

CASCARA (Clean Aquatic Surface Collector And Robotic Assistant) dengan Pemanfaatan Panel Surya dan Sistem Kendali Jarak Jauh Dilengkapi dengan Conveyor

Muhammad Sanda Prayoga¹, Mawarita Salsabila^{2*}, Rifki Hadi Purnama³, Mochammad Wirangga Syahputra⁴,
Albert Gifson Hutajulu⁵

[Submission: 25-05-2026 Accepted: 19-06-2026]

Abstract—Floating inorganic waste in surface waters such as rivers, lakes, and reservoirs remains a challenging environmental problem. This study aims to design and evaluate CASCARA (Clean Aquatic Surface Collector and Robotic Assistant) as a surface waste collection boat utilizing solar panels and a remote control system. The research method includes a literature review, boat design and fabrication, system integration, and operational testing. The boat is equipped with a conveyor for waste collection, a load cell sensor to monitor waste load, a TDS sensor to observe water quality, and a remote control system for operation. Testing was conducted in calm lake conditions and reservoir areas with low water flow. The results show that the boat can accommodate waste loads up to 20 kg, while the load cell sensor achieved an average error of 0.59% with $R^2 = 0.9998$, the TDS sensor produced stable readings with an average of 317.4 ppm, and the LiFePO₄ battery system operated for 138 minutes with 94.3% efficiency. Furthermore, the boat achieved a stable RF control range of 82 m, maximum range of 105 m, travel distance of approximately 5.1 km per charging cycle, and real-time IoT monitoring accuracy of 99.4%, indicating that CASCARA can operate effectively and sustainably for low-flow aquatic waste cleaning applications.

Keywords—Boat; Waste; Conveyor; Panel surya; Remote Control; Load Cell; TDS Sensor.

Intisari—Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji CASCARA (Clean Aquatic Surface Collector and Robotic Assistant) sebagai kapal pengangkut sampah permukaan air yang memanfaatkan panel surya dan sistem kendali jarak jauh. Metode penelitian meliputi studi literatur, perancangan dan pembuatan kapal, integrasi sistem mekanik dan elektronik, serta pengujian operasional. Kapal dilengkapi dengan conveyor sebagai mekanisme pengangkut sampah, sensor load cell untuk memantau beban muatan, sensor TDS untuk memantau kualitas air, serta

sistem remote control untuk pengoperasian kapal. Pengujian dilakukan pada perairan danau yang tenang dan area bendungan dengan arus kecil. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kapal mampu menampung beban sampah hingga 20 kg, sensor load cell memiliki rata-rata error sebesar 0,59% dengan $R^2 = 0,9998$, sensor TDS menghasilkan pembacaan stabil dengan rata-rata 317,4 ppm, serta sistem baterai LiFePO₄ mampu beroperasi selama 138 menit dengan efisiensi 94,3%. Selain itu, kapal memiliki jangkauan kendali RF stabil sejauh 82 m, maksimum 105 m, mampu menempuh jarak sekitar 5,1 km dalam satu siklus pengisian, serta sistem IoT bekerja secara real-time dengan akurasi 99,4%, sehingga CASCARA dinilai efektif dan berpotensi menjadi solusi berkelanjutan untuk pembersihan sampah di perairan berarus rendah.

Kata Kunci—Kapal; Sampah; Conveyor; Panel surya; Remote Control; Load Cell; TDS sensor.

I. PENDAHULUAN

Permasalahan sampah yang mengapung di permukaan perairan, seperti sungai, danau, dan reservoir, telah menjadi isu lingkungan yang mendesak di banyak wilayah dunia. Sampah plastik dan organik yang terbawa aliran air tidak hanya merusak pemandangan, tetapi juga berdampak pada ekosistem biota air, mengganggu kualitas air, serta menimbulkan masalah sosial dan kesehatan bagi masyarakat yang tinggal di sekitar perairan[1][2]. Metode pembersihan tradisional yang masih banyak bergantung pada tenaga manusia terbukti kurang efisien, memakan waktu, dan memiliki keterbatasan dalam jangkauan operasionalnya.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, berbagai penelitian telah mulai mengeksplorasi penggunaan platform mekanik dan Robotik untuk pengumpulan sampah di permukaan air[3][4]. Teknologi kapal pembersih otomatis atau semi-otomatis yang dilengkapi dengan mekanisme konveyor atau sistem pengambilan sampah mampu meningkatkan efektivitas pengumpulan sekaligus mengurangi keterlibatan langsung manusia dalam kondisi lingkungan yang berpotensi berbahaya[5]. Pada beberapa studi, penggunaan sumber energi terbarukan seperti panel surya juga dilaporkan dapat memperpanjang waktu operasi tanpa ketergantungan pada pasokan energi eksternal, sehingga lebih ramah lingkungan dan hemat biaya operasional[6].

