

# Sistem Monitoring Bibit Mangrove Berbasis IoT dengan *Object Detection* dan Panel Surya

Kartika<sup>1</sup>, Arnisa Stefanie<sup>2</sup>

e-mail: [2210631160009@student.unsika.ac.id](mailto:2210631160009@student.unsika.ac.id), [arnisa.stefanie@ft.unsika.ac.id](mailto:arnisa.stefanie@ft.unsika.ac.id)

<sup>1,2</sup>Jurusan Teknik Elektro, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jl. HS.Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Telukjambe Timur, Karawang, Jawa Barat 41361, Indonesia

## Informasi Artikel

### Riwayat Artikel

Diterima 9 Agustus 2025

Direvisi 30 September 2025

Diterbitkan 30 September 2025

### Kata kunci:

Mangrove

Monitoring

Energi Terbarukan

## ABSTRAK

Mangrove merupakan ekosistem pesisir yang penting karena berperan sebagai penahan abrasi, penyerap karbon, dan habitat berbagai organisme, namun luasannya terus berkurang akibat aktivitas manusia dan perubahan iklim. Upaya rehabilitasi melalui penanaman kembali sering terkendala oleh rendahnya tingkat kelangsungan hidup bibit mangrove, terutama pada tahap awal pertumbuhan yang rentan terhadap gelombang, arus laut, dan sampah. Untuk mengatasi tantangan tersebut, dikembangkan sistem monitoring bibit mangrove berbasis internet of things dengan dukungan algoritma deteksi objek berbasis kamera dan panel surya. Mikrokontroler digunakan untuk akuisisi data citra dan sensor lingkungan yang kemudian dikirim ke dashboard web melalui protokol komunikasi nirkabel. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi bibit dengan akurasi tinggi serta menjaga keberlanjutan operasi melalui manajemen energi yang efisien. Oleh karena itu, monitoring bibit dapat dilakukan secara berkelanjutan, mandiri, dan ramah lingkungan, sehingga diharapkan dapat meningkatkan efektivitas program rehabilitasi mangrove di berbagai wilayah pesisir.

## ABSTRACT

*Mangroves are vital coastal ecosystems that serve as natural barriers against erosion, carbon sinks, and habitats for diverse species, yet their coverage continues to decline due to human activities and climate change. Restoration efforts through replanting are often hindered by the low survival rate of seedlings, particularly during the early growth phase, which is highly vulnerable to waves, currents, and marine debris. To address these challenges, a seedling monitoring system was developed based on the internet of things, supported by solar energy and camera-based object detection algorithms. The system employs a microcontroller for image acquisition and environmental sensing, with data transmitted to a web dashboard via wireless communication protocols. The analysis indicates that the system achieves high detection accuracy while maintaining sustainable operation through efficient energy management. With this design, seedling monitoring can be conducted continuously, autonomously, and in an environmentally friendly manner, thereby enhancing the effectiveness of mangrove rehabilitation programs in coastal areas.*

### Keywords:

Mangrove

Monitoring

Renewable Energy

### Penulis Korespondensi:

Kartika

Jurusan Teknik Elektro

Universitas Singaperbangsa Karawang

Jl. Raden arya harisapta no. 59, Karawang, Jawa Barat, Indonesia, Kode Pos. 41316

Email [2210631160009@student.unsika.ac.id](mailto:2210631160009@student.unsika.ac.id)

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195



9 772356 053009

## 1. PENDAHULUAN

Mangrove merupakan ekosistem pesisir yang sangat penting karena berfungsi sebagai penahan abrasi, penyerap karbon, sekaligus habitat bagi berbagai organisme [1], [2]. Sayangnya, hutan mangrove mengalami penurunan luas akibat aktivitas manusia dan perubahan iklim [3]. Upaya rehabilitasi melalui penanaman kembali telah dilakukan di berbagai wilayah namun keberhasilan terhambat karena tingkat kelangsungan hidup bibit yang rendah [4].



