

Mitigasi Karhutla Menggunakan IoT Dengan Pendekatan Zona Fresnel Untuk Optimalisasi Transmisi Data

Fires Mitigation Using IoT and Fresnel Zone to Optimize Transmission

Denny Primanda¹, Nurman Hariyanto², Aditya Pratama³, Adha Maulana⁴

^{1,2,3,4}Prodi Sistem Informasi, FT UNU Kalimantan Barat, Kubu Raya
e-mail: ¹denny.primanda@unukalbar.ac.id, ²nurman.hariyanto@unukalbar.ac.id,
³adityapratamabadra@unukalbar.ac.id, ⁴adhamaulana@unukalbar.ac.id

Abstrak

Proses transmisi data pada alat mitigasi karhutla menggunakan IoT dalam jaringan LoRa terdapat masalah yang muncul yaitu waktu pengiriman dan kualitas sinyal yang diterima. Masalah tersebut akan diselesaikan dengan meninggikan posisi pemancar dan penerima guna mengoptimalkan ruang bebas pada Zona Fresnel, yang terbukti efektif digunakan untuk memecahkan masalah pada proses transmisi data. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor ketinggian berhasil meningkatkan waktu transmisi 4 kali lebih cepat (rata-rata penurunan waktu 9,5 detik) dan kualitas sinyal secara drastis (rata-rata penurunan 31,25 RSSI) apabila diterapkan untuk memecahkan masalah waktu pengiriman dan kualitas sinyal pada proses transmisi data.

Kata kunci—Karhutla, Internet of Things, Zona Fresnel, LoRa

Abstract

The data transmission process on the forest and land fire mitigation tool using IoT in the LoRa network encounters issues, especially in delivery time and signal quality. These problems are addressed by elevating the position of the transmitter and receiver to optimize free space in the Fresnel Zone, which has proven effective in improving data transmission. The study results showed that increasing the height helped increase transmission speed by four times (reducing the average time by 9.5 seconds) and significantly improved signal quality (reducing average RSSI by 31.25), resolving issues related to the delivery time and signal strength process.

Keywords—Forest and Land Fire, Internet of Things, Fresnel Zone, LoRa

1. PENDAHULUAN

Kebakaran Hutan dan Lahan (Karhutla) merupakan peristiwa yang dapat menyebabkan dampak yang parah bagi makhluk hidup. Dampak yang diakibatkan meliputi berbagai sektor seperti Kesehatan [1][2], ekologi [3], keragaman hayati [4], ekonomi [5] dan perubahan iklim [6]. Karhutla masih sering terjadi setiap tahunnya khususnya di Indonesia dengan tujuan untuk membuka lahan pertanian [7]. Karena dampaknya yang bersifat katastropik dan telah terjadi

bertahun-tahun, maka perlu dilakukan penanganan untuk menyelesaikan permasalahan karhutla. Pendekatan penangan secara reaktif seperti pemadaman yang selama ini dilakukan sangat mahal dan seringkali sangat terlambat. Oleh karena itu perlu pendekatan penangan secara proaktif seperti peringatan dini untuk mencegah karhutla sebelum api membesar.

Penanganan secara proaktif dapat dilakukan dengan beberapa cara seperti patroli, citra satelit dan teknologi Internet of Things (IoT). Pada pendekatan sistem patroli memiliki keterbatasan seperti skala, biaya tinggi, subjektif, dan personel berada pada lokasi yang beresiko. Selanjutnya pada pendekatan sistem satelit memiliki manfaat untuk mendeteksi titik panas, namun terdapat beberapa kelemahan seperti keterlambatan pengiriman data, citra yang terhalang awan, serta ketidakmampuan mendeteksi panas yang terdapat di bawah pada lahan gambut. Sementara pendekatan menggunakan teknologi IoT memungkinkan penempatan sensor nirkabel pada lokasi strategis di dalam hutan maupun di lahan gambut. Dengan kelebihan yang dimiliki tersebut teknologi IoT dapat mengatasi kelemahan yang terdapat pada pendekatan patroli dan citra satelit.

