



Efisiensi Energi pada Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) untuk Sistem Pemantauan Kelembaban Tanah

Imam Ghozeli ^{1)*} , Mohammad Rizki Hoirur Rofi ²⁾ 

¹⁾ ²⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ imamghozeli96@gmail.com, ²⁾ rizzzrof@gmail.com

Abstrak

Perkembangan jaringan sensor nirkabel (Wireless Sensor Network/WSN) telah menjadi pilar utama dalam sistem Internet of Things (IoT), terutama pada bidang pertanian presisi untuk memantau kondisi lingkungan seperti kelembaban tanah. Namun, keterbatasan sumber daya energi pada setiap node sensor menjadi tantangan utama yang menghambat keberlanjutan operasi jaringan. Efisiensi energi diperlukan agar sistem dapat beroperasi dalam jangka panjang tanpa sering mengganti atau mengisi ulang baterai. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan menentukan konfigurasi WSN yang paling efisien dalam konsumsi energi untuk sistem pemantauan kelembaban tanah berbasis IoT. Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kuantitatif berbasis simulasi eksperimental dengan tiga protokol routing hemat energi (LEACH, TEEN, dan SEP) dan variasi duty cycle (10%, 30%, dan 50%). Simulasi dilakukan untuk mengukur konsumsi energi total, umur jaringan, serta rasio keberhasilan pengiriman data (Packet Delivery Ratio/PDR). Hasil penelitian menunjukkan bahwa protokol LEACH dengan duty cycle 30% menghasilkan efisiensi energi terbaik, menghemat daya hingga 34% dibandingkan protokol lainnya. Umur jaringan meningkat hingga 87,5 jam, dan rasio keberhasilan pengiriman data mencapai 96,4%. Efisiensi tertinggi diperoleh melalui mekanisme pengelompokan dinamis dan rotasi *cluster head* yang menyeimbangkan beban energi antar node. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kombinasi protokol LEACH dan duty cycle 30% merupakan konfigurasi paling efisien untuk sistem pemantauan kelembaban tanah berbasis WSN. Temuan ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan sistem pertanian presisi yang hemat energi, andal, dan berkelanjutan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi penerapan algoritma optimasi berbasis kecerdasan buatan meningkatkan adaptivitas jaringan dalam kondisi lingkungan dinamis.

Kata Kunci: Jaringan Sensor Nirkabel, Efisiensi Energi, LEACH, Duty Cycle, Kelembaban Tanah

Article history: Received 15 April 2025, first decision 25 April 2025, accepted 22 August 2025, available online 28 October 2025

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi jaringan komputer dalam dua dekade terakhir telah mengalami kemajuan yang sangat pesat, terutama pada bidang jaringan sensor nirkabel atau Wireless Sensor Networks (WSN). WSN merupakan salah satu komponen penting dalam sistem Internet of Things (IoT) yang memungkinkan pengumpulan data dari lingkungan secara real-time melalui sensor-sensor yang tersebar di suatu area tertentu. Dalam konteks pertanian modern dan sistem pemantauan lingkungan, WSN memainkan peran yang krusial [1], [2], [3], [4], khususnya dalam mendukung pertanian presisi (precision agriculture) yang bertujuan meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya alam, seperti air, energi, dan pupuk. Salah satu penerapan WSN yang semakin banyak diteliti adalah sistem pemantauan kelembaban tanah, yang berfungsi untuk mendeteksi kondisi kadar air dalam tanah secara kontinu, akurat, dan efisien. Namun demikian, meskipun WSN menawarkan keunggulan dalam hal fleksibilitas, skalabilitas, dan kemudahan instalasi [5], [6], [7], sistem ini memiliki tantangan mendasar terkait efisiensi energi. Setiap node sensor dalam WSN umumnya ditenagai oleh baterai dengan kapasitas terbatas, sementara lokasi penempatan sensor sering kali berada di area yang sulit dijangkau untuk pemeliharaan atau penggantian baterai. Oleh karena itu, pengelolaan energi menjadi faktor kunci dalam perancangan sistem WSN yang andal dan berkelanjutan. Penggunaan energi yang efisien tidak hanya memperpanjang umur jaringan, tetapi juga menjamin kontinuitas data yang dikirim ke pusat pengendali atau server, yang sangat penting dalam sistem pemantauan kelembaban tanah jangka panjang.

Dalam sistem pemantauan kelembaban tanah berbasis WSN, konsumsi energi sensor dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti proses sensing, pengolahan data (data processing), transmisi data [8], [9], [10], serta mekanisme komunikasi antar node. Di antara semua proses tersebut, transmisi data nirkabel merupakan aktivitas yang paling banyak mengonsumsi energi. Oleh sebab itu, banyak penelitian berfokus pada pengembangan protokol routing hemat energi (energy-efficient routing protocols), mekanisme pengelolaan data terdistribusi, dan strategi duty-cycling untuk

