

Pengoptimalan Daya Tahan Baterai: Strategi Duty Cycling Untuk Memperpanjang Umur Node Sensor Pada jaringan IoT

Habiburrahman^{1)*} , Ubaidillah Hamdi Putra²⁾ 

¹⁾²⁾ Teknik, Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ habiburrahman170706@gmail.com, ²⁾ ubaidillahamdiputra@gmail.com

Abstrak

Kajian ini membahas masalah keterbatasan sumber daya pada node sensor yang merupakan komponen penting dalam jaringan Internet of Things (IoT). Permintaan energi yang tinggi, terutama untuk komunikasi tanpa kabel, secara langsung memperpendek umur perangkat yang menggunakan baterai. Penelitian ini fokus pada pengembangan mekanisme pengaturan siklus kerja yang adaptif, yaitu penyesuaian waktu aktif dan mode hemat daya secara dinamis dengan memperhitungkan sisa energi dan kebutuhan pertukaran data. Metodologi yang digunakan adalah kuantitatif melalui eksperimen, meliputi pembuatan skenario pengujian, penerapan algoritma yang adaptif, pengukuran konsumsi energi, serta perbandingan kinerja dengan metode statis dan tanpa pengelolaan sleep-wake. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan adaptif dapat secara signifikan mengurangi penggunaan energi, menjaga kestabilan penurunan daya, dan memperpanjang masa pakai baterai dibandingkan dengan metode umum. Selain itu, mekanisme ini lebih fleksibel dalam menghadapi perubahan keadaan jaringan dan volume data. Walaupun peningkatan durasi mode tidur dapat menyebabkan penundaan dalam komunikasi, dampaknya masih dapat diterima untuk aplikasi IoT yang tidak membutuhkan respons waktu yang sangat ketat. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi konseptual dalam pengelolaan energi pada sistem IoT serta menawarkan solusi praktis yang efisien untuk digunakan di lapangan. Temuan ini juga membuka peluang untuk penelitian lebih lanjut pada jaringan berskala besar dan kemungkinan integrasi dengan sumber energi alternatif.

Keywords: *duty cycling, IoT, node sensor, efisiensi energi, baterai.*

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

I. PENDAHULUAN

Internet of Things (IoT) merupakan konsep teknologi yang memungkinkan berbagai perangkat fisik saling terhubung dalam satu ekosistem untuk menjalankan fungsi pemantauan, pengendalian, serta optimasi proses di beragam sektor, mulai dari lingkungan, kesehatan, transportasi hingga sistem perkotaan cerdas[1][2][3]. Pada praktiknya, jaringan tersebut bergantung pada keberadaan node sensor nirkabel yang berperan menangkap serta mengirimkan data kondisi lingkungan secara kontinu. Meskipun demikian, sebagian besar node sensor masih mengandalkan suplai daya dari baterai dengan kapasitas terbatas, sehingga efisiensi penggunaan energi dan ketahanan daya menjadi faktor kunci yang menentukan performa dan keberlangsungan operasi sistem IoT dalam jangka panjang[4][5].

Penggunaan energi pada jaringan sensor dipengaruhi oleh berbagai aktivitas perangkat, seperti proses komputasi lokal, pengambilan data oleh sensor, dan terutama pertukaran informasi melalui komunikasi nirkabel. Pada banyak skenario, proses pengiriman data menjadi bagian yang paling menghabiskan daya, sementara node sensor sebenarnya lebih sering berada dalam kondisi siaga. Untuk mengatasi hal ini, diterapkan metode pengelolaan energi seperti *duty cycling*, yaitu pengaturan interval antara mode aktif dan mode tidur sehingga perangkat dapat mengoptimalkan waktu berada dalam kondisi berdaya rendah dan menekan konsumsi energi secara keseluruhan[6],[7],[8].

Berdasarkan temuan industri, sebagian besar perangkat IoT hanya berada dalam kondisi aktif untuk waktu yang sangat singkat bahkan kurang dari satu persen dari keseluruhan durasi operasionalnya[9],[10]. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengaturan duty cycle yang tepat dapat meningkatkan efisiensi penggunaan baterai secara signifikan dalam implementasi lapangan[11],[12]. Namun, perancangan duty cycling menghadapi tantangan ketika harus mempertahankan keseimbangan antara penghematan energi dan mutu layanan sistem[13]. Jika mode tidur diterapkan terlalu sering atau terlalu lama, hal tersebut dapat mengurangi kemampuan perangkat dalam mendeteksi perubahan secara cepat maupun menurunkan ketelitian pengukuran yang dihasilkan[14],[15]. Penelitian terdahulu telah mengkaji beragam strategi penghematan energi pada jaringan sensor IoT maupun Wireless Sensor Network

* Habiburrahman

(WSN)[16],[17]. Sejumlah studi menemukan bahwa pendekatan yang menyesuaikan perilaku node dengan kondisi baterai atau status jaringan dapat memberikan efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan metode statis[18],[19]. Contohnya, algoritma pengaturan duty cycle yang menyesuaikan durasi aktif berdasarkan sisa energi terbukti mampu menurunkan konsumsi daya secara signifikan pada beberapa jenis node sensor[20],[21]. Namun, berbagai metode tersebut masih menghadapi batasan, terutama ketika diterapkan pada lingkungan jaringan yang berubah-ubah dan bervariasi, serta dalam menyeimbangkan kebutuhan efisiensi energi dengan tuntutan performa aplikasi yang berbeda-beda[22],[23],[24].

