

Implementasi Wireless Sensor Network untuk Sistem Deteksi Kebakaran Hutan Berbasis Sensor Suhu dan Asap

Softianto ^{1)*} , Ismawati ²⁾ 

¹⁾²⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ sofyan17@gmail.com, ²⁾ ismawatii.empatbelas@gmail.com.

Abstrak

Kebakaran hutan merupakan permasalahan lingkungan yang masih sering terjadi dan menimbulkan dampak serius terhadap ekosistem, kesehatan masyarakat, serta perekonomian. Sistem pemantauan konvensional memiliki keterbatasan dalam jangkauan dan kecepatan respons, sehingga diperlukan pendekatan berbasis teknologi jaringan untuk mendukung deteksi dini secara real-time. Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan dan mengevaluasi Wireless Sensor Network (WSN) berbasis sensor suhu dan asap sebagai sistem deteksi dini kebakaran hutan. Penelitian ini menggunakan metode studi kuantitatif berbasis simulasi terkontrol, dengan merancang arsitektur WSN multi-hop yang terdiri dari node sensor suhu dan asap, sink node, serta sistem pemantauan terpusat. Pengujian dilakukan untuk mengamati respons sistem terhadap perubahan suhu dan konsentrasi asap, serta keandalan pengiriman data jaringan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi normal suhu berada pada kisaran 29–31 °C dan asap 45–60 ppm. Sistem mendeteksi kenaikan suhu secara bertahap mulai menit ke-13 dan mendeteksi peningkatan asap mulai menit ke-15. Peringatan sistem dipicu pada menit ke-21 ketika suhu dan asap secara bersamaan melampaui ambang batas 55 °C dan 200 ppm. Seluruh data pengujian berhasil dikirimkan ke sistem pemantauan tanpa kehilangan data yang signifikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem WSN berbasis sensor suhu dan asap mampu melakukan deteksi dini kebakaran hutan secara efektif dan andal. Tujuan penelitian tercapai, namun pengujian lanjutan pada lingkungan nyata dan integrasi dengan sistem mitigasi skala besar disarankan untuk penelitian selanjutnya.

Kata Kunci: Wireless Sensor Network, Deteksi Kebakaran Hutan, Sensor Suhu dan Asap, Jaringan Nirkabel, Sistem Deteksi Dini

Article history: Received 5 April 2025, first decision 22 April 2025, accepted 22 August 2025, available online 28 October 2025

I. PENDAHULUAN

Kebakaran hutan merupakan salah satu bencana lingkungan yang memiliki dampak multidimensional, baik dari aspek ekologis, sosial, maupun ekonomi. Di berbagai negara berkembang, termasuk Indonesia, kebakaran hutan dan lahan (karhutla) masih menjadi permasalahan serius yang terjadi hampir setiap tahun, terutama pada musim kemarau. Dampak yang ditimbulkan tidak hanya berupa kerusakan ekosistem hutan dan hilangnya keanekaragaman hayati, tetapi juga pencemaran udara lintas wilayah [1], [2], [3], [4], gangguan kesehatan masyarakat, serta kerugian ekonomi dalam skala besar. Oleh karena itu, diperlukan upaya mitigasi yang efektif, khususnya dalam bentuk sistem deteksi dini yang mampu mengidentifikasi potensi kebakaran sebelum api menyebar secara luas. Salah satu tantangan utama dalam penanggulangan kebakaran hutan adalah keterbatasan sistem pemantauan konvensional [5], [6], [7]. Metode tradisional seperti patroli manual, menara pengawas, atau pelaporan berbasis visual memiliki sejumlah kelemahan, antara lain keterbatasan jangkauan, ketergantungan pada kondisi cuaca dan visibilitas, serta respon yang relatif lambat. Selain itu, wilayah hutan yang luas dan sering kali sulit diakses menyebabkan pengawasan secara terus-menerus menjadi tidak efisien jika hanya mengandalkan tenaga manusia [8], [9], [10], [11]. Kondisi ini mendorong perlunya pendekatan berbasis teknologi yang mampu melakukan pemantauan secara real-time, otomatis, dan berkelanjutan.

Dalam konteks perkembangan teknologi jaringan komputer, Wireless Sensor Network (WSN) muncul sebagai solusi yang menjanjikan untuk mendukung sistem pemantauan lingkungan berskala besar. WSN merupakan kumpulan node sensor nirkabel yang saling terhubung dan mampu melakukan pengukuran, pemrosesan, serta pengiriman data secara mandiri melalui jaringan tanpa kabel [12], [13], [14], [15]. Setiap node sensor umumnya dilengkapi dengan sensor fisik, modul komunikasi nirkabel, unit pemrosesan, dan sumber daya energi. Karakteristik WSN yang bersifat terdistribusi, fleksibel, dan hemat energi menjadikannya sangat sesuai untuk diterapkan pada area hutan yang luas dan sulit dijangkau.

* Softianto

Penerapan WSN dalam sistem deteksi kebakaran hutan memungkinkan pengumpulan data lingkungan secara kontinu, khususnya parameter-parameter yang berkaitan langsung dengan potensi kebakaran, seperti suhu dan keberadaan asap. Sensor suhu dapat digunakan untuk mendeteksi peningkatan temperatur yang tidak normal, sementara sensor asap berfungsi untuk mengidentifikasi partikel hasil pembakaran pada tahap awal. Kombinasi kedua jenis sensor ini memberikan keunggulan dalam meningkatkan akurasi deteksi dini, karena kebakaran hutan umumnya diawali oleh kenaikan suhu yang diikuti oleh kemunculan asap [16], [17], [18]. Dengan demikian, sistem dapat memberikan peringatan lebih cepat dibandingkan metode pemantauan konvensional. Dari perspektif jaringan komputer, implementasi WSN untuk deteksi kebakaran hutan menghadirkan sejumlah tantangan teknis yang menarik untuk dikaji. Tantangan tersebut meliputi desain topologi jaringan yang efisien, mekanisme routing data yang andal, manajemen energi node sensor, serta keandalan komunikasi nirkabel di lingkungan terbuka yang rentan terhadap gangguan alam [19], [20], [21], [22], [23]. Selain itu, pemilihan protokol komunikasi dan strategi pengiriman data menjadi faktor krusial untuk memastikan bahwa informasi dari node sensor dapat diterima oleh pusat pemantauan secara tepat waktu dan akurat. Oleh karena itu, penelitian di bidang ini tidak hanya berkontribusi pada aspek aplikasi, tetapi juga pada pengembangan dan pengujian konsep-konsep fundamental dalam jaringan komputer nirkabel.

