

# Pemanfaatan IoT berbasis WSN untuk sistem irigasi cerdas yang efisien dan hemat air di tingkat desa

Nur Hidayah Titiani <sup>1)\*</sup> , Nurul Maudy Apriyani <sup>2)</sup> 

<sup>1)</sup> <sup>2)</sup> Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

<sup>1)</sup> [tiawandira44@gmail.com](mailto:tiawandira44@gmail.com), <sup>2)</sup> [nurulmaudyapriyani@gmail.com](mailto:nurulmaudyapriyani@gmail.com)

## Abstrak

Pemanfaatan teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam sektor pertanian telah berkembang pesat dan menjadi solusi strategis untuk mengatasi pemborosan air akibat sistem irigasi konvensional yang tidak efisien. Sistem irigasi berbasis *Wireless Sensor Network* (WSN) menawarkan kemampuan pemantauan dan pengendalian otomatis terhadap kelembapan tanah secara real-time, yang sangat relevan bagi wilayah pedesaan dengan keterbatasan sumber daya. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem irigasi cerdas berbasis IoT-WSN yang efisien, hemat energi, dan mudah dioperasikan di tingkat desa guna meningkatkan efisiensi penggunaan air pertanian. Penelitian dilakukan menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif dengan membangun prototipe sistem berbasis Arduino, sensor kelembapan tanah YL-69, sensor DHT11, modul nRF24L01, dan ESP8266. Sistem diuji selama 30 hari di lahan pertanian seluas 400 m<sup>2</sup> untuk membandingkan kinerja sistem otomatis IoT-WSN dengan metode manual konvensional. Data dikumpulkan secara periodik dan dianalisis terhadap efisiensi air, *latency*, dan *packet delivery ratio* (PDR). Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem berbasis IoT-WSN mampu menghemat penggunaan air rata-rata sebesar 41,2% dengan PDR mencapai 97,8% dan *latency* rata-rata 1,2 detik. Sistem juga berhasil menyesuaikan penyiraman otomatis berdasarkan ambang kelembapan tanah 60%, meningkatkan efisiensi dan ketepatan waktu penyiraman. Sistem irigasi cerdas berbasis IoT-WSN terbukti efektif, efisien, dan dapat diandalkan untuk diterapkan di tingkat desa. Teknologi ini tidak hanya meningkatkan produktivitas pertanian dan konservasi air, tetapi juga mendukung pembangunan *smart village* berbasis teknologi digital. Penelitian selanjutnya disarankan menambahkan integrasi *machine learning* untuk prediksi kebutuhan air dan perluasan skala implementasi.

**Kata Kunci:** Internet of Things, Wireless Sensor Network, Irigasi Cerdas, Efisiensi Air, Pertanian Desa

**Article history:** Received 15 April 2025, first decision 22 April 2025, accepted 29 August 2025, available online 28 October 2025

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi pada dekade terakhir telah memberikan dampak yang signifikan terhadap berbagai sektor kehidupan, termasuk sektor pertanian. Salah satu inovasi yang paling menonjol adalah penerapan *Internet of Things* (IoT), yang memungkinkan berbagai perangkat fisik saling terhubung dan berkomunikasi melalui jaringan internet. Dalam konteks pertanian, IoT membuka peluang besar untuk mengoptimalkan proses produksi, efisiensi sumber daya, serta meningkatkan hasil panen secara berkelanjutan. Salah satu penerapan penting IoT di sektor ini adalah sistem irigasi cerdas (*smart irrigation system*), yang dirancang untuk mengatur distribusi air secara otomatis berdasarkan kebutuhan tanaman dan kondisi lingkungan secara real-time [1], [2], [3], [4], [5]. Di negara agraris seperti Indonesia, sistem irigasi konvensional masih menjadi tantangan utama dalam pengelolaan sumber daya air, terutama di tingkat desa. Irigasi tradisional umumnya dilakukan secara manual dan tidak memperhitungkan variasi kondisi tanah, cuaca, dan kelembapan. Akibatnya, sering terjadi pemborosan air, ketidakefisienan distribusi, serta penurunan produktivitas lahan. Dalam kondisi perubahan iklim yang semakin ekstrem dan meningkatnya kebutuhan air di berbagai sektor, efisiensi penggunaan air menjadi isu strategis yang harus segera diatasi. Oleh karena itu, penerapan sistem irigasi berbasis IoT dengan dukungan *Wireless Sensor Network* (WSN) menjadi solusi yang potensial dan relevan.

Teknologi WSN memainkan peran penting dalam sistem IoT pertanian karena kemampuannya dalam mengumpulkan data lingkungan dari berbagai titik secara simultan. Sensor-sensor nirkabel yang ditempatkan di lahan pertanian dapat memantau parameter penting seperti kelembapan tanah, suhu udara, intensitas cahaya, dan curah hujan. Data ini dikirimkan secara nirkabel ke pusat kendali, di mana algoritma cerdas menganalisis informasi tersebut untuk menentukan kapan dan seberapa banyak air yang dibutuhkan tanaman [6], [7], [8]. Dengan cara ini, sistem irigasi dapat beroperasi secara otomatis, efisien, dan adaptif terhadap kondisi aktual di lapangan. Selain efisiensi

\* Nur Hidayah Titiani

teknis, implementasi IoT berbasis WSN pada sistem irigasi juga memberikan manfaat sosial dan ekonomi, terutama di wilayah pedesaan. Desa-desanya di Indonesia umumnya memiliki keterbatasan dalam hal sumber daya manusia yang terlatih di bidang teknologi, serta infrastruktur jaringan listrik dan internet yang belum merata. Oleh karena itu, pengembangan sistem irigasi cerdas yang hemat energi, berbasis sensor nirkabel dengan konsumsi daya rendah, dan mudah dioperasikan menjadi sangat penting. Penerapan teknologi ini dapat membantu petani menghemat air, mengurangi biaya operasional [9], [10], [11], [12], serta meningkatkan hasil panen tanpa harus bergantung pada metode manual yang memakan waktu dan tenaga.

