5 meter, nilai tertinggi dicapai, namun ketika jarak diperpanjang lebih dari 4 meter, nilai backscatter power turun drastis.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai *backscatter power* mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak antara reader dan tag. Pada jarak terdekat, nilai pantulan sinyal masih cukup tinggi sehingga komunikasi berlangsung dengan baik. Namun, ketika jarak pembacaan diperpanjang, daya pantulan berkurang secara signifikan. Pola ini sesuai dengan teori propagasi gelombang elektromagnetik, di mana energi sinyal yang diterima semakin lemah karena mengalami pelemahan (*path loss*) selama merambat.



Gambar 3 Grafik Backscatter Power

Gambar 3 memperlihatkan tren penurunan daya pantulan yang konsisten terhadap penambahan jarak [7]. Hal ini menegaskan bahwa jarak merupakan faktor dominan yang memengaruhi kemampuan tag untuk memantulkan kembali sinyal ke reader. Pengukuran parameter *propagation delay* memperlihatkan adanya kenaikan nilai seiring bertambahnya jarak antara reader dan tag. Meskipun peningkatannya cukup jelas, nilai delay yang terukur masih berada pada skala nanodetik. Dengan demikian, keterlambatan propagasi tidak memberikan dampak signifikan terhadap performa sistem RFID UHF secara keseluruhan.



Gambar 4 Grafik Propagation Delay

Gambar 4 menunjukkan kecenderungan linear antara jarak dengan waktu propagasi [8]. Hasil ini menggambarkan bahwa semakin jauh posisi tag, semakin lama waktu yang dibutuhkan sinyal untuk menempuh jalur komunikasi, meskipun dalam konteks sistem RFID nilainya relatif kecil dan dapat diabaikan.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kualitas komunikasi pada sistem RFID UHF sangat dipengaruhi oleh jarak baca. Nilai RSSI menurun seiring dengan penambahan jarak, yang berdampak pada meningkatnya PER serta menurunnya Read Rate. Backscatter power juga mengalami penurunan signifikan, sedangkan propagation delay meningkat secara linear namun masih dalam skala yang tidak berpengaruh besar terhadap performa sistem. Analisis SNR-BER menegaskan bahwa sistem memerlukan SNR minimal 10 dB agar nilai BER tetap rendah dan komunikasi berlangsung dengan baik.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sistem RFID UHF memiliki potensi yang baik untuk mendukung penerapan MLFF, asalkan parameter operasional seperti jarak baca, kualitas antena, dan kondisi lingkungan diperhatikan secara optimal.

REFERENSI

- [1] K. Finkenzeller, "FID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication, 3rd ed. John Wiley & Sons," 2010.
- [2] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design," Hoboken, NJ: Wiley,, vol. 4th ed, 2016.
- [3] D. M. Dobkin, "The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice," Newnes, 2012.
- [4] S. Preradovic and N. C. Karmakar, "ultiresonator-based chipless RFID: Bar code of the future," *IEEE Microwave Magazine*, Vols. vol. 11, no. 7, p. 87–97, 2010.
- [5] MathWorks, "MATLAB and Simulink Documentation".
- [6] L. Yang, A. Rida, R. Vyas, and M. M. Tentzeris, "RFID Tag and RF Structures on a Paper Substrate Using Inkjet-Printing Technology," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vols. 55, no. 12, p. 2894–2901, 2007.
- [7] L. Chen and K. H. Lin, "Performance of Multiple RFID Tags in Dense Reader Environments," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vols. 57, no. 11, p. 797–3805, 2010.
- [8] R. Want, "An Introduction to RFID Technology," *EEE Pervasive Computing*, Vols. 5, no. 1, p. 25–33, 2006.