Teknologi IoT memungkinkan untuk melakukan deteksi dini karena kinerja dari komponen sensor secara real-time yang dapat ditempatkan pada area rawan karhutla sehingga parameter kunci dapat direkam secara terus menerus. Dengan data tersebut, sistem dapat secara otomatis memberikan notifikasi kepada pihak terkait untuk melakukan tindak lanjut. Dengan penempatan posisi yang akurat dan real-time data beserta koordinat lokasi yang presisi dapat dilakukan secara singkat. Oleh karena itu penempatan posisi yang tepat dan transmisi data menjadi permasalahan yang penting dalam sistem deteksi dini karhutla berbasis IoT. Pada penelitian N. Hariyanto dan D. Primanda [8], permasalahan keterbatasan jaringan dapat diatasi dengan teknologi LoRa. Jaringan LoRa tepat diimplementasikan untuk mengatasi karhutla pada wilayah minim jangkauan jaringan internet. Meskipun permasalahan jarak dapat ditangani pada penelitian tersebut, namun permasalahan penempatan posisi yang tepat seperti ketinggian tidak dipertimbangkan pada penelitian tersebut. Dari hasil yang diperoleh penelitian sebelumnya meskipun transmisi dapat dilakukan dalam jarak yang cukup jauh, namun waktu yang diperlukan relatif lebih lambat dan kualitas sinyal yang semakin menurun seiring bertambahnya jarak transmisi data.

Oleh karena itu pada penelitian yang akan dilakukan, untuk mengatasi permasalahan tersebut sistem deteksi dini menggunakan jaringan LoRa yang dibangun mempertimbangkan ketinggian posisi perangkat pemancar dan penerima pada saat implementasi. Faktor ketinggian ini didasari pada pendekatan Zona Fresnel [9], yang mana transmisi data berbasis gelombang radio seperti LoRa terjadi pada ruang berbentuk elips. Jika ada sebuah objek pada Zona Fresnel bahkan jika tidak menghalangi Line of Sight (LoS) secara langsung, sinyal akan menjadi lemah karena pantulan, difraksi dan penyerapan. Oleh karena itu meningkatkan ketinggian akan memberikan ruang bebas pada Zona Fresnel. Hal tersebut akan membuat lebih banyak sinyal yang dapat diterima tanpa terganggu, sehingga ketinggian pemancar dan penerima menjadi parameter kritis dalam merancang sistem deteksi dini karhutla untuk memastikan ruang bebas pada Zona Fresnel.

Berdasarkan uraian yang telah dijelaskan di atas maka akan dilakukan penelitian Alat Bantu Mitigasi Bencana Dalam Mendeteksi Karhutla Menggunakan Teknologi IoT Jaringan LoRa Dengan Prinsip Zona Fresnel. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh faktor ketinggian dalam transmisi data antara perangkat pemancar dan penerima terhadap waktu dan kualitas sinyal dalam memberikan notifikasi kebakaran hutan dan lahan.

2. METODE PENELITIAN

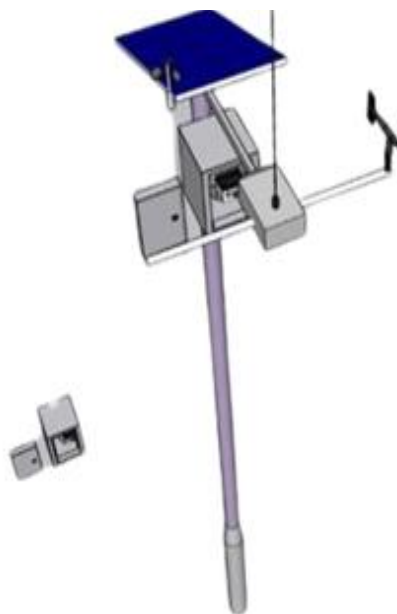
Pada bagian ini dilakukan perancangan sistem Alat Bantu Mitigasi Bencana Dalam Mendeteksi Karhutla Menggunakan Teknologi IoT Jaringan LoRa Dengan Prinsip Zona Fresnel serta desain eksperimen untuk melakukan pengujian sistem yang dibangun.

2.1 Rancangan Sistem

Untuk memberikan Gambaran secara umum bagaimana alat deteksi dini karhutla bekerja, selanjutnya akan dibahas komponen perangkat pengirim data, jaringan LoRa, lingkungan sistem secara keseluruhan dan prinsip Zona Fresnel.