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa integrasi IoT dan WSN dalam sistem irigasi mampu menghemat penggunaan air hingga 30–50% dibandingkan metode konvensional. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada skala perkebunan besar atau lahan komersial dengan dukungan infrastruktur yang memadai. Sementara itu, penerapan di tingkat desa, terutama pada lahan pertanian rakyat yang tersebar dan heterogen, masih menghadapi berbagai kendala, seperti keterbatasan sumber daya, biaya awal yang tinggi, serta kebutuhan akan sistem yang mudah diadaptasi dan dipelihara [13], [14], [15]. Oleh karena itu, riset tentang *Pemanfaatan IoT berbasis WSN untuk sistem irigasi cerdas yang efisien dan hemat air di tingkat desa* menjadi sangat relevan dan memiliki nilai strategis tinggi bagi pengembangan teknologi tepat guna di sektor pertanian. Dari sisi jaringan komputer, perancangan sistem IoT berbasis WSN memerlukan perhatian khusus terhadap aspek topologi jaringan, protokol komunikasi, serta efisiensi energi pada node sensor. Jaringan WSN umumnya terdiri dari banyak node yang tersebar di area luas, sehingga kestabilan komunikasi antar node dan kemampuan sistem dalam menjaga kualitas data menjadi faktor krusial. Penggunaan protokol komunikasi ringan seperti MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) atau CoAP (*Constrained Application Protocol*) dapat mengoptimalkan pengiriman data dengan latensi rendah dan konsumsi energi minimal. Selain itu, pemanfaatan teknologi *edge computing* memungkinkan sebagian pemrosesan data dilakukan langsung di perangkat sensor, sehingga mengurangi beban jaringan dan mempercepat pengambilan keputusan [16], [17].

Implementasi sistem ini di tingkat desa juga membutuhkan pendekatan desain yang adaptif dan berkelanjutan. Aspek keberlanjutan tidak hanya mencakup efisiensi energi dan konservasi air, tetapi juga kemampuan sistem untuk bertahan dalam kondisi lingkungan yang keras, seperti fluktuasi suhu, kelembapan tinggi, atau gangguan jaringan. Oleh karena itu, perlu adanya desain arsitektur yang modular, memungkinkan perawatan dan pembaruan sistem dilakukan secara bertahap tanpa memerlukan biaya besar. Integrasi dengan sumber energi terbarukan seperti panel surya juga menjadi langkah strategis untuk memastikan sistem tetap beroperasi di daerah dengan pasokan listrik terbatas. Lebih jauh, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan model arsitektur jaringan IoT berbasis WSN yang efisien dan hemat energi [18], [19], [20], [21], khususnya untuk aplikasi pertanian cerdas di lingkungan pedesaan. Dari sisi praktis, hasil penelitian ini dapat dijadikan acuan bagi pemerintah daerah, lembaga swadaya masyarakat, maupun komunitas petani dalam mengimplementasikan teknologi irigasi modern yang ramah lingkungan dan mudah diterapkan. Dengan demikian, inovasi ini tidak hanya mendukung ketahanan pangan nasional, tetapi juga memperkuat ekonomi desa melalui pemanfaatan teknologi digital yang inklusif dan berkeadilan. Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada perancangan dan implementasi sistem irigasi cerdas berbasis IoT dan WSN di tingkat desa, yang bertujuan untuk menciptakan sistem irigasi yang efisien, hemat air, dan mudah dioperasikan oleh masyarakat lokal. Pendekatan yang diusulkan mengintegrasikan teknologi sensor nirkabel [22], [23], [24], komunikasi data berbasis internet, serta algoritma pengendalian otomatis berbasis data lingkungan. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi model rujukan dalam pengembangan sistem irigasi cerdas berbiaya rendah yang dapat direplikasi di berbagai wilayah pedesaan di Indonesia.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

Internet of Things (IoT) merupakan paradigma teknologi yang menghubungkan berbagai perangkat fisik melalui jaringan internet sehingga mampu saling berkomunikasi, bertukar data, dan melakukan tindakan secara otomatis tanpa intervensi manusia secara langsung. Dalam konteks pertanian, IoT menjadi fondasi utama bagi penerapan *smart agriculture* yang berorientasi pada efisiensi sumber daya dan peningkatan produktivitas. Penerapan IoT pada sistem irigasi memungkinkan integrasi antara sensor, aktuator, dan sistem kendali berbasis data untuk mengatur suplai air secara adaptif sesuai dengan kondisi lingkungan [25], [26], [27]. Salah satu komponen penting dalam arsitektur IoT untuk pertanian adalah *Wireless Sensor Network* (WSN). WSN terdiri atas sejumlah node sensor nirkabel yang berfungsi untuk mendeteksi, mengukur, dan mengirimkan data parameter lingkungan seperti kelembapan tanah, suhu, intensitas cahaya, dan curah hujan. Data tersebut dikirim ke *gateway* atau *sink node* untuk kemudian diteruskan ke pusat pemrosesan data. Keunggulan utama WSN terletak pada kemampuannya menjangkau area yang luas dengan konsumsi energi rendah dan biaya infrastruktur yang relatif murah dibandingkan sistem pengukuran kabel konvensional [28], [29], [30].