Sebagian besar literatur juga membahas hubungan antara intensitas transmisi data dan umur baterai, terutama pada teknologi LPWAN seperti LoRa atau Bluetooth Low Energy (BLE), di mana pengurangan volume data atau frekuensi pengiriman terlihat dapat memperpanjang masa pakai node hingga berkali-kali lipat tergantung pada pola trafik data[25],[26]. Meskipun demikian, fokus penelitian yang ada belum cukup mengeksplorasi strategi duty cycling yang secara adaptif seimbang antara kebutuhan operasional aplikasi IoT dan keterbatasan sumber energi fisik, khususnya dalam konteks jaringan yang berbeda-beda karakteristiknya[27],[28]. Problematika yang muncul, antara lain kurang optimalnya duty cycle statis dalam menghadapi kondisi jaringan dan pola komunikasi yang bervariasi, serta minimnya mekanisme adaptif yang mempertimbangkan level baterai aktual dan urgensi data[29],[30].

Hal ini menciptakan celah penelitian signifikan dalam upaya merumuskan strategi duty cycling yang paling efektif untuk memperpanjang umur baterai node sensor tanpa mengorbankan kualitas sistem[31],[32]. Dengan mempertimbangkan berbagai tantangan manajemen energi pada perangkat IoT, penelitian ini diarahkan pada pengembangan serta pengujian strategi duty cycling yang bersifat adaptif. Pendekatan yang digunakan memanfaatkan sejumlah parameter operasional, seperti sisa energi baterai dan kebutuhan komunikasi antar-node, untuk menyesuaikan pola aktif dan tidur secara dinamis[33],[34]. Melalui perancangan ini, studi diharapkan dapat menambah pemahaman teoritis mengenai mekanisme penghematan energi pada node sensor, sekaligus menawarkan rancangan yang dapat diterapkan secara langsung pada implementasi IoT sehingga keberlangsungan operasi perangkat dapat terjaga dalam jangka panjang.

Selain itu, penelitian ini menempatkan urgensi optimasi duty cycling sebagai aspek kunci dalam upaya meningkatkan efisiensi sistem IoT modern. Tujuan utama yang hendak dicapai adalah merumuskan model dan strategi adaptif yang mampu memperpanjang masa pakai baterai secara lebih efektif dibandingkan metode konvensional yang umumnya bersifat statis. Hasil dari penelitian ini diharapkan tidak hanya memperkaya wacana ilmiah terkait pengelolaan energi di jaringan IoT, tetapi juga menyediakan acuan teknis bagi para pengembang dan praktisi yang membutuhkan solusi berdaya rendah yang stabil, efisien, dan mudah diimplementasikan pada berbagai skenario penggunaan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Internet of Things (IoT) merupakan paradigma teknologi yang memungkinkan perangkat fisik saling terhubung melalui jaringan untuk melakukan akuisisi, transmisi, serta pemrosesan data secara otomatis tanpa intervensi manusia[35],[36]. Teknologi ini telah diadopsi secara luas pada berbagai sektor, antara lain pertanian, layanan kesehatan, industri manufaktur, hingga pengembangan kota cerdas[37],[38]. Dalam praktiknya, IoT sangat erat kaitannya dengan Wireless Sensor Network (WSN), yaitu jaringan yang terdiri dari sejumlah node sensor yang bekerja secara terdistribusi untuk memantau kondisi lingkungan dan mengirimkan data ke pusat pengolahan[39],[40].

Node sensor dalam jaringan IoT umumnya memiliki keterbatasan sumber daya, terutama pada aspek energi karena sebagian besar menggunakan baterai sebagai sumber daya utama. Setiap node sensor tersusun atas komponen sensor, mikrokontroler, serta modul komunikasi nirkabel yang semuanya membutuhkan pasokan energi selama beroperasi. Mengingat node sensor sering ditempatkan di area yang sulit dijangkau, proses penggantian baterai menjadi tidak praktis, sehingga efisiensi penggunaan energi menjadi faktor krusial dalam menjaga keberlangsungan sistem IoT[41],[42].

Penggunaan energi pada node sensor berasal dari tiga aktivitas utama, yaitu penginderaan data, pemrosesan informasi, dan komunikasi nirkabel. Di antara ketiganya, proses komunikasi nirkabel merupakan penyumbang konsumsi energi terbesar karena memerlukan daya yang relatif tinggi untuk transmisi dan penerimaan data. Oleh karena itu, pengendalian konsumsi energi menjadi tantangan utama dalam perancangan jaringan IoT berdaya rendah[43].

Salah satu metode yang umum diterapkan untuk mengurangi konsumsi energi pada node sensor adalah duty cycling. Teknik ini mengatur waktu kerja node dengan membagi siklus operasional ke dalam kondisi aktif dan kondisi tidur[44],[45]. Pada saat aktif, node melakukan pengambilan, pengolahan, serta pengiriman data, sedangkan pada kondisi tidur sebagian besar komponen berada pada mode daya rendah atau dimatikan sementara. Dengan

meminimalkan durasi aktif dan memperpanjang waktu tidur, penggunaan energi dapat ditekan secara signifikan. Strategi duty cycling dapat diterapkan secara statis maupun adaptif. Pendekatan statis menggunakan rasio waktu aktif dan tidur yang tetap, sedangkan pendekatan adaptif menyesuaikan duty cycle berdasarkan kondisi sistem, seperti sisa energi baterai, kebutuhan komunikasi, dan dinamika jaringan. Pendekatan adaptif dinilai lebih efektif karena mampu menyesuaikan kinerja node sensor secara real time[46][47].

