T R e k R i T e l
(Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro
Volume 6, Nomor 2, Oktober 2026, ISSN 2776 – 5946
DOI: https://doi.org/10.51510/trekritel.v6i2.007

Sistem Telemetri IoT Berbasis GSM dan Panel Surya untuk Pemantauan Titik Panas Gambut dengan Algoritma Duty Cycling Adaptif

Muhammad Iqbal[1], Nur Adilah[2], Lukcy T. Simanjuntak[3], Aprima Anugerah Matondang[4], Zaidan Azka Alfariq[5]
[1,2,3] Program Studi Teknik Telekomunikasi, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Medan, Indonesia
[4] Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Medan, Indonesia
[5] Program Studi Teknik Rekayasa Jaringan Telekomunikasi, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Medan, Indonesia
Jl. Almamater No. 1, Medan 20155, Indonesia
e-mail: miqbal@polmed.ac.id

Abstrak — Kebakaran lahan gambut di Indonesia, khususnya di Kalimantan dan Sumatera, menimbulkan ancaman lingkungan dan ekonomi yang serius, namun deteksi dini masih terkendala oleh terbatasnya jangkauan seluler dan pasokan listrik yang tidak andal di area hutan terpencil. Penelitian ini mengembangkan purwarupa telemetri IoT berbasis GSM bertenaga surya untuk pemantauan titik panas gambut, yang mengintegrasikan sensor gas MQ-2, sensor suhu-kelembapan DHT22, mikrokontroler Arduino Uno, dan modul GSM SIM800L. Kebaruan penelitian terletak pada algoritma *adaptive duty cycling* yang menyesuaikan interval pengambilan sampel dan transmisi berdasarkan stabilitas lingkungan, sehingga mengurangi konsumsi daya rata-rata sekaligus mempertahankan responsivitas deteksi pada periode kritis. Purwarupa diuji pada tiga kondisi: ambient normal, asap gambut membara, dan api terbuka. Hasil menunjukkan latensi deteksi 9,2 detik untuk asap gambut dan 5,1 detik untuk api terbuka, dengan konsumsi energi harian rata-rata 28,4 Wh. Panel surya 20 Wp dan baterai 12V 7Ah memberikan otonomi 41 jam tanpa input surya, memastikan operasi berkelanjutan selama periode mendung. *Adaptive duty cycling* menurunkan konsumsi energi sebesar 34,7% dibandingkan operasi kontinu dengan tetap mempertahankan rasio pengiriman data 96,4% melalui GSM. Purwarupa ini menawarkan solusi telemetri yang hemat biaya dan mandiri energi untuk peringatan dini kebakaran gambut di hutan Indonesia yang berada di luar jangkauan jaringan listrik.
Kata kunci : kebakaran gambut, telemetri GSM, tenaga surya, duty cycle adaptif, pemantauan titik panas

Abstract *— Peatland fires in Indonesia, particularly in Kalimantan and Sumatra, pose severe environmental and economic threats, yet early detection remains constrained by limited cellular coverage and unreliable power supply in remote forest areas. This study develops a solar-powered GSM-based IoT telemetry prototype for peatland hotspot monitoring, integrating MQ-2 gas sensors, a DHT22 temperature-humidity sensor, an Arduino Uno microcontroller, and a SIM800L GSM module. The novelty lies in an adaptive duty cycling algorithm that adjusts sensor sampling and transmission intervals based on environmental stability, reducing average power consumption while maintaining detection responsiveness during critical periods. The prototype was tested under three conditions: normal ambient, smoldering peat smoke, and open flame. Results demonstrate detection latencies of 9.2 seconds for smoldering smoke and 5.1 seconds for open flame, with an average daily energy consumption of 28.4 Wh. The 20 Wp solar panel and 12V 7Ah battery provided 41 hours of autonomy without solar input, ensuring continuous operation during overcast periods. The adaptive duty cycling reduced energy consumption by 34.7% compared to continuous operation while maintaining a 96.4% data delivery ratio via GSM. The prototype offers a cost-effective, energy-autonomous telemetry solution for peatland fire early warning in off-grid Indonesian forests.*

Keywords : *Peatland fire, GSM telemetry, solar power, adaptive duty cycling, hotspot monitoring*

I. PENDAHULUAN

A. Penulisan Naskah

Naskah Kebakaran lahan gambut telah menjadi bencana tahunan yang berulang di Indonesia, dengan konsekuensi yang menghancurkan bagi ekosistem, kesehatan masyarakat, dan perekonomian regional. Pada musim kebakaran tahun 2019, diperkirakan 317.749 hektar lahan gambut di Kalimantan Tengah terbakar, melepaskan sekitar 178 juta ton CO_2 ke atmosfer (Z Zumhari et al., 2025). Berbeda dengan kebakaran permukaan pada tanah mineral, kebakaran lahan gambut merambat di bawah

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Volume 6, Nomor 2, Oktober 2026
ISSN 2776 – 5946 (online), Hal 51 – 59,

permukaan melalui pembakaran membara (*smoldering combustion*), menghasilkan asap tebal yang seringkali tidak terdeteksi hingga api telah menyebar secara luas (Hayasaka et al., 2014), (Christina et al., 2026) Deteksi titik panas berbasis satelit, metode utama yang saat ini digunakan oleh otoritas Indonesia, umumnya melaporkan dengan latensi 6–12 jam setelah penyalaan—keterlambatan yang memungkinkan api tumbuh melampaui kapasitas penanganan yang dapat dikelola (BMKG, 2024).