2.1.1 Perangkat Pengirim Data

Perangkat yang digunakan sebagai pemancar untuk mendeteksi karhutla seperti pada Gambar 1. Perangkat tersebut dilengkapi dengan beberapa sensor yang meliputi sensor asap, sensor suhu, sensor kecepatan angin dan sensor arah angin. Selain itu perangkat juga dilengkapi dengan GPS yang berfungsi untuk mengirim data lokasi dan Micro Processor Unit (MPU) yang berfungsi menerima data, memproses dan menyajikan data.



Gambar 1. Perangkat pengirim data

Perangkat pemancar dapat ditempatkan pada lokasi rawan karhutla untuk menangkap apakah ada anomali seperti asap maupun peningkatan suhu. Saat perangkat menangkap adanya anomali, data akan ditransmisikan ke dalam database menggunakan jaringan LoRa yang tidak memerlukan internet. Penggunaan jaringan LoRa dalam perangkat yang digunakan untuk komunikasi data dengan pertimbangan lokasi hutan dan lahan yang sangat mungkin tidak terjangkau jaringan internet. Penjelasan lebih rinci terkait jaringan LoRa akan dibahas lebih lanjut pada bagian selanjutnya.

Dengan konfigurasi yang telah diuraikan di atas, perangkat pemancar akan mengirimkan data berupa kecepatan dan arah angin, komposisi asap, suhu dan koordinat lokasi. Namun fokus penelitian yang akan dilakukan terkait dengan kualitas sinyal, sehingga data seperti waktu pengiriman dan kekuatan sinyal yang akan menjadi fokus pembahasan. Meskipun fokus pembahasan terkait data waktu pengiriman dan kekuatan sinyal, namun data kecepatan dan arah angin, komposisi asap, suhu dan koordinat lokasi akan menjadi bahan penelitian selanjutnya.

2. 1.2 Jaringan LoRa

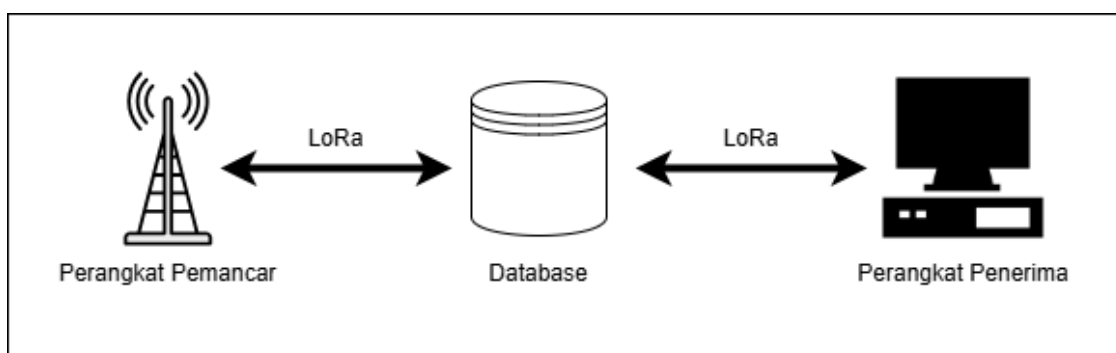
Long Range atau yang dikenal dengan LoRa merupakan teknologi modulasi spektrum radio sehingga memungkinkan komunikasi nirkabel dengan jarak yang sangat jauh [10]. Oleh karena itu LoRa dapat digunakan sebagai jaringan komunikasi terkait karhutla yang sangat mungkin terjadi pada wilayah yang tidak terjangkau internet. Selain itu, karhutla juga sangat mungkin terjadi jauh dari lokasi pos pemantau karhutla. Sehingga LoRa dapat menjadi solusi untuk transmisi data antara perangkat pemancar dan penerima tanpa tergantung jaringan internet.

Beberapa penelitian terkait alat mitigasi karhutla berbasis IoT menggunakan jaringan LoRa dalam eksperimennya [8][11][12], hal ini sebagai bukti bahwa jaringan LoRa dapat diimplementasikan dalam area yang luas yang menjadi karakteristik tempat terjadinya karhutla. Hal ini didukung dengan kelebihan LoRa yang dapat mengakomodasi transmisi jarak jauh. Keunggulan lain yang mendasari LoRa tepat diimplementasikan untuk penelitian alat mitigasi karhutla berbasis IoT seperti konsumsi daya rendah [13], biaya implementasi rendah [14], skalabilitas [15], dan keamanan dalam melindungi data [16].