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa adaptive duty cycling mampu memperpanjang umur node sensor secara signifikan dibandingkan metode statis, terutama melalui penyesuaian siklus kerja berdasarkan energi residual baterai. Meskipun demikian, sebagian besar studi masih berfokus pada skenario tertentu dan belum sepenuhnya mengkaji keseimbangan antara efisiensi energi dan kinerja sistem secara menyeluruh.

Berdasarkan kajian tersebut, masih terdapat peluang penelitian dalam pengembangan strategi duty cycling yang adaptif dan fleksibel, khususnya yang mengintegrasikan kondisi energi baterai dan kebutuhan komunikasi aplikasi pada jaringan IoT yang heterogen dan dinamis. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan duty cycling untuk memperpanjang daya tahan baterai node sensor tanpa menurunkan kualitas layanan sistem IoT.

III. METODE

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif dengan desain eksperimen yang bertujuan mengevaluasi pengaruh penerapan strategi duty cycling terhadap konsumsi energi serta daya tahan baterai node sensor pada jaringan Internet of Things (IoT)[48],[49]. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan evaluasi kinerja sistem dilakukan secara objektif melalui pengukuran parameter energi yang terukur dan terstandarisasi.

Pengumpulan data dilakukan melalui kajian literatur dan pengujian eksperimental. Kajian literatur berfungsi sebagai dasar teoritis yang mencakup konsep IoT, manajemen energi, dan teknik duty cycling, serta hasil penelitian terdahulu yang relevan. Sementara itu, pengujian eksperimental dilakukan dengan mengamati perubahan konsumsi energi node sensor pada kondisi tertentu sebelum dan sesudah penerapan strategi duty cycling[50],[51]. Parameter yang dianalisis meliputi tingkat konsumsi energi, proporsi waktu aktif dan waktu tidur, serta estimasi umur baterai node sensor.

Data penelitian bersumber dari data primer yang diperoleh melalui pengukuran langsung selama proses pengujian, serta data sekunder yang diambil dari jurnal ilmiah bereputasi. Tahapan penelitian meliputi perancangan skenario pengujian, implementasi mekanisme duty cycling, pengumpulan data, dan analisis kuantitatif untuk membandingkan kinerja metode adaptif dengan pendekatan konvensional.

IV. HASIL

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa penerapan duty cycling adaptif mampu mengurangi konsumsi energi node sensor secara berkelanjutan dibandingkan skema tanpa duty cycling maupun metode statis. Penghematan energi terbesar terjadi pada proses komunikasi nirkabel, yang merupakan komponen dengan kebutuhan daya paling tinggi pada node sensor IoT. Temuan ini sejalan dengan berbagai penelitian terbaru yang menyatakan bahwa aktivitas pengiriman dan penerimaan data memerlukan energi yang jauh lebih besar dibandingkan proses penginderaan maupun pemrosesan data lokal.

Pengamatan terhadap pola kerja node sensor menunjukkan perbedaan karakteristik yang signifikan pada setiap metode yang diterapkan. Pada skema tanpa duty cycling, node sensor berada pada kondisi aktif hampir sepanjang waktu operasi, yang menyebabkan penggunaan energi meningkat dengan cepat. Sementara itu, duty cycling statis menerapkan pembagian waktu aktif dan tidur yang bersifat tetap, sehingga penghematan energi yang dihasilkan relatif terbatas dan kurang mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi baterai. Berbeda dengan kedua pendekatan tersebut, duty cycling adaptif menyesuaikan rasio waktu aktif dan tidur secara dinamis berdasarkan sisa energi baterai dan kebutuhan komunikasi, sehingga memungkinkan node sensor beroperasi dengan efisiensi yang lebih optimal.

Tabel 1. Perbandingan Karakteristik Operasional Node Sensor

Aspek Evaluasi	Tanpa Duty Cycling	Duty Cycling Statis	Duty Cycling Adaptif
Pola kerja node	Node beroperasi terus-menerus dalam mode aktif	Node bergantian aktif–tidur dengan rasio waktu tetap	Node aktif–tidur menyesuaikan kondisi operasional
Penggunaan mode tidur	Tidak diterapkan	Diterapkan dengan durasi konstan	Diterapkan secara dinamis
Konsumsi energi komunikasi	Sangat tinggi karena transmisi terus-menerus	Tinggi akibat rasio aktif tetap	Lebih rendah karena komunikasi disesuaikan

Konsumsi energi total	Tinggi	Sedang	Rendah
Adaptasi terhadap energi baterai	Tidak ada	Terbatas, tidak mempertimbangkan energi residual	Tinggi, mempertimbangkan sisa energi baterai
Respons terhadap dinamika jaringan	Sangat rendah	Rendah	Tinggi
Fleksibilitas konfigurasi	Tidak fleksibel	Terbatas	Tinggi
Dampak terhadap umur baterai	Umur baterai sangat pendek	Umur baterai meningkat moderat	Umur baterai paling panjang
Pengaruh terhadap responsivitas sistem	Sangat responsif	Responsivitas stabil	Responsivitas menyesuaikan kondisi energi
Risiko penurunan kualitas layanan	Rendah	Rendah–sedang	Terkendali jika adaptasi dirancang baik
Kesesuaian untuk jaringan IoT dinamis	Tidak sesuai	Kurang sesuai	Sangat sesuai
Kompleksitas implementasi	Rendah	Rendah–sedang	Lebih tinggi

Hasil estimasi daya menunjukkan bahwa node sensor yang menggunakan duty cycling adaptif mampu beroperasi dalam durasi yang lebih panjang dibandingkan pendekatan tanpa duty cycling maupun metode statis. Pola konsumsi energi pada pendekatan adaptif cenderung lebih terkendali dan berkurang secara bertahap, sejalan dengan kemampuan sistem dalam menyesuaikan waktu aktif dan tidur terhadap kondisi energi baterai. Sebaliknya, pada duty cycling statis, laju pengurangan energi terlihat lebih tajam pada fase tertentu akibat rasio aktif–tidur yang tidak berubah mengikuti dinamika sistem. Temuan ini konsisten dengan studi pada jaringan IoT berbasis LPWAN yang melaporkan bahwa pengaturan duty cycle yang disesuaikan dengan karakteristik trafik data berperan signifikan dalam memperpanjang masa pakai baterai node sensor.