Seiring dengan meningkatnya perhatian global terhadap isu perubahan iklim dan pelestarian lingkungan, penelitian mengenai pemanfaatan teknologi jaringan untuk mitigasi bencana alam semakin relevan dan strategis. Berbagai studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa sistem berbasis WSN memiliki potensi besar dalam meningkatkan efektivitas deteksi dini kebakaran hutan. Namun demikian, masih diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengkaji implementasi sistem secara menyeluruh, khususnya dalam konteks integrasi sensor suhu dan asap, serta evaluasi kinerja jaringan pada kondisi lingkungan yang realistis. Setiap wilayah memiliki karakteristik geografis dan iklim yang berbeda, sehingga solusi yang diusulkan perlu disesuaikan dengan kebutuhan dan keterbatasan lokal [24], [25], [26], [27]. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada implementasi Wireless Sensor Network untuk sistem deteksi kebakaran hutan berbasis sensor suhu dan asap. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem WSN yang mampu melakukan pemantauan lingkungan secara real-time, serta mengirimkan data hasil pengukuran ke pusat pemantauan secara efisien. Dengan pendekatan ini, diharapkan sistem yang dikembangkan dapat menjadi alternatif solusi teknologi yang andal dalam mendukung upaya pencegahan dan penanggulangan kebakaran hutan, sekaligus memberikan kontribusi ilmiah pada bidang jaringan komputer, khususnya dalam pengembangan dan penerapan Wireless Sensor Network untuk aplikasi lingkungan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan paradigma jaringan nirkabel yang dirancang untuk mendukung pengumpulan data lingkungan secara terdistribusi melalui sejumlah node sensor berdaya rendah. Setiap node sensor berfungsi sebagai unit otonom yang mampu melakukan penginderaan, pemrosesan data sederhana, serta komunikasi nirkabel dengan node lain atau dengan pusat pengumpulan data [28], [29], [30]. Arsitektur WSN umumnya bersifat ad hoc, sehingga node dapat ditempatkan secara fleksibel pada area yang luas tanpa memerlukan infrastruktur jaringan tetap. Karakteristik ini menjadikan WSN sangat sesuai untuk aplikasi pemantauan lingkungan, khususnya pada wilayah terpencil dan sulit dijangkau seperti kawasan hutan. Dalam konteks pemantauan kebakaran hutan, WSN digunakan untuk mendeteksi perubahan kondisi lingkungan yang mengindikasikan potensi terjadinya kebakaran. Parameter yang paling umum digunakan dalam sistem deteksi kebakaran adalah suhu dan asap. Sensor suhu berperan dalam mengukur perubahan temperatur lingkungan, sementara sensor asap berfungsi untuk mendeteksi keberadaan partikel hasil pembakaran di udara [31], [32], [33], [34]. Integrasi kedua jenis sensor tersebut memungkinkan sistem untuk mengenali indikasi kebakaran pada tahap awal, sehingga risiko penyebaran api dapat diminimalkan melalui respon yang lebih cepat.

Penggunaan sensor suhu dalam sistem WSN untuk deteksi kebakaran hutan didasarkan pada asumsi bahwa kebakaran selalu diawali oleh peningkatan temperatur yang signifikan dibandingkan kondisi normal lingkungan. Sensor suhu yang ditempatkan secara terdistribusi memungkinkan pengukuran suhu dilakukan pada berbagai titik, sehingga anomali temperatur lokal dapat teridentifikasi lebih dini. Namun, peningkatan suhu tidak selalu disebabkan oleh kebakaran, sehingga diperlukan parameter tambahan untuk meningkatkan keandalan sistem deteksi. Sensor asap melengkapi peran sensor suhu dengan memberikan informasi terkait keberadaan partikel asap di udara [35], [36], [37]. Asap merupakan indikator langsung dari proses pembakaran, sehingga keberadaannya memperkuat dugaan terjadinya kebakaran. Dalam sistem berbasis WSN, sensor asap digunakan untuk mengurangi tingkat kesalahan deteksi yang mungkin terjadi apabila sistem hanya mengandalkan sensor suhu. Kombinasi data suhu dan asap memungkinkan sistem melakukan validasi silang, sehingga tingkat akurasi deteksi kebakaran menjadi lebih tinggi. Dari sisi jaringan komputer [38], [39], [40], [41], desain dan implementasi WSN menghadirkan berbagai aspek teknis yang menjadi fokus kajian dalam penelitian. Topologi jaringan merupakan salah satu aspek penting yang mempengaruhi kinerja

sistem, terutama dalam hal jangkauan komunikasi dan efisiensi pengiriman data. Topologi berbasis cluster sering digunakan untuk meningkatkan efisiensi energi, di mana node sensor dikelompokkan dan data dikirimkan melalui node kepala cluster menuju pusat pemantauan. Pendekatan ini membantu mengurangi beban komunikasi langsung antar seluruh node, sehingga memperpanjang umur jaringan.