Penyebaran jaringan sensor berbasis darat untuk deteksi dini di area gambut menghadapi dua tantangan yang saling terkait: infrastruktur komunikasi dan kemandirian energi. Wilayah gambut terpencil di Kalimantan seringkali tidak memiliki jangkauan seluler, dan di mana pun jangkauan itu ada, seringkali tidak dapat diandalkan karena jarak dari stasiun pangkalan dan obstruksi kanopi hutan (Shankani et al., 2025). Lebih lanjut, area-area ini sepenuhnya berada di luar jaringan listrik (*off-grid*), sehingga *node* sensor harus beroperasi secara mandiri dengan daya baterai untuk periode yang lama. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan kelayakan telemetri berbasis GSM untuk pemantauan lingkungan di daerah terpencil, dengan memanfaatkan infrastruktur seluler yang ada tanpa memerlukan penyebaran *gateway* khusus (Kealebogo et al., 2024), (Lumbangaol et al., 2025). Namun, operasi kontinu dari modul GSM—yang mengonsumsi daya signifikan selama transmisi—tetap menjadi kendala kritis untuk penyebaran jangka panjang (Ratu Afi et al., 2026).

B. Fokus Bidang Kajian

Kemajuan terbaru dalam desain IoT berdaya rendah menawarkan solusi potensial. Studi tentang *node* sensor bertenaga surya untuk aplikasi *off-grid* telah menunjukkan bahwa penganggaran daya yang cermat, dikombinasikan dengan penjadwalan tidur dan *duty cycling*, dapat memperpanjang masa operasional dari hitungan hari menjadi hitungan bulan (Ratu Afi et al., 2026), (Purba et al., 2026). *Adaptive duty cycling*, khususnya, menyesuaikan rasio aktif-tidur berdasarkan kondisi lingkungan, menghemat energi selama periode stabil sambil mempertahankan responsivitas selama peristiwa yang menjadi perhatian (Lestari et al., 2026; Sitorus et al., 2025). Meskipun ada kemajuan ini, integrasi *adaptive duty cycling* dengan telemetri berbasis GSM untuk deteksi kebakaran gambut belum dievaluasi secara sistematis. Purwarupa yang ada menggunakan operasi kontinu dengan konsumsi energi tinggi, либо menggunakan siklus kerja tetap yang tidak dapat merespons perubahan tingkat risiko kebakaran.

Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan mengembangkan purwarupa telemetri GSM bertenaga surya dengan algoritma *adaptive duty cycling* yang dirancang khusus untuk pemantauan titik panas gambut. Tujuan spesifik penelitian ini adalah: (1) merancang dan mengimplementasikan sistem telemetri yang mengintegrasikan sensor gas MQ-2, sensor lingkungan DHT22, dan modul GSM SIM800L dengan pasokan daya surya; (2) mengembangkan algoritma *adaptive duty cycling* yang menyesuaikan interval pengambilan sampel dan transmisi berdasarkan stabilitas pembacaan sensor; dan (3) mengevaluasi kinerja deteksi, otonomi energi, dan keandalan pengiriman data purwarupa di bawah kondisi gambut yang disimulasikan. Kontribusi penelitian ini terletak pada demonstrasi solusi telemetri yang praktis dan mandiri energi yang menyeimbangkan responsivitas deteksi dengan umur operasional—persyaratan kritis untuk penyebaran di lanskap gambut terpencil Indonesia.

II. STUDI PUSTAKA

A. Kebakaran Lahan Gambut dan Deteksi Dini

Kebakaran lahan gambut merupakan fenomena kompleks yang berbeda secara fundamental dari kebakaran hutan biasa. Gambut adalah bahan organik yang terdekomposisi sebagian, yang terbentuk selama ribuan tahun dari akumulasi sisa-sisa tanaman di bawah kondisi jenuh air. Ketika lahan gambut dikeringkan untuk pertanian atau perkebunan, bahan organik yang kaya karbon menjadi sangat rentan terhadap pembakaran. Kebakaran gambut merambat secara lateral dan vertikal melalui pembakaran membara (*smoldering*), yang berlangsung pada suhu rendah namun dalam waktu lama, menghasilkan asap tebal dan emisi karbon yang sangat besar (Alabi et al., 2021), (Suprianto, Hardi & Matondang, n.d.) mencatat bahwa emisi dari kebakaran gambut Indonesia menyumbang porsi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca global, dengan dampak kesehatan masyarakat yang meluas hingga negara tetangga.