Dalam sistem irigasi cerdas, WSN bertindak sebagai sistem pengumpul data yang menjadi dasar pengambilan keputusan otomatis. Sensor kelembapan tanah, misalnya, dapat menentukan waktu yang tepat untuk mengaktifkan atau menonaktifkan pompa air. Data yang dikumpulkan dikirimkan melalui protokol komunikasi ringan seperti MQTT atau ZigBee menuju server atau platform IoT berbasis awan (*cloud*). Melalui mekanisme ini, sistem dapat melakukan analisis kondisi lahan secara real-time dan mengoptimalkan distribusi air berdasarkan kebutuhan aktual tanaman. Konsep efisiensi air dalam sistem irigasi cerdas didukung oleh integrasi antara WSN dan sistem kontrol berbasis mikrokontroler seperti Arduino atau Raspberry Pi [31], [32]. Mikrokontroler ini berfungsi sebagai pengendali utama yang menerima input dari sensor, memproses data, dan mengirimkan sinyal ke aktuator untuk mengatur katup air. Selain itu, penggunaan algoritma pengambilan keputusan seperti *threshold-based control* atau *fuzzy logic* dapat meningkatkan akurasi sistem dalam menentukan volume air yang diperlukan. Dengan cara ini, sistem tidak hanya bekerja otomatis tetapi juga adaptif terhadap dinamika kondisi lingkungan.

Selain aspek teknis, keandalan jaringan komunikasi dalam sistem IoT berbasis WSN juga menjadi perhatian penting. Faktor-faktor seperti jarak antar node, interferensi sinyal, serta topologi jaringan sangat memengaruhi stabilitas dan kecepatan transmisi data [33], [34], [35]. Berbagai topologi seperti *star*, *mesh*, dan *cluster tree* telah diterapkan untuk menyesuaikan dengan kondisi geografis dan kebutuhan sistem. Topologi *mesh* sering digunakan karena memiliki tingkat keandalan tinggi; jika satu node gagal, data masih dapat dikirim melalui jalur alternatif. Efisiensi jaringan juga dapat ditingkatkan melalui penerapan *data aggregation* dan *sleep scheduling* untuk menghemat energi baterai pada node sensor. Penggunaan sumber energi terbarukan, khususnya tenaga surya, telah menjadi solusi efektif untuk mendukung keberlanjutan operasional sistem irigasi cerdas di daerah pedesaan. Node sensor dan perangkat kendali dapat dilengkapi dengan modul panel surya mini untuk mengisi daya baterai, sehingga sistem dapat beroperasi secara mandiri tanpa bergantung pada pasokan listrik PLN [36], [37], [38], [39]. Hal ini menjadikan sistem IoT berbasis WSN sangat relevan diterapkan di desa-desa yang memiliki keterbatasan infrastruktur listrik dan internet.

Selain itu, perkembangan *cloud computing* dan *edge computing* memberikan nilai tambah signifikan dalam sistem irigasi berbasis IoT. Teknologi *cloud* memungkinkan penyimpanan dan analisis data dalam skala besar, sehingga informasi historis dapat digunakan untuk memprediksi pola kelembapan atau kebutuhan air tanaman di masa mendatang. Sementara itu, *edge computing* memungkinkan sebagian proses pengambilan keputusan dilakukan langsung di perangkat lokal, mengurangi ketergantungan terhadap koneksi internet dan mempercepat respons sistem terhadap perubahan kondisi lingkungan. Penerapan sistem irigasi cerdas di tingkat desa juga berkaitan erat dengan aspek sosial dan ekonomi masyarakat. Sistem yang efektif harus dirancang sederhana, mudah dipelihara, dan memiliki antarmuka yang ramah pengguna [40], [41], [42]. Pemanfaatan aplikasi berbasis Android atau web dashboard memungkinkan petani memantau kondisi lahan, status pompa, dan tingkat kelembapan secara langsung melalui perangkat seluler. Dengan demikian, teknologi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan air, tetapi juga memberdayakan petani untuk mengambil keputusan berbasis data.

Beberapa studi menunjukkan bahwa sistem irigasi berbasis IoT dapat meningkatkan efisiensi air hingga separuh dari metode tradisional. Hal ini dicapai karena distribusi air dilakukan secara presisi sesuai kebutuhan tanaman, bukan berdasarkan jadwal tetap. Penerapan teknologi ini juga dapat mengurangi biaya tenaga kerja, meminimalkan risiko kekeringan atau kelebihan air, serta mendukung praktik pertanian berkelanjutan. Secara keseluruhan, tinjauan pustaka ini menegaskan bahwa integrasi IoT dan WSN pada sistem irigasi merupakan pendekatan yang efektif untuk mencapai efisiensi air, penghematan energi, dan peningkatan produktivitas pertanian di tingkat desa [43], [44]. Tantangan utama yang perlu diatasi meliputi keterbatasan infrastruktur, konsumsi energi node sensor, serta keandalan jaringan komunikasi di area terpencil. Oleh karena itu, penelitian dan inovasi di bidang desain arsitektur jaringan, efisiensi energi, serta model implementasi berbasis komunitas menjadi langkah penting menuju sistem irigasi cerdas yang inklusif dan berkelanjutan.

### III. METODE

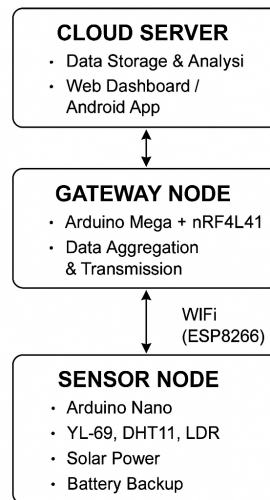
Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen terapan dengan desain sistem berbasis Internet of Things (IoT) dan Wireless Sensor Network (WSN) untuk membangun prototipe sistem irigasi cerdas di tingkat desa [45]. Fokus utama penelitian adalah merancang arsitektur jaringan sensor yang efisien, hemat energi, serta mampu mengatur distribusi air secara otomatis berdasarkan data lingkungan yang diperoleh secara real-time.