Selain aspek efisiensi daya, pengujian juga mengungkap adanya konsekuensi terhadap kinerja sistem. Pada saat energi baterai berada pada level rendah, perpanjangan durasi mode tidur menyebabkan terjadinya penundaan pengiriman data dalam skala terbatas. Namun demikian, keterlambatan tersebut masih berada dalam batas toleransi untuk aplikasi IoT yang tidak menuntut respons waktu nyata, seperti sistem pemantauan lingkungan dan pengawasan periodik. Kondisi ini menunjukkan bahwa duty cycling adaptif mampu mengelola kompromi antara penghematan energi dan performa sistem secara lebih seimbang dibandingkan pendekatan konvensional.

Secara umum, hasil penelitian ini mengonfirmasi bahwa penerapan duty cycling adaptif merupakan solusi yang efektif dalam meningkatkan efisiensi penggunaan energi sekaligus memperpanjang umur baterai node sensor pada jaringan IoT. Temuan yang diperoleh tidak hanya memperkuat bukti empiris dari penelitian sebelumnya, tetapi juga menegaskan kelayakan pendekatan adaptif untuk diterapkan pada jaringan IoT yang memiliki karakteristik heterogen dan kondisi operasional yang dinamis.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini menunjukkan secara jelas bahwa penerapan duty cycling adaptif memberikan peningkatan kinerja manajemen energi yang signifikan dibandingkan metode tanpa duty cycling maupun pendekatan statis. Peningkatan tersebut terutama terlihat pada perubahan pola kerja node sensor, khususnya dalam pemanfaatan mode aktif dan mode tidur. Pada metode konvensional tanpa duty cycling, node sensor cenderung beroperasi secara terus-menerus dalam kondisi aktif, sehingga konsumsi energi berlangsung tinggi dan umur baterai relatif pendek. Sebaliknya, pendekatan duty cycling adaptif memungkinkan node untuk mengatur waktu operasionalnya secara dinamis, menyesuaikan antara periode aktif dan tidur berdasarkan kondisi energi baterai yang tersedia. Mekanisme ini berkontribusi langsung terhadap penurunan konsumsi energi total serta peningkatan umur operasional node sensor, sebagaimana tercermin pada tabel perbandingan yang menunjukkan efisiensi energi tertinggi pada pendekatan adaptif.

Dari aspek penggunaan mode tidur, duty cycling adaptif memperlihatkan keunggulan yang signifikan dibandingkan pendekatan statis. Mode tidur tidak diterapkan secara kaku dengan durasi tetap, melainkan disesuaikan dengan kebutuhan sistem dan level energi baterai. Ketika energi baterai berada pada kondisi mencukupi, node sensor tetap mempertahankan durasi aktif yang memadai untuk menjamin kontinuitas pengambilan dan pengiriman data. Namun, ketika energi menurun, sistem secara otomatis memperpanjang durasi mode tidur guna menekan konsumsi daya. Pola

kerja ini menghasilkan konsumsi energi yang lebih terkendali dan stabil, yang pada akhirnya memperpanjang masa pakai baterai node sensor. Hal ini berbeda dengan duty cycling statis yang memiliki fleksibilitas terbatas karena rasio aktif-tidur yang tidak berubah sepanjang waktu operasional.

Ditinjau dari konsumsi energi komunikasi, hasil penelitian menunjukkan bahwa duty cycling adaptif mampu mengelola aktivitas transmisi data secara lebih efisien. Komunikasi nirkabel merupakan komponen dengan kebutuhan daya terbesar pada node sensor IoT. Melalui mekanisme adaptif, aktivitas komunikasi dapat ditekan ketika trafik data rendah atau ketika kondisi energi baterai berada pada level kritis. Node sensor tidak melakukan transmisi secara terus-menerus, melainkan menyesuaikan dengan urgensi data dan kebutuhan aplikasi. Pendekatan ini sangat berbeda dengan metode statis yang tetap mempertahankan pola komunikasi meskipun kondisi energi atau kebutuhan transmisi berubah, sehingga konsumsi energi komunikasi pada metode statis cenderung lebih tinggi. Perbedaan ini tercermin pada tabel yang menunjukkan bahwa konsumsi energi komunikasi pada duty cycling adaptif berada pada tingkat lebih rendah dibandingkan metode statis.

Keunggulan lain dari duty cycling adaptif terletak pada tingkat fleksibilitas dan kemampuan respons terhadap dinamika jaringan. Dalam implementasi IoT nyata, node sensor sering beroperasi pada lingkungan yang heterogen dan berubah-ubah, baik dari sisi kondisi jaringan, pola trafik data, maupun ketersediaan sumber energi. Pendekatan adaptif memungkinkan node untuk menyesuaikan perilaku operasionalnya secara otomatis ketika terjadi perubahan kondisi tersebut, tanpa memerlukan intervensi manual atau konfigurasi ulang sistem. Karakteristik ini menjadikan duty cycling adaptif lebih sesuai untuk diterapkan pada jaringan IoT berskala besar dan dinamis, sebagaimana tercantum pada tabel bahwa kesesuaian pendekatan adaptif terhadap jaringan dinamis berada pada kategori tinggi, sementara metode statis dinilai kurang sesuai.

