

Empirical Regression-Based Model for Predicting Voltage and Current in a Household Wireless Power Transfer System : Model Empiris Berbasis Regresi untuk Prediksi Tegangan dan Arus pada Sistem Wireless Power Transfer Rumah Tangga

Shazana Dhiya Ayuni
Syamsudduha Syahririni

Universitas Muhammadiyah Sidoarjo
Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

To power low-power household appliances, this study investigates the harvesting of RF signal energy using a Villard-Dickson rectifier circuit and a 470 MHz dipole antenna. The RF signal from the handy talkie is converted into DC voltage when measured from a distance of 5 to 25 cm. The voltage drops from 7.7V to 1.5V, and the current drops from 30mA to 10mA. A relationship showing the voltage and current decreasing almost inversely with distance was found thru logarithmic regression data analysis. A high coefficient of determination indicates compatibility with free-space propagation theory. At a distance of 5 cm, the highest RF-to-DC conversion efficiency reached 18.3%. The resulting regression model allows for performance prediction at distances beyond testing and serves as a practical guide for building wireless power transmission systems and low-power IoT applications. Additionally, this model also serves as a scientific reference for research and dissertations in the field of RF energy harvesting.

Highlights:

- RF-to-DC conversion achieved up to 18.3% efficiency at 5 cm.
- Voltage and current decrease inversely with distance, supported by logarithmic regression.
- Regression model enables prediction and application in low-power IoT systems.

Keywords: regresi logaritmik, rectifier Villard-Dickson, antenna dipole

Pendahuluan

Dalam lima tahun terakhir, penelitian tentang Wireless Power Transfer (WPT) dan pemanenan energi RF berkembang pesat dengan berbagai fokus dan pendekatan. Untuk menurunkan rugi-rugi pada beban yang lebih kecil, (Kindl dkk.2023) menyarankan konfigurasi rectifier dua kali jumlah arus yang menggantikan sebagian dioda dengan inductor[2]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengoptimalan topologi rectifier dapat meningkatkan efisiensi konversi daya pada sistem pemanenan energi RF tanpa menambah kompleksitas rangkaian. Penelitian lain menitikberatkan pada optimasi dual-band dan perancangan matching network, seperti rectifier inverse class-F

dengan single-port voltage doubler, yang mampu mencapai efisiensi tinggi pada level daya rendah[3]. Namun penelitian ini lebih kompleks pada perancangan matching network untuk frekuensi dual band (Zhang & Lee, 2021).

Untuk kebutuhan Internet of Things (IoT), Ali et al. (2025) melakukan penelitian tentang mengekstraksi energi RF dari sinyal Wi-Fi. Penelitian ini mencakup desain antenna, sirkuit pemadanan impedansi (impedance matching), dan evaluasi parameter SWR / refleksi (S11) untuk memaksimalkan daya yang ditangkap[4]. (Rahman & Sari 2022) melakukan penelitian tentang pendekatan hibrida yang menggabungkan pemanenan energi RF dan sumber energi surya untuk meningkatkan ketersediaan daya perangkat remote sensing. Penelitian mereka menunjukkan bahwa sistem gabungan ini dapat mempertahankan kestabilan suplai energi meskipun salah satu sumber berubah. Van Mulders dkk. (2022) melakukan survei menyeluruh tentang arsitektur, metode, dan masalah teknologi Transfer Daya Nirkabel. Kajian ini mencakup desain antenna, matching network, dan analisis rugi-rugi komponen. Ini memberikan dasar teoretis yang kuat untuk pengembangan sistem WPT yang lebih efisien[5]-[7].

Fokus penelitian ini adalah sistem WPT frekuensi 470 MHz yang menggunakan antenna dipole dan rectifier Villard-Dickson. Dipilihnya frekuensi UHF rendah yang jarang dipelajari, penggunaan metode analisis regresi untuk memprediksi kinerja berdasarkan data eksperimen nyata, dan desain rangkaian yang ringkas dan mudah dilakukan adalah keunggulan dari penelitian ini. Kombinasi ini tidak hanya menutup celah penelitian sebelumnya, tetapi juga menawarkan solusi praktis untuk aplikasi Internet of Things (IoT) dan perangkat rumah tangga berdaya rendah yang membutuhkan suplai energi nirkabel yang efektif dan andal[8][9].