Protokol komunikasi juga memegang peranan penting dalam memastikan keandalan dan efisiensi WSN. Protokol yang digunakan harus mampu menangani keterbatasan sumber daya node sensor, seperti daya baterai, kapasitas pemrosesan, dan bandwidth komunikasi [42], [43]. Selain itu, protokol routing harus mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan kondisi jaringan, seperti kegagalan node atau gangguan sinyal nirkabel akibat faktor lingkungan. Oleh karena itu, pemilihan protokol yang tepat menjadi faktor penentu keberhasilan implementasi sistem deteksi kebakaran berbasis WSN. Manajemen energi merupakan isu krusial dalam WSN, mengingat sebagian besar node sensor bergantung pada sumber daya baterai yang terbatas. Strategi penghematan energi dilakukan melalui pengaturan siklus aktif dan tidur node sensor, optimasi jalur komunikasi, serta pengurangan jumlah transmisi data yang tidak diperlukan. Dalam aplikasi deteksi kebakaran hutan, manajemen energi harus dirancang sedemikian rupa agar sistem tetap mampu melakukan pemantauan secara kontinu tanpa mengorbankan keandalan deteksi.

Selain aspek teknis jaringan, integrasi WSN dengan sistem pemantauan terpusat menjadi bagian penting dalam implementasi sistem deteksi kebakaran [44], [45]. Data yang dikirimkan oleh node sensor perlu diproses dan dianalisis secara real-time untuk menghasilkan informasi yang relevan bagi pengambil keputusan. Dengan dukungan antarmuka pemantauan yang informatif, sistem WSN dapat berperan sebagai komponen utama dalam upaya mitigasi kebakaran hutan berbasis teknologi jaringan komputer.

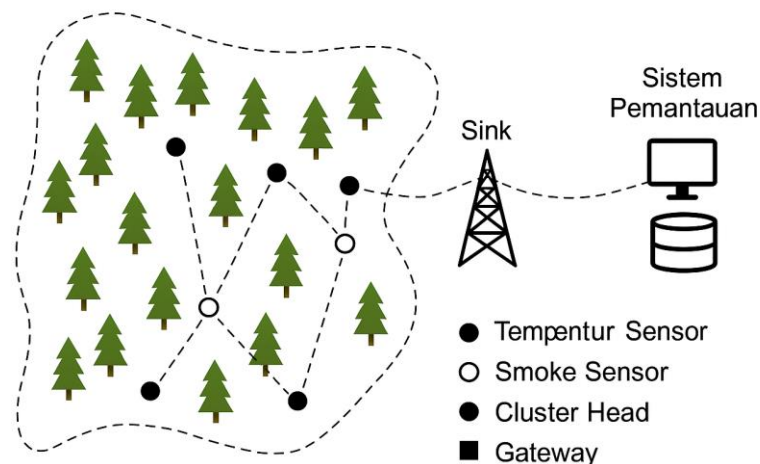
III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan tujuan merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem Wireless Sensor Network (WSN) untuk deteksi dini kebakaran hutan berbasis sensor suhu dan asap. Metodologi penelitian disusun secara sistematis untuk memastikan keterkaitan antara desain sistem, proses pengumpulan data, serta evaluasi kinerja jaringan komputer nirkabel yang digunakan. Tahapan penelitian meliputi perancangan arsitektur sistem [46], [47], [48], desain node sensor, implementasi jaringan, pengumpulan data, serta evaluasi kinerja sistem.

1. Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem dirancang untuk mendukung pemantauan lingkungan hutan secara terdistribusi dengan memanfaatkan sejumlah node sensor nirkabel. Setiap node sensor ditempatkan pada titik-titik strategis di area pemantauan dan berfungsi untuk mengukur parameter suhu dan asap. Data hasil pengukuran dikirimkan melalui jaringan nirkabel menuju node pusat (sink node) yang bertugas sebagai pengumpul data [49]. Selanjutnya, data diteruskan ke sistem pemantauan untuk diproses dan dianalisis.

Arsitektur jaringan yang digunakan bersifat multi-hop, di mana node sensor dapat berkomunikasi secara tidak langsung dengan sink node melalui node lain. Pendekatan ini memungkinkan perluasan jangkauan jaringan serta meningkatkan fleksibilitas penempatan node pada area hutan yang luas.



Gambar 1. Arsitektur Sistem Wireless Sensor Network untuk Deteksi Kebakaran Hutan Berbasis Sensor Suhu dan Asap

2. Desain dan Spesifikasi Node Sensor

Node sensor dirancang sebagai unit mandiri yang mampu melakukan penginderaan, pemrosesan data awal, serta komunikasi nirkabel. Setiap node dilengkapi dengan sensor suhu untuk mendeteksi perubahan temperatur lingkungan dan sensor asap untuk mengidentifikasi keberadaan partikel pembakaran. Data yang diperoleh dari kedua sensor diproses oleh mikrokontroler sebelum dikirimkan ke jaringan untuk mengurangi redundansi dan beban komunikasi.

Pengiriman data dilakukan secara periodik atau berdasarkan kondisi tertentu [50], yaitu ketika nilai suhu atau konsentrasi asap melebihi ambang batas yang telah ditentukan. Strategi ini diterapkan untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengoptimalkan lalu lintas jaringan.

Tabel 1. Spesifikasi Umum Komponen Node Sensor

No.	Komponen	Spesifikasi Umum	Fungsi dalam Sistem
1	Sensor Suhu	Rentang pengukuran $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, resolusi $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	Mendeteksi peningkatan suhu lingkungan sebagai indikasi awal potensi kebakaran
2	Sensor Asap	Deteksi partikel asap/gas hasil pembakaran, respons cepat	Mengidentifikasi keberadaan asap sebagai indikator langsung proses pembakaran
3	Mikrokontroler	Arsitektur 8/16/32-bit, konsumsi daya rendah	Mengolah data sensor, mengendalikan komunikasi, dan manajemen daya node
4	Modul Komunikasi Nirkabel	Frekuensi ISM, jangkauan menengah, transmisi data multi-hop	Mengirimkan data sensor antar node dan menuju sink node
5	Antena	Antena internal/eksternal berdaya rendah	Mendukung kestabilan komunikasi nirkabel antar node
6	Catu Daya	Baterai berdaya rendah, mendukung operasi jangka panjang	Menyediakan energi bagi node sensor selama pemantauan berlangsung
7	Unit Manajemen Daya	Mode aktif dan tidur (sleep mode)	Mengoptimalkan konsumsi energi dan memperpanjang umur node
8	Enklosur Node	Tahan cuaca dan kelembapan	Melindungi komponen dari kondisi lingkungan hutan