Penelitian ini mengimplementasikan jaringan LoRa dalam melakukan eksperimen yang dimulai dari perangkat pemancar menuju sampai ke perangkat penerima. Pembahasan terkait transmisi data akan di bahas pada bagian selanjutnya.

2. 1.2 Lingkungan Sistem

Proses deteksi karhutla dimulai dengan pendeteksian kebakaran oleh perangkat pemancar seperti Gambar 2. Sensor yang terdapat pada perangkat pemancar akan memantau kondisi lingkungan secara terus-menerus. Jika pada lingkungan tersebut terdeteksi potensi bahaya kebakaran, data akan direkam dan dikirimkan melalui jaringan LoRa ke dalam database.



Gambar 2. Sistem pendeteksi dini karhutla berbasis IoT jaringan LoRa

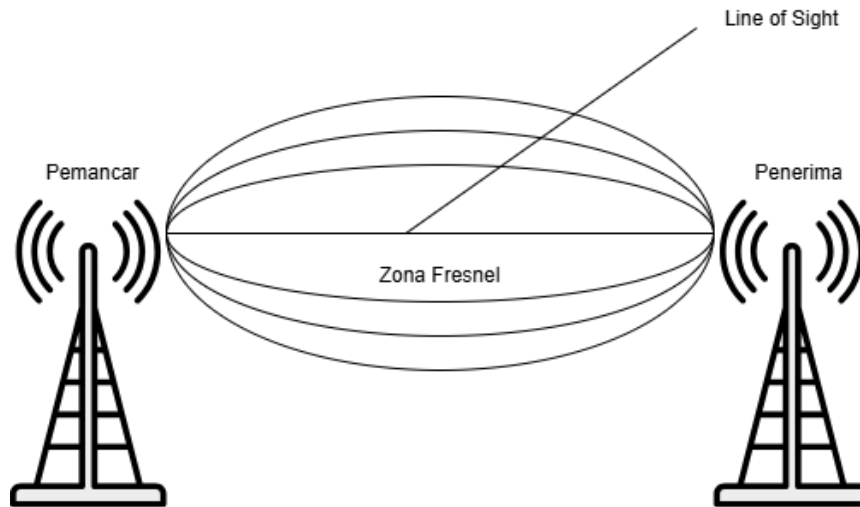
Selanjutnya proses terakhir saat data telah sampai pada database, akan diteruskan ke perangkat penerima. Kemudian perangkat penerima akan menggunakan data ini untuk menganalisisnya, dan memberikan peringatan dini kepada petugas, sehingga tindakan pencegahan atau pemadaman awal dapat dilakukan dengan cepat sebelum api membesar. Seluruh proses transmisi data dari perangkat pemancar hingga perangkat penerima dilakukan dalam jaringan LoRa yang tidak memerlukan internet. Lingkungan sistem seperti pada Gambar 2 sangat tepat untuk diimplementasikan pada wilayah yang luas dengan jangkauan internet yang sangat terbatas.

2. 1.3 Ruang Bebas Pada Zona Fresnel

Transmisi radio seperti jaringan LoRa yang digunakan dalam penelitian ini tidak hanya terjadi pada garis lurus, melainkan dalam sebuah ruang berbentuk elips di antara pemancar dan penerima (Zona Fresnel) [17]. Untuk memudahkan dalam memahami Zona Fresnel dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 3. Oleh karena transmisi terjadi pada ruang elips tersebut,

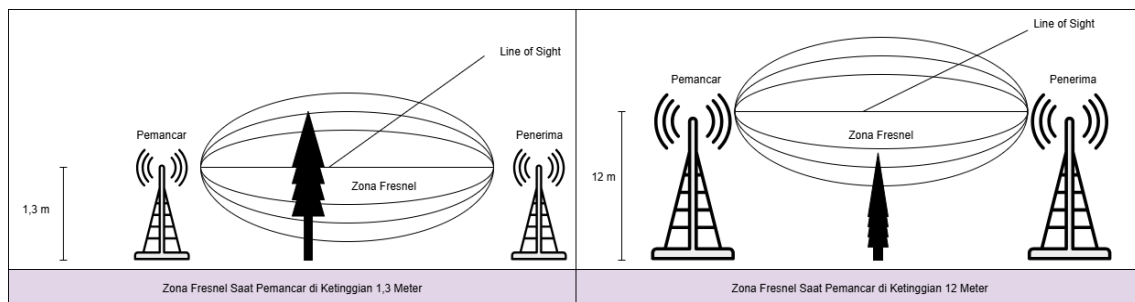
Mitigasi Karhutla Menggunakan IoT Dengan Pendekatan Zona Fresnel Untuk Optimalisasi Transmisi Data