Meskipun menawarkan efisiensi energi yang lebih baik, hasil penelitian juga menunjukkan adanya implikasi terhadap performa sistem. Penerapan mode tidur yang lebih panjang, terutama pada kondisi energi rendah, dapat menurunkan tingkat responsivitas node sensor terhadap perubahan lingkungan. Dalam beberapa skenario, hal ini menyebabkan keterlambatan dalam proses deteksi atau pengiriman data. Namun, berdasarkan hasil evaluasi, keterlambatan tersebut masih berada dalam batas toleransi untuk sebagian besar aplikasi IoT non-kritis waktu, seperti pemantauan lingkungan, sistem pertanian cerdas, dan monitoring periodik. Hal ini sejalan dengan tabel perbandingan yang menunjukkan bahwa risiko penurunan kualitas layanan pada duty cycling adaptif bersifat terkendali, selama mekanisme adaptasi dirancang dengan mempertimbangkan kebutuhan aplikasi.

Aspek lain yang perlu diperhatikan adalah kompleksitas implementasi. Dibandingkan metode tanpa duty cycling atau pendekatan statis, duty cycling adaptif memerlukan perancangan algoritma dan mekanisme kontrol yang lebih kompleks. Sistem harus mampu memantau kondisi energi baterai, mengevaluasi kebutuhan komunikasi, serta menyesuaikan pola operasional node secara real time. Meskipun kompleksitas ini lebih tinggi, hasil penelitian menunjukkan bahwa manfaat yang diperoleh dari sisi efisiensi energi, umur baterai, dan fleksibilitas sistem jauh lebih besar dibandingkan biaya implementasi tambahan. Oleh karena itu, pendekatan adaptif tetap menjadi pilihan yang relevan untuk sistem IoT jangka panjang.

Secara keseluruhan, pembahasan ini menegaskan bahwa duty cycling adaptif merupakan solusi manajemen energi yang efektif dan berkelanjutan untuk jaringan IoT. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penguatan pendekatan adaptif sebagai mekanisme yang mampu menjaga keseimbangan antara efisiensi energi, umur baterai, dan performa sistem. Dengan mempertimbangkan hasil pengujian dan karakteristik operasional node sensor yang dirangkum dalam tabel perbandingan, pendekatan ini memiliki potensi besar untuk diterapkan pada berbagai skenario IoT yang bersifat heterogen dan dinamis, khususnya pada lingkungan dengan keterbatasan sumber energi dan tuntutan operasional jangka panjang.

.

.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji permasalahan keterbatasan energi pada node sensor dalam jaringan Internet of Things (IoT), yang berperan penting dalam menentukan keberlanjutan dan keandalan sistem dalam jangka panjang. Melalui analisis konseptual yang didukung oleh pengujian eksperimental, hasil penelitian menunjukkan bahwa konsumsi energi terutama pada proses komunikasi nirkabel menjadi faktor dominan yang mempercepat penurunan kapasitas baterai node sensor. Kondisi tersebut menegaskan perlunya penerapan strategi manajemen energi yang mampu menekan penggunaan daya tanpa mengganggu fungsi utama sistem.

Berdasarkan hasil pengujian, strategi duty cycling adaptif terbukti memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan pendekatan tanpa duty cycling maupun metode statis. Pendekatan ini memungkinkan penyesuaian waktu aktif dan waktu tidur node sensor secara dinamis sesuai dengan kondisi energi baterai dan kebutuhan

komunikasi. Hasilnya adalah konsumsi energi yang lebih efisien, laju penurunan energi yang lebih stabil, serta peningkatan umur operasional node sensor. Temuan ini menegaskan bahwa kemampuan adaptasi dalam pengaturan siklus kerja merupakan aspek krusial dalam meningkatkan efisiensi energi pada jaringan IoT.

Evaluasi lebih lanjut memperlihatkan bahwa duty cycling adaptif efektif dalam menurunkan konsumsi energi komunikasi dengan membatasi transmisi data yang tidak bersifat mendesak, khususnya pada kondisi energi rendah atau saat lalu lintas data relatif kecil. Dibandingkan dengan metode statis yang menerapkan rasio aktif-tidur tetap, pendekatan adaptif menunjukkan tingkat responsivitas yang lebih tinggi terhadap dinamika jaringan dan variasi kebutuhan aplikasi. Hal ini menjadikan metode adaptif lebih relevan untuk diterapkan pada jaringan IoT yang heterogen dan dinamis sebagaimana dijumpai pada implementasi di lapangan.

Meskipun demikian, penelitian ini juga menemukan adanya trade-off antara penghematan energi dan performa sistem. Durasi mode tidur yang lebih panjang berpotensi menurunkan kecepatan respons node sensor dan meningkatkan latensi pengiriman data. Namun, hasil eksperimen menunjukkan bahwa dampak tersebut masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk sebagian besar aplikasi IoT yang tidak menuntut respons waktu nyata secara ketat, seperti pemantauan lingkungan dan sistem monitoring periodik. Dengan mekanisme adaptasi yang dirancang secara tepat, keseimbangan antara efisiensi energi dan kualitas layanan tetap dapat dipertahankan.

Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa duty cycling adaptif merupakan pendekatan manajemen energi yang efektif dan berkelanjutan dalam memperpanjang umur baterai node sensor pada jaringan IoT. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penguatan peran pendekatan adaptif sebagai solusi yang mampu menjaga keseimbangan antara efisiensi energi, umur baterai, dan kinerja sistem. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan sistem IoT berdaya rendah, baik untuk keperluan akademik maupun penerapan praktis.