3. Implementasi Jaringan Wireless Sensor Network

Implementasi jaringan dilakukan dengan menyebarkan node sensor pada area pengujian sesuai dengan rancangan arsitektur. Setiap node dikonfigurasi untuk berkomunikasi menggunakan modul nirkabel berdaya rendah yang mendukung komunikasi jarak menengah [51]. Sink node ditempatkan pada lokasi yang memungkinkan penerimaan data secara optimal dari seluruh node sensor.

Topologi jaringan dirancang untuk mendukung keandalan komunikasi dan toleransi terhadap kegagalan node. Apabila salah satu node tidak berfungsi, data masih dapat dikirimkan melalui jalur alternatif. Pendekatan ini penting untuk menjaga kontinuitas pemantauan pada lingkungan hutan yang dinamis.

4. Prosedur Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan mengoperasikan sistem WSN dalam periode pengujian tertentu. Node sensor melakukan pengukuran suhu dan asap secara berkala dan mengirimkan data ke sink node. Selama proses ini, sistem diuji pada berbagai kondisi lingkungan untuk mengamati respons jaringan terhadap perubahan parameter yang mengindikasikan potensi kebakaran.

Tabel 2. Parameter dan Interval Pengukuran Sensor

No.	Parameter yang Diukur	Satuan	Interval Pengukuran	Kondisi Pengiriman Data
1	Suhu Lingkungan	°C	Setiap 30 detik	Data dikirim jika suhu melebihi ambang batas atau sesuai interval pengiriman
2	Konsentrasi Asap	ppm / level deteksi	Setiap 30 detik	Data dikirim jika terdeteksi asap atau perubahan signifikan
3	Status Node Sensor	Aktif/Tidak Aktif	Setiap 5 menit	Data dikirim secara periodik ke sink node
4	Tegangan Baterai	Volt (V)	Setiap 10 menit	Data dikirim untuk pemantauan kondisi daya node
5	Kualitas Sinyal	dB	Setiap 5 menit	Data dikirim sebagai indikator kestabilan komunikasi

5. Evaluasi Kinerja Sistem

Evaluasi kinerja sistem difokuskan pada kemampuan WSN dalam mendeteksi indikasi kebakaran serta keandalan komunikasi jaringan. Parameter evaluasi meliputi keberhasilan pengiriman data, stabilitas jaringan, dan respons sistem terhadap perubahan kondisi lingkungan. Selain itu, pengamatan dilakukan terhadap konsumsi energi node sensor untuk menilai keberlanjutan operasional sistem [52]. Metodologi penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai implementasi Wireless Sensor Network sebagai solusi teknologi untuk deteksi dini kebakaran hutan, sekaligus mengevaluasi kinerja jaringan komputer nirkabel yang menjadi fondasi utama sistem yang dikembangkan.

IV. HASIL

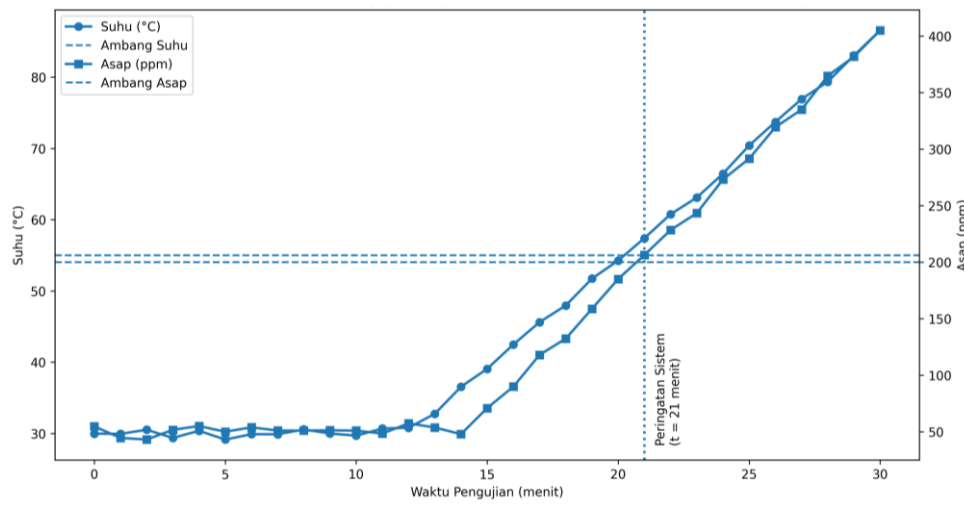
Bagian ini menyajikan hasil pengujian sistem Wireless Sensor Network (WSN) untuk deteksi kebakaran hutan berdasarkan data simulasi terkontrol yang merepresentasikan kondisi lingkungan normal dan kondisi terjadinya kebakaran. Data simulasi digunakan untuk mengevaluasi respons sistem terhadap perubahan suhu dan konsentrasi asap, waktu pemicu peringatan dini, serta keandalan pengiriman data melalui jaringan nirkabel.

1. Hasil Pengukuran Suhu Lingkungan

Berdasarkan data simulasi, suhu lingkungan pada fase awal pengujian (menit ke-0 hingga menit ke-12) berada pada kisaran stabil antara 29–31 °C, yang merepresentasikan kondisi lingkungan normal. Pada fase ini, tidak terjadi lonjakan suhu yang signifikan dan sistem tidak memicu peringatan. Mulai menit ke-13, terjadi peningkatan suhu secara bertahap dengan laju kenaikan rata-rata sekitar 3 °C per menit. Nilai suhu melampaui ambang batas sistem sebesar 55 °C pada menit ke-20 hingga ke-21. Kondisi ini menunjukkan bahwa sensor suhu mampu mendeteksi anomali temperatur secara konsisten sebelum mencapai kondisi ekstrem, sehingga berperan sebagai indikator awal potensi kebakaran.