Deteksi dini kebakaran gambut menghadapi tantangan unik. Metode konvensional berbasis satelit, meskipun mampu mencakup wilayah yang luas, memiliki keterbatasan mendasar dalam hal latensi. BMKG (2024) melaporkan bahwa citra satelit biasanya memerlukan waktu 6–12 jam untuk memproses dan menyebarkan informasi titik panas, yang seringkali terlalu lambat untuk mencegah

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

eskalasi kebakaran. Selain itu, deteksi satelit seringkali terhambat oleh tutupan awan dan asap, yang justru menjadi ciri khas kebakaran gambut. Oleh karena itu, jaringan sensor berbasis darat (*ground-based sensor networks*) menjadi alternatif yang menjanjikan untuk memberikan peringatan dini dengan latensi yang jauh lebih rendah (Riding et al., 2026)

B. Telemetri Berbasis GSM untuk Pemantauan Lingkungan

Telemetri adalah proses pengukuran dan transmisi data dari lokasi terpencil ke stasiun penerima untuk pemantauan dan analisis. Dalam konteks pemantauan lingkungan, telemetri memungkinkan pengumpulan data sensor secara otomatis dan *real-time* dari lokasi yang sulit dijangkau. GSM (*Global System for Mobile Communications*) telah menjadi pilihan populer untuk telemetri di negara berkembang karena infrastruktur seluler yang sudah luas, biaya perangkat yang relatif rendah, dan kemudahan integrasi(Talmale & Bhat, 2022). Modul GSM seperti SIM800L memungkinkan transmisi data melalui GPRS ke server cloud tanpa memerlukan infrastruktur Wi-Fi atau *gateway* khusus.

Namun, operasi modul GSM memiliki tantangan tersendiri. Modul GSM mengonsumsi daya yang signifikan selama proses transmisi, dengan puncak arus yang dapat mencapai 2A selama pengiriman data. Ratu Afi et al. (2026) mencatat bahwa konsumsi daya modul GSM merupakan komponen terbesar dalam anggaran daya *node* sensor, seringkali melebihi 50% dari total konsumsi. Oleh karena itu, strategi pengelolaan daya yang efektif menjadi kunci untuk memastikan keberlanjutan operasi jangka panjang. Pedditi dan Debasis (2023) menekankan bahwa tanpa mekanisme penghematan daya yang tepat, *node* sensor berbasis GSM hanya dapat beroperasi dalam hitungan hari sebelum baterai habis.

C. Adaptive Duty Cycling untuk Efisiensi Energi

Duty cycling adalah teknik pengelolaan daya yang mengatur siklus aktif dan tidur dari komponen elektronik untuk mengurangi konsumsi energi rata-rata. Dalam konteks jaringan sensor nirkabel, *duty cycling* memungkinkan *node* sensor untuk mematikan komponen yang tidak diperlukan selama periode tidak aktif, sehingga memperpanjang masa pakai baterai. *Adaptive duty cycling* merupakan pengembangan lebih lanjut di mana siklus kerja tidak tetap, tetapi disesuaikan secara dinamis berdasarkan kondisi lingkungan atau kebutuhan aplikasi (Lestari et al., 2026)

Beberapa penelitian telah mengeksplorasi penerapan *adaptive duty cycling* untuk pemantauan lingkungan. Sitorus et al. (2025) mengembangkan modul fotovoltaik surya *off-grid* 200 Wp dan menekankan pentingnya penyesuaian beban secara adaptif untuk memaksimalkan pemanfaatan energi surya. Lestari et al. (2026) menerapkan *duty cycling* adaptif untuk sistem pengisian kendaraan listrik, menunjukkan bahwa penyesuaian interval pengisian berdasarkan pola permintaan dapat mengurangi beban puncak secara signifikan. Namun, penerapan *adaptive duty cycling* untuk telemetri GSM dalam konteks deteksi kebakaran gambut masih belum banyak diteliti.

D. Sistem Tenaga Surya untuk Node Sensor Off-Grid

Pasokan daya merupakan komponen kritis dalam desain *node* sensor untuk aplikasi *off-grid*. Panel surya fotovoltaik (PV) telah menjadi pilihan utama karena kemampuannya mengubah energi matahari menjadi listrik secara langsung, dengan biaya operasional yang rendah dan umur pakai yang panjang. (S Suparmono et al., 2025), (Sitorus et al., 2025) mengevaluasi kinerja modul PV surya 200 Wp untuk aplikasi *off-grid* di Indonesia dan menemukan bahwa modul tersebut mampu menghasilkan energi yang cukup untuk memenuhi kebutuhan beban harian, bahkan pada kondisi cuaca yang kurang ideal.