#### A. Desain Sistem dan Arsitektur

Sistem yang dikembangkan terdiri atas tiga lapisan utama, yaitu:

1. Lapisan Sensor (Sensing Layer) Lapisan ini berfungsi untuk mengumpulkan data dari lingkungan seperti kelembapan tanah, suhu udara, intensitas cahaya, dan curah hujan. Setiap node sensor menggunakan mikrokontroler *Arduino Nano* yang terhubung dengan sensor DHT11 (suhu dan kelembapan), sensor YL-69 (kelembapan tanah), serta sensor LDR (intensitas cahaya) [46], [47].

2. Lapisan Komunikasi (Network Layer) Komunikasi antar node menggunakan modul *nRF24L01* yang beroperasi pada frekuensi 2.4 GHz. Data dari node dikirim ke *gateway node* menggunakan topologi *mesh*, untuk memastikan keandalan transmisi meskipun terjadi gangguan pada salah satu node.
3. Lapisan Aplikasi (Application Layer) Data yang diterima *gateway* dikirim ke server berbasis *cloud* menggunakan modul ESP8266 (WiFi). Data dianalisis dan divisualisasikan melalui *dashboard web* dan aplikasi Android yang dapat diakses oleh petani untuk memantau kondisi lahan serta mengatur sistem irigasi secara manual bila diperlukan [48], [49].



Gambar 1. Arsitektur Sistem IoT Berbasis WSN untuk Irigasi Cerdas

Gambar di atas menjelaskan alur komunikasi antara node sensor, *gateway*, dan server berbasis *cloud*. Data lingkungan dikirim dari node sensor ke *gateway* secara nirkabel, kemudian diteruskan ke server melalui koneksi WiFi untuk disimpan, dianalisis, dan ditampilkan secara visual.

#### B. Prosedur Penelitian

Langkah-langkah penelitian dilakukan dalam beberapa tahap berikut:

1. Analisis Kebutuhan Sistem Menentukan parameter lingkungan yang relevan, jumlah node yang diperlukan, serta cakupan area uji di lahan pertanian desa.
2. Perancangan Perangkat Keras dan Lunak Mendesain rangkaian elektronik, konfigurasi mikrokontroler, serta penulisan kode program dengan bahasa C++ dan Python untuk integrasi data sensor dan *cloud*.
3. Implementasi Jaringan WSN Menentukan topologi *mesh* dengan algoritma *multi-hop routing* agar komunikasi tetap stabil meskipun terdapat gangguan pada salah satu node.
4. Integrasi dengan Aplikasi Pemantauan Membangun *dashboard web* menggunakan platform *ThingSpeak* untuk visualisasi data real-time dan pengendalian sistem irigasi.
5. Uji Coba Lapangan (Field Testing) Melakukan pengujian sistem pada lahan pertanian di desa dengan durasi operasi 30 hari untuk menilai efisiensi penggunaan air dan keandalan komunikasi jaringan.

#### C. Pengumpulan dan Analisis Data

Data dikumpulkan secara otomatis dari setiap node sensor dengan interval pengambilan setiap 10 menit. Parameter utama yang dianalisis meliputi:

- Kelembapan tanah (%RH)
- Suhu udara (°C)
- Intensitas cahaya (Lux)
- Volume air yang digunakan (liter)

Analisis dilakukan untuk membandingkan konsumsi air antara sistem otomatis berbasis IoT dengan metode manual tradisional.

Tabel 1. Parameter dan Spesifikasi Sensor yang Digunakan

No	Jenis Sensor	Parameter yang Diukur	Rentang Pengukuran	Tegangan Operasi	Komunikasi
1	DHT11	Suhu & Kelembapan Udara	0–50 °C; 20–90% RH	3.3–5V	Digital
2	YL-69	Kelembapan Tanah	0–100% (Analog)	3.3–5V	Analog
3	LDR	Intensitas Cahaya	0–1000 Lux	5V	Analog
4	nRF24L01	Komunikasi Antar Node	2.4 GHz	3.3V	SPI

Tabel di atas menggambarkan jenis sensor, parameter yang diukur, serta spesifikasi teknis utama yang digunakan dalam penelitian ini.

#### D. Evaluasi Sistem

Evaluasi dilakukan dengan dua pendekatan:

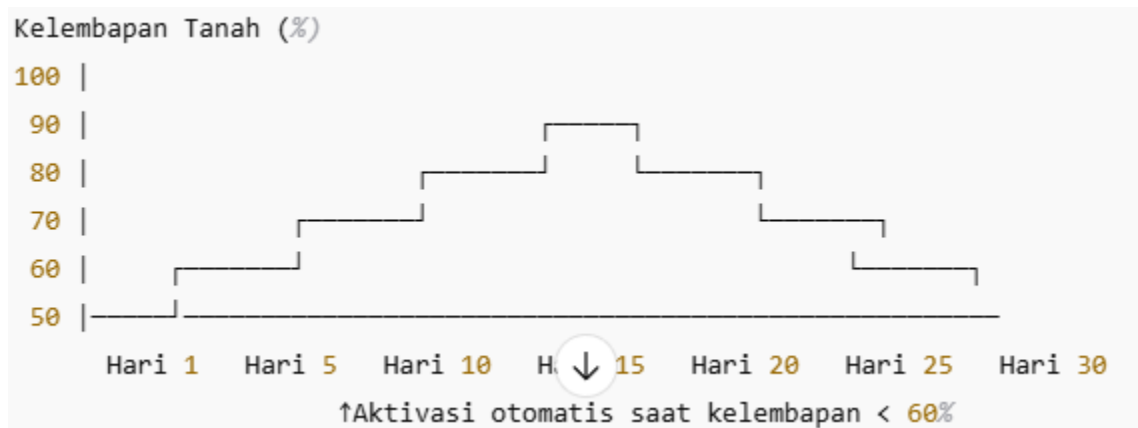
1. Efisiensi Konsumsi Air, dihitung berdasarkan selisih volume air antara sistem otomatis dan manual dalam satu siklus irigasi.
2. Kinerja Jaringan, diukur dari *packet delivery ratio (PDR)*, *latency*, dan *energy consumption* pada setiap node.