maka sangat penting untuk meminimalkan objek yang terdapat di dalamnya. Kondisi ruang bebas pada Zona Fresnel dapat meningkatkan kualitas transmisi yang terjadi.



Gambar 3. Sistem pendeteksi dini karhutla berbasis IoT jaringan LoRa

Untuk meningkatkan kualitas sinyal secara optimal, idealnya sekitar 60% dari volume Zona Fresnel harus bebas dari hambatan [18], terlebih jika tidak ada yang menghalangi garis LoS secara langsung. Oleh karena itu pada penelitian ini mengusulkan untuk meningkatkan ketinggian perangkat pemancar dan penerima sehingga Zona Fresnel memiliki ruang bebas lebih dari 60% dan garis LoS bebas dari hambatan. Dengan ketinggian 12 meter yang menjadi usulan dalam penelitian diharapkan objek yang menjadi hambatan pada Zona Fresnel menjadi minim dan garis LoS tanpa hambatan. Kondisi ini dengan tujuan memastikan lebih banyak energi sinyal mencapai perangkat penerima tanpa terganggu.



Gambar 4. Perbandingan Zona Fresnel pada ketinggian 1,3 meter dan 12 meter

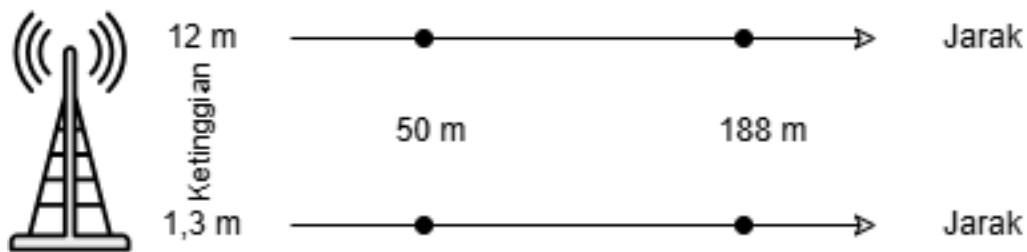
Pada Gambar 4 dapat dilihat perbedaan Zona Fresnel yang memiliki banyak hambatan dan minim hambatan. Gambar sisi kiri menunjukkan saat perangkat pemancar dan penerima berada pada ketinggian 1,3 meter. Pada posisi tersebut Zona Fresnel sangat mungkin memiliki hambatan yang sangat besar dan kemungkinan bisa diatas 80%. Selain itu kemungkinan LoS terhalang juga sangat besar dan menyebabkan kualitas sinyal menurun dan waktu yang lebih lambat. Berbeda dengan gambar di sisi kanan yang ketinggian perangkat pemancar dan penerima berada pada ketinggian 12 meter. Posisi tersebut dapat meminimalkan hambatan yang berada pada Zona Fresnel, sehingga ruang bebas yang dimiliki sangat mungkin lebih besar dari 60%. Dalam

keadaan tersebut LoS sangat mungkin bebas hambatan, sehingga kualitas yang diterima oleh perangkat penerima memiliki kualitas dan waktu yang relatif singkat.

2. 2 Desain Eksperimen

Setelah sistem selesai dibangun selanjutnya dilakukan pengujian terkait dengan ketinggian perangkat pemancar dan penerima. Desain eksperimen yang dirancang bertujuan untuk mengetahui pengaruh kekuatan dan kecepatan sinyal yang ditransmisikan.

Eksperimen dilakukan dengan mengoptimalkan ruang bebas pada zona fresnel, dengan menempatkan pemancar dan penerima pada ketinggian 12 meter untuk mendapatkan nilai eksperimen. Selanjutnya sebagai nilai kontrol, pemancar dan penerima ditempatkan pada ketinggian 1,3 meter. Desain eksperimen secara rinci dapat dilihat pada Gambar 5, pada ketinggian 12 meter dan 1,3 meter akan diuji kekuatan dan kecepatan sinyal pada jarak 50 meter dan 188 meter dan masing-masing dilakukan sebanyak 5 kali untuk setiap skema agar menghasilkan data yang lebih akurat.