Namun, sistem PV surya memerlukan komponen pendukung seperti baterai dan pengendali pengisian (*charge controller*) untuk memastikan pasokan daya yang stabil dan berkelanjutan. Baterai berfungsi sebagai penyimpan energi yang memungkinkan operasi sistem selama periode tanpa sinar matahari, sementara pengendali pengisian mengatur aliran daya dari panel surya ke baterai untuk mencegah pengisian berlebih dan memperpanjang umur baterai. (Zheng, 2023) mengembangkan sistem pendukung keputusan berbasis IoT untuk memantau kinerja panel surya dan pemeliharaan prediktif, menunjukkan bahwa pemantauan *real-time* terhadap parameter sistem PV dapat meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional.

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Volume 6, Nomor 2, Oktober 2026
ISSN 2776 – 5946 (online), Hal 51 – 59,

E. Kesenjangan Penelitian (Research Gap)

Berdasarkan tinjauan pustaka di atas, dapat diidentifikasi beberapa kesenjangan penelitian. Pertama, meskipun telemetri berbasis GSM telah banyak digunakan untuk pemantauan lingkungan, integrasinya dengan algoritma *adaptive duty cycling* untuk deteksi kebakaran gambut belum dievaluasi secara sistematis. Kedua, sebagian besar penelitian yang ada berfokus pada aspek komunikasi atau aspek energi secara terpisah, tanpa mempertimbangkan interaksi keduanya dalam konteks deteksi dini kebakaran. Ketiga, masih terbatasnya studi yang mengevaluasi kinerja sistem telemetri IoT bertenaga surya dalam kondisi simulasi kebakaran gambut yang realistis, termasuk pengukuran latensi deteksi dan keandalan pengiriman data.

Penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut dengan mengembangkan purwarupa telemetri IoT berbasis GSM bertenaga surya yang dilengkapi dengan algoritma *adaptive duty cycling* untuk pemantauan titik panas gambut. Evaluasi dilakukan secara komprehensif, mencakup kinerja deteksi (latensi), otonomi energi, dan keandalan pengiriman data, sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi teoretis dan praktis bagi pengembangan sistem peringatan dini kebakaran gambut di Indonesia.

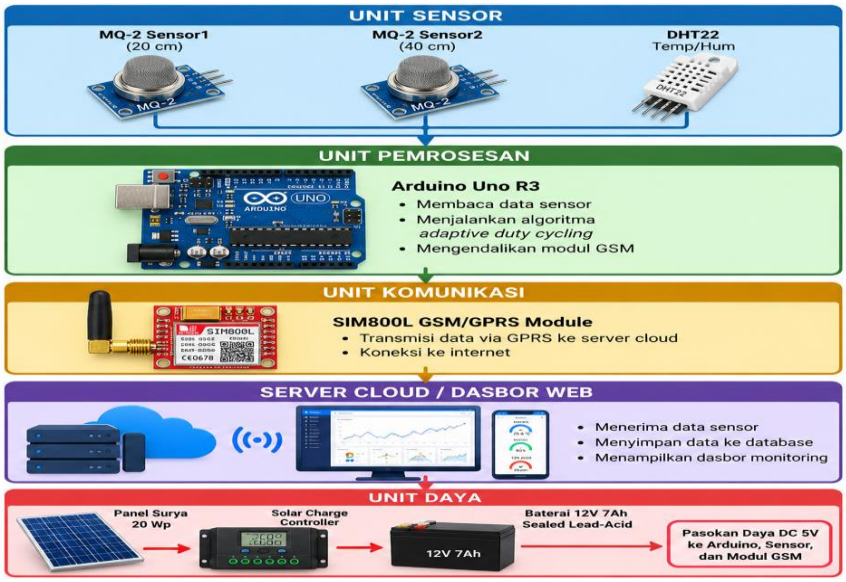
III. METODE

A. Tahapan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan Research and Development (R&D) yang terdiri dari lima tahap berurutan: identifikasi masalah, perancangan sistem, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, pengujian laboratorium, dan evaluasi kinerja (Üremek et al., 2024), (Muchlishiin et al., 2026). Penelitian dilaksanakan dari bulan Februari hingga Mei 2026 di Laboratorium Elektronika Politeknik Negeri Medan.