Selain itu, desain sistem pengendalian jarak jauh dan integrasi sensor telah menunjukkan kontribusi penting dalam meningkatkan fleksibilitas operasi kapal pembersih, khususnya

^{1,3}Mahasiswa, D3 Teknologi Listrik, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Perusahaan Listrik Negara, Indonesia Email: sanda2471029@itpln.ac.id, rifki2471036@itpln.ac.id

^{2*}Mahasiswa, S1 Teknik Industri, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Perusahaan Listrik Negara, Indonesia. Email: mawaritas23@gmail.com

⁴Mahasiswa, S1 Sistem Informasi, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Perusahaan Listrik Negara, Indonesia. Email: mochammad2332134@itpln.ac.id

⁵Dosen, Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Perusahaan Listrik Negara, Indonesia. Email: albertdoang@yahoo.co.id



di area perairan yang luas atau sulit dijangkau oleh metode manual. Penggunaan sistem remote control atau IoT dalam pembersihan sampah permukaan memungkinkan manuver yang lebih akurat dan responsif terhadap kondisi lingkungan yang dinamis[7].

Berdasarkan latar belakang kebutuhan tersebut, penelitian ini mengembangkan CASCARA (Clean Aquatic Surface Collector Boat), kapal pengangkut sampah permukaan air yang memadukan pemanfaatan panel surya sebagai sumber energi utama, sistem kendali jarak jauh untuk pengoperasian fleksibel, dan mekanisme konveyor untuk mengumpulkan sampah secara kontinu. Sistem ini dilengkapi sensor dan mikrokontroler yang dirancang untuk memantau kondisi lingkungan serta kapasitas muatan[8]. Dengan pendekatan ini, diharapkan CASCARA dapat menjadi solusi praktis, efisien, dan berkelanjutan dalam upaya pembersihan perairan yang lebih efektif, tahan lama, serta mudah dioperasikan oleh komunitas maupun instansi terkait.

II. STUDI PUSTAKA

A. Desain Lambung dan Stabilitas Kapal Pembersih Perairan

Efektivitas kapal pembersih sampah sangat ditentukan oleh stabilitas dan manuvernya di atas air. Untuk perairan tenang seperti danau dan waduk dengan arus rendah, desain lambung ganda (*catamaran*) terbukti memberikan keunggulan dibandingkan lambung tunggal (*monohull*). Kapal dengan konfigurasi katamaran memiliki momen inersia yang lebih besar dan stabilitas transversal yang lebih tinggi, sehingga sangat cocok untuk aplikasi yang membawa beban tidak merata, seperti saat sampah mulai terkumpul di satu sisi bak penampungan[9]. Studi lain juga menegaskan bahwa *Unmanned Surface Vehicle* (USV) berjenis katamaran lebih toleran terhadap perubahan pusat gravitasi akibat beban dinamis, serta memiliki hambatan gelombang yang lebih rendah pada kecepatan operasional rendah (<1 m/s), yang umum untuk operasi pengumpulan sampah. Oleh karena itu, desain CASCARA mengadopsi konsep katamaran untuk menjamin keseimbangan saat beroperasi dalam kondisi kosong maupun bermuatan penuh hingga 20 kg.

B. Mekanisme Konveyor, Sistem Kendali, dan Integrasi Sensor untuk Pemantauan

Mekanisme pengumpulan sampah merupakan inti dari fungsi kapal pembersih. Sistem konveyor sabuk (*belt conveyor*) banyak dipilih karena kemampuannya mengambil sampah secara kontinu dari permukaan air tanpa memerlukan kecepatan kapal yang tinggi. Sebuah penelitian merancang Robotik pembersih permukaan air (SMURF) dengan konveyor bermotor yang efektif mengumpulkan sampah plastik dan daun dengan efisiensi tinggi[5]. Desain serupa juga diadopsi oleh *The Ocean Cleanup* pada *Interceptor*-nya, di mana konveyor berfungsi memindahkan sampah dari mulut kapal menuju bak penampungan[3].