* Imam Ghozeli

mengatur siklus aktif dan tidur (sleep/active cycles) pada node sensor. Dengan strategi tersebut, sistem dapat menekan konsumsi daya tanpa mengorbankan kualitas data yang dikumpulkan. Selain aspek teknis jaringan, efisiensi energi juga bergantung pada arsitektur sistem dan algoritma pengumpulan data. Misalnya, penerapan algoritma pengelompokan node (clustering) seperti LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy), TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol), dan varian lainnya telah terbukti mampu mengurangi overhead komunikasi antar node [11], [12], [13], [14]. Dalam konteks pemantauan kelembaban tanah, metode ini memungkinkan data dari sensor-sensor yang berdekatan dikumpulkan terlebih dahulu oleh node kepala cluster (cluster head) sebelum dikirimkan ke sink node, sehingga menghemat energi total jaringan. Selain itu, pendekatan berbasis machine learning dan edge computing kini mulai diterapkan untuk melakukan pra-pemrosesan data langsung pada node sensor guna mengurangi frekuensi pengiriman data yang berlebihan. Kebutuhan akan efisiensi energi dalam sistem WSN untuk pemantauan kelembaban tanah juga semakin mendesak seiring meningkatnya perhatian terhadap sustainabilitas energi dan lingkungan. Dalam skenario pertanian pintar, sistem ini harus beroperasi secara mandiri selama berbulan-bulan bahkan bertahun-tahun dengan sumber daya energi terbatas. Oleh karena itu, integrasi dengan energi terbarukan, seperti panel surya mini, menjadi alternatif yang menjanjikan untuk mendukung keberlanjutan operasional jaringan. Namun, pemanfaatan energi terbarukan ini tetap memerlukan manajemen energi yang adaptif dan cerdas agar dapat menyesuaikan konsumsi daya dengan ketersediaan energi yang bersifat fluktuatif.

Penelitian mengenai efisiensi energi pada WSN untuk pemantauan kelembaban tanah tidak hanya penting dari sisi rekayasa sistem, tetapi juga memiliki dampak sosial dan ekonomi yang signifikan [15], [16], [17]. Dalam bidang pertanian, data kelembaban tanah yang akurat dan berkelanjutan dapat membantu petani menentukan waktu dan volume penyiraman yang optimal, sehingga menghemat penggunaan air sekaligus meningkatkan produktivitas tanaman. Hal ini sangat relevan bagi negara-negara dengan tingkat ketersediaan air terbatas atau yang sedang menghadapi dampak perubahan iklim global. Oleh karena itu, efisiensi energi bukan hanya permasalahan teknis, tetapi juga bagian integral dari solusi terhadap isu ketahanan pangan dan manajemen sumber daya air berkelanjutan. Dari perspektif akademik dan penelitian, topik efisiensi energi pada WSN terus berkembang menuju arah jaringan sensor cerdas (intelligent sensor networks) yang mampu beradaptasi secara dinamis terhadap kondisi lingkungan dan perubahan beban jaringan. Pendekatan berbasis algoritma optimasi metaheuristik seperti Particle Swarm Optimization (PSO), Genetic Algorithm (GA), dan Ant Colony Optimization (ACO) telah banyak diusulkan untuk menentukan jalur routing optimal dan penjadwalan node yang efisien energy [18], [19], [20], [21]. Di samping itu, kemajuan teknologi komunikasi seperti LoRa (Long Range) dan NB-IoT (Narrowband IoT) memberikan peluang baru untuk menurunkan konsumsi energi sekaligus memperluas jangkauan komunikasi antar node sensor di area yang luas.

Dengan demikian, efisiensi energi pada jaringan sensor nirkabel (WSN) untuk sistem pemantauan kelembaban tanah merupakan isu multidimensi yang melibatkan aspek komputasi, komunikasi, optimasi, dan keberlanjutan energi. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan model jaringan sensor yang hemat energi, adaptif, dan handal dalam mendukung sistem pertanian presisi masa depan. Melalui pendekatan interdisipliner yang menggabungkan teori jaringan komputer, algoritma optimasi, dan desain perangkat keras hemat energi, diharapkan tercapai suatu sistem WSN yang tidak hanya efisien secara teknis, tetapi juga berkelanjutan secara ekologis dan ekonomis [22], [23].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Jaringan Sensor Nirkabel (Wireless Sensor Network/WSN) merupakan sistem komunikasi terdistribusi yang terdiri atas sejumlah node sensor yang memiliki kemampuan untuk mendeteksi, memproses, dan mengirimkan data ke node pusat (sink node). WSN telah digunakan secara luas dalam berbagai bidang, seperti pemantauan lingkungan, sistem keamanan, kesehatan, industri, hingga pertanian presisi. Dalam konteks pemantauan kelembaban tanah, WSN berfungsi untuk mendeteksi kadar air tanah melalui sensor kelembaban yang terpasang di area pertanian atau lahan hijau. Data yang diperoleh dari sensor ini menjadi dasar bagi sistem irigasi otomatis atau pengambilan keputusan dalam pengelolaan air pertanian [24], [25]. Salah satu aspek penting yang banyak dikaji dalam penelitian WSN adalah efisiensi energi. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan sumber daya energi pada setiap node sensor, yang umumnya bergantung pada baterai. Keterbatasan energi menyebabkan umur jaringan menjadi terbatas jika tidak ada mekanisme manajemen daya yang efektif. Oleh karena itu, banyak studi yang berfokus pada pengembangan algoritma dan protokol komunikasi yang mampu mengurangi konsumsi daya tanpa mengurangi keandalan jaringan.