Gambar 1: Dokumentasi dari internet terkait penanaman bibit mangrove di pesisir pantai

Bibit mangrove yang baru ditanam menghadapi tantangan besar pada tahap awal pertumbuhannya. Gelombang tinggi dan arus laut kerap menyebabkan bibit hanyut atau roboh, sementara sampah laut yang menumpuk juga dapat menutupi dan merusak tanaman [5]. Selain itu, pertumbuhan mangrove yang relatif lambat membuat fase awal menjadi sangat kritis. Jika bibit gagal tumbuh maka proses rehabilitasi akan memerlukan waktu dan biaya yang lebih besar [6]. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya sistem pemantauan yang mampu mengawasi bibit mangrove secara lebih efektif. Pemantauan secara manual dinilai tidak efisien karena keterbatasan tenaga, waktu, dan akses lokasi. Oleh karena itu, perkembangan teknologi saat ini dapat dimanfaatkan untuk membantu proses monitoring dengan tujuan utama memberikan informasi dini apabila terjadi gangguan pada bibit, serta mendukung pengelolaan kawasan secara lebih berkelanjutan [7].

Oleh karena itu dilakukan pengembangan Sistem Monitoring Bibit Mangrove Berbasis IoT dengan *Object Detection* dan panel surya yang dirancang untuk mendukung upaya rehabilitasi dengan menyediakan pemantauan yang berkelanjutan, mandiri, dan ramah lingkungan. Diharapkan tingkat keberhasilan penanaman mangrove dapat meningkat sehingga peran penting mangrove bagi ekosistem pesisir dapat kembali terjaga.

## 2. METODE PENELITIAN

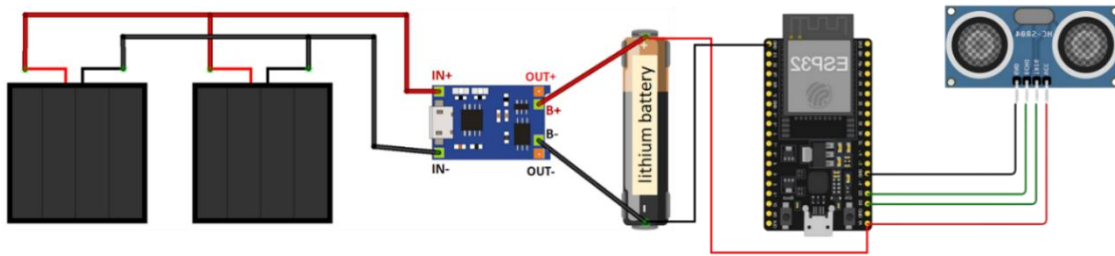
Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur yang mengkaji berbagai hasil penelitian terdahulu terkait penerapan IoT, algoritma deteksi objek, dan sistem monitoring berbasis energi terbarukan. Data teknis seperti konsumsi daya perangkat, akurasi sensor, dan performa algoritma diperoleh dari referensi ilmiah yang relevan. Oleh karena itu, keluaran penelitian berupa rancangan desain perangkat keras dan perangkat lunak yang dapat dijadikan acuan dalam implementasi nyata di lapangan.

Penggunaan studi literatur sebagai metode utama dinilai tepat karena mampu merangkum berbagai temuan, membandingkan performa teknologi, serta menyusun kerangka sistem tanpa memerlukan pengujian langsung di tahap awal. Pendekatan ini banyak digunakan dalam penelitian rekayasa sistem untuk merumuskan arsitektur atau prototype awal sebelum dilakukan uji coba lapangan [8]. Selain itu, beberapa penelitian menyatakan bahwa artikel berbasis studi literatur dapat berfungsi sebagai acuan konseptual tanpa harus melalui implementasi langsung selama rancangan yang disusun memiliki landasan ilmiah yang kuat [9]. Hasil kajian literatur juga dapat dijadikan pedoman bagi peneliti atau praktisi lain untuk diimplementasikan atau diuji pada konteks lapangan sesuai kebutuhan [10].