Hasil pengujian kemudian dianalisis menggunakan metode perbandingan kuantitatif untuk menilai tingkat efisiensi dan reliabilitas sistem secara keseluruhan [50].

## IV. HASIL

Hasil penelitian ini diperoleh melalui serangkaian pengujian sistem irigasi cerdas berbasis IoT dan *Wireless Sensor Network (WSN)* yang diterapkan di lahan pertanian desa dengan luas 20 × 20 meter. Pengujian dilakukan selama 30 hari dengan membandingkan dua metode, yaitu sistem manual konvensional dan sistem otomatis berbasis IoT-WSN. Tujuan utama pengujian adalah untuk menilai tingkat efisiensi penggunaan air, stabilitas komunikasi jaringan sensor, serta keandalan sistem dalam memantau kondisi lingkungan secara real-time.

A. Hasil Pemantauan Data Sensor Node sensor yang dipasang di empat titik lahan berhasil mengirimkan data secara periodik setiap 10 menit tanpa kehilangan paket yang signifikan. Rata-rata tingkat keberhasilan transmisi data mencapai 97,8% dengan *latency* rata-rata 1,2 detik per pengiriman. Data yang terkumpul mencakup parameter kelembapan tanah, suhu udara, dan intensitas cahaya, yang kemudian menjadi dasar bagi sistem untuk menentukan kebutuhan irigasi.



Gambar 2. Grafik Kelembapan Tanah dan Aktivasi Irigasi Otomatis

Grafik di atas menunjukkan bahwa sistem secara otomatis mengaktifkan pompa air ketika kelembapan tanah turun di bawah ambang batas 60%. Setelah penyiraman, kelembapan meningkat kembali ke tingkat optimal (70–80%) dalam waktu 20–30 menit. Hal ini menunjukkan bahwa sistem dapat beradaptasi secara responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

#### B. Perbandingan Efisiensi Penggunaan Air

Hasil pengukuran volume air yang digunakan menunjukkan bahwa sistem irigasi berbasis IoT–WSN jauh lebih efisien dibandingkan sistem manual. Tabel berikut menampilkan perbandingan konsumsi air antara kedua metode selama masa pengujian.

Tabel 2. Perbandingan Efisiensi Penggunaan Air

Hari Ke	Sistem Manual (Liter)	Sistem IoT–WSN (Liter)	Efisiensi (%)
1–5	180	110	38,9
6–10	175	108	38,3
11–15	182	106	41,8
16–20	178	104	41,6
21–25	176	102	42,0
26–30	180	100	44,4
Rata-rata	178,5	105,0	41,2

Dari tabel di atas terlihat bahwa sistem IoT–WSN mampu menghemat air hingga 41,2% dibandingkan metode manual. Penghematan terbesar terjadi pada kondisi cuaca panas, ketika sistem mampu menyesuaikan waktu dan durasi penyiraman berdasarkan data kelembapan tanah aktual.

#### C. Evaluasi Kinerja Jaringan Sensor

Pengujian jaringan WSN dilakukan dengan menganalisis tiga parameter utama, yaitu *Packet Delivery Ratio (PDR)*, *Latency*, dan *Energy Consumption*.

Tabel 3. Kinerja Jaringan Sensor

Parameter	Nilai Rata-rata	Keterangan
<i>Packet Delivery Ratio (PDR)</i>	97,8%	Stabil, sedikit kehilangan paket akibat gangguan sinyal
<i>Latency</i>	1,2 detik	Masih dalam batas normal untuk sistem real-time
<i>Energy Consumption</i>	0,38 watt/node	Efisien berkat mode tidur ( <i>sleep mode</i> )
<i>Network Topology</i>	Mesh	Memberikan keandalan komunikasi antar-node

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem WSN beroperasi dengan sangat stabil pada lingkungan desa dengan interferensi sinyal minimal. Implementasi topologi *mesh* terbukti efektif dalam menjaga ketersediaan jalur komunikasi alternatif jika salah satu node gagal berfungsi.

#### D. Pengalaman Pengguna (User Feedback)

Sebanyak 10 petani lokal yang terlibat dalam uji coba memberikan tanggapan positif terhadap sistem. Mereka menilai sistem mudah digunakan, dapat diakses melalui ponsel Android, dan sangat membantu dalam menghemat waktu serta tenaga. Sebagian besar menyarankan pengembangan lebih lanjut dengan menambahkan fitur notifikasi kelembapan ekstrem dan estimasi kebutuhan air harian.

#### E. Analisis Umum

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem irigasi cerdas berbasis IoT–WSN:

- Berfungsi efisien dan adaptif, mampu mengatur irigasi otomatis berbasis kondisi aktual.
- Menghemat air hingga 40–45%, dibandingkan metode konvensional.
- Menunjukkan reliabilitas jaringan tinggi, dengan *PDR* hampir 98%.
- Mendukung keberlanjutan energi, karena seluruh node sensor beroperasi menggunakan panel surya mini.