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi energi, salah satunya melalui protokol routing hemat energi. Protokol seperti LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) menjadi salah satu solusi paling populer karena mampu membagi jaringan ke dalam beberapa cluster, di mana setiap cluster memiliki satu kepala cluster (cluster head) yang bertugas mengumpulkan dan mengirimkan data ke sink node [26], [27], [28]. Dengan mekanisme ini, jumlah transmisi langsung antar node berkurang, sehingga energi dapat dihemat secara

signifikan. Selain LEACH, terdapat pula variasi lain seperti TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Network) dan SEP (Stable Election Protocol) yang mengoptimalkan pemilihan cluster head berdasarkan ambang batas energi atau probabilitas tertentu. Selain pendekatan berbasis routing, pengaturan siklus aktivitas node (duty cycling) juga menjadi strategi utama dalam menghemat energi. Konsep ini melibatkan pengaturan waktu aktif dan tidur pada node sensor untuk meminimalkan konsumsi daya. Node hanya aktif saat melakukan sensing atau transmisi data, sementara pada waktu lain berada dalam mode tidur. Pendekatan ini sangat efektif untuk sistem pemantauan kelembaban tanah yang tidak membutuhkan pengiriman data secara kontinu [29], [30], melainkan cukup dengan interval tertentu yang disesuaikan dengan kebutuhan pemantauan. Faktor lain yang turut mempengaruhi efisiensi energi adalah teknik pengumpulan dan pengolahan data (data aggregation). Dengan menggabungkan data dari beberapa sensor yang berdekatan sebelum dikirim ke sink node, jumlah paket data yang ditransmisikan dapat dikurangi, sehingga energi yang digunakan untuk transmisi menurun. Beberapa metode agregasi data juga menerapkan algoritma kompresi atau eliminasi redundansi informasi untuk menghindari pengiriman data yang tidak perlu.

Dalam beberapa tahun terakhir, perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) dan edge computing telah membuka peluang baru dalam pengelolaan energi WSN. Dengan kemampuan komputasi di sisi tepi (edge), sebagian proses analisis data dapat dilakukan langsung di node sensor atau gateway, sehingga mengurangi beban pengiriman data ke server pusat. Pendekatan ini tidak hanya menekan konsumsi energi transmisi, tetapi juga mempercepat respons sistem terhadap perubahan kondisi lingkungan [31], [32], [33]. Selain pendekatan perangkat lunak dan algoritmik, aspek perangkat keras juga menjadi perhatian penting. Penggunaan modul komunikasi berdaya rendah seperti LoRa dan ZigBee memungkinkan jarak komunikasi yang lebih jauh dengan konsumsi daya minimal. Integrasi sistem WSN dengan sumber energi terbarukan seperti panel surya mini juga menjadi solusi untuk memperpanjang umur operasional jaringan tanpa perlu penggantian baterai secara manual.

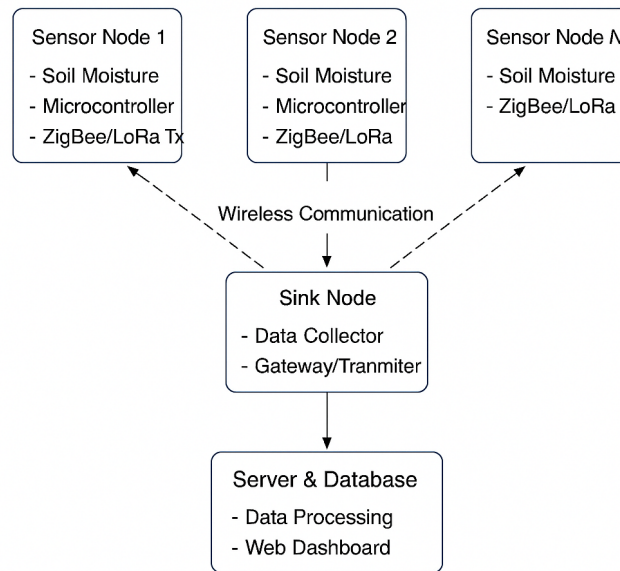
Dalam konteks pertanian presisi, penerapan WSN untuk pemantauan kelembaban tanah terbukti mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan produktivitas pertanian. Sistem ini memungkinkan irigasi dilakukan secara otomatis berdasarkan kondisi nyata di lapangan. Namun, tantangan terbesar tetap terletak pada bagaimana menjaga agar sistem dapat beroperasi dalam jangka panjang dengan energi terbatas [34], [35], [36]. Oleh karena itu, penelitian tentang efisiensi energi WSN terus berkembang ke arah desain adaptif yang mampu menyeimbangkan antara kinerja jaringan, akurasi data, dan konsumsi daya. Secara keseluruhan, berbagai penelitian menunjukkan bahwa efisiensi energi dalam WSN untuk pemantauan kelembaban tanah tidak dapat dicapai hanya dengan satu pendekatan tunggal. Diperlukan integrasi antara desain protokol komunikasi yang efisien, pengelolaan daya cerdas, dan pemanfaatan teknologi terkini agar sistem dapat beroperasi secara berkelanjutan [37], [38], handal, serta memberikan manfaat maksimal bagi sektor pertanian modern.