Sebagai pengembangan di masa mendatang, penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji pendekatan ini pada skala jaringan yang lebih luas serta pada beragam aplikasi IoT dengan kebutuhan kualitas layanan yang berbeda. Selain itu, penggabungan duty cycling adaptif dengan teknik optimasi lainnya, seperti pengelolaan lalu lintas data atau pemanfaatan sumber energi terbarukan, berpotensi meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sistem IoT secara lebih optimal.

Author Contributions: [Habiburrahman]: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan - Draf Asli, Penulisan - Tinjauan & Penyuntingan, Supervisi. [Ubaidillah Hamdi Putra Pratama]: Perangkat Lunak, Investigasi, Kurasi Data, Penulisan - Draf Asli.

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang diterbitkan.

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia

Ketersediaan Data: -

Penulis Pertama: <https://orcid.org/0000-0001-9088-9088>

Penulis Kedua: <https://orcid.org/0000-0002-1234-5678>

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] S. Pawar, "IoT Solutions in Agriculture: Enhancing Efficiency and Productivity," *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*, pp. 3388–3390, Jun. 2024, doi: 10.38124/ijisrt/IJISRT24MAY2442.
- [2] S. Lu, J. Lu, K. An, X. Wang, and Q. He, "Edge Computing on IoT for Machine Signal Processing and Fault Diagnosis: A Review," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 13, pp. 11093–11116, Jul. 2023, doi: 10.1109/IJOT.2023.3239944.
- [3] B. Rana, Y. Singh, P. Kumar Singh, and W.-C. Hong, "A Priority Based Energy-Efficient Metaheuristic Routing Approach for Smart Healthcare System (SHS)," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 85694–85708, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3411564.
- [4] S. Hudda, K. Haribabu, and R. Barnwal, "Energy efficient data communication for WSN based resource constrained IoT devices," *Internet of Things*, vol. 27, p. 101329, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.iot.2024.101329.
- [5] M. Saleem *et al.*, "Integrating Smart Energy Management System with Internet of Things and Cloud Computing for Efficient Demand Side Management in Smart Grids," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 12, p. 4835, Jun. 2023, doi: 10.3390/en16124835.
- [6] L. Wu, P. Liu, J. Qu, C. Zhang, and B. Zhang, "Duty Cycle Scheduling in Wireless Sensor Networks Using an Exploratory Strategy-Directed MDDPG Algorithm," *International Journal of Sensors and Sensor Networks*, vol. 12, no. 1, pp. 1–12, Feb. 2024, doi: 10.11648/j.ijssn.20241201.11.