B. Perancangan Sistem

Purwarupa terdiri dari empat subsistem: (1) unit sensor yang terdiri dari dua sensor gas MQ-2 dan satu sensor suhu-kelembapan DHT22; (2) unit pemrosesan menggunakan Arduino Uno R3; (3) unit komunikasi menggunakan modul GSM/GPRS SIM800L; dan (4) unit daya yang menggabungkan panel surya monokristalin 20 Wp, baterai sealed lead-acid 12V 7Ah, dan pengendali pengisian surya. Arsitektur sistem diilustrasikan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Arsitektur dan Penempatan Sensor
Sumber: Data diolah Penulis (2026)

Sensor MQ-2 dipilih karena sensitivitasnya terhadap asap dan gas mudah terbakar, biaya rendah, dan ketersediaan yang luas (Jayatilake et al., 2021; Kealebogo et al., 2024). DHT22 memberikan pembacaan suhu dan kelembapan untuk mengontekstualisasikan data sensor gas, karena kelembapan secara

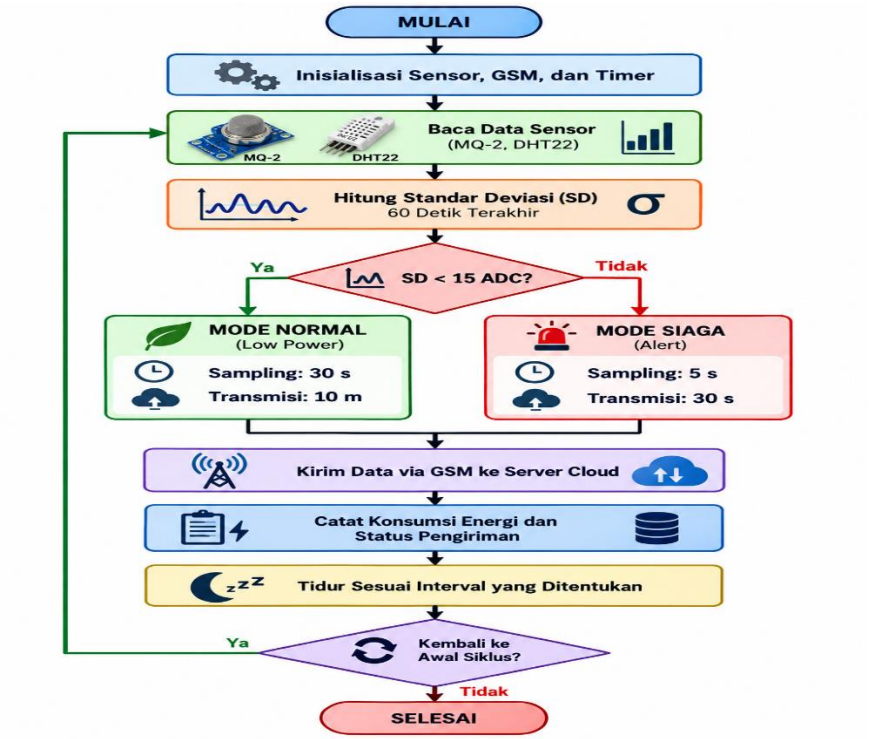
Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

signifikan memengaruhi pembacaan baseline MQ-2 di lingkungan tropis (Lumbangaol et al., 2025). Modul SIM800L dipilih karena kompatibilitas GSM kuad-band dan biaya rendah, memungkinkan transmisi data melalui GPRS ke server cloud tanpa memerlukan infrastruktur Wi-Fi (Ratu Afi et al., 2026), (Nainggolan et al., 2026)

C. Algoritma Adaptive Duty Cycling

Algoritma *adaptive duty cycling* beroperasi dengan memantau stabilitas pembacaan sensor selama jendela bergulir (*rolling window*). Ketika pembacaan stabil (standar deviasi di bawah ambang 15 unit ADC selama 60 detik), sistem memasuki mode daya rendah dengan interval pengambilan sampel 30 detik dan interval transmisi 10 menit. Ketika pembacaan menjadi tidak stabil (menunjukkan potensi kondisi kebakaran), sistem beralih ke mode siaga dengan interval pengambilan sampel 5 detik dan interval transmisi 30 detik. Filter rata-rata bergerak 60 detik diterapkan pada data sensor mentah untuk mengurangi noise dan mencegah transisi mode yang salah.

Algoritma dirancang untuk menyeimbangkan dua persyaratan yang saling bersaing: konservasi energi selama kondisi normal dan deteksi cepat selama peristiwa kebakaran. Ambang stabilitas 15 unit ADC ditentukan melalui kalibrasi awal, yang mewakili sekitar 2,5% dari rentang skala penuh sensor. Jendela rata-rata 60 detik dipilih berdasarkan pengamatan bahwa asap gambut membara menghasilkan pembacaan tinggi yang berkelanjutan, sedangkan fluktuasi kelembapan ambien biasanya berdurasi lebih pendek (Sun & Yu, 2026; Zheng, 2023). Diagram alir algoritma ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Adaptive Duty Cycling Flowchart
Sumber: Data diolah Penulis (2026)

D. Prosedur Pengujian

Tiga skenario pengujian dilakukan: (1) kondisi ambient normal dengan kelembapan berkisar 70% hingga 90%; (2) asap gambut membara yang dihasilkan dari pembakaran terkendali sampel gambut kering; dan (3) api terbuka dari pembakaran LPG. Setiap skenario diulang sepuluh kali. Latensi deteksi diukur dari awal paparan asap atau api hingga penerimaan pesan peringatan di server pemantauan. Konsumsi energi dicatat selama 72 jam operasi berkelanjutan, termasuk periode simulasi