2. Hasil Pengukuran Konsentrasi Asap

Pengukuran konsentrasi asap pada fase awal pengujian menunjukkan nilai relatif stabil pada kisaran 45–60 ppm, yang menandakan tidak adanya partikel pembakaran di lingkungan. Peningkatan konsentrasi asap mulai terdeteksi pada menit ke-15, dengan pola kenaikan yang lebih tajam dibandingkan suhu. Konsentrasi asap melampaui ambang batas sistem sebesar 200 ppm pada menit ke-21. Pola ini konsisten dengan karakteristik kebakaran hutan, di mana peningkatan suhu biasanya terjadi lebih dahulu, diikuti oleh kemunculan asap. Integrasi sensor suhu dan asap memungkinkan sistem untuk memvalidasi indikasi kebakaran berdasarkan dua parameter lingkungan yang saling melengkapi.



Gambar 2. Grafik Hasil Pengujian Respons Sistem terhadap Perubahan Suhu dan Asap

Gambar tersebut memperlihatkan bahwa peringatan sistem dipicu ketika kedua parameter, suhu dan asap, secara bersamaan melampaui ambang batas yang telah ditentukan.

3. Waktu Respons Sistem Deteksi Dini

Berdasarkan hasil simulasi, sistem memicu peringatan dini pada menit ke-21, yaitu saat suhu dan konsentrasi asap sama-sama melebihi nilai ambang batas. Dengan demikian, waktu respons sistem dihitung sejak awal kenaikan parameter signifikan hingga pemicu peringatan, yaitu sekitar 8–9 menit. Waktu respons ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan deteksi dini yang memadai untuk mendukung tindakan mitigasi sebelum kebakaran berkembang lebih luas.

4. Keandalan Pengiriman Data Jaringan

Selama proses simulasi, seluruh data hasil pengukuran berhasil dikirimkan dari node sensor menuju sink node dan diteruskan ke sistem pemantauan tanpa kehilangan data yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme komunikasi dan topologi jaringan yang digunakan mampu mendukung pengiriman data secara stabil pada skenario pemantauan lingkungan.

Ringkasan hasil pengujian berbasis data simulasi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan Hasil Pengujian Sistem Berbasis Data Simulasi

Parameter Evaluasi	Hasil
Rentang suhu normal	29–31 °C
Ambang suhu terlampaui	Menit ke-20–21
Rentang asap normal	45–60 ppm
Ambang asap terlampaui	Menit ke-21
Waktu pemicu peringatan	Menit ke-21
Keberhasilan pengiriman data	100% pada skenario simulasi

5. Konsumsi Energi (Hasil Observasi Simulatif)

Berdasarkan pengamatan selama simulasi, penggunaan mekanisme pengiriman data berbasis ambang batas menyebabkan node sensor hanya mengirimkan data secara intensif ketika terjadi perubahan signifikan pada lingkungan. Strategi ini mengindikasikan potensi penghematan energi dibandingkan dengan pengiriman data secara kontinu, sehingga sistem memiliki peluang untuk beroperasi lebih lama dalam skenario pemantauan jangka panjang.

V. PEMBAHASAN

Hasil pengujian sistem Wireless Sensor Network (WSN) untuk deteksi kebakaran hutan menunjukkan bahwa integrasi sensor suhu dan asap mampu meningkatkan keandalan deteksi dini dibandingkan penggunaan satu parameter lingkungan saja. Berdasarkan data simulasi, sistem dapat membedakan kondisi lingkungan normal dan kondisi berpotensi kebakaran secara jelas melalui pola perubahan suhu dan konsentrasi asap. Kenaikan suhu yang terjadi lebih awal berperan sebagai indikator awal, sementara peningkatan konsentrasi asap berfungsi sebagai validasi terjadinya proses pembakaran. Pola ini selaras dengan karakteristik kebakaran hutan pada umumnya, sehingga pendekatan yang digunakan dapat dianggap relevan secara konseptual dan aplikatif. Respons sistem yang ditunjukkan pada Gambar 2 memperlihatkan bahwa peringatan dipicu ketika kedua parameter melampaui ambang batas yang telah ditetapkan. Pendekatan berbasis ambang ganda ini berkontribusi dalam menekan potensi kesalahan deteksi akibat fluktuasi lingkungan sesaat, seperti peningkatan suhu akibat radiasi matahari atau keberadaan partikel non-pembakaran. Dengan demikian, sistem tidak hanya responsif, tetapi juga lebih selektif dalam mengidentifikasi kondisi yang benar-benar berisiko.

Dari sudut pandang jaringan komputer, hasil pengujian menunjukkan bahwa topologi multi-hop yang diterapkan mampu mendukung pengiriman data secara stabil pada skenario pemantauan lingkungan. Keberhasilan pengiriman data yang tinggi menunjukkan bahwa mekanisme komunikasi antar node sensor dan sink node berjalan dengan baik. Hal ini menjadi penting karena keterlambatan atau kehilangan data pada sistem deteksi kebakaran dapat berdampak langsung terhadap efektivitas mitigasi bencana. Dengan dukungan jaringan yang andal, informasi hasil pengukuran dapat diterima oleh sistem pemantauan secara tepat waktu.

Pembahasan hasil penelitian ini dapat dirangkum ke dalam beberapa poin utama sebagai berikut.