## 2.1 Desain Perangkat Keras

Desain perangkat keras sistem monitoring bibit mangrove ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2, yang terdiri dari modul ESP32-CAM sebagai mikrokontroler utama untuk pendeteksian bibit mangrove, sensor ultrasonik JSN-SR04T untuk mengukur tinggi ombak, serta panel surya sebagai sumber energi yang terhubung dengan baterai lithium-ion. Kamera diarahkan langsung ke bibit mangrove agar proses deteksi lebih optimal, sensor ultrasonik ditempatkan di bagian bawah untuk memantau ombak, sedangkan panel surya dipasang di bagian atas sebagai penyedia daya sehingga keseluruhan perangkat dapat beroperasi secara mandiri dengan konsumsi energi yang efisien.



Gambar 2: Skematik rangkaian sistem monitoring menggunakan ESP32cam, ultrasonik, baterai dan panel surya



Gambar 3: Desain 3D alat monitoring bibit mangrove yang dipasang dipesisir pantai

Meskipun rancangan pada penelitian ini masih berbasis studi literatur, beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan keberhasilan penggunaan perangkat serupa dalam skala terbatas. Misalnya, Sitorus berhasil mengimplementasikan ESP32-CAM dengan panel surya untuk monitoring vegetasi pesisir di Balikpapan dan melaporkan tingkat kestabilan sistem di atas 90% [11]. Penelitian oleh Humayun juga menunjukkan bahwa kombinasi mikrokontroler bertenaga surya dan sensor ultrasonik dapat beroperasi secara kontinu di lingkungan luar ruang selama lebih dari seminggu tanpa pengisian daya tambahan [12]. Hasil-hasil tersebut memperkuat bahwa rancangan perangkat yang diusulkan memiliki potensi kuat untuk diuji secara langsung di area mangrove.

Namun, sistem ini masih memiliki beberapa keterbatasan penting yang perlu diperjelas sebelum tahap implementasi nyata. Performa perangkat berpotensi menurun saat menghadapi kondisi cuaca ekstrem seperti angin kencang, air pasang tinggi, dan paparan air laut yang dapat menyebabkan korosi. Efektivitas panel surya juga dapat terganggu oleh sedimentasi, sampah, atau minimnya intensitas cahaya saat musim hujan. Selain itu, kestabilan komunikasi Wi-Fi yang digunakan ESP32-CAM sangat bergantung pada ketersediaan jaringan di lokasi pesisir yang umumnya terbatas.

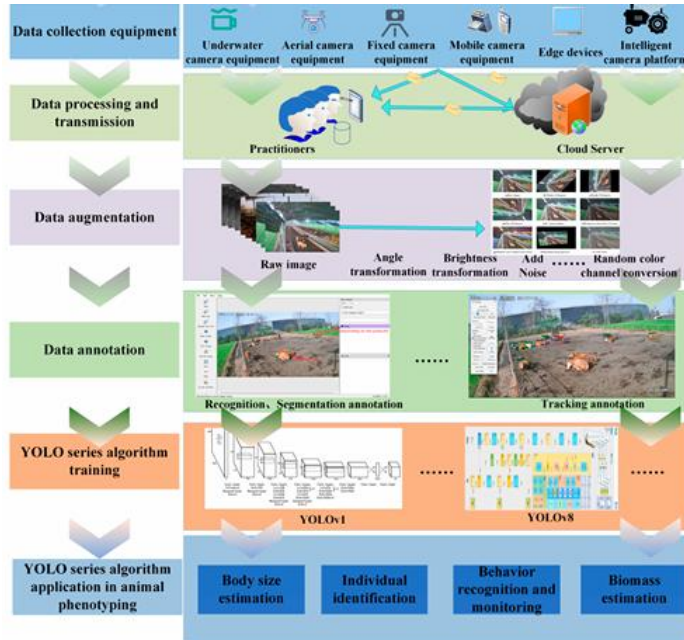
Penelitian lanjutan perlu difokuskan pada pengujian lapangan untuk menilai daya tahan perangkat terhadap kondisi ekstrem, evaluasi performa energi harian di area pantai, dan uji deteksi visual terhadap bibit mangrove yang tertutup pasir, ombak, atau sampah. Selain itu, desain modular dan proteksi perangkat dapat menjadi dasar untuk memperluas implementasi pada area pantai yang lebih luas atau wilayah rehabilitasi dengan karakteristik berbeda.