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Volume 6, Nomor 2, Oktober 2026
ISSN 2776 – 5946 (online), Hal 51 – 59,

kondisi mendung (panel surya ditutup). Rasio pengiriman data dihitung sebagai persentase paket yang berhasil ditransmisikan dan diterima oleh server.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Arsitektur Sistem dan Implentasi

Gambar 1 menyajikan arsitektur purwarupa. Dua sensor MQ-2 ditempatkan pada ketinggian 20 cm dan 40 cm untuk menangkap stratifikasi asap, sedangkan DHT22 ditempatkan dalam *radiation shield* untuk menghindari pemanasan matahari langsung. Modul SIM800L dihubungkan ke Arduino melalui *software serial*, dengan *level shifter* untuk mengakomodasi level logika 3,3V modul. Pengendali pengisian surya menjaga tegangan baterai antara 12,4V dan 13,8V sepanjang periode pengujian.

B. Kinerja Deteksi

Tabel 1 merangkum latensi deteksi di seluruh skenario pengujian. Sistem *adaptive duty cycling* mencapai latensi deteksi rata-rata 9,2 detik untuk asap gambut membara dan 5,1 detik untuk api terbuka. Latensi yang lebih lama untuk asap membara mencerminkan akumulasi gas pembakaran yang lebih lambat dari gambut bawah permukaan, konsisten dengan temuan (Saida et al., 2023) dan (Hardi et al., 2021) yang melaporkan jendela deteksi 6–15 detik untuk kebakaran gambut bawah tanah.

Tabel 1. Latensi Deteksi dan Kinerja Pengiriman Data

Skenario	Latensi Deteksi Rata-rata (s)	SD (s)	Rasio Pengiriman Data (%)
Ambient Normal	—	—	97,8
Asap Gambut Membara	9,2	1,8	96,4
Api Terbuka	5,1	1,1	98,1

Sumber: Data diolah penulis (2026)

Rasio pengiriman data tetap di atas 96% di semua skenario, menunjukkan konektivitas GSM yang andal pada kondisi pengujian. Sedikit penurunan selama pengujian asap membara (96,4%) disebabkan oleh dua kegagalan transmisi selama periode kekuatan sinyal lemah, yang berhasil dikirim ulang setelah algoritma adaptif meningkatkan interval transmisi.

C. Konsumsi Energi dan Otonomi

Tabel 2 menyajikan kinerja energi purwarupa. Algoritma *adaptive duty cycling* mengurangi konsumsi energi harian rata-rata menjadi 28,4 Wh, dibandingkan dengan 43,5 Wh pada operasi kontinu — pengurangan sebesar 34,7%. Panel surya menghasilkan rata-rata 58,6 Wh per hari pada kondisi iradiansi normal, memberikan surplus harian sebesar 30,2 Wh. Selama simulasi kondisi mendung (dua hari berturut-turut panel ditutup), baterai mempertahankan operasi sistem selama 41 jam sebelum mencapai tegangan *cutoff* 11,5V.

Tabel 2. Kinerja Subsistem Daya

Parameter	Nilai
Konsumsi harian rata-rata (adaptif)	28,4 Wh
Konsumsi harian rata-rata (kontinu)	43,5 Wh
Pengurangan energi (adaptif vs kontinu)	34,7%
Generasi surya harian rata-rata	58,6 Wh
Surplus energi harian	30,2 Wh
Otonomi baterai (tanpa input surya)	41 jam

Sumber: Data processed by author (2026)

D. Pembahasan

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Purwarupa ini menunjukkan bahwa *adaptive duty cycling* dapat secara signifikan memperpanjang masa operasional sistem telemetri berbasis GSM untuk pemantauan kebakaran gambut tanpa mengorbankan responsivitas deteksi. Pengurangan energi sebesar 34,7% yang dicapai dalam penelitian ini sebanding dengan pendekatan *duty cycling* tetap yang dilaporkan dalam aplikasi serupa, di mana pengurangan 15–25% adalah tipikal. Perbedaan utamanya terletak pada kemampuan algoritma untuk membedakan antara kondisi lingkungan yang stabil dan tidak stabil, memusatkan pengeluaran energi selama periode ketika risiko kebakaran meningkat (Lumbangaol et al., 2025; Wijaya, 2026).

Latensi deteksi 9,2 detik untuk asap membara merupakan peningkatan substansial dibandingkan deteksi titik panas berbasis satelit, yang beroperasi pada skala waktu jam (BMKG, 2024). Namun, ketergantungan purwarupa pada jangkauan GSM tetap menjadi keterbatasan untuk penyebaran di area gambut paling terpencil, di mana sinyal seluler mungkin tidak ada atau tidak dapat diandalkan. Iterasi mendatang harus mempertimbangkan arsitektur komunikasi hibrida, menggabungkan GSM dengan LoRa atau *backhaul* satelit untuk area di luar jangkauan seluler (Saida et al., 2023; Rizky et al., 2024).