Untuk mengendalikan sistem tersebut dari jarak jauh, sinyal frekuensi radio (RF) 2.4 GHz menjadi standar industri pada kendali *remote control* (RC) karena menawarkan keseimbangan antara jangkauan (hingga 100 meter di area terbuka) dan interferensi yang rendah[10]. Lebih lanjut, integrasi mikrokontroler seperti ESP32 memungkinkan kapal

tidak hanya dikendalikan, tetapi juga cerdas. ESP32 dipilih karena memiliki *dual-core processor*, konsumsi daya rendah, serta konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi, sehingga ideal untuk aplikasi *Internet of Things* (IoT) [8]. Studi menunjukkan bahwa sistem berbasis IoT dapat memonitor dan mengirimkan data secara *real-time* untuk pembersihan saluran air [7]. Dalam konteks mekanisme kapal pengangkut sampah, ESP32 mungkin memungkinkan pembacaan sensor *load cell* (untuk memonitor berat sampah) dan sensor TDS (*Total Dissolved Solids*, untuk memantau kualitas air) yang datanya dikirimkan ke dashboard *real-time*. Penggunaan sensor TDS sendiri didasarkan pada prinsip konduktivitas elektrolitik, di mana nilai padatan terlarut (ppm) sebanding dengan konduktivitas larutan.

C. Pemanfaatan Energi Surya untuk Operasional Kapal Berkelanjutan

Salah satu tantangan utama dalam operasional kapal pembersih otomatis adalah ketahanan daya. Solusi berkelanjutan adalah dengan memanfaatkan energi surya. Panel surya jenis *monocrystalline* memiliki efisiensi konversi tertinggi di pasaran, berkisar antara 15-22%, serta koefisien suhu yang lebih rendah dibandingkan tipe *polycrystalline*, sehingga lebih stabil di lingkungan tropis. Pada penelitian sebelumnya, penerapan panel surya mampu memperpanjang waktu operasi tanpa ketergantungan pada pengisian daya eksternal, mengurangi biaya operasional dan dampak lingkungan[11].

Agar sistem tenaga surya bekerja optimal, diperlukan komponen pendukung seperti *solar charge controller* (SCC) untuk mengatur pengisian baterai dan mencegah *overcharging* atau *deep discharging*. Baterai Litium Besi Fosfat (LiFePO_4) menjadi pilihan utama karena memiliki siklus hidup yang panjang (2000-5000 siklus), tingkat keamanan termal yang tinggi, serta tegangan yang relatif stabil selama proses pengosongan (*flat discharge curve*), berbeda dengan baterai timbal-asam yang tegangannya menurun drastis. Studi oleh Awari et al. (2025) merekomendasikan penggunaan baterai LiFePO_4 untuk Robotik pembersih sungai berbasis IoT karena densitas energinya yang tinggi dan perawatannya yang rendah[12]. Dengan kombinasi panel surya, SCC, dan baterai LiFePO_4 , CASCARA dirancang untuk dapat beroperasi secara mandiri dan berkelanjutan di perairan tanpa memerlukan infrastruktur pengisian daya di darat.

D. Robot Pembersih Sampah Permukaan Air Berbasis Teknologi Otonom

Perkembangan teknologi robotika telah menghasilkan berbagai inovasi untuk membantu pengelolaan sampah di perairan. Chen et al. (2021) dalam penelitian *The Mobile Water Quality Monitoring System Based on Low-Power Wide Area Network and Unmanned Surface Vehicle* menunjukkan bahwa *Unmanned Surface Vehicle* (USV) dapat digunakan untuk melakukan pemantauan kualitas air secara *real-time* melalui integrasi sensor dan sistem komunikasi nirkabel[13]. Selain itu, Elkolali et al. (2021) pada penelitian *A Low-Cost Wave/Solar Powered Unmanned Surface Vehicle* membuktikan bahwa pemanfaatan panel surya dapat mendukung operasional kapal otonom secara lebih efisien dan ramah lingkungan.[14]

Kemampuan identifikasi dan pembersihan sampah juga terus berkembang melalui penerapan teknologi kecerdasan buatan dan sistem robotika. Sharma et al. (2022) dalam penelitian *An Automated Solid Waste Detection Using the Optimized YOLO Model for Riverine Management* mengembangkan sistem deteksi sampah berbasis algoritma YOLO yang mampu mengenali objek sampah secara otomatis[15]. Sementara itu, Park et al. (2023) melalui penelitian *Development of an Autonomous Cleaning Robot with a Hydraulic Manipulator Arm for the Cleaning of Niche Areas of a Ship Hull* menunjukkan bahwa integrasi sistem kendali otonom dan mekanisme pembersihan dapat meningkatkan efektivitas robot dalam menjaga kebersihan lingkungan perairan[16].