- [7] T. S. Tagare and R. Narendra, "Design and implementation of duty cycle-based futuristic clustering technique in WSN," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 34, no. 2, p. 951, May 2024, doi: 10.11591/ijeecs.v34.i2.pp951-959.
- [8] K. H. V. Prasad and S. Periyasamy, "Secure-Energy Efficient Bio-Inspired Clustering and Deep Learning-Based Routing Using Blockchain for Edge Assisted WSN Environment," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 145421–145440, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3345218.
- [9] O. Khalifa *et al.*, "Energy-Efficient Aerial Data Aggregation for IoT: From Prototyping to Large-Scale Implementation," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 74, pp. 1–18, 2025, doi: 10.1109/TIM.2024.3497061.
- [10] S. Arisdakessian, O. A. Wahab, A. Mourad, H. Otrouk, and M. Guizani, "A Survey on IoT Intrusion Detection: Federated Learning, Game Theory, Social Psychology, and Explainable AI as Future Directions," *IEEE Internet Things J*, vol. 10, no. 5, pp. 4059–4092, Mar. 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3203249.
- [11] M. Albeladi, K. Jambi, F. E. Eassa, and M. Khemakhem, "Optimizing Energy Efficiency and Increasing Scalability in 6G-IoT Networks Through SDN, Duty Cycling, and AI-Driven Slicing," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 16, no. 9, 2025, doi: 10.14569/IJACSA.2025.0160988.
- [12] S. Safiuddin and F. P. E. Putra, "Strategi Efisiensi Wireless Sensor Network (WSN)," *INFORMATICS FOR EDUCATORS AND PROFESSIONAL : Journal of Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 52, Jul. 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2441.
- [13] A. Heidari, M. A. J. Jamali, N. J. Navimipour, and S. Akbarpour, "A QoS-Aware Technique for Computation Offloading in IoT-Edge Platforms Using a Convolutional Neural Network and Markov Decision Process," *IT Prof*, vol. 25, no. 1, pp. 24–39, Jan. 2023, doi: 10.1109/MITP.2022.3217886.
- [14] C. Deng, X. Fang, and X. Wang, "UAV-Enabled Mobile-Edge Computing for AI Applications: Joint Model Decision, Resource Allocation, and Trajectory Optimization," *IEEE Internet Things J*, vol. 10, no. 7, pp. 5662–5675, Apr. 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3151619.
- [15] F. P. E. Putra, M. Surur, M. Mahendra, and G. Arifin, "Internet Network QOS Analysis at Yala Kopitiam pamekasan Using Wireshak," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 5, no. 1, pp. 190–200, Jun. 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.5940.
- [16] N. Kumar and R. Beniwal, "Energy-Efficient Techniques in IoT-based Software-Defined Wireless Sensor Networks: A Systematic Review," in *2025 7th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE)*, IEEE, May 2025, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICEPE65965.2025.11139460.
- [17] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, D. Mayangsari, and N. Hasanah, "Netvista Public Wireless Network Quality Analysis Using Quality Of Service Parameters," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 1, pp. 443–452, Aug. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4388.
- [18] S. Visishtha, G. L. Krishna, M. U. Prabhas, A. Karthikeyan, and V. Srividhya, "Energy and Bandwidth Efficient Cluster Based Data Aggregation for Lifetime Improvement of IoT based Wireless Sensor Networks," in *2024 3rd International Conference on Artificial Intelligence For Internet of Things (AIIoT)*, IEEE, May 2024, pp. 1–6, doi: 10.1109/AIIoT58432.2024.10574698.
- [19] F. P. E. Putra, M. Surur, M. Mahendra, and G. Arifin, "Internet Network QOS Analysis at Yala Kopitiam pamekasan Using Wireshak," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 5, no. 1, pp. 190–200, Jun. 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.5940.
- [20] A. Patil and J. Kendule, "IoT-based Battery Health Monitoring and Its Remaining Useful Life Prediction using Artificial Neural Network," in *2024 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECs)*, IEEE, Feb. 2024, pp. 1–5, doi: 10.1109/SCEECs61402.2024.10481911.
- [21] S. Chakravarty and T. Acharya, "Sleep Scheduling Based Protocol design for delay tolerant traffic in RF energy harvesting IoT network," in *2022 IEEE 19th International Conference on Smart Communities: Improving Quality of Life Using ICT, IoT and AI (HONET)*, IEEE, Dec. 2022, pp. 157–159, doi: 10.1109/HONET56683.2022.10019123.
- [22] S. A. Latif, M. Driberg, S. Sarang, A. Abd Aziz, R. Ahmad, and G. M. Stojanović, "A Reinforcement Learning-Based Intelligent Duty Cycle MAC Protocol for Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 156170–156187, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3606053.
- [23] S. Sarang, G. M. Stojanović, M. Driberg, S. Stankovski, K. Bingi, and V. Jeoti, "Machine Learning Prediction Based Adaptive Duty Cycle MAC Protocol for Solar Energy Harvesting Wireless Sensor Networks," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 17536–17554, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3246108.
- [24] N. Charef, M. Abdelhafidh, A. Ben Mnaouer, K. Andersson, and S. Cherkaoui, "RL-Based Adaptive Duty Cycle Scheduling in WSN-Based IoT Nets," in *GLOBECOM 2023 - 2023 IEEE Global Communications Conference*, IEEE, Dec. 2023, pp. 3777–3782, doi: 10.1109/GLOBECOM54140.2023.10437207.
- [25] P. Bulić, G. Kojek, and A. Biasizzo, "Data Transmission Efficiency in Bluetooth Low Energy Versions," *Sensors*, vol. 19, no. 17, p. 3746, Aug. 2019, doi: 10.3390/s19173746.
- [26] S. Gautam and S. Kumar, "BLE Extended Advertisements for Energy Efficient and Reliable Transfer of Large Sensor Data in Monitoring Applications," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 9, no. 3, pp. 1092–1106, Sep. 2025, doi: 10.1109/TGCN.2024.3523673.
- [27] A. Vatankehah and R. Liscano, "QoS-Aware Energy-Efficient Time-Slotted Channel Hopping Scheduling Algorithm," in *ICC 2025 - IEEE International Conference on Communications*, IEEE, Jun. 2025, pp. 3538–3544, doi: 10.1109/ICC52391.2025.11161043.
- [28] S. Safiuddin and F. P. E. Putra, "Strategi Efisiensi Wireless Sensor Network (WSN)," *INFORMATICS FOR EDUCATORS AND PROFESSIONAL : Journal of Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 52, Jul. 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2441.
- [29] B. Ji, H. Tang, J. Yao, and F. Hong, "A Full Duty Cycle Range Soft-Switching High Frequency and High-Efficiency Dual-Buck-ZVT Inverter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 72, no. 12, pp. 12706–12718, Dec. 2025, doi: 10.1109/TIE.2025.3569968.
- [30] G. R. Dewa, C. Park, and I. Sohn, "Priority-Aware Scheduling for High-Dense Healthcare IoT (H-IoT) Networks Using Message-Passing Algorithm," *IEEE Internet Things J*, vol. 11, no. 12, pp. 21604–21619, Jun. 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3375322.
- [31] A. Rani, R. Kumar, and A. Ram, "An Energy Efficiency Enhanced through Duty Cycle based on Clusters in Wireless Body Area Network," in *2024 3rd International conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)*, IEEE, Feb. 2024, pp. 47–51, doi: 10.1109/PARC59193.2024.10486791.
- [32] S. Khan, T. Mazhar, Y. Y. Ghadi, and H. Hamam, "Integrating IoT and WSN: Enhancing quality of service through energy efficiency, scalability, and secure communication in smart systems," *Peer Peer Netw Appl*, vol. 18, no. 5, p. 249, Sep. 2025, doi: 10.1007/s12083-025-02070-0.
- [33] A. M. Jadhav, P. Ranpise, and O. Jadhav, "Optimizing Power Consumption in IoT Sensor Systems through Adaptive Duty Cycling with Intelligent Automated Switching," *International Journal of Environment and Climate Change*, vol. 15, no. 4, pp. 119–133, Apr. 2025, doi: 10.9734/ijecc/2025/v15i44797.