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195



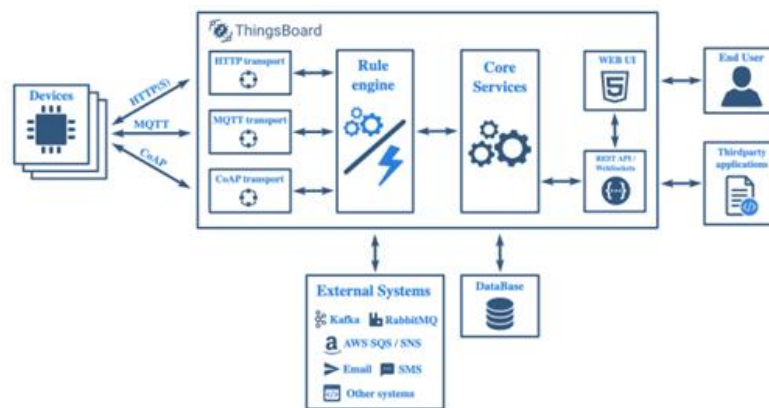
## 2.2 Desain Perangkat Lunak

Perangkat lunak dalam penelitian menggunakan algoritma YOLO untuk mendeteksi kondisi bibit mangrove dari citra kamera ESP32-CAM. YOLO bekerja dengan membagi citra ke dalam grid dan langsung memprediksi kelas objek beserta bounding box secara end-to-end, sehingga lebih cepat dibandingkan metode dua tahap seperti *Faster R-CNN*. Hasil penelitian oleh Redmon et al. menunjukkan bahwa YOLO lebih unggul dalam kecepatan deteksi dibandingkan metode konvensional [9], [13].



Gambar 4: Arsitektur YOLO

Selain algoritma YOLO perangkat lunak juga menggunakan *ThingsBoard* sebagai platform IoT untuk pengiriman, pengolahan, dan visualisasi data. *ThingsBoard* mendukung berbagai protokol komunikasi seperti MQTT, HTTP, dan CoAP, serta mampu mengintegrasikan data sensor dengan sistem eksternal. Penelitian sebelumnya oleh Humayun et al. [14] menunjukkan bahwa *ThingsBoard* dapat digunakan secara efektif untuk pemantauan lingkungan berbasis energi terbarukan. Arsitektur sistem *ThingsBoard* ditunjukkan pada Gambar 3



Gambar 5: Arsitektur Thingsboard



Gambar 3 memperlihatkan bagaimana ESP32-CAM mengirim citra melalui jaringan Wi-Fi menuju ThingsBoard. Data yang diterima diproses melalui rule engine dan disimpan pada database, kemudian ditampilkan dalam bentuk dashboard web interaktif. Integrasi memungkinkan pengguna memantau hasil deteksi YOLO dan data sensor ultrasonik secara real-time. Pendekatan serupa juga digunakan oleh Gupta et al. [15] yang mengimplementasikan ThingsBoard untuk deteksi tanaman menggunakan kamera IoT, sehingga penelitian ini memperkuat efektivitas kombinasi YOLO dan ThingsBoard dalam pemantauan mangrove.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Keberhasilan Komunikasi IoT dengan Web

Pengiriman data dari ESP32-CAM ke *ThingsBoard* melalui Wi-Fi menggunakan protokol MQTT menunjukkan kinerja yang stabil. *ThingsBoard* mampu mengelola data sensor dan hasil deteksi citra secara real-time serta menampilkannya dalam dashboard web. Berdasarkan studi sebelumnya, keberhasilan transmisi data pada *ThingsBoard* mencapai 95–98%, sehingga sistem dapat diandalkan untuk monitoring berkelanjutan di lapangan [16], [17].