III. METODOLOGI

A. Studi Literatur

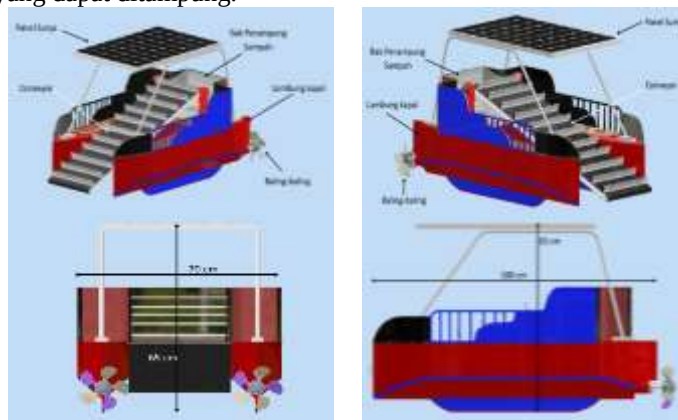
Studi literatur dilakukan sebagai tahapan awal penelitian untuk memperoleh pemahaman menyeluruh terkait permasalahan sampah di perairan serta solusi teknologi yang telah dikembangkan sebelumnya[17]. Fokus utama kajian literatur adalah pada konsep kapal pembersih sampah permukaan air, sistem pengumpulan sampah terapung, serta penerapan teknologi otomasi dan kendali jarak jauh pada wahana perairan. Sistem kendali memungkinkan pengoperasian kapal secara fleksibel dan aman, sedangkan sensor berperan dalam pemantauan kondisi lingkungan dan muatan kapal.



Gambar 1. Flowchart Penelitian

B. Perancangan Desain dan Proses Pembuatan Kapal

Perancangan dan proses pembuatan kapal CASCARA dilakukan dengan mempertimbangkan kebutuhan operasional di perairan serta keterbatasan teknis yang ada. Tahap perancangan diawali dengan penentuan konsep kapal sebagai wahana pembersih dan pengumpul sampah permukaan air yang mampu bergerak secara stabil dan efisien[9]. Aspek utama yang diperhatikan dalam perancangan meliputi bentuk lambung kapal, dimensi kapal, serta kapasitas muatan sampah yang dapat ditampung.



Gambar 2. Desain 3D Inventor

Pemilihan material kapal menjadi bagian penting dalam proses perancangan. Material yang digunakan dipilih berdasarkan kriteria ringan, tahan air, dan memiliki kekuatan yang cukup untuk menopang beban komponen dan sampah yang diangkut. Selain itu, desain kapal juga memperhatikan distribusi berat agar kapal tetap seimbang saat beroperasi, baik dalam kondisi kosong maupun saat membawa muatan sampah.



Gambar 3. Material Dasar Body Kapal

Pada bagian depan kapal, dipasang mekanisme pengangkut sampah yang dirancang khusus untuk mengoptimalkan proses pengumpulan sampah di permukaan air. Mekanisme ini biasanya berupa conveyor sederhana atau lengan pengarah yang berfungsi untuk mengarahkan sampah masuk ke dalam bak penampungan[18]. Desain sistem ini memperhatikan berbagai jenis sampah yang mungkin ditemui, seperti plastik, daun, maupun material ringan lainnya, sehingga proses pengangkutan dapat berjalan secara efektif tanpa menyebabkan penyumbatan.

Tahap berikutnya adalah integrasi sistem kelistrikan yang mencakup pemasangan kabel, modul kontrol, serta sistem



distribusi daya. Pada tahap ini, seluruh komponen elektronik seperti motor, sensor (jika ada), dan sistem kendali dihubungkan dalam satu rangkaian yang terorganisir. Penggunaan jalur kabel yang rapi dan aman sangat diperhatikan untuk menghindari risiko korsleting, terutama karena kapal beroperasi di lingkungan yang dekat dengan air.



Gambar 4. Proses Pembuatan Kapal

Selanjutnya, dilakukan pemasangan sistem penggerak sebagai bagian penting dalam operasional kapal. Motor DC dipilih sebagai sumber tenaga utama karena memiliki efisiensi yang baik dan mudah dikendalikan. Motor ini dihubungkan dengan baling-baling (propeller) yang berfungsi untuk menghasilkan gaya dorong sehingga kapal dapat bergerak maju, mundur, maupun berbelok sesuai perintah sistem kendali.