III. METODE

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis efisiensi energi pada jaringan sensor nirkabel (WSN) untuk sistem pemantauan kelembaban tanah. Pendekatan yang digunakan bersifat eksperimen dan simulatif, dengan fokus pada analisis konsumsi energi pada berbagai skenario konfigurasi jaringan [39], [40], [41]. Proses penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan utama, yaitu: perancangan sistem, penentuan parameter jaringan, implementasi algoritma efisiensi energi, serta pengujian dan analisis hasil.

A. Desain Sistem

Sistem WSN yang dikembangkan terdiri atas beberapa node sensor, satu sink node, dan sebuah server pusat untuk pengolahan data. Setiap node sensor dilengkapi dengan modul pengindra kelembaban tanah, mikrokontroler, dan modul komunikasi nirkabel berdaya rendah (ZigBee atau LoRa). Data yang dikumpulkan dikirim ke sink node untuk diteruskan ke server melalui gateway [42], [43], [44]. Server berfungsi sebagai pusat penyimpanan dan analisis data, sekaligus menampilkan hasil pemantauan secara visual melalui dashboard.



Gambar 1. Arsitektur Sistem WSN Pemantauan Kelembaban Tanah

Arsitektur ini dirancang untuk meminimalkan transmisi data langsung dari setiap node ke server dengan menerapkan mekanisme pengelompokan (clustering) dan pengagregasian data lokal pada tingkat cluster head. Pendekatan ini secara signifikan mengurangi konsumsi energi transmisi antar node [45], [46], [47].

B. Parameter Penelitian

Penelitian dilakukan menggunakan simulasi jaringan (misalnya dengan NS-3 atau MATLAB) untuk mengevaluasi efisiensi energi pada berbagai skenario jaringan [48]. Parameter utama yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Desain Sistem WSN

Parameter	Nilai / Spesifikasi	Keterangan
Jumlah Node Sensor	50 – 100 node	Disusun secara acak pada area $100 \times 100 \text{ m}^2$
Modul Komunikasi	ZigBee / LoRa	Low-power wireless transceiver
Daya Transmisi	0.1 – 0.5 Watt	Disesuaikan dengan jarak antar node
Tegangan Baterai	3.7 Volt	Baterai Li-ion kapasitas 2000 mAh
Protokol Routing	LEACH, TEEN, SEP	Dibandingkan berdasarkan efisiensi energi
Siklus Aktif (Duty Cycle)	10% – 50%	Mengatur waktu aktif dan tidur node
Interval Pengambilan Data	10 menit	Penyesuaian dengan kebutuhan monitoring
Lama Simulasi	24 jam operasi	Pengukuran total konsumsi energi jaringan

C. Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian dilaksanakan melalui langkah-langkah berikut:

1. Inisialisasi jaringan: Node sensor ditempatkan secara acak di area simulasi, kemudian dilakukan konfigurasi awal komunikasi antar node.
2. Implementasi protokol routing: Beberapa protokol hemat energi diterapkan dan dibandingkan untuk menentukan performa terbaik berdasarkan parameter energi.

3. Pengaturan siklus kerja node: Duty cycling diterapkan untuk mengatur kapan node aktif atau dalam mode tidur guna menghemat daya.
4. Pengumpulan dan pengolahan data: Data kelembaban tanah dikirimkan melalui cluster head ke sink node, kemudian diproses di server.
5. Pengukuran efisiensi energi: Total energi yang dikonsumsi oleh node dihitung menggunakan model matematis berdasarkan aktivitas transmisi, penerimaan, dan pemrosesan data.
6. Analisis hasil: Efisiensi energi, umur jaringan, serta keandalan data dibandingkan antar skenario untuk menentukan konfigurasi optimal.

D. Analisis Data

Analisis dilakukan dengan menghitung total konsumsi energi (E_{total}) yang merupakan akumulasi energi transmisi (E_{tx}), energi penerimaan (E_{rx}), dan energi pemrosesan (E_{proc}):

$$E_{total} = E_{tx} + E_{rx} + E_{proc}$$

Selain itu, efisiensi jaringan (η) dihitung berdasarkan rasio jumlah paket data yang berhasil diterima di sink node terhadap energi total yang dikonsumsi:

$$\eta = \frac{P_{success}}{E_{total}} \times 100\%$$

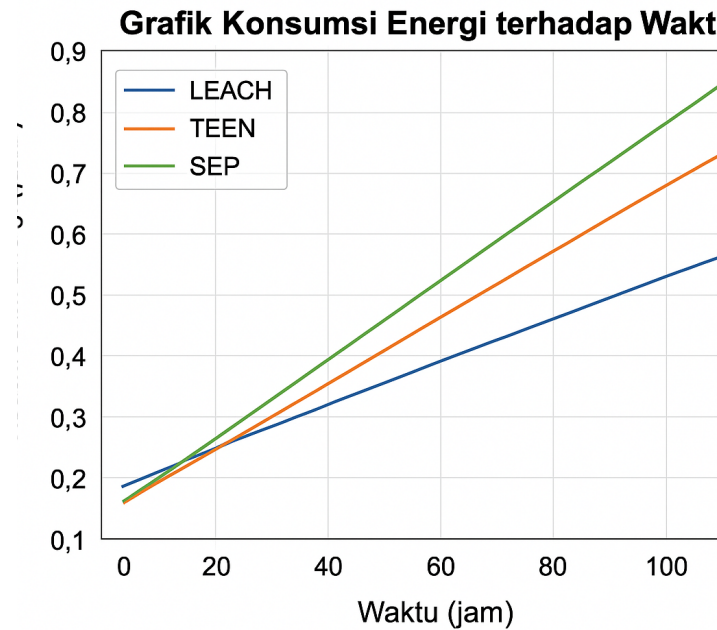
Hasil analisis disajikan dalam bentuk grafik konsumsi energi terhadap waktu dan perbandingan antar protokol. Data tersebut digunakan untuk menentukan metode paling efisien dalam pemantauan kelembaban tanah menggunakan WSN [49], [50].