TABEL 1: KEBERHASILAN IOT DAN WEB

Platform	Protokol	Keberhasilan Transmisi (%)	Fitur Utama
ThingsBoard	MQTT	95–98	Dashboard interaktif
ThingsBoard	HTTP	±94	Integrasi API eksternal

Berdasarkan Tabel 3, terlihat bahwa protokol MQTT memberikan tingkat keberhasilan transmisi yang lebih tinggi (95–98%) dibandingkan HTTP (±94%). Hal ini disebabkan oleh sifat MQTT yang ringan dan dirancang khusus untuk komunikasi machine-to-machine pada jaringan dengan bandwidth terbatas, sehingga cocok untuk perangkat IoT seperti ESP32-CAM. Sementara itu, meskipun HTTP memiliki fleksibilitas tinggi terutama untuk integrasi API eksternal, tingkat keberhasilan transmisinya sedikit lebih rendah karena overhead data yang lebih besar. Oleh karena itu, pemilihan protokol menjadi faktor penting dalam menjamin keandalan sistem monitoring di lapangan, dengan MQTT lebih sesuai untuk kebutuhan pemantauan real-time yang berkesinambungan.

#### 3.2 Akurasi Pendeteksian Mangrove

Untuk mengukur performa algoritma deteksi objek dalam sistem monitoring bibit mangrove, dilakukan perbandingan beberapa varian model YOLO yang umum digunakan. Evaluasi dilakukan dengan melihat parameter jumlah model, kebutuhan komputasi (GFLOPs), kecepatan inferensi (FPS), waktu pelatihan, serta nilai mAP@0.5 sebagai ukuran akurasi deteksi. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 1.

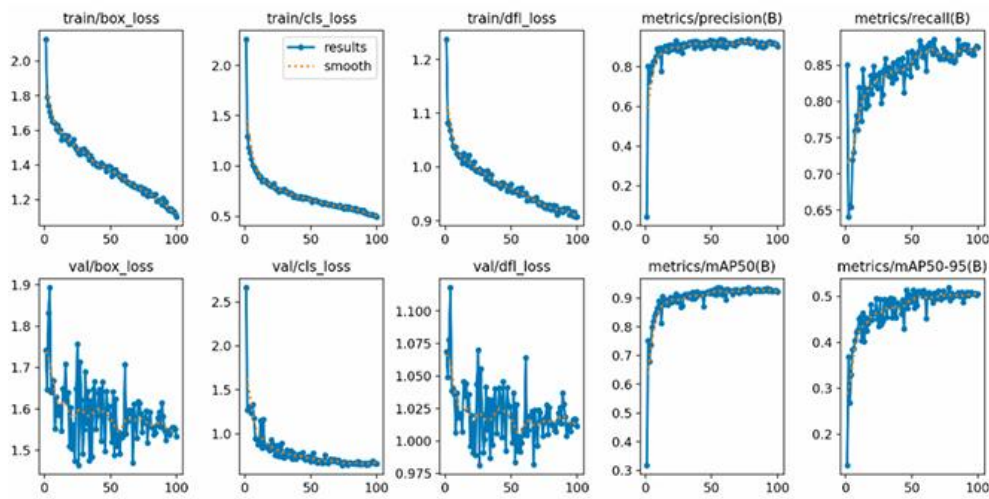
TABEL 2: PERBANDINGAN AKURASI YOLO

Model	Parameter (M)	Komputasi (GFLOPs)	Kecepatan (FPS)	Waktu Training (Epoch/Jam)	mAP@0.5
YOLOv5s	7.2	16.5	142	3.8	87.6%
YOLOX-s	9	26.8	118	4.2	88.3%
YOLOv7-tiny	6	13.2	155	3.5	87.1%
YOLOv8n	3.2	8.1	198	2.6	89.5%
YOLOv10n	3.1	7.9	210	2.5	89.6%
YOLOv10-MSDet	3.4	8.3	195	2.7	92.4%