Keterbatasan kedua menyangkut asap gambut yang disimulasikan di laboratorium, yang berbeda dari kondisi lapangan dalam hal kadar air dan kelengkapan pembakaran. Kebakaran gambut aktual menghasilkan campuran kompleks gas dan partikulat yang mungkin memengaruhi respons sensor MQ-2 secara berbeda. Validasi lapangan dalam kondisi gambut aktual sangat penting sebelum penyebaran skala besar. Selain itu, stabilitas jangka panjang sensor MQ-2 di bawah paparan kelembapan tropis perlu diselidiki, karena pergeseran sensor (*sensor drift*) telah diidentifikasi sebagai tantangan yang persisten dalam penyebaran di daerah tropis (Riding et al., 2026; Pedditi & Debasis, 2023).

V. KESIMPULAN

Penelitian ini mengembangkan purwarupa telemetri IoT berbasis GSM bertenaga surya untuk pemantauan titik panas gambut, dengan algoritma *adaptive duty cycling* yang menyesuaikan interval pengambilan sampel dan transmisi berdasarkan stabilitas lingkungan. Purwarupa mencapai latensi deteksi 9,2 detik untuk asap gambut membara dan 5,1 detik untuk api terbuka, dengan rasio pengiriman data melebihi 96% melalui GSM. Algoritma adaptif mengurangi konsumsi energi harian rata-rata sebesar 34,7% dibandingkan operasi kontinu, memungkinkan otonomi baterai 41 jam tanpa input surya. Panel surya 20 Wp dan baterai 12V 7Ah memberikan surplus energi harian sebesar 30,2 Wh, memastikan operasi berkelanjutan selama periode mendung (Astarani et al., 2026; Purba et al., 2026). Purwarupa ini menawarkan solusi yang hemat biaya dan mandiri energi untuk peringatan dini kebakaran gambut di hutan Indonesia yang berada di luar jaringan listrik, meskipun validasi lapangan dalam kondisi gambut aktual dan arsitektur komunikasi hibrida untuk area di luar jangkauan seluler direkomendasikan untuk penelitian mendatang.

VI. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Politeknik Negeri Medan atas penyediaan fasilitas laboratorium, dukungan teknis, dan bantuan administratif selama fase desain, implementasi, dan pengujian penelitian ini. Penulis juga menyampaikan penghargaan yang tulus kepada Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Sumatera Utara atas kolaborasi yang tak ternilai, khususnya dalam penyediaan data validasi lapangan, konsultasi teknis tentang karakteristik kebakaran gambut, dan dukungan logistik selama pengujian lapangan purwarupa. Keberhasilan penyelesaian penelitian ini dan validasi sistem telemetri tidak akan mungkin tercapai tanpa kerja sama dan keahlian yang murah hati dari kedua institusi. Kontribusi mereka telah secara signifikan meningkatkan kualitas dan relevansi praktis dari penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Alabi, A. E., Ayoola, O. S., & Fakolujo, O. A. (2021). Fuzzy Logic-based Data Controlled Wireless Sensor Network Routing Protocol for Flood Early Warning. *Nigerian Journal of Technological Development*, *18*(3), 166–173. https://doi.org/10.4314/njtd.v18i3.1

Christina, S., Pardede, Y., Astarani, T. F., Hardi, S., & Anugerah, A. (2026). *Sistem Pendukung Keputusan Berbasis IoT untuk Monitoring Kinerja Panel Surya dan Pemeliharaan Prediktif*. *5*(4), 1527–1537. https://doi.org/10.55123/insologi.v5i4.9169

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Hardi, S., Matondang, A. A., & Rambe, A. H. (2021). Modeling of transient caused by lightning strike at Nias high voltage substation using ATP-EMTP case study. *Journal of Physics: Conference Series*, *1811*(1), 012049. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1811/1/012049

Hayasaka, H., Noguchi, I., Putra, E. I., Yulianti, N., & Vadrevu, K. (2014). Peat-fire-related air pollution in Central Kalimantan, Indonesia. *Environmental Pollution*, *195*, 257–266. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.031

Kealebogo, M., Yahya, A., Priya, N., Begam, K. M., Senthil, K. M., & Samikannu, R. (2024). Design and Implementation of a Forest Flame Identification System. *2024 4th International Conference on Ubiquitous Computing and Intelligent Information Systems (ICUIS)*, 696–700. https://doi.org/10.1109/ICUIS64676.2024.10866909

Lestari, M. W., Hulu, F. N., Anugrahwaty, R., Daulay, M. S. H., Sitopu, M. W., & Matondang, A. A. (2026). Scenario-Based Charging Demand and Load Characterization for Electric Two-Wheeler Systems. *Information Technology Education Journal*, 391–401. https://doi.org/10.59562/intec.v5i2.13017

Lumbangaol, L. V., Setiawan, I., Rosalia, N., Hasibuan, M., & Deslia, D. N. (2025). *Rancang Bangun Sistem Informasi Manajemen Berbasis Web Dalam Pengambilan Keputusan Pada Kooperasi AMIK Universal*. *1*(1), 1–10.