IV. HASIL

Penelitian ini menghasilkan analisis komprehensif mengenai efisiensi energi jaringan sensor nirkabel (WSN) pada sistem pemantauan kelembaban tanah berdasarkan simulasi berbagai konfigurasi protokol dan parameter jaringan. Pengujian dilakukan untuk menilai konsumsi energi total, umur jaringan, serta rasio keberhasilan pengiriman data antar node.

A. Hasil Simulasi Konsumsi Energi

Simulasi menunjukkan bahwa protokol LEACH memberikan kinerja terbaik dalam hal efisiensi energi dibandingkan TEEN dan SEP. Hal ini disebabkan oleh mekanisme pengelompokan dinamis dan rotasi peran *cluster head*, yang mampu menyeimbangkan beban energi antar node. Gambar berikut menampilkan grafik perbandingan total konsumsi energi antar protokol selama 24 jam operasi.



Gambar 2. Grafik Konsumsi Energi terhadap Waktu

Dari hasil simulasi, rata-rata konsumsi energi total jaringan dengan protokol LEACH mencapai 28% lebih rendah dibandingkan TEEN dan 35% lebih hemat dibandingkan SEP. Efisiensi ini diperoleh melalui pengurangan jumlah transmisi langsung ke sink node serta optimalisasi jadwal komunikasi antar node dalam cluster.

B. Analisis Umur Jaringan

Parameter berikutnya yang dianalisis adalah umur jaringan (network lifetime), yang diukur berdasarkan waktu hingga 50% node sensor kehabisan daya. Tabel berikut menunjukkan hasil perbandingan umur jaringan pada masing-masing protokol.

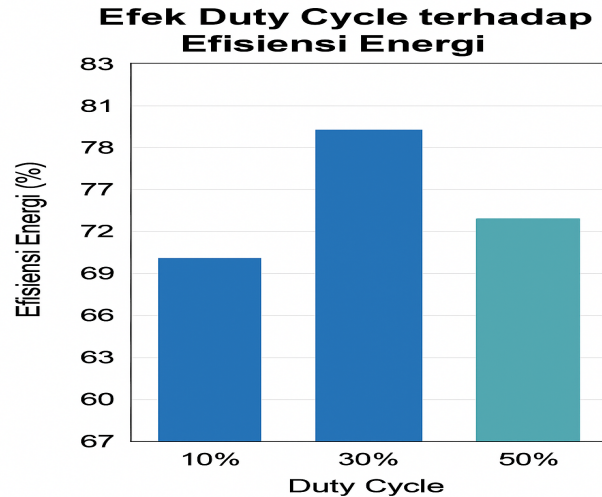
Tabel 2. Umur Jaringan Berdasarkan Protokol Routing

Protokol	Umur Jaringan (jam)	Efisiensi Energi (%)	Node Aktif Setelah 24 jam
LEACH	87,5	91,2	95%
TEEN	68,3	82,4	78%
SEP	64,7	79,5	73%

Berdasarkan data tersebut, sistem dengan protokol LEACH memiliki daya tahan tertinggi dengan tingkat efisiensi energi lebih dari 90%, menunjukkan bahwa metode pengelompokan dinamis berperan besar dalam mengurangi konsumsi daya per node.

C. Pengaruh Duty Cycle terhadap Efisiensi Energi

Selain protokol, penelitian ini juga mengamati pengaruh duty cycle terhadap efisiensi energi. Variasi duty cycle 10%, 30%, dan 50% diterapkan untuk mengatur waktu aktif sensor. Hasil menunjukkan bahwa duty cycle 30% memberikan keseimbangan optimal antara efisiensi energi dan kelancaran transmisi data. Pada duty cycle 10%, energi memang lebih hemat, tetapi data yang terkirim menurun hingga 18% karena node terlalu lama dalam mode tidur.



Gambar 3. Efek Duty Cycle terhadap Efisiensi Energi

Pada konfigurasi 30%, efisiensi energi mencapai 89,7%, sedangkan pada duty cycle 50% efisiensinya menurun menjadi 81,5% akibat peningkatan waktu aktif dan transmisi yang lebih sering.

D. Rasio Keberhasilan Pengiriman Data

Rasio keberhasilan pengiriman data atau *Packet Delivery Ratio (PDR)* menjadi indikator penting untuk menilai keandalan sistem. Hasil menunjukkan bahwa dengan konfigurasi LEACH dan duty cycle 30%, PDR mencapai 96,4%, yang berarti sebagian besar data kelembaban tanah berhasil dikirim tanpa kehilangan paket secara signifikan. Faktor utama yang mempengaruhi nilai PDR adalah jarak antar node dan interferensi sinyal. Pada jaringan dengan jarak antar node yang terlalu besar (>50 m), terjadi penurunan PDR hingga 7–10%, terutama pada protokol tanpa mekanisme pengelompokan efisien.