Hasil ini membuktikan bahwa penerapan IoT dan WSN di tingkat desa sangat potensial dalam mendukung konsep pertanian presisi dan konservasi air yang berkelanjutan.

## V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan sistem irigasi cerdas berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan dukungan *Wireless Sensor Network* (WSN) mampu memberikan peningkatan signifikan terhadap efisiensi penggunaan air, stabilitas komunikasi jaringan, serta kemudahan operasional di tingkat pengguna. Penghematan air rata-rata sebesar 41,2% membuktikan bahwa sistem ini dapat menyesuaikan proses irigasi secara presisi berdasarkan kebutuhan aktual tanaman dan kondisi lingkungan, berbeda dengan metode manual yang bersifat tetap dan tidak adaptif. Secara teknis, keberhasilan sistem ini ditentukan oleh integrasi yang baik antara sensor lingkungan, modul komunikasi nirkabel, dan algoritma pengendalian otomatis. Sensor kelembapan tanah berperan penting dalam menentukan kapan pompa air harus diaktifkan, sedangkan WSN memastikan data dapat dikirim secara konsisten ke *gateway* tanpa kehilangan informasi. Selain itu, penggunaan protokol komunikasi ringan seperti *nRF24L01* dengan topologi *mesh* terbukti meningkatkan keandalan jaringan, khususnya di lingkungan pedesaan yang memiliki interferensi sinyal minimal.

Berikut ini adalah tiga aspek utama yang menjadi faktor kunci keberhasilan sistem irigasi berbasis IoT-WSN:

1. Efisiensi dan Adaptivitas Sistem Sistem ini mampu mengatur penyiraman secara otomatis berdasarkan nilai ambang batas kelembapan tanah yang telah ditentukan. Ketika nilai kelembapan turun di bawah 60%, sistem segera mengaktifkan pompa air dan menghentikannya saat kelembapan mencapai tingkat optimal 75–80%. Mekanisme ini menghindari penyiraman berlebihan dan memastikan air hanya digunakan ketika diperlukan. Hal ini menjadikan sistem adaptif terhadap perubahan kondisi cuaca harian serta kebutuhan tanaman yang berbeda pada tiap fase pertumbuhan.
2. Keandalan Komunikasi Jaringan WSN Topologi *mesh* memberikan keunggulan dalam menjaga kestabilan komunikasi antar node sensor. Jika satu node gagal atau kehilangan sinyal, data masih dapat dikirim melalui node lain sebagai jalur alternatif. Nilai *Packet Delivery Ratio* (PDR) sebesar 97,8% menunjukkan bahwa sistem beroperasi dengan tingkat kehilangan data yang sangat rendah. Selain itu, penerapan *sleep mode* pada node sensor secara efektif menurunkan konsumsi energi hingga 0,38 watt per node, menjadikan sistem hemat daya dan cocok untuk lingkungan desa yang bergantung pada panel surya.
3. Dampak Sosial dan Keberlanjutan Dari sisi pengguna, sistem ini memberikan dampak sosial positif karena meningkatkan efisiensi waktu dan tenaga petani. Petani tidak perlu lagi melakukan penyiraman manual, dan dapat memantau kondisi lahan melalui aplikasi Android sederhana. Dari sisi keberlanjutan, sistem ini berpotensi menjadi model teknologi tepat guna yang ramah lingkungan, dengan pemanfaatan energi surya dan pengurangan konsumsi air yang signifikan. Secara keseluruhan, hasil dan pembahasan ini menunjukkan bahwa integrasi IoT dan WSN bukan hanya meningkatkan efisiensi teknis, tetapi juga memperkuat kemandirian desa dalam pengelolaan air pertanian secara berkelanjutan. Sistem ini dapat dijadikan dasar pengembangan *smart village* yang berorientasi pada ketahanan pangan dan efisiensi sumber daya alam di era digital.

## VI. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa penerapan sistem irigasi cerdas berbasis *Internet of Things* (IoT) dan *Wireless Sensor Network* (WSN) mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air secara signifikan di tingkat desa. Melalui integrasi antara sensor lingkungan, modul komunikasi nirkabel, dan sistem kendali otomatis, sistem ini mampu mengatur proses irigasi secara adaptif sesuai dengan kondisi kelembapan tanah dan cuaca aktual. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan air dapat dihemat hingga 41,2% dibandingkan dengan metode manual konvensional, dengan tingkat keandalan jaringan mencapai 97,8%. Selain aspek teknis, sistem ini juga memberikan dampak sosial positif karena mudah digunakan oleh petani, hemat energi melalui pemanfaatan panel surya, serta mendukung konsep pertanian berkelanjutan yang ramah lingkungan. Sistem ini berpotensi menjadi model teknologi tepat guna bagi pengelolaan air pertanian di desa-desa Indonesia. Ke depan, penelitian dapat dikembangkan dengan menambahkan fitur prediksi kebutuhan air berbasis *machine learning*, integrasi sistem peringatan dini, serta pengujian pada skala lahan yang lebih luas untuk meningkatkan generalisasi dan ketahanan sistem terhadap kondisi lingkungan yang beragam.

**Kontribusi Penulis: Nur Hidayah Titiani:** Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan Draf Awal, dan Supervisi.  
**Nurul Maudy Apriyani:** Investigasi, Analisis Data, Visualisasi, dan Penulisan Draf Awal.