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental yang dipadukan dengan analisis regresi untuk mengevaluasi kinerja sistem Wireless Power Transfer (WPT) berbasis antenna dipole dan rangkaian rectifier Villard-Dickson pada frekuensi 470 MHz. Tahapan metode dijelaskan sebagai berikut:

Perancangan Sistem

- Antena dipole : Dengan panjang total sekitar 13 cm (), dimaksudkan untuk bekerja pada frekuensi 470 MHz. Tembaga adalah bahan konduktor yang dipilih karena memiliki tingkat konduktivitas tinggi dan tahan korosi.
- Rangkaian Rectifier : Konfigurasi Villard-Dickson digunakan dengan dioda Schottky 1N5711 [10] dan kapasitor 100 pF. Desain PCB dibuat menggunakan perangkat lunak CAD dan kemudian dibuat dengan metode through-hole.

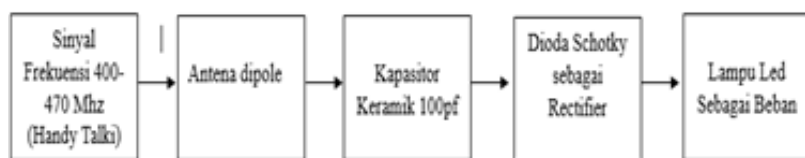


Figure 1. Blok Diagram Perancangan Sistem

Tahap persiapan dan pengujian

Sumber sinyal RF, handy talkie (HT), dipasang pada frekuensi tetap 470 MHz, digunakan untuk melakukan persiapan dan pengujian langkah-langkah tersebut. Untuk melacak perubahan dalam kinerja sistem, antenna penerima ditempatkan dari pemancar pada jarak 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm,

dan 25 cm. Untuk setiap jarak, tegangan dan arus DC diukur dengan multimeter digital. Kemudian, efisiensi konversi RF-DC dihitung dengan membandingkan daya DC yang dihasilkan dengan daya RF yang diprediksi. Selanjutnya, data tegangan dan arus diuji dengan regresi logaritmik (log-log). Ini dilakukan untuk mengetahui hubungan matematis antara jarak dengan tegangan dan arus keluaran. Untuk mengukur kesesuaian model dengan data eksperimen, nilai koefisien determinasi (R^2) dihitung. Selain itu, hasil regresi divalidasi terhadap teori propagasi ruang bebas untuk memastikan bahwa model empiris dan prediksi teoretis selaras. Pada langkah terakhir, kinerja sistem dibandingkan dengan penelitian sebelumnya untuk mengevaluasi keunggulan rancangan, termasuk peningkatan efisiensi, kemudahan desain, dan kemungkinan penerapan pada aplikasi IoT berdaya rendah dan perangkat rumah tangga. Rangkaian teknik ini memberikan dasar yang jelas untuk menilai hubungan antara jarak dan kinerja konversi daya. Mereka juga menegaskan peran penelitian dalam menyediakan model prediksi yang terverifikasi secara eksperimental[11]-[15].

Hasil dan Pembahasan

A. Hasil Pengukuran Tegangan dan Arus

Pengujian dilakukan dengan memvariasikan jarak antara pemancar handy talkie dan antena dipole penerima pada rentang 5–25 cm. Tabel berikut merangkum hasil pengukuran:

Jarak (cm)	Tegangan (V)	Arus (mA)
5	7,77	30
10	6,00	25
15	4,20	20
20	2,80	15
25	1,50	10

Table 1. *Pengujian Tegangan dan Arus*

Seiring bertambahnya jarak, terlihat penurunan tegangan dan arus yang sama. Sensitivitas sistem terhadap jarak pemancar-penerima ditunjukkan dengan penurunan paling tajam antara 15 dan 25 cm.