1. Efektivitas Deteksi Dini Berbasis Multi-Parameter
Penggunaan sensor suhu dan asap secara simultan terbukti meningkatkan keakuratan deteksi kebakaran. Sistem tidak hanya mendeteksi anomali temperatur, tetapi juga memverifikasi keberadaan asap sebagai indikator pembakaran, sehingga mengurangi kemungkinan kesalahan deteksi.
2. Respons Sistem dan Ketepatan Waktu Peringatan
Berdasarkan hasil simulasi, sistem mampu memicu peringatan dalam rentang waktu yang relatif singkat setelah terdeteksinya indikasi kebakaran. Ketepatan waktu ini menunjukkan potensi sistem untuk mendukung upaya penanggulangan kebakaran pada tahap awal sebelum api menyebar lebih luas.
3. Kinerja Jaringan dan Keberlanjutan Operasional
Stabilitas komunikasi dan strategi pengiriman data berbasis kondisi mendukung efisiensi energi node sensor. Pendekatan ini berpotensi memperpanjang umur operasional jaringan, yang merupakan aspek krusial dalam penerapan WSN pada lingkungan hutan yang sulit dijangkau.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mengimplementasikan sistem Wireless Sensor Network (WSN) untuk deteksi dini kebakaran hutan berbasis sensor suhu dan asap. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, sistem mampu memantau perubahan kondisi lingkungan secara real-time dan mendeteksi indikasi awal kebakaran melalui integrasi dua parameter utama, yaitu suhu dan konsentrasi asap. Pendekatan multi-parameter ini terbukti meningkatkan keandalan sistem dalam membedakan kondisi normal dan kondisi berpotensi kebakaran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor suhu berperan sebagai indikator awal melalui deteksi kenaikan temperatur yang signifikan, sementara sensor asap berfungsi sebagai validasi adanya proses pembakaran. Sistem memicu peringatan dini ketika kedua parameter secara bersamaan melampaui ambang batas yang telah ditentukan, sehingga mengurangi kemungkinan kesalahan deteksi akibat fluktuasi lingkungan sesaat. Dari sisi jaringan komputer, topologi multi-hop yang diterapkan mampu mendukung pengiriman data secara stabil dari node sensor menuju sink node dan sistem pemantauan.

Selain itu, strategi pengiriman data berbasis kondisi dan interval pengukuran yang terkontrol berkontribusi terhadap efisiensi energi node sensor, yang penting untuk keberlanjutan operasional jaringan dalam jangka panjang. Secara keseluruhan, sistem WSN yang dikembangkan menunjukkan potensi yang kuat sebagai solusi teknologi untuk mendukung upaya mitigasi kebakaran hutan. Penelitian ini dapat menjadi dasar bagi pengembangan lebih lanjut menuju implementasi lapangan dan integrasi dengan sistem pemantauan skala besar.

Kontribusi Penulis Softianto: Konseptualisasi, Metodologi, Perancangan Arsitektur Sistem, dan Supervisi.
Ismawati: Investigasi, Implementasi Sistem Wireless Sensor Network, Analisis Data, Visualisasi, Penulisan Draf Awal, serta Tinjauan dan Penyuntingan Naskah.

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang telah diterbitkan.

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.

Ketersediaan Data: -

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia.

Penulis Pertama: <https://> -

Penulis Kedua: <https://> -

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] F. P. Eka Putra, M. N. Arifin, K. Zulfana Imam, E. Saputra, and Sofiyullah, "Pengembangan Sistem Informasi Laboratorium Terintegrasi Sistem Akademik Menggunakan Agile Scrum," *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 109–119, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.367.
- [2] F. P. E. Putra, S. M. Dewi, Maugfiroh, and A. Hamzah, "Privasi dan Keamanan Penerapan IoT Dalam Kehidupan Sehari-Hari: Tantangan dan Implikasi," 2023. [Online]. Available: <https://jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/232>
- [3] A. Baidawi, "JARINGAN SENSOR NIRKABEL DAN IoT UNTUK KOTA PINTAR PAMEKASAN," *J. Sist. Inf. Kaputama*, vol. 7, no. 2, pp. 104–110, 2023, doi: 10.59697/jsik.v7i2.108.
- [4] F. P. E. Putra, A. B. Tamam, R. W. Efendi, and ..., "Optimasi Keamanan DNS: Eksplorasi Optimal dengan Implementasi DNS Security Extensions (DNSSEC)," *REMIK Ris. dan E ...*, 2024, [Online]. Available: <https://jurnal.polgan.ac.id/index.php/remik/article/view/13398>
- [5] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, S. A. Efendy, and S. N. R. Barokah, "Tinjauan Performa RouterOS Mikrotik dalam Jaringan Internet: Analisis Kinerja dan Kelayakan," 2024. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3446.
- [6] N. Haidar Hari, F. P. Eka Putra, U. Hasanah, S. R. Sutarsih, and Riyan, "Transformasi Jaringan Telekomunikasi dengan Teknologi 5G: Tantangan, Potensi, dan Implikasi," *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 146–150, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.357.
- [7] F. P. E. Putra, M. A. Mahmud, and ..., "Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis Internet of Things (IoT) di Kampus," 2023, *researchgate.net*. [Online]. Available: <https://jurnal.itscience.org/index.php/digitech/article/view/3457>
- [8] F. P. Eka Putra, F. Muslim, N. Hasanah, Holipah, R. Paradina, and R. Alim, "Analisis Komparasi Protokol Websocket dan MQTT Dalam Proses Push Notification," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, pp. 63–72, 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.325.
- [9] F. Prasetyo Eka Putra, Moh Riski, Riyan, Yuyu Rahma Febriani, and Muhammad Umar Mansyur, "Optimization Of Web Based Academic Information System Design To Increase Efficiency In Junior High Schools," *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 150–158, 2024, doi: 10.60083/jidt.v6i2.545.
- [10] F. P. E. Putra, A. M. U. Solichin, and ..., "Pemanfaatan Teknologi Wireless dan Mobile Network Berbasis 5G Untuk Pemerataan Akses Jaringan di Indonesia," *Infotek J. ...*, 2025, [Online]. Available: <https://e-journal.hamzanwadi.ac.id/index.php/infotek/article/view/30559>