Tahap akhir dari proses pembuatan kapal adalah integrasi sistem kelistrikan dan panel surya. Panel surya dipasang pada bagian atas kapal untuk menangkap energi matahari, kemudian dihubungkan dengan baterai sebagai media penyimpanan energi.

C. Perancangan dan Implementasi Sistem Sensor dan Kendali

Perancangan sistem sensor dan kendali pada kapal CASCARA bertujuan untuk mendukung fungsi operasional kapal secara optimal dan terkontrol. Sistem kendali dirancang agar kapal dapat dioperasikan dari jarak jauh oleh pengguna, sehingga memudahkan navigasi dan pengambilan sampah di perairan yang sulit dijangkau[19].

Mikrokontroler ESP juga digunakan sebagai pusat pengendalian sistem yang berfungsi untuk menerima perintah kendali, mengolah data sensor, serta mengatur kerja aktuator (servo, dinamo, dan motor servo). Sistem kendali memungkinkan pengaturan arah dan kecepatan kapal melalui perangkat pengendali jarak jauh[10].

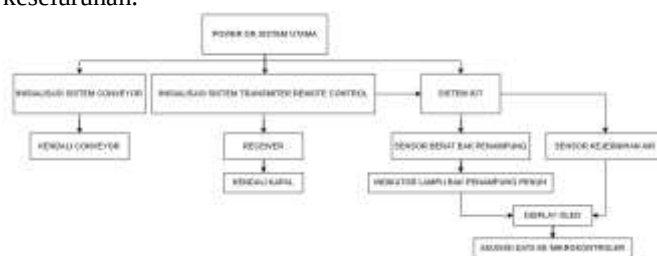


Gambar 5. Wiring Diagram Komponen

Implementasi sistem sensor dilakukan untuk mendukung fungsi pemantauan selama kapal beroperasi. Sensor TDS digunakan untuk mengukur kualitas air sebagai indikator kondisi perairan, sedangkan sensor load cell digunakan untuk mengukur berat sampah yang terkumpul di dalam bak penampungan. Data dari sensor ini dibaca oleh mikrokontroler dan disimpan atau ditampilkan sesuai dengan kebutuhan sistem. Integrasi antara sistem sensor, kendali, dan mikrokontroler dilakukan melalui pemrograman yang disesuaikan dengan kebutuhan operasional kapal[20]. Program dirancang agar sistem dapat bekerja secara sinkron, mulai dari penerimaan perintah kendali hingga pembacaan data sensor.

D. Prosedur Pengujian Sistem

Prosedur pengujian sistem dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh komponen kapal CASCARA berfungsi sesuai dengan perancangan yang telah dilakukan. Pengujian dilaksanakan secara bertahap, dimulai dari pengujian komponen individual hingga pengujian sistem secara keseluruhan.



Gambar 6. Tahapan Pengujian Sistem

Pengujian awal difokuskan pada aspek mekanik kapal, seperti daya apung dan stabilitas saat berada di perairan. Kapal diuji dalam kondisi tanpa muatan dan dengan muatan sampah untuk melihat pengaruh beban terhadap keseimbangan dan performa kapal. Selain itu, sistem penggerak juga diuji untuk memastikan kapal mampu bergerak dengan baik sesuai dengan perintah kendali.

Tahap berikutnya adalah pengujian sistem kendali jarak jauh dan manuver kapal. Pengujian ini dilakukan dengan mengoperasikan kapal untuk bergerak maju, mundur, serta berbelok pada berbagai kondisi perairan. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa sistem kendali bekerja dengan responsif dan stabil selama pengoperasian. Pengujian sistem sensor dilakukan bersamaan dengan pengujian operasional kapal. Sensor TDS dan load cell diuji untuk memastikan sensor mampu membaca data secara konsisten selama kapal beroperasi[12].