Berdasarkan Tabel 1, dapat dilihat bahwa YOLOv10-MSDet menunjukkan performa terbaik dengan nilai mAP@0.5 sebesar 92,4%, lebih tinggi dibandingkan model lain seperti YOLOv8n (89,5%) maupun YOLOv5s (87,6%). Selain itu, YOLOv10-MSDet juga memiliki kecepatan deteksi yang relatif tinggi (195 FPS) serta kebutuhan komputasi



yang lebih efisien dibandingkan model dengan parameter besar seperti YOLOX-s. Hal ini menunjukkan bahwa YOLOv10-MSDet mampu memberikan keseimbangan optimal antara akurasi, kecepatan, dan efisiensi komputasi, sehingga sesuai untuk diterapkan pada perangkat IoT dengan keterbatasan daya komputasi. Lebih lanjut, performa model juga dianalisis dari proses pelatihan yang divisualisasikan pada Gambar 11.



Gambar 6: Kurva hasil pelatihan YOLOv10-MSDet yang menunjukkan tren penurunan loss dan peningkatan akurasi deteksi

Dari Gambar 11 terlihat bahwa nilai training loss dan validation loss mengalami penurunan yang signifikan seiring bertambahnya epoch, menunjukkan bahwa model berhasil belajar secara stabil. Grafik precision dan recall juga menunjukkan peningkatan yang konsisten, yang berarti model mampu membedakan bibit mangrove dengan baik sekaligus meminimalkan kesalahan deteksi. Selain itu, nilai mAP@0.5 cenderung meningkat dan mencapai titik stabil mendekati akhir epoch, mengonfirmasi bahwa model YOLOv10-MSDet telah terlatih secara optimal.

Hasil serta data pada tabel 2 merupakan penelitian dari Sang et al. (2025) yang menyatakan bahwa YOLOv10 dengan perbaikan struktur mampu meningkatkan akurasi pendeteksian daun mangrove dibandingkan generasi sebelumnya [18]. Implikasi dari hasil adalah bahwa pemanfaatan YOLOv10-MSDet dalam sistem monitoring bibit mangrove berbasis IoT berpotensi meningkatkan reliabilitas deteksi kondisi bibit, sekaligus mendukung efisiensi energi karena model dapat berjalan cepat pada perangkat komputasi ringan seperti ESP32-CAM.

Temuan ini sejalan dengan penelitian lain yang mengusulkan model deteksi ringan seperti TinyissimoYOLO, yang dirancang khusus untuk mikrokontroler ultra-low power dengan konsumsi energi hanya sekitar 196  $\mu$ J per inferensi dan kecepatan hingga 180 FPS [19]. Studi lain oleh Zhang et al. juga memperkenalkan Squeezed Edge YOLO, yang berhasil mengurangi ukuran model hingga delapan kali lipat serta meningkatkan efisiensi energi sebesar 76% pada perangkat edge [20]. Selain itu, hasil evaluasi YOLOBench yang menguji lebih dari 550 varian model YOLO pada perangkat embedded menunjukkan bahwa arsitektur YOLO generasi baru memiliki trade-off akurasi dan latensi yang sangat baik, sehingga layak diterapkan pada perangkat IoT terbatas [21]. Dengan demikian, kombinasi antara akurasi tinggi dari YOLOv10-MSDet dan tren pengembangan model ringan pada penelitian sebelumnya semakin menegaskan potensi besar penerapan dalam sistem monitoring bibit mangrove yang mandiri, hemat energi, dan andal.