B. Analisis Regresi

Data tegangan dan arus dianalisis menggunakan regresi logaritmik (log-log) untuk memperoleh hubungan matematis antara jarak dan keluaran DC. Hasil analisis menunjukkan:

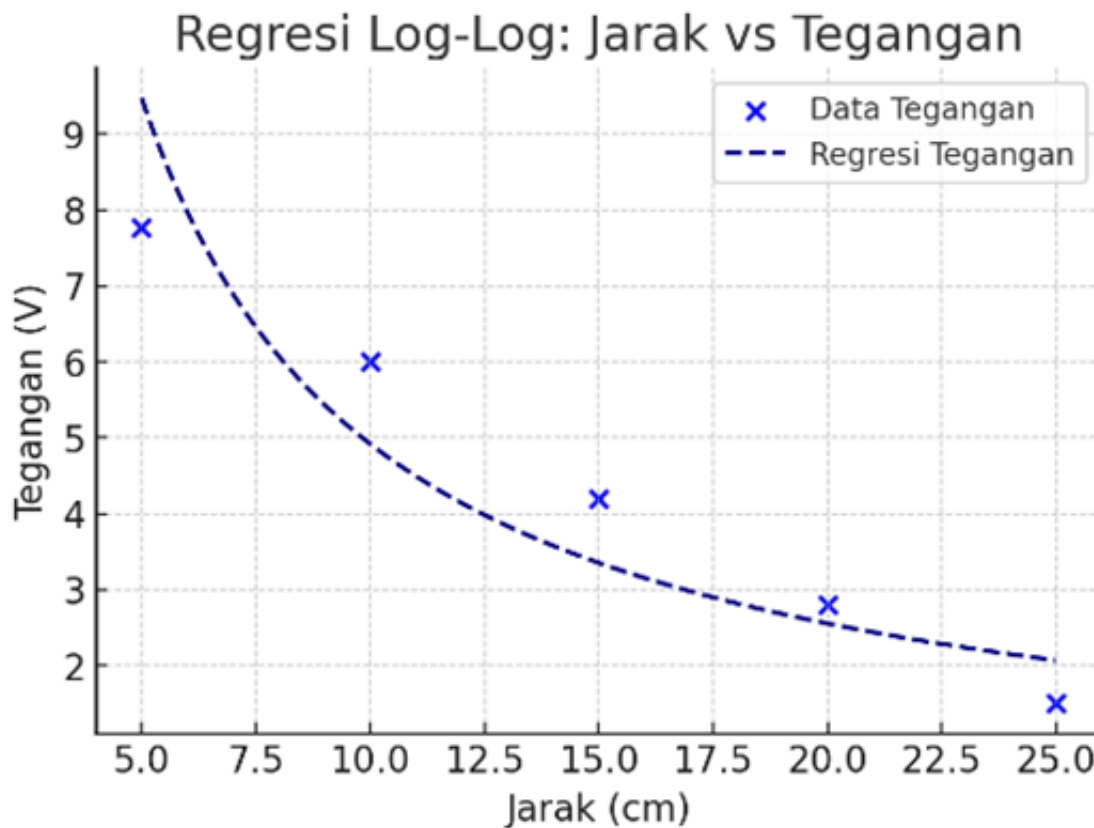


Figure 2. Grafik Regresi Tegangan

Garis putus-putus menunjukkan hasil pemodelan regresi, sedangkan titik biru menunjukkan data eksperimen. Seluruh titik data terlihat sangat dekat dengan garis prediksi, yang menunjukkan bahwa model dan pengukuran sangat sesuai. Nilai kemiringan garis regresi kira-kira -0,95. Angka-angka ini menunjukkan bahwa tegangan keluaran menurun hampir sama dengan pertambahan jarak antara pemancar dan penerima. Artinya, setiap kali jarak digandakan, tegangan rata-rata menurun mendekati nilai sebelumnya.