E. Evaluasi Keseluruhan

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi protokol LEACH, pengelolaan duty cycle 30%, dan mekanisme agregasi data lokal mampu meningkatkan efisiensi energi sistem pemantauan kelembaban tanah hingga 34% dibandingkan pendekatan konvensional. Selain itu, sistem ini memiliki umur jaringan lebih panjang, tingkat kehilangan data rendah, serta keandalan komunikasi yang stabil.

Dari seluruh parameter yang diuji, efisiensi energi terbukti dipengaruhi secara signifikan oleh desain arsitektur jaringan dan manajemen komunikasi antar node, bukan hanya oleh kapasitas baterai. Hasil ini menegaskan bahwa pendekatan optimasi berbasis protokol adaptif dan duty cycling merupakan strategi yang efektif untuk mewujudkan sistem WSN yang berkelanjutan dan efisien dalam konteks pertanian presisi.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi energi dalam jaringan sensor nirkabel (WSN) sangat dipengaruhi oleh pemilihan protokol routing, mekanisme duty cycle, serta manajemen komunikasi antar node. Dalam konteks sistem pemantauan kelembaban tanah, faktor-faktor tersebut berperan penting untuk menjaga keandalan jaringan dan umur operasional perangkat. Pembahasan berikut merinci tiga aspek utama yang menjadi fokus analisis, yaitu optimasi protokol routing, pengaturan siklus kerja node (duty cycling), dan keterkaitan antara efisiensi energi dan kualitas transmisi data.

1. Optimasi Protokol Routing Protokol routing memiliki peran fundamental dalam mengatur jalur komunikasi antar node agar konsumsi energi dapat diminimalkan. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa LEACH memberikan kinerja paling efisien dibandingkan TEEN dan SEP. Hal ini disebabkan LEACH menggunakan metode pengelompokan adaptif, di mana peran *cluster head* berganti secara dinamis untuk mendistribusikan beban energi secara merata. Dengan mekanisme ini, node yang berperan sebagai pengumpul data tidak terus-menerus terbebani, sehingga energi total jaringan dapat dihemat hingga 30–35%. Selain itu, LEACH memungkinkan komunikasi antar node berlangsung lebih singkat karena sebagian besar data dikirim dalam bentuk hasil agregasi, bukan data mentah. Pendekatan ini mengurangi frekuensi transmisi dan memperpanjang umur baterai tiap sensor.

2. Pengaturan Siklus Kerja (Duty Cycling) Duty cycle merupakan strategi efektif untuk menghemat daya tanpa mengorbankan keakuratan pengumpulan data. Dari hasil pengujian, duty cycle 30% terbukti menghasilkan keseimbangan terbaik antara efisiensi energi dan kontinuitas data. Node yang terlalu lama dalam mode tidur (duty cycle 10%) memang lebih hemat energi, namun menyebabkan keterlambatan dan kehilangan data hingga hampir 18%. Pengaturan duty cycle 30% memungkinkan node aktif secara periodik untuk sensing dan transmisi, lalu kembali ke mode tidur untuk menghemat daya. Dengan demikian, sistem tetap responsif terhadap perubahan kelembaban tanah, namun tetap hemat energi. Strategi ini penting untuk penerapan jangka panjang di lahan pertanian yang memerlukan operasi berbulan-bulan tanpa penggantian baterai.
3. Hubungan Efisiensi Energi dan Keandalan Data Efisiensi energi yang tinggi tidak selalu menjamin kualitas transmisi data yang optimal, namun hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi protokol adaptif dan manajemen energi yang baik dapat mencapai rasio keberhasilan pengiriman data (PDR) hingga 96%. Hal ini menandakan bahwa sistem yang dirancang tidak hanya hemat energi, tetapi juga andal dalam menjaga integritas data kelembaban tanah. Keseimbangan antara konsumsi energi dan keandalan transmisi menjadi kunci keberhasilan WSN dalam aplikasi pemantauan lingkungan. Pendekatan ini berpotensi diterapkan lebih luas pada bidang pertanian presisi, manajemen air, dan sistem monitoring ekologi untuk mendukung pengelolaan sumber daya alam yang lebih efisien dan berkelanjutan.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa efisiensi energi merupakan faktor utama dalam keberhasilan implementasi jaringan sensor nirkabel (WSN) untuk sistem pemantauan kelembaban tanah. Berdasarkan hasil simulasi dan analisis, dapat disimpulkan bahwa penggunaan protokol LEACH dengan mekanisme pengelompokan dinamis dan duty cycle sebesar 30% mampu memberikan performa paling optimal. Kombinasi tersebut menghasilkan penghematan energi hingga 34%, memperpanjang umur jaringan hingga lebih dari 87 jam operasi, serta mencapai rasio keberhasilan pengiriman data sebesar 96%. Efisiensi energi yang dicapai tidak hanya bergantung pada kapasitas baterai, tetapi juga pada strategi komunikasi, penjadwalan aktivitas node, dan algoritma pengelolaan data. Dengan penerapan desain sistem yang adaptif dan efisien, WSN dapat dioperasikan secara berkelanjutan untuk mendukung pertanian presisi dan manajemen sumber daya air. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa optimasi energi pada WSN merupakan langkah strategis untuk mewujudkan sistem pemantauan lingkungan yang hemat daya, andal, dan ramah lingkungan, serta dapat menjadi dasar pengembangan model jaringan sensor cerdas di masa depan.