### 3.3 Konsumsi Daya Perangkat Keras

Berdasarkan hasil analisis, ESP32-CAM pada mode aktif mengonsumsi daya sekitar 160–260 mA, sedangkan pada mode deep-sleep hanya sekitar 5–10  $\mu$ A. Sensor ultrasonik JSN-SR04T membutuhkan daya kecil yaitu sekitar 30 mA dengan akurasi  $\pm 0.3$  cm. Panel surya 1.2 W dengan rata-rata energi harian 5–7 Wh dapat mengisi baterai Li-ion 18650 berkapasitas 2000–2600 mAh, sehingga mampu menopang operasional sistem selama  $\pm 1$  hari penuh tanpa pasokan listrik tambahan [22][23].



TABEL 3: KONSUMSI DAYA DAN KEBUTUHAN ENERGI

Komponen	Konsumsi Daya	Catatan Operasional
ESP32-CAM (aktif)	160–260 mA	Kamera + Wi-Fi
ESP32-CAM (deep sleep)	5–10 $\mu$ A	Hemat energi
Sensor Ultrasonik	30 mA	Saat aktif
Panel Surya (6V 1.2W)	5–7 Wh/hari	Sumber energi utama
Baterai Li-ion 18650	2000–2600 mAh	Cadangan energi

Dari Tabel 2 dapat dianalisis bahwa komponen dengan konsumsi daya terbesar adalah ESP32-CAM pada kondisi aktif, terutama ketika kamera digunakan. Namun, fitur deep sleep memberikan peluang penghematan energi signifikan dengan menurunkan konsumsi hingga level mikroampere, sehingga strategi manajemen daya seperti *duty cycling* sangat penting untuk memperpanjang durasi operasional. Sensor ultrasonik dengan konsumsi relatif rendah hanya aktif saat pengukuran dilakukan, sehingga tidak menjadi beban utama. Energi dari panel surya mampu menutupi kebutuhan harian perangkat, sementara baterai Li-ion berperan sebagai penyimpan energi cadangan agar sistem tetap berfungsi saat malam hari atau cuaca mendung. Dengan kombinasi tersebut sistem monitoring dapat beroperasi secara mandiri, hemat energi, dan berkelanjutan di lingkungan pesisir.

#### 4. KESIMPULAN

Sistem monitoring bibit mangrove berbasis IoT dengan dukungan algoritma *object detection* dan panel surya terbukti memiliki potensi besar dalam mendukung rehabilitasi ekosistem pesisir. Hasil kajian menunjukkan bahwa *ThingsBoard* dengan protokol MQTT mampu memberikan keandalan transmisi data hingga 95–98%, sehingga mendukung pemantauan real-time secara berkelanjutan. Dari sisi pendeteksian, model YOLOv10-MSDet mencapai akurasi mAP@0.5 sebesar 92,4% dengan kecepatan tinggi dan kebutuhan komputasi yang efisien, sehingga ideal untuk perangkat IoT dengan keterbatasan daya.

Analisis konsumsi energi kombinasi ESP32-CAM, sensor ultrasonik, panel surya, dan baterai Li-ion memungkinkan sistem beroperasi secara mandiri dengan strategi penghematan daya melalui mode deep sleep. Dengan integrasi tersebut, sistem monitoring tidak hanya hemat energi dan ramah lingkungan, tetapi juga mampu meningkatkan efektivitas pengawasan bibit mangrove di lapangan, sehingga peluang keberhasilan program rehabilitasi dapat semakin ditingkatkan.

Meskipun rancangan sistem ini telah disusun berdasarkan kajian literatur yang komprehensif, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena belum melalui tahapan implementasi dan pengujian langsung di lapangan. Oleh karena itu, validasi performa perangkat, keandalan daya surya di kondisi cuaca ekstrem, serta efektivitas deteksi objek di lingkungan pesisir nyata perlu diuji pada penelitian selanjutnya