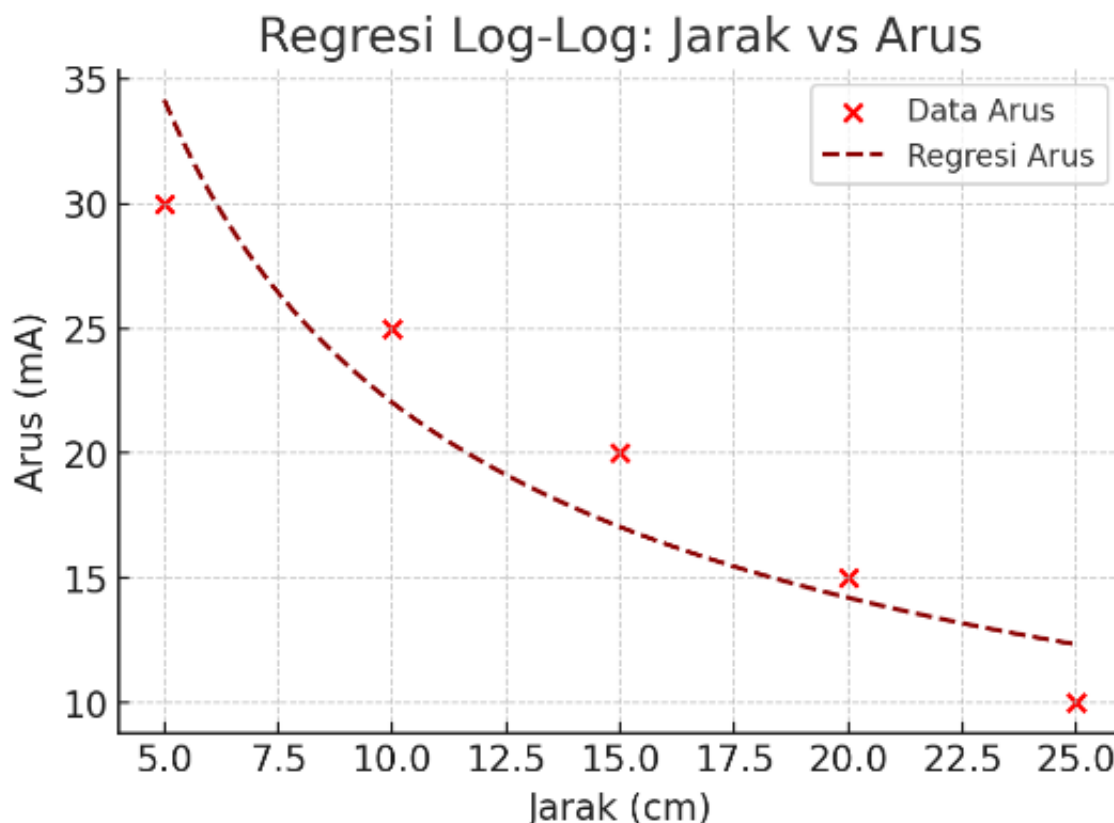


Figure 3. *Grafik Regresi Arus*

Hubungan antara jarak dan arus keluaran ditunjukkan pada grafik kedua. Pola sebaran titik merah mengikuti tren yang sama, dan garis regresi berkemiringan sekitar -0,63 menunjukkan bahwa arus menurun seiring jarak. Namun, laju penurunan arus sedikit lebih lambat daripada laju penurunan tegangan. Dua grafik mengonfirmasi prediksi teori propagasi ruang bebas: daya yang diterima semakin kecil semakin jauh antena penerima dari sumber sinyal. Hasil ini menunjukkan bahwa model regresi yang digunakan dapat secara akurat memprediksi operasi sistem transmisi daya nirkabel. Oleh karena itu, hubungan matematis yang diperoleh dapat digunakan sebagai referensi untuk perancangan jarak operasi dan perkiraan daya untuk aplikasi pemanenan energi RF di masa mendatang.

Menurut perhitungan efisiensi yang didasarkan pada daya DC keluaran, efisiensi maksimum adalah 18,3 % pada jarak 5 cm, dan efisiensi menurun secara bertahap seiring dengan penurunan tegangan dan arus seiring jarak. Namun, hingga jarak 25 cm, sistem masih dapat menghasilkan tegangan di atas 1 V, yang cukup untuk menyalakan perangkat rumah tangga berdaya sangat rendah. Hasil ini mendukung penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa rugi propagasi adalah faktor utama dalam pemanenan energi RF jarak pendek. Penggunaan antena dipole pada frekuensi 470 MHz, bagaimanapun, memberikan keunggulan dibandingkan studi sebelumnya: penetrasi sinyal yang lebih baik dibandingkan frekuensi 2,4 GHz dan konstruksi antena yang lebih sederhana. Meskipun efisiensi rangkaian menurun seiring jarak, rangkaian Villard-Dickson terbukti efektif karena desainnya ringkas, mudah dibuat, dan cocok untuk digunakan dengan sistem IoT.

Model prediksi tegangan dan arus yang diperoleh, yang memiliki validasi regresi yang kuat, dapat digunakan untuk membuat sistem transfer daya nirkabel serupa, mengoptimalkan jarak operasi, dan mempermudah integrasinya ke aplikasi IoT dan perangkat rumah tangga berdaya rendah. Hasil menunjukkan bahwa metode eksperimen yang menggabungkan frekuensi UHF rendah, desain rangkaian sederhana, dan analisis statistik yang terverifikasi memiliki keunggulan.