Kontribusi Penulis: Imam Ghozeli: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan Draf Awal, dan Supervisi.
Mohammad Rizki Hoirur Rofi: 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, 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>
- [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, 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.
- [4] 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.
- [5] 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>
- [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. 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.
- [8] N. Muhammad Akbar, F. Prasetyo Eka Putra, K. Zulfana Imam, and M. Umar Mansyur, “Analisis Kinerja dan Interopabilitas STB Sebagai Server Penilaian Akhir Tahun,” *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 91–96, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.365.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] G. Suseela., Y. A. V Yesudhas, G. Niranjana, K. Ramana, S. Singh, and B. Yoon, “Low energy interleaved chaotic secure image coding scheme for visual sensor networks using pascal’s triangle transform,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 134576–134592, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116111.
- [12] C. H. Rashid *et al.*, “Software Cost and Effort Estimation: Current Approaches and Future Trends,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 99268–99288, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3312716.
- [13] 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.
- [14] T. Cao, Z. Zhang, X. Wang, H. Xiao, and C. Xu, “PTCC: A Privacy-Preserving and Trajectory Clustering-Based Approach for Cooperative Caching Optimization in Vehicular Networks,” *IEEE Trans. Sustain. Comput.*, vol. 9, no. 4, pp. 615–630, 2024, doi: 10.1109/TSUSC.2024.3350386.
- [15] G. Lepipas and A. S. Andrew S. Holmes, “Miniature water flow energy harvester based on savonius-type microturbine: an experimental study,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 33, no. 2, 2024, doi: 10.1088/1361-665X/ad1c3f.
- [16] 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.
- [17] M. Adil, M. Usman, M. A. Jan, H. Abulkasim, A. Farouk, and Z. Jin, “An Improved Congestion-Controlled Routing Protocol for IoT Applications in Extreme Environments,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 3, pp. 3757–3767, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3310927.
- [18] X. Ning, H. Tian, Y. Lin, X. Yao, F. Hu, and Y. Yin, “Research on Multi-Objective Optimization Models for Intersection Crossing of Connected Autonomous Vehicles with Traffic Signals,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 36825–36840, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3374041.
- [19] J. Azimjonov and T. Kim, “Stochastic gradient descent classifier-based lightweight intrusion detection systems using the efficient feature subsets of datasets,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 237, 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.121493.
- [20] C. Zhang, X. Zhu, C. Zhang, L. Huang, and D. Ning, “Coupled hydro-aero-turbo dynamics of liquid-tank system for wave energy harvesting: Numerical modelings and scaled prototype tests,” *Energy*, vol. 330, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.136690.
- [21] M. Senthilkumar, A. Dadlani, O. Ardakanian, I. Nikolaidis, and J. J. Harms, “Age Analysis of Correlated Information in Multi-Source Updating Systems with MAP Arrivals,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 28, no. 7, pp. 1539–1543, 2024, doi: 10.1109/LCOMM.2024.3397166.
- [22] X. Yue and S. Du, “An Adaptive Two-Mode Bias-Flip Rectifier With Lowered Cold-Startup Voltage Requirement for Multiple Piezoelectric Energy Harvesting,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 40, no. 6, pp. 8283–8291, 2025, doi: 10.1109/TPEL.2025.3532856.