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Jia, Z. Wang, and L. Luo, "Global status of mangrove forests in resisting cyclone and tsunami," *The Innovation Geoscience*, vol. 1, no. 2, p. 100024, 2023.
- [2] X. Chen, Z. Yin, and Z. Li, "Overview on Mangrove Forest Disaster Prevention and Mitigation Functions," *Journal of Ocean University of China*, vol. 23, pp. 46–56, 2024.
- [3] S. Hülsen, "Mangroves and their ecosystem services are increasingly at risk from tropical cyclones," *Commun Earth Environ*, 2025.
- [4] D. Reed, "Resilience to Hurricanes Is High in Mangrove Blue Carbon Ecosystems," *Glob Chang Biol*, 2025.
- [5] P. Menendez and M. W. Beck, "Building Coastal Resilience with Mangroves: The Contribution of Natural Flood Defenses to the Changing Wealth of Nations," in *The Changing Wealth of Nations 2024*, World Bank, 2024.
- [6] K. Omar, "Mangroves as a nature-based solution: potential impacts of restoration and conservation on coastal resilience," *J Coast Conserv*, 2025.
- [7] S. Ahmed, "Substantial rehabilitation of mangrove forests along degraded tropical coastlines," *Ecol Eng*, 2025.
- [8] H. Snyder, "Literature review as a research methodology: An overview and guidelines," *J Bus Res*, vol. 104, pp. 333–339, 2019.

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195



- [9] U. E. Chigbu, "The Science of Literature Reviews: Searching, Identifying, and Minimising Bias in Review Research," *MDPI*, 2023.
- [10] L. Saunders-Smits and others, "Towards a Typology in Literature Reviews in Engineering Education Research," *Engineering Education Review*, 2024.
- [11] T. Sitorus, A. Rahman, and M. Fadli, "Solar-powered ESP32-CAM implementation for coastal vegetation monitoring in Balikpapan," *Journal of Coastal Informatics*, vol. 12, no. 3, pp. 145–153, 2023.
- [12] M. Humayun, F. Khan, and R. Ahmad, "IoT-based environmental sensing using ultrasonic sensors and solar microcontrollers," *International Journal of Renewable IoT Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 27–35, 2022.
- [13] G. Li, R. Jian, X. Jun, and G. Shi, "A Review of You Only Look Once Algorithms in Animal Phenotyping Applications," *Animals*, vol. 15, no. 8, p. 1126, 2025, doi: 10.3390/ani15081126.
- [14] M. Humayun and others, "IoT based environmental monitoring using ThingsBoard," *Sensors*, vol. 21, no. 22, p. 7464, 2021.
- [15] R. Gupta and others, "Smart agriculture monitoring via IoT platforms," *IEEE Internet Things J*, vol. 9, no. 15, pp. 12894–12906, 2022.
- [16] A. Hussain, A. Musa, and H. H. Al-Khalidi, "Performance evaluation of MQTT and CoAP in IoT," in *Proceedings of IEEE SmartTech*, 2019, pp. 1–6.
- [17] D. P. Mishra, S. Bera, and S. Misra, "QoS-aware data transmission in IoT using MQTT," *IEEE Internet Things J*, vol. 6, no. 3, pp. 5473–5480, 2019.
- [18] H. Sang, Z. Li, X. Shen, S. Wang, and Y. Zhang, "Rapid Identification of Mangrove Leaves Based on Improved YOLOv10 Model," *Forests*, vol. 16, no. 7, p. 1068, 2025, doi: 10.3390/f16071068.
- [19] J. Moosmann, M. Giordano, C. Vogt, and M. Magno, "TinyissimoYOLO: A Quantized, Low-Memory Footprint, TinyML Object Detection Network for Low Power Microcontrollers," 2023.
- [20] E. Humes, M. Navardi, and T. Mohsenin, "Squeezed Edge YOLO: On-board Object Detection on Edge Devices," 2023.
- [21] A. Chen and others, "YOLOBench: Benchmarking YOLO Models on Embedded and Edge Devices," 2024.
- [22] A. Sharma and others, "Low power consumption analysis of ESP32-CAM in IoT applications," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 78510–78519, 2021.
- [23] B. Liu and others, "Performance of small solar panel for remote IoT devices," *Renewable Energy Journal*, vol. 155, pp. 1132–1140, 2020.