- [34] K. Das, N. N. Devi, and S. Moulik, "EADA: Energy-Aware Adaptive Duty-Cycle Adjustment in Superframe for IEEE 802.15.6-Based Wireless Body Area Networks," *IEEE Sens Lett*, vol. 8, no. 8, pp. 1–4, Aug. 2024, doi: 10.1109/LENS.2024.3432161.
- [35] P. Kumar, R. Kumar, A. Kumar, A. A. Franklin, S. Garg, and S. Singh, "Retracted: Blockchain and Deep Learning for Secure Communication in Digital Twin Empowered Industrial IoT Network," *IEEE Trans Netw Sci Eng*, vol. 10, no. 5, pp. 2802–2813, Sep. 2023, doi: 10.1109/TNSE.2022.3191601.
- [36] W. He, M. J. A. Baig, and M. T. Iqbal, "An Internet of Things—Supervisory Control and Data Acquisition (IoT-SCADA) Architecture for Photovoltaic System Monitoring, Control, and Inspection in Real Time," *Electronics (Basel)*, vol. 14, no. 1, p. 42, Dec. 2024, doi: 10.3390/electronics14010042.
- [37] F. P. Eka Putra, Ach. M. Ubaidillah Solichin, Moh. N. Wildanul Hakim, and M. T. Ramadhan, "Pemanfaatan Teknologi Wireless dan Mobile Network Berbasis 5G Untuk Pemerataan Akses Jaringan di Indonesia," *Infotek: Jurnal Informatika dan Teknologi*, vol. 8, no. 2, pp. 415–425, Jul. 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30559.
- [38] M. Saban *et al.*, "A Smart Agricultural System Based on PLC and a Cloud Computing Web Application Using LoRa and LoRaWan," *Sensors*, vol. 23, no. 5, p. 2725, Mar. 2023, doi: 10.3390/s23052725.
- [39] F. P. Eka Putra, A. Baidawi, A. A. Mubarak, and Frediyanto, "Merancang Jaringan Sensor Nirkabel dan IoT untuk Kota Pintar Pamekasan," *Jurnal Informasi dan Teknologi*, pp. 138–145, Jul. 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.331.
- [40] Md. N. Mowla, N. Mowla, A. F. M. S. Shah, K. M. Rabie, and T. Shongwe, "Internet of Things and Wireless Sensor Networks for Smart Agriculture Applications: A Survey," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 145813–145852, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3346299.
- [41] X. Deng, J. Yin, P. Guan, N. N. Xiong, L. Zhang, and S. Mumtaz, "Intelligent Delay-Aware Partial Computing Task Offloading for Multiuser Industrial Internet of Things Through Edge Computing," *IEEE Internet Things J*, vol. 10, no. 4, pp. 2954–2966, Feb. 2023, doi: 10.1109/JIOT.2021.3123406.
- [42] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. N. Saputra, F. M. Haris, and S. N. R. Barokah, "Application of Internet of Things Technology in Monitoring Water Quality in Fishponds," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 1, pp. 356–361, Jul. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4231.
- [43] S. He, Q. Li, M. Khishe, A. Salih Mohammed, H. Mohammadi, and M. Mohammadi, "The optimization of nodes clustering and multi-hop routing protocol using hierarchical chimp optimization for sustainable energy efficient underwater wireless sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 30, no. 1, pp. 233–252, Jan. 2024, doi: 10.1007/s11276-023-03464-9.
- [44] S. Khriji, R. Chéour, and O. Kanoun, "Dynamic Voltage and Frequency Scaling and Duty-Cycling for Ultra Low-Power Wireless Sensor Nodes," *Electronics (Basel)*, vol. 11, no. 24, p. 4071, Dec. 2022, doi: 10.3390/electronics11244071.
- [45] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, M. A. Huda, H. Hasbullah, and A. Rohman, "Computer Network Management Optimization Through Big Data Analysis Using Time Series Analysis Method," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 1, pp. 434–442, Aug. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4373.
- [46] X. Huang *et al.*, "Lithium-Ion Battery Lifetime Extension With Positive Pulsed Current Charging," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 71, no. 1, pp. 484–492, Jan. 2024, doi: 10.1109/TIE.2023.3250850.
- [47] F. P. Eka Putra, I. N. Sudana Degeng, S. Ulfa, and W. Kamdi, "The Evolution of Quality Education: Impacts and Challenges of Using Open Educational Resources (OER) and Open Educational Practices (OEP) in the Conceive - Design - Implement - Operate (CDIO) Framework," *TEM Journal*, pp. 386–395, Feb. 2024, doi: 10.18421/TEM131-40.
- [48] F. P. Eka Putra, L. Fitriyah, Z. Naimah, and S. A. Rofika, "Evaluasi Kinerja Aplikasi Wireshark Dalam Monitoring Jaringan Kecil Dengan Topologi Star dan Bus," *Jurnal Ilmiah ILKOMINFO - Ilmu Komputer & Informatika*, vol. 8, no. 2, pp. 164–176, Jul. 2025, doi: 10.47324/ilkominfo.v8i2.343.
- [49] V. Nkemeni, F. Mieyeville, and P. Tsafack, "Energy Consumption Reduction in Wireless Sensor Network-Based Water Pipeline Monitoring Systems via Energy Conservation Techniques," *Future Internet*, vol. 15, no. 12, p. 402, Dec. 2023, doi: 10.3390/fi15120402.
- [50] C. Portillo, J. Martinez-Bauset, V. Pla, and V. Casares-Giner, "Energy Consumption Modeling for Heterogeneous Internet of Things Wireless Sensor Network Devices: Entire Modes and Operation Cycles Considerations," *Telecom*, vol. 5, no. 3, pp. 723–746, Aug. 2024, doi: 10.3390/telecom5030036.
- [51] G. Kaur, V. Balyan, and S. H. Gupta, "Experimental analysis of low-duty cycle campus deployed IoT network using LoRa technology," *Results in Engineering*, vol. 23, p. 102844, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102844.