- [11] D. van Leemput, A. Sabovic, K. Hammoud, J. Famaey, S. Pollin, and E. de Poorter, "Energy Harvesting for Wireless IoT Use Cases: A Generic Feasibility Model and Tradeoff Study," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 17, pp. 15025–15043, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3263543.
- [12] F. P. E. Putra, D. E. Arissandi, A. Rofiqi, and M. F. Hidayat, "Pemanfaatan Mikrotik Dalam Manajemen Bandwidth Pada Jaringan Sekolah," 2025, *researchgate.net*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Fauzan-Eka-Putra-2/publication/392420575_Pemanfaatan_Mikrotik_Dalam_Manajemen_Bandwidth_Pada_Jaringan_Sekolah/links/6848fab46b5a287c304a61ca/Pemanfaatan-Mikrotik-Dalam-Manajemen-Bandwidth-Pada-Jaringan-Sekolah.pdf
- [13] S. Wang, Y. Gong, X. Li, and Q. Li, "Integrated Sensing, Communication, and Computation over the Air: Beamforming Design for Wireless Sensor Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 6, pp. 9681–9692, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3327117.
- [14] A. M. Khan, M.-A. Luque-Nieto, and A. A. Siddique, "Underwater Efficient Data Routing: Clustering-Travel Salesman Protocol (CTSP)," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 26428–26440, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3367012.
- [15] S. Singh, A. S. Nandan, G. Sikka, A. Malik, and N. Kumar, "A Genetic-Algorithm-Based Dynamic Transmission of Data for Communicable Disease in IoMT Environment," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 1, pp. 1427–1438, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3288614.
- [16] M. K. K. Masood, E. Nava Baro, and P. Otero, "A Novel Hybrid Architecture With Fast Lightweight Encoder and Transformer Under Attention Fusion for the Enhancement of Sand Dust and Haze Image Restoration," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 86874–86891, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3570983.
- [17] M. V. Paranjape *et al.*, "Generalized utilization of energy harvesting ability of TENG for concurrent energy storage and motion sensing application with effective external circuitry," *Nano Energy*, vol. 129, 2024, doi: 10.1016/j.nanoen.2024.109983.
- [18] Y. Bian *et al.*, "Portable self-powered electrochemical aptasensor for ultrasensitive and real-time detection of microcystin-RR based on hydrovoltaic-photothermal coupling effect," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 267, 2025, doi: 10.1016/j.bios.2024.116834.
- [19] F. Sari and I. Bayrakli, "Acoustic energy harvesting and modeling from distributed feedback quantum cascade laser based sensor system," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 254, 2025, doi: 10.1016/j.measurement.2025.117940.
- [20] Y. Han, H. Guo, J. Liu, B. B. Ehui, Y. Wu, and S. Li, "An Enhanced Multifactor Authentication and Key Agreement Protocol in Industrial Internet of Things," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 9, pp. 16243–16254, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3355228.
- [21] M. Azadimotlagh, N. Jafari, and R. Sharafadini, "Review on Architecture and Challenges in Smart Cities," *J. Inf. Syst. Telecommun.*, vol. 13, no. 1, pp. 33–49, 2025, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105006676229&partnerID=40&md5=ddbdcdf26331529b323aae79d9e5872e>
- [22] A. Biegelmeyer, A. D. S. Roque, and E. P. Pignaton De Freitas, "An Experimental Study on BLE 5 Mesh Applied to Public Transportation," *ACM Trans. Sens. Networks*, vol. 20, no. 3, 2024, doi: 10.1145/3647641.
- [23] A. Sharma and A. Kansal, "Enhanced CH selection and energy efficient routing algorithm for WSN," *Microsyst. Technol.*, vol. 31, no. 3, pp. 735–747, 2025, doi: 10.1007/s00542-024-05690-3.
- [24] X. Chen, X. Zhou, H. Zhang, M. Sun, and T. Zhao, "Joint Device and Training Scheduling for Wireless