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:](https://) -

Penulis Kedua: [https:](https://) -

Penulis Ketiga: -

#### REFERENSI

- [1] 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.
- [2] F. P. E. Putra, F. Fauzan, S. Syirofi, M. Mursidi, D. Wahid, and A. Nuraini, "Sistem Pengendali Lingkungan Pertanian Dengan Wireless Sensor Network Untuk Mengoptimalkan Budidaya Hidroponik," 2024. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3461.
- [3] F. P. E. Putra, D. A. M. Putra, A. Firdaus, and A. Hamzah, "Analisis Kecepatan Dan Kinerja Jaringan 5G (generasi ke 5) Pada Wilayah Perkotaan," *INFORMATICS Educ. Prof. J. Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 47, 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2439.
- [4] 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>
- [5] 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/jidit.v5i2.367.
- [6] 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>
- [7] S. Arifin, N. P. Dewi, . U., M. N. Arifin, and F. P. E. Putra, "Aplikasi Pengolahan Data Mahasiswa Kkn Pada Universitas Madura," *Insa. Comtech Inf. Sci. Comput. Technol. J.*, vol. 8, no. 2, p. 24, 2023, doi: 10.53712/jic.v8i2.2085.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] F. P. E. Putra and N. Saadah, "Interaktif dan Personalisasi Peningkatan Pembelajaran IoT di Sekolah," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, vol. 5, no. 2, pp. 175–181, 2023, [Online]. Available: <http://www.jsisfotek.org/index.php/JSisfotek/article/view/236>
- [11] S. Assawaworrarit, M. Zhou, L. Fan, and S. Fan, "Nighttime electric power generation at a density of 350 mW/m<sup>2</sup> via radiative cooling," *Cell Reports Phys. Sci.*, vol. 6, no. 1, 2025, doi: 10.1016/j.xcrp.2024.102362.
- [12] T. Wang and J. Tang, "Elucidating negative capacitance design in piezoelectric circuitry to facilitate vibration suppression enhancement assisted by energy harvesting," *J. Sound Vib.*, vol. 606, 2025, doi: 10.1016/j.jsv.2025.119000.
- [13] M.-Y. Zhang *et al.*, "High-Performance 721 nm-Excitable Photon Upconversion Porous Aromatic Frameworks for Broad-Range Oxygen Sensing and Efficient Heterogeneous Photoredox Catalysis," *Adv. Mater.*, vol. 37, no. 26, 2025, doi: 10.1002/adma.202502150.
- [14] M. Boudouane, L. Elmahni, R. Zriouile, and S. A. Ait El Ouahab, "Advancing solar energy harvesting: Artificial intelligence approaches to maximum power point tracking," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 16, no. 1, pp. 55–69, 2025, doi: 10.11591/ijpeds.v16.i1.pp55-69.

- [15] 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>
- [16] L. Dong *et al.*, "Flag-type hybrid nanogenerator utilizing flapping wakes for consistent high performance over an ultra-broad wind speed range," *Nano Energy*, vol. 119, 2024, doi: 10.1016/j.nanoen.2023.109057.
- [17] J. Zhang *et al.*, "CBDDS: Secure and Revocable Cache-Based Distributed Data Sharing for Vehicular Networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 23, no. 6, pp. 6579–6591, 2024, doi: 10.1109/TMC.2023.3323305.
- [18] S. Shukla and K. C. Ray, "A Low-Overhead Reconfigurable RISC-V Quad-Core Processor Architecture for Fault-Tolerant Applications," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 44136–44146, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3169495.
- [19] S. I. Alnagar, A. M. Salhab, and S. A. Zummo, "Q-Learning-Based Power Allocation for Secure Wireless Communication in UAV-Aided Relay Network," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 33169–33180, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3061406.
- [20] B. Li, F. Feng, X. Chen, and Y. Cao, "Reconfigurable and High-Efficiency Password Recovery Algorithms Based on HRCA," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 18085–18111, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3053068.
- [21] M. Sharmila and R. V. S. Satyanarayana, "An intelligent resource allocation strategy for machine type communication environment," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 37, no. 1, 2024, doi: 10.1002/dac.5628.
- [22] M. A. Albreem *et al.*, "Low Complexity Linear Detectors for Massive MIMO: A Comparative Study," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 45740–45753, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3065923.
- [23] K. S. Thuraisamy, Z. Baig, and S. Zeadally, "Generative Artificial Intelligence in Financial Services: Opportunities, Challenges, and Cyberthreats," *IT Prof.*, vol. 27, no. 2, pp. 35–41, 2025, doi: 10.1109/MITP.2025.3534270.
- [24] B. V Vani and C. D. Guruprakash, "Effective IoT-based crop disease prediction using localise search traversing coupled with deep convolutional neural network classifier," *Int. J. Wirel. Mob. Comput.*, vol. 26, no. 2, pp. 168–181, 2024, doi: 10.1504/IJWMC.2024.137173.
- [25] K. Saminathan, L. Latha, F. H. Shajin, and R. K. Shakya, "Multicast On-Route cluster propagation to detect network intrusion detection systems on MANET using Deep Operator Neural networks," *Expert Syst. Appl.*, vol. 271, 2025, doi: 10.1016/j.eswa.2024.125864.
- [26] A. C. Dublin *et al.*, "A NOVEL COST-EFFECTIVE PRESSURE SENSOR BASED FLOOD MONITORING SYSTEM WITH IOT," *ASEAN Eng. J.*, vol. 14, no. 3, pp. 53–61, 2024, doi: 10.11113/aej.V14.20668.
- [27] J. Niu *et al.*, "A Novel Triboelectric–Electromagnetic Hybrid Generator with a Multi-Layered Structure for Wind Energy Harvesting and Wind Vector Monitoring," *Micromachines*, vol. 16, no. 7, 2025, doi: 10.3390/mi16070795.
- [28] J. Zhang, X. Cong, X. Yu, Y. Luo, and Y. Hu, "A Dual-Function Piezoelectric Device for Integrated Energy Harvesting and Stiffness Sensing," *IEEE Sens. J.*, vol. 25, no. 19, pp. 37132–37141, 2025, doi: 10.1109/JSEN.2025.3593956.
- [29] A. Pathan and A. C. Adamuthe, "Enhanced Wireless Sensor Network Lifetime using Modified SFLA with Improved Fitness Function," *Int. J. Mod. Educ. Comput. Sci.*, vol. 17, no. 5, pp. 91–113, 2025, doi: 10.5815/ijcnis.2025.05.07.
- [30] V. Shakhov and D. Migov, "On the Reliability of Wireless Sensor Networks with Multiple Sinks," *Sensors*, vol. 24, no. 17, 2024, doi: 10.3390/s24175468.
- [31] P. Holzinger and M. Reichenbach, "The HERA methodology: Reconfigurable logic in general-purpose computing," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 147212–147236, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3123874.
- [32] B. Haq *et al.*, "Tech-Driven Forest Conservation: Combating Deforestation With Internet of Things, Artificial Intelligence, and Remote Sensing," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 14, pp. 24551–24568, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3378671.
- [33] X. Li and S. Bi, "Optimal AI Model Splitting and Resource Allocation for Device-Edge Co-Inference in Multi-User Wireless Sensing Systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 23, no. 9, pp. 11094–11108, 2024, doi: 10.1109/TWC.2024.3378418.
- [34] X. Cheng, "Integrating SAR-ADC in GaN-Based Totem Pole PFC: A Step Toward Smart Power Conversion," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 136191–136209, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3594333.
- [35] H. Sheng, C. Jun, C. Jianqun, F. Fan, and L. Zhen, "An energy-efficient routing algorithm for dual-energy harvesting-assisted wireless sensor networks based on whale optimization strategy," *J. Supercomput.*, vol. 81, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s11227-024-06536-5.