Gambar 5. Skema eksperimen

Pada ketinggian 12 meter dengan jarak 50 meter eksperimen dilakukan di lantai 3 gedung rektorat Universitas Nahdlatul Ulama Kalimantan Barat (UNU Kalbar) seperti pada Gambar 6, dengan menempatkan pemancar dan penerima pada dua sisi ujung gedung yang berbeda. Selanjutnya pada jarak 188 meter pemancar ditempatkan gedung rusunawa UNU Kalbar sedangkan penerima ditempatkan pada lantai 3 pada lantai 3 gedung rektorat UNU Kalbar. Skema ketinggian 12 meter dengan jarak 50 meter dan 188 meter pada Zona Fresnel sangat minim objek yang terdapat di dalamnya.

Sementara pada ketinggian 1,3 meter dengan jarak 50 meter dan 188 meter dilakukan di sekitar area UNU Kalbar. Pada area tersebut terdapat objek yang mungkin dapat menjadi gangguan dalam transmisi data. Pemancar ditempatkan di area rektorat UNU Kalbar, sementara penerima ditempatkan dengan jarak yang telah ditentukan sesuai dengan skema eksperimen.



Gambar 6. Skema eksperimen

Selanjutnya agar pemancar menangkap adanya anomali, maka dilakukan simulasi terjadinya kebakaran. Simulasi dilakukan dengan membakar kertas untuk menghasilkan asap serta panas yang dikondisikan sehingga pemancar menangkap telah terjadi anomali. Selanjutnya pemancar akan mentransmisikan data ke penerima. Simulasi ini dilakukan pada ketinggian dan jarak yang telah ditentukan sesuai dengan skema eksperimen. Pada bagian selanjutnya akan dibahas hasil dari eksperimen yang telah dirancang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Eksperimen dilakukan sesuai dengan desain eksperimen yang telah ditentukan. Eksperimen dimulai dengan membuat simulasi kebakaran dengan cara membakar kertas untuk menciptakan asap dan dan panas. Simulasi kebakaran seperti pada Gambar 7, selanjutnya asap dan panas dikondisikan agar perangkat pemancar menangkap anomali. Selanjutnya data ditransmisikan ke perangkat penerima seperti pada Gambar 8, data yang diterima berupa waktu pengiriman dan kekuatan sinyal. Simulasi ini secara rekursif dilakukan sampai seluruh skema yang dirancang terpenuhi.

Data rangkuman hasil eksperimen dapat dilihat pada Tabel 1, data waktu dan kekuatan sinyal merupakan rata-rata dari 5 kali percobaan pada setiap skema. Berdasarkan data tersebut hasil eksperimen menunjukkan adanya peningkatan dari sisi waktu dan kekuatan sinyal saat ketinggian pemancar dan penerima ditingkatkan. Pada ketinggian 12 meter dengan jarak 50 meter dan 188 meter waktu transmisi yang diperlukan sebesar 3 detik, sementara dengan ketinggian 1,3 meter dengan jarak yang sama waktu yang diperlukan secara berurutan adalah 12 detik dan 13 detik. Selanjutnya rata-rata peningkatan waktu secara keseluruhan dihitung dan didapatkan nilai sebesar 9,5 detik.

Sementara nilai yang diterima pada ketinggian 12 meter dengan jarak 50 meter dan 188 meter jika dibandingkan pada ketinggian 1,3 meter dengan jarak yang sama secara berurutan meningkat dari 47 RSSI ke 77 RSSI dan dari 57,5 RSSI ke 90 RSSI. Dengan demikian peningkatan terjadi secara berurutan sebesar 30 RSSI dan 32,5 RSSI, dengan nilai peningkatan rata-rata yang diterima sebesar 31,25 RSSI. Peningkatan ini merupakan indikator menurunnya kualitas sinyal, karena semakin rendah nilai yang diterima maka sinyal yang diterima akan semakin berkualitas.