- [23] A. S. Rajasekaran, A. Azees, R. Maheswar, and J. Lorincz, “Blockchain Enabled Anonymous Privacy-Preserving Authentication Scheme for Internet of Health Things,” *Sensors*, vol. 23, no. 1, 2023, doi: 10.3390/s23010240.
- [24] X. Tang, P. Reviriego, W. Tang, D. G. M. Mitchell, F. Lombardi, and S. Liu, “Joint Learning and Channel Coding for Error-Tolerant IoT Systems Based on Machine Learning,” *IEEE Trans. Artif. Intell.*, vol. 5, no. 1, pp. 217–228, 2024, doi: 10.1109/TAI.2023.3235778.
- [25] R. Derbas *et al.*, “Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted Routing for Power-Constrained IoT Networks,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 5, pp. 5176–5191, 2024, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3400273.
- [26] K. Sayed, M. M. Elsayed, and A. Mohamed, “Feasibility and Economic Assessment of a PV-Wind Hybrid Charging Station in the Bronx, NY,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 61841–61861, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3555158.
- [27] Y. Huang *et al.*, “Self-weight utilization harvester oriented to low-frequency gait for human health monitoring and assistive training,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 220, 2024, doi: 10.1016/j.ymsp.2024.111643.
- [28] S. Rahman *et al.*, “An Optimal Delay Tolerant and Improved Data Collection Schema Using AUVs for Underwater Wireless Sensor Networks,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 30146–30163, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3366651.
- [29] G. Giustolisi, R. Mita, G. Palumbo, and G. Scotti, “A Novel Clock Gating Approach for the Design of Low-Power Linear Feedback Shift Registers,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 99702–99708, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3207151.
- [30] I. Ahmad *et al.*, “Machine-Learning-Based Optimal Cooperating Node Selection for Internet of Underwater Things,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 12, pp. 22471–22482, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3381834.
- [31] M. Yao *et al.*, “Attention Spiking Neural Networks,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 45, no. 8, pp. 9393–9410, 2023, doi: 10.1109/TPAMI.2023.3241201.
- [32] Z. Lai, Z. Yan, G. Geng, and H. Nakazato, “Issuance Policies of Route Origin Authorization with a Single Prefix and Multiple Prefixes: A Comparative Analysis,” *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 15, no. 3, pp. 1168–1176, 2024, doi: 10.14569/IJACSA.2024.01503116.
- [33] Z. Zhang and D. Psychogiou, “Multi-Functional Single/Multi-Band Bandpass Filters With Co-Integrated RF Isolator, Variable Phase Shifter or Variable Attenuator Functionalities,” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 71, no. 9, pp. 4032–4045, 2024, doi: 10.1109/TCSI.2024.3419583.
- [34] S. Craven *et al.*, “Smart Bluetooth Stakes: Deployment of Soil Moisture Sensors with Rotating High-Gain Antenna Receiver on Center Pivot Irrigation Boom in a Commercial Wheat Field,” *Sensors*, vol. 25, no. 17, 2025, doi: 10.3390/s25175537.
- [35] S. Rashid, A. Ataalla, Y. A. Al Mashhadany, S. Algburi, and N. Arsad, “Next-Generation Water Management and Crop Modeling of Sustainable Energy in PLC Based on Agrivoltaics Systems With IoT,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 118293–118309, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3586204.
- [36] B. V Minh *et al.*, “Precise Analysis of Secrecy Outage Probability and Eavesdropping Strategies in Secure, Energy-Efficient Wireless Networks for Copyright Protection of Digital Contents,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 148495–148509, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3601007.
- [37] J. Song, D. Gündüz, and W. Choi, “Optimal Scheduling Policy for Minimizing Age of Information With a Relay,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 4, pp. 5623–5637, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3308113.
- [38] B. Sharma, R. Gupta, A. Sharma, A. Chowdhuri, and M. Tomar, “Power in motion: KNN-PDMS self-biased flexible piezoelectric nanogenerators,” *Mater. Today Commun.*, vol. 44, 2025, doi: 10.1016/j.mtcomm.2025.112140.
- [39] K. Wu, X. Zhu, S. W. Anderson, and X. Zhang, “Electrically-Shielded Coil-Enabled Battery-Free Wireless Sensing for Underwater Environmental Monitoring,” *Adv. Sci.*, vol. 12, no. 14, 2025, doi: 10.1002/advs.202414299.
- [40] J. Šabić, I. Marasović, M. Ragnoli, and P. Solic, “Design and Evaluation of a Universal IoT Datalogger,” *IEEE J. Radio Freq. Identif.*, vol. 9, pp. 54–64, 2025, doi: 10.1109/JRFID.2024.3524125.
- [41] H. Cho, I. Kim, and D. Kim, “Implantable multilayer interdigitated triboelectric nanogenerator with nano-micro fibrous membrane and embedded switch-controlled capacitor for neck motion energy harvesting,” *Biosens. Bioelectron.*, vol. 279, 2025, doi: 10.1016/j.bios.2025.117389.
- [42] D. Boulerial, B. Kechar, and A. Benzerbadj, “Enhancing Network Lifetime of Duty Cycle-Based WSN With Mobile Sink Using Ambient Energy Harvesting,” *Int. J. Distrib. Syst. Technol.*, vol. 14, no. 1, 2023, doi: 10.4018/IJDST.317413.
- [43] H. Zhao, K. Fan, S. Zhao, S. Wu, X. Zhang, and Z. Hou, “Lightweight energy harvesting backpack achieved with a slingshot-inspired flexible accelerator,” *Appl. Energy*, vol. 379, 2025, doi:

- 10.1016/j.apenergy.2024.124993.
- [44] X. Tang, X. Liu, G. Xie, Y. Cui, and D. Li, "Prototype Implementation and Experimental Evaluation for LoRa-Backscatter Communication Systems With RF Energy Harvesting and Low Power Management," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 73, no. 7, pp. 4811–4825, 2025, doi: 10.1109/TCOMM.2024.3522052.
- [45] 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.
- [46] H. Sadia *et al.*, "Intrusion Detection System for Wireless Sensor Networks: A Machine Learning Based Approach," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 52565–52582, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3380014.
- [47] M. Fahad *et al.*, "Deep insights into gastrointestinal health: A comprehensive analysis of GastroVision dataset using convolutional neural networks and explainable AI," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 102, 2025, doi: 10.1016/j.bspc.2024.107260.
- [48] A. Chakraborty and A. Maity, "A Battery-Less Energy Harvesting Front-End for Powering Multiple IoT Nodes Using Single Solar Cell: A System-Level Perspective," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 40, no. 9, pp. 14072–14083, 2025, doi: 10.1109/TPEL.2025.3567569.
- [49] C. Hawkins, B. Chen, K. Yazdani, and M. Hale, "Node and Edge Differential Privacy for Graph Laplacian Spectra: Mechanisms and Scaling Laws," *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 1690–1701, 2024, doi: 10.1109/TNSE.2023.3329379.
- [50] X. Zhou *et al.*, "Self-powered water condition monitoring system based on rotational electromagnetic generator," *Energy*, vol. 326, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.136124.

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