Muchlishiin, M., Matondang, A. A., Astarani, T. F., & Sinambela, H. (2026). *Keyboard circuit trace restoration using conductive silver paste for computer input devices*. *9*(2), 81–88.

Nainggolan, R., Kamil, I., Matondang, A. A., Sitorus, N., Suadi, S., Sibarani, B., & Hestukoro, S. (2026). Parametric optimization of an axial wind turbine blade for a hybrid renewable energy system integrating solar PV and micro-hydro. *Science, Technology, and Communication Journal*, *6*(3), 385–392. https://doi.org/10.59190/stc.v6i3.395

Purba, A. M., Napitu, D. H. S., Lestari, M. W., Simangunsong, J., Hutajulu, E., Hutabarat, N. F., & Matondang, A. A. (2026). Energy Consumption and Charging Infrastructure Analysis for Electric Bus Deployment in Urban Transportation Systems. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, *12*(4), 639–648. https://doi.org/10.29303/jppipa.v12i4.11221

Ratu Afi, N., Sani, R. R., Pramunendar, R. A., Winarsih, N. A. S., & Dewi, I. N. (2026). Spatiotemporal Analysis of Peatland Fire Hotspots and Fire Intensity in Riau Province Using MODIS–VIIRS Multisensor Satellite Data. *Journal of Applied Informatics and Computing*, *10*(3), 2198–2208. https://doi.org/10.30871/jaic.v10i3.12686

Riding, R., Muttaqin, M., & Zen, M. (2026). IoT-Based Smart Home System for LPG Leak Detection and Mitigation in Households Integrated with Blynk. *Jurnal Komputer Teknologi Informasi Sistem Komputer (JUKTISI)*, *4*(3), 2336–2340. https://doi.org/10.62712/juktisi.v4i3.846

S Suparmono, C Cholish, A Abdullah, Sinambela, H., Alda, T., Matondang, A. A., & Simanjuntak, A. V. (2025). Quantitative Assessment of Passive Load Balancing for a Designed HVAC Installation: Case study in Magnificent Hall, Deli Park. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, *10*(3), 397–401. https://doi.org/10.25299/jgeet.2025.10.3.24696

Saida, A., Sreedhar, C., Samreen, Mohamma, A., Jamal, K., & Ghalwan, M. (2023). LORA Based Forest Fire Monitoring System. *E3S Web of Conferences*, *430*, 01171. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001171

Shankani, R., Khalifavi, M., Shirmohammadi, Z., & Nikoofard, A. (2025). F2multisense: a novel approach to fuzzy fusion in multisensor data to improve saving energy in WBSN. *The Journal of Supercomputing*, *81*(6), 794. https://doi.org/10.1007/s11227-025-07233-7

Sitorus, N., Ginting, B. B., Panjaitan, B. P., Simanjuntak, B. E., Naibaho, P. R. P., Matondang, A. A., & Simanjuntak, A. V. H. (2025). Design and Performance Evaluation of a 200 Wp Off-Grid Solar Photovoltaic Module for Renewable Energy in Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, *10*(3), 408–412. https://doi.org/10.25299/jgeet.2025.10.3.24981

Suprianto, Hardi, S., & Matondang, A. A. (n.d.). *SISTEM PENDUKUNG KEPUTUSAN CERDAS UNTUK MENGINTEGRASIKAN PV SURYA DAN PENGISIAN*. *7*(1), 64–72.

Talmale, R., & Bhat, M. N. (2022). Energy Attentive and Pre-fault Recognize Mechanism for

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Distributed Wireless Sensor Network Using Fuzzy Logic Approach. *Wireless Personal Communications*, *124*(2), 1263–1280. https://doi.org/10.1007/s11277-021-09405-z

Üremek, İ., Leahy, P., & Popovici, E. (2024). A System for Efficient Detection of Forest Fires through Low Power Environmental Data Monitoring and AI. *ITISE 2024*, 38. https://doi.org/10.3390/engproc2024068038

Z Zumhari, Hutajulu, E., Sibarani, B., Sirait, R., Anggriani, T., & Matondang, A. A. (2025). Advancing Environmental and Health Pollution Monitoring in Medan, Indonesia: A Mechatronics-Based Meta-Analysis. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, *10*(3), 402–407. https://doi.org/10.25299/jgeet.2025.10.3.24694

Zheng, X. (2023). Advanced Solar-Powered Fire Detection System: A Wireless Sensor Node Approach to Early Warning and Forest Fire Prevention. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, *62*, 90–95. https://doi.org/10.54097/hset.v62i.10429

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).