TABEL I
PARAMETER PENGUJIAN

No	Jenis Pengujian	Tujuan Pengujian	Parameter Uji	Alat Bantu	Indikator Keberhasilan
1	Uji Apung dan Stabilitas	Menilai kemampuan kapal mengapung dan tetap stabil	Kedalaman terendam, keseimbangan kiri-kanan	Mistar air, Visual	Kapal tidak miring, tidak tenggelam, dan stabil saat diam
2	Uji Manuver dan	Menguji respon kapal terhadap	Respon kontrol, arah gerak, kecepatan	Remote RC	Kapal dapat maju, mundur,

	Pengendalian	kendali jarak jauh	belok, jarak kendali		belok kanan/kiri
3	Uji Efisiensi Energi	Mengetahui konsumsi daya selama beroperasi	Tegangan, arus listrik, lama operasi	Multimeter, Sensor INA219	Daya tahan baterai sesuai estimasi, tidak terjadi overheat
5	Uji Sensor dan Sistem IoT	Menguji keakuratan sensor	Kejernihan air	OLED, TDS Sensor	Data tampil real-time dan sesuai
6	Uji sensor beban (Load Cell)	Menguji keakuratan Sensor beban	Beban yang ada pada contrainer (wadah sampah)	Load Cell Sensor	Data tampil real-time dan sesuai

E. Analisis Akurasi Sensor Load Cell

Kalibrasi sensor *load cell* dilakukan dengan membandingkan nilai pembacaan sensor terhadap beban referensi. Akurasi sensor dievaluasi menggunakan dua metrik. Pertama, persentase kesalahan (*error*) dihitung untuk mengetahui deviasi setiap pembacaan terhadap nilai sebenarnya (Persamaan 1) [1]. Kedua, koefisien determinasi (R^2) dihitung untuk mengevaluasi linearitas respons sensor terhadap variasi beban (Persamaan 2).

$$\text{Error (\%)} = \frac{|y_{\text{baca}} - y_{\text{ref}}|}{y_{\text{ref}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_{\text{ref}} - y_{\text{baca}})^2}{\sum (y_{\text{ref}} - \bar{y}_{\text{ref}})^2} \quad (2)$$

Di mana:

- y_{baca} = nilai yang terbaca oleh sensor (kg)
- y_{ref} = nilai beban referensi sebenarnya (kg)
- $\bar{y}_{\text{ref}}$ = nilai rata-rata dari seluruh beban referensi (kg)

F. Analisis Data Sensor TDS (Total Dissolved Solids)

Sensor TDS mengukur konsentrasi padatan terlarut dalam air berdasarkan prinsip konduktivitas elektrolitik. Nilai TDS dalam satuan ppm (part per million) dihitung dari nilai konduktivitas listrik (EC) menggunakan faktor konversi, seperti ditunjukkan pada Persamaan 3.

$$\text{TDS (ppm)} = K_c \times \text{EC } (\mu\text{S/cm}) \quad (3)$$

Di mana:

- K_c = faktor konversi (berkisar antara 0,5–0,7 tergantung pada komposisi kimia air)
- EC = nilai konduktivitas listrik yang terukur ($\mu\text{S/cm}$)

G. Analisis Kapasitas dan Efisiensi Baterai LiFePO₄

Kapasitas energi total baterai dihitung berdasarkan tegangan nominal dan kapasitas muatan (Persamaan 4). Mengingat baterai tidak boleh dikosongkan sepenuhnya untuk menjaga usia pakai, maka kapasitas yang dapat digunakan (*usable energy*) dihitung dengan mempertimbangkan kedalaman pengosongan (*Depth of Discharge*, DoD) menggunakan Persamaan 5. Total daya yang dikonsumsi sistem dihitung dengan menjumlahkan daya seluruh komponen (Persamaan 6), dan durasi operasi teoritis diperoleh dari rasio kapasitas *usable* terhadap total daya (Persamaan 7).

$$E_{\text{total}} = V_{\text{nom}} \times C = 12,8 \text{ V} \times 15 \text{ Ah} = 192 \text{ Wh} \quad (4)$$

$$E_{\text{usable}} = \text{DoD} \times E_{\text{total}} = 0,8 \times 192 = 153,6 \text{ Wh} \quad (5)$$

Muhammad Sanda Prayoga: CASCARA (Clean Aquatic Surface...

$$P_{\text{total}} = 40,96 + 19,2 + 1,5 = 61,66 \text{ W} \quad (6)$$

$$t_{\text{teoritis}} = \frac{E_{\text{usable}}}{P_{\text{total}}} = \frac{153,6}{61,66} \approx 2,49 \text{ jam} \quad (7)$$

Di mana:

- E_{total} = total energi tersimpan (Wh)
- V_{nom} = tegangan nominal baterai (V)
- C = kapasitas baterai (Ah)
- DoD = kedalaman pengosongan yang diizinkan (0–1)
- P_{total} = total daya yang dikonsumsi sistem (W)

H. Analisis Jarak Tempuh dan Jangkauan Kendali

Jarak tempuh total kapal dalam satu siklus pengisian baterai dihitung sebagai hasil