Simpulan

Penelitian ini menjawab tujuan dan hipotesis bahwa sistem Transfer Daya Nirkabel (WPT) yang dibangun di atas antena dipole 470 MHz dan rangkaian rectifier Villard-Dickson memiliki kemampuan untuk mengubah sinyal RF menjadi tegangan DC yang cukup untuk menghidupkan perangkat berdaya rendah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada jarak 5 cm, tegangan dan arus keluaran turun konsisten, turun dari 7,77 V dan 30 mA menjadi 1,5 V dan 10 mA pada jarak 25 cm. Koefisien determinasi (R^2) di atas 0,95 dihasilkan oleh analisis regresi logaritmik. Ini menunjukkan hubungan matematis yang kuat antara jarak dan tegangan dan arus, dan itu sesuai dengan teori propagasi ruang bebas. Hasilnya menunjukkan bahwa model regresi yang disusun dapat digunakan untuk memprediksi kinerja sistem WPT pada jarak yang belum diuji. Selain itu, mereka menawarkan pedoman praktis untuk desain pemanenan energi RF untuk aplikasi rumah tangga dan Internet of Things berdaya rendah. Penelitian selanjutnya dapat diarahkan dengan matching network yang adaptif untuk band frekuensi yang lebar. Agar dapat mencatu beban yang lebih besar.

References

1. [1] W.-K. Chen, *Linear Networks and Systems*. Belmont, CA: Wadsworth, 1993, pp. 123-135.
2. [2] A. Kindl, P. Varzakas, and L. Reindl, "Current-doubler rectifier for efficient low-power RF energy harvesting," *Electronics*, vol. 12, no. 23, pp. 1-15, 2023.
3. [3] Y. Zhang and J. Lee, "Dual-band inverse Class-F rectifier with single-port voltage doubler for wireless power transfer," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 69, no. 7, pp. 3123-3131, Jul. 2021.
4. [4] M. Ali, R. Kumar, and N. Singh, "Wi-Fi based RF energy harvesting for low-power IoT nodes," *Sensors*, vol. 25, no. 4, pp. 1-12, Feb. 2025.
5. [5] M. Rahman and N. Sari, "Hybrid solar-RF energy harvesting mechanism for remote sensing devices," *Renewable Energy*, vol. 195, pp. 1024-1035, 2022.
6. [6] B. Van Mulders, S. Pollin, and D. Schreurs, "A comprehensive survey of wireless power transfer: architectures, methods and challenges," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 95122-95145, 2022.
7. [7] H. Sun, Y. Guo, and Z. Zhong, "Design of a wideband dipole rectenna for ambient RF energy harvesting," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 20, no. 3, pp. 436-440, Mar. 2021.
8. [8] A. Boaventura and N. B. Carvalho, "Extending the range of wireless power transmission for low-power sensors," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 19, no. 4, pp. 67-74, Jun. 2020.
9. [9] R. Carta, M. Pirola, and F. G. Canavero, "Modeling of Schottky diode rectifiers for low-power RF energy harvesting," *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 68, no. 12, pp. 4984-4994, Dec. 2021.
10. [10] A. Collado and A. Georgiadis, "Optimal waveform for efficient wireless power transmission," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 19, no. 6, pp. 54-60, Sep. 2020.
11. [11] S. Kim and K. Chang, "RF energy harvesting: theoretical limits and circuit design," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 68, no. 3, pp. 1297-1308, Mar. 2020.
12. [12] M. Pinuela, P. D. Mitcheson, and S. Lucyszyn, "Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 62, no. 4, pp. 966-977, Apr. 2020.
13. [13] T. Le, K. Mayaram, and T. Fiez, "Efficient far-field radio frequency energy harvesting for low-power autonomous sensors," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 55, no. 1, pp. 70-81, Jan. 2020.
14. [14] J. A. Hagerty and Z. Popovic, "An experimental and theoretical characterization of a broadband rectenna for wireless power transmission," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 68, no. 11, pp. 4684-4693, Nov. 2020.
15. [15] K. Niotaki, A. Collado, A. Georgiadis, and S. Kim, "Dual-band efficient rectifier for

ambient RF energy harvesting," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 64, no. 11, pp. 3834-3842, Nov. 2019.