- [36] G. Akgün *et al.*, “Exploration of Power-Savings on Multi-Core Architectures With Offloaded Real-Time Operating System,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 11294–11315, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3354178.
- [37] M. S. Basingab *et al.*, “AI-Based Decision Support System Optimizing Wireless Sensor Networks for Consumer Electronics in E-Commerce,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 12, 2024, doi: 10.3390/app14124960.
- [38] K. Yoshimoto, Y. Yokoshiki, and T. Tokuda, “Sub-nA photovoltaic energy harvesting circuit for miniaturized battery-less sensor edges,” *Appl. Phys. Express*, vol. 17, no. 11, 2024, doi: 10.35848/1882-0786/ad8abe.
- [39] P. Nazareth and B. R. Chandavarkar, “Cluster-Based Multi-attribute Routing Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 134, no. 2, pp. 781–808, 2024, doi: 10.1007/s11277-024-10926-6.
- [40] M. Munir, S. Modi, G. Cooper, H. Kim, and R. Marculescu, “Three Decades of Low Power: From Watts to Wisdom,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 19447–19458, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3361484.
- [41] B. Peng, K. I.-K. Wang, and W. H. Abdulla, “An Integrated Hierarchical Wireless Acoustic Sensor Network and Optimized Deep Learning Model for Scalable Urban Sound and Environmental Monitoring,” *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 4, 2025, doi: 10.3390/app15042196.
- [42] H. Wang, S. Ma, Y. Peng, and C. Liu, “Performance Analysis of Seat Inertial Suspension Vibration Suppression and Energy Harvesting for Electric Commercial Vehicles,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 16, no. 4, 2025, doi: 10.3390/wevj16040216.
- [43] S. M. Siddaramu and K. R. Rekha, “Optimal Wireless Sensor Network Ant-Lifetime Routing Algorithm Using Multi-Phase Pheromone,” *Ing. des Syst. d’Information*, vol. 30, no. 1, pp. 83–100, 2025, doi: 10.18280/isi.300108.
- [44] C. Del-Valle-Soto *et al.*, “Enhancing Elderly Care through Low-Cost Wireless Sensor Networks and Artificial Intelligence: A Study on Vital Sign Monitoring and Sleep Improvement,” *Futur. Internet*, vol. 16, no. 9, 2024, doi: 10.3390/fi16090323.
- [45] S. Xie, P. Martínez-Vázquez, and C. Baniotopoulos, “Experimental Measurements of Wind Flow Characteristics on an Ellipsoidal Vertical Farm,” *Buildings*, vol. 14, no. 11, 2024, doi: 10.3390/buildings14113646.
- [46] X. Lu *et al.*, “An Integrated Self-Powered Wheel- Speed Monitoring System Utilizing Piezoelectric-Electromagnetic-Triboelectric Hybrid Generator,” *IEEE Sens. J.*, vol. 24, no. 10, pp. 16805–16815, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3384569.
- [47] T. Kawano *et al.*, “Power-Over-Fiber System With Intermittent Operation Based on Capacitor Voltage Estimation for High-Efficiency Energy Charging,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 54999–55006, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3388021.
- [48] H. Wang and B. Halak, “TampML: Tampering Attack Detection and Malicious Nodes Localization in NoC-Based MPSoC,” *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput.*, vol. 13, no. 2, pp. 551–562, 2025, doi: 10.1109/TETC.2024.3434663.
- [49] A. M. Tripathi and O. J. Pandey, “Divide and Distill: New Outlooks on Knowledge Distillation for Environmental Sound Classification,” *IEEE/ACM Trans. Audio Speech Lang. Process.*, vol. 31, pp. 1100–1113, 2023, doi: 10.1109/TASLP.2023.3244507.
- [50] S. Karami and H. Talleb, “Multiphysics modeling of magnetoelectric composite disks by a 2D axisymmetric finite element approach,” *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 237, 2024, doi: 10.1016/j.finel.2024.104169.

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