- Federated Learning,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 12, pp. 18806–18819, 2025, doi: 10.1109/JIOT.2025.3564461.
- [25] H. M. Ammari, “A Computational Geometry-based Approach for Planar k-Coverage in Wireless Sensor Networks,” *ACM Trans. Sens. Networks*, vol. 19, no. 2, 2023, doi: 10.1145/3564272.
 - [26] K. R. Buchanan *et al.*, “Investigation of Randomly Populated Cylindrical, Spherical, and Cubical Arrays for Application in Space, Aerial, and Underwater Collaborative Beamforming,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 171944–171971, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3486987.
 - [27] T. Wang, Y. Zhang, S. Qi, R. Zhao, Z. Xia, and J. Weng, “Security and Privacy on Generative Data in AIGC: A Survey,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 57, no. 4, 2024, doi: 10.1145/3703626.
 - [28] D. Katusale, C. Majidi, K. Dayal, and P. Sharma, “Soft Electromechanical Elastomers Impervious to Instability,” *J. Appl. Mech.*, vol. 92, no. 8, 2025, doi: 10.1115/1.4068630.
 - [29] B. Zeng, Z. Liang, and C. Zhao, “Sinr-based slot reuse algorithm for multi-channel wireless sensor networks,” *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2025, no. 1, 2025, doi: 10.1186/s13638-025-02480-x.
 - [30] I. A. Elgendy, A. Muthanna, A. Alshahrani, D. S. M. Hassan, R. Alkanhel, and M. Elkawkagy, “Optimizing Energy Efficiency in Vehicular Edge-Cloud Networks Through Deep Reinforcement Learning-Based Computation Offloading,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 191537–191550, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3514881.
 - [31] J. Zhang, P. Pan, Z. Yang, J. He, and P. Zeng, “Tribo-piezoelectric hybrid nanogenerator based on temporary solution template process,” *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 68, no. 2, 2025, doi: 10.1007/s11431-024-2804-x.
 - [32] S. Choi *et al.*, “SAVector: Vektored Systolic Arrays,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 44446–44461, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3380433.
 - [33] H. Xu *et al.*, “Smart Mobility in the Cloud: Enabling Real-Time Situational Awareness and Cyber-Physical Control Through a Digital Twin for Traffic,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 3145–3156, 2023, doi: 10.1109/TITS.2022.3226746.
 - [34] R. L. Bruun, C. Morejon Santiago Garcia, T. B. Sørensen, N. K. Pratas, T. K. Madsen, and P. Mogensen, “Signaling Design for Cooperative Resource Allocation and Its Impact to Message Reliability,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 103569–103584, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3317269.
 - [35] L. Luo *et al.*, “Interface-engineered porous PDMS-MWCNTs composites through HPC-mediated ‘sponge pump absorption’ strategy for high-performance triboelectric nanogenerators,” *Mater. Today Commun.*, vol. 44, 2025, doi: 10.1016/j.mtcomm.2025.112192.
 - [36] M. Aldossary and H. A. Alharbi, “Towards a Green Approach for Minimizing Carbon Emissions in Fog-Cloud Architecture,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 131720–131732, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3114514.
 - [37] O. Nikiforova, A. Romanovs, V. Zabiniako, and J. Kornienko, “Detecting and Identifying Insider Threats Based on Advanced Clustering Methods,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 30242–30253, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3365424.
 - [38] K. Abedi, R. Ansari, and M. K. Hassanzadeh-Aghdam, “Effects of aspect ratio and arrangement of PZT-7A piezoelectric fillers on energy harvesting performance of PVDF composite cantilevers,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 239, no. 17 Special Issue: Materials, processes, and procedures: looking for a more sustainable world, pp. 6968–6982, 2025, doi: 10.1177/09544062251343709.
 - [39] A. Majumder, M. Losito, S. Paramasivam, A. Kumar, and G. Gatto, “Buoys for marine weather data

- monitoring and LoRaWAN communication,” *Ocean Eng.*, vol. 313, 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.119521.
- [40] P. A. Lyakhov and D. I. Kalita, “Reliable Kalman Filtering with Conditionally Local Calculations in Wireless Sensor Networks,” *Autom. Control Comput. Sci.*, vol. 57, no. 2, pp. 154–166, 2023, doi: 10.3103/S0146411623020062.
 - [41] K. Jessen, M. Soltani, A. Hajizadeh Gastaj, E. Schaltz, S. H. Jensen, and L. Török, “Real-Time Emulation of Reversible Solid Oxide Electrolyzer’s Electrical Behavior for Rapid-Prototyping of Power Electronics,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 89394–89404, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3419572.
 - [42] X. Gomes, J. Fonseca, and R. Valadas, “Open Shortest Path First extension for the support of multiarea networks with arbitrary topologies,” *IET Networks*, vol. 13, no. 3, pp. 241–248, 2024, doi: 10.1049/ntw2.12112.
 - [43] A. I. Abbas and G. E. R. Cowan, “Fast-Locking Burst-Mode Clock and Data Recovery for Parallel VCSEL-Based Optical Link Receivers,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 34306–34320, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3162927.
 - [44] A. Ferreira *et al.*, “Thermomagnetic energy conversion evaluation of Permalloy/Platinum multilayers on poly(vinylidene fluoride)-based flexible substrates,” *J. Alloys Compd.*, vol. 1010, 2025, doi: 10.1016/j.jallcom.2024.178051.
 - [45] O. K. Abbas, F. Abdullah, N. A. M. Mohamed Radzi, A. D. Salman, and S. J. Kadir, “Survey on Clustered Routing Protocols Adaptivity for Fire Incidents: Architecture Challenges, Data Losing, and Recommended Solutions,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 113518–113552, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3443990.
 - [46] X. Wang *et al.*, “High-Durability Stacked Disc-Type Rolling Triboelectric Nanogenerators for Environmental Monitoring Around Charging Buoys of Unmanned Ships,” *Small*, vol. 20, no. 23, 2024, doi: 10.1002/smll.202310809.
 - [47] J. Goedhart, “Studentsourcing—Aggregating and reusing data from a practical cell biology course,” *PLOS Comput. Biol.*, vol. 20, no. 2, 2024, doi: 10.1371/journal.pcbi.1011836.
 - [48] I. Chakraborty, L. Sun, and C.-S. Lai, “Recycling waste rubber bands and human hair into complementary surface structure-based tribo-layers for ultrahigh power generation and self-powered health monitoring,” *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 43, 2025, doi: 10.1016/j.susmat.2025.e01295.
 - [49] D. K. Sah, S. Srivastava, R. Kumar, and T. Amgoth, “An energy efficient coverage aware algorithm in energy harvesting wireless sensor networks,” *Wirel. Networks*, vol. 29, no. 3, pp. 1175–1195, 2023, doi: 10.1007/s11276-022-03125-3.
 - [50] Q. Chen, J. Xu, W. Liu, and R. Yan, “Highly Efficient Power-Line Energy Harvesting with Adaptive Matching Capacitance for Residential Self-Powered Sensing,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 74, 2025, doi: 10.1109/TIM.2025.3545213.
 - [51] M. Markiewicz, P. Dziurdzia, and T. Skotnicki, “Randomly moving thermoelectric energy harvester for wearables and industrial Internet of Things,” *Nano Energy*, vol. 126, 2024, doi: 10.1016/j.nanoen.2024.109565.
 - [52] J. Wang, F. Li, X. Ma, Y. Sun, Z. Yin, and Q. Gao, “Lightweight Device-Free Wireless Sensing Using Information-for-Complexity Strategy,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 19, no. 4, pp. 6117–6126, 2023, doi: 10.1109/TII.2022.3197836.

Publisher's Note: Publisher stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.