Gambar 7. Perangkat pemancar dan simulasi kebakaran



Gambar 8. Perangkat penerima

Tabel 1. Perbandingan Ketinggian 12 Meter dan 1,3 Meter

Ketinggian	Jarak	Waktu (Detik)	Kekuatan Sinyal (RSSI)
12 m	50 m	3	47
	188 m	3	57,5
1,3 m	50 m	12	77
	188 m	13	90

Pada saat perangkat pemancar dan penerima berada pada ketinggian 12 meter dengan jarak 50 meter dan 188 meter tidak terdapat perbedaan waktu dalam transmisi data, namun kualitas sinyal yang diterima mengalami sedikit peningkatan dari 47 RSSI ke 57,5 RSSI. Dengan demikian terjadi peningkatan 10,7 RSSI yang membuat kualitas sinyal sedikit menurun.

Selanjutnya saat perangkat pemancar dan penerima berada pada ketinggian 1,3 meter dengan jarak 50 meter dan 188 meter terjadi penambahan waktu dari 12 detik ke 13 detik dan kualitas sinyal yang diterima dari 77 RSSI ke 90 RSSI. Dengan demikian terjadi penambahan waktu sebesar 1 detik dan peningkatan sebesar 13 RSSI. Dengan kata lain waktu transmisi data melambat dan terjadi penurunan sinyal pada kondisi yang rentan.

4. KESIMPULAN

Dari hasil eksperimen dapat disimpulkan ketinggian merupakan faktor kunci dalam menempatkan perangkat pemancar dan penerima, data menunjukkan bahwa dengan menaikkan ketinggian dari 1,3 meter ke 12 meter memberikan peningkatan performa yang sangat besar. Waktu pengiriman menjadi 4 kali lebih cepat dan kekuatan sinyal (RSSI) meningkat secara drastis, yang menandakan koneksi yang jauh lebih stabil dan andal.

Selanjutnya koneksi cenderung cepat dan stabil pada ketinggian 12 meter, data menunjukkan penambahan jarak dari 50 meter ke 188 meter hampir tidak mempengaruhi waktu pengiriman dan hanya sedikit menurunkan kekuatan sinyal.

Berbeda dengan ketinggian 12 meter, pada ketinggian 1,3 meter koneksi cenderung lambat dan rentan gangguan. Penambahan jarak dari 50 meter ke 188 meter membuatnya semakin lambat dan secara signifikan memperburuk kekuatan sinyal hingga mencapai 90 RSSI, yang merupakan level sinyal yang lemah dan rentan terputus.

5. SARAN

Pada penelitian selanjutnya perlu untuk mempertimbangkan jarak dan ketinggian yang lebih bervariasi pada saat melakukan eksperimen, dengan eksperimen yang lebih bervariasi akan menghasilkan data yang semakin baik dan keakuratannya semakin meningkat.

Pada penelitian ini tidak mempertimbangkan jarak sumber api dengan perangkat pemancar, sehingga pada penelitian selanjutnya perlu mempertimbangkan jarak tersebut ke dalam instrumen penelitian. Jarak antara sumber api dan perangkat pemancar dapat digunakan untuk melakukan prediksi besaran api untuk menentukan keputusan secara cepat.

Selanjutnya data berupa kecepatan dan arah angin, komposisi asap, suhu dan koordinat lokasi yang tersimpan di dalam database dapat digunakan sebagai bahan penelitian untuk menemukan pemodelan dalam mempelajari karhutla di masa mendatang. Pemodelan tersebut dapat digunakan oleh pihak terkait dalam menentukan kebijakan strategis dalam pengendalian karhutla.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. P. Purnomo, F. V Rahmasari, D. W. Trisnawati, and R. Erviana, "Observed Data of Forest Fire Hotspots effects on Respiratory Disorder by Arc-GIS in Riau Province, Indonesia," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Department of Government Affairs and Administration, Jusuf Kalla School of Government, University Muhammadiyah Yogyakarta (UMY), Indonesia: IOP Publishing Ltd, 2021. doi: 10.1088/1755-1315/717/1/012036.
- [2] E. L. Pakhtigian, S. K. Pattanayak, and J.-S. Tan-Soo, "Forest Fires, Smoky Kitchens, and Human Health in Indonesia," *Environ. Resour. Econ.*, vol. 87, no. 8, pp. 2115–2141, 2024,

- doi: 10.1007/s10640-024-00865-y.
- [3] J. W. F. Slik, “El Niño droughts and their effects on tree species composition and diversity in tropical rain forests,” *Oecologia*, vol. 141, no. 1, pp. 114–120, 2004, doi: 10.1007/s00442-004-1635-y.
- [4] V. Murtinah, M. Edwin, and O. Bane, “Dampak Kebakaran Hutan Terhadap Sifat Fisik dan Kimia Tanah di Taman Nasional Kutai, Kalimantan Timur,” *J. Pertan. Terpadu*, vol. 5, pp. 128–139, Dec. 2017, doi: 10.36084/jpt.v5i2.133.
- [5] P. Tonoto, *Indonesia’s Fires and Haze the cost of catastrophe*. 2017.
- [6] V. Huijnen *et al.*, “Fire carbon emissions over maritime southeast Asia in 2015 largest since 1997.,” *Sci. Rep.*, vol. 6, p. 26886, May 2016, doi: 10.1038/srep26886.
- [7] Greenpeace Indonesia, “Karhutla dalam Lima Tahun Terakhir,” 2020. [Online]. Available: <https://www.greenpeace.org/indonesia/publikasi/44219/karhutla-dalam-lima-tahun-terakhir/>
- [8] N. Hariyanto and D. Primanda, “Rancang Bangun Alat Bantu Mitigasi Bencana Dalam Mendeteksi Karhutla di Kalimantan Barat Menggunakan Iot Jaringan Lora,” *J. Inf. Technol.*, vol. 5, no. 1, 2025, doi: 10.46229/jifotech.v5i1.984.
- [9] J. Wu, H. Zhang, W. Zhang, G. Jin, L. Cao, and G. Barbastathis, “Single-shot lensless imaging with fresnel zone aperture and incoherent illumination,” *Light Sci. Appl.*, vol. 9, no. 1, 2020, doi: 10.1038/s41377-020-0289-9.
- [10] A. Pineda-Briseño, R. Baltazar, R. C. Martínez, E. E. L. Pacheco, and D. G. G. Rodríguez, “Experimental Evaluation of LoRa RSSI Performance in Educational IoT Deployments,” in *Lecture Notes in Computer Science*, G. O., M. B., G. C., K. Y., F. L. M.N., S. F., and B. A., Eds., TecNM/Instituto Tecnológico de Matamoros, Tamps., H. Matamoros, Mexico: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2026, pp. 393–410. doi: 10.1007/978-3-031-97617-9_26.
- [11] N. L. Saleh *et al.*, “Peatland forest monitoring and management solution in Peninsular Malaysia: Optimal parameters for LoRa data,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 16, no. 6, 2025, doi: 10.1016/j.asej.2025.103374.
- [12] E. A. Kadir, A. Efendi, and S. L. Rosa, “Application of LoRa WAN Sensor and IoT for Environmental Monitoring in Riau Province Indonesia,” in *2018 5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, 2018, pp. 281–285. doi: 10.1109/EECSI.2018.8752830.
- [13] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, “Understanding the Limits of LoRaWAN,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 9, pp. 34–40, 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600613.
- [14] A. Lavric and V. Popa, “Internet of Things and LoRaTM Low-Power WideArea Networks: A Survey,” in *2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, IEEE, 2017. doi: 10.1109/ISSCS.2017.8034915.
- [15] J. Haxhibeqiri, F. Van den Abeele, I. Moerman, and J. Hoebeke, “LoRa scalability: A simulation model based on interference measurements,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 6, Jun. 2017, doi: 10.3390/s17061193.
- [16] M. Bor, U. Roedig, T. Voigt, and J. M. Alonso, “Do LoRa low-power wide-area networks scale?,” in *MSWiM 2016 - Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, Association for Computing Machinery, Inc, Nov. 2016, pp. 59–67. doi: 10.1145/2988287.2989163.
- [17] F. Zhu, J. Xu, Z. Li, K. Yang, and J. Zhang, “Automatic Estimation of Fresnel Zones in Migrated Dip-Angle Gathers Using Semantic Segmentation Model,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 62, pp. 1–14, 2024, doi: 10.1109/TGRS.2024.3400868.
- [18] Q. Yu and L. Dai, “Near-Field Wideband Beamforming for RIS Based on Fresnel Zones,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 73, no. 7, pp. 5126–5138, 2025, doi: 10.1109/TCOMM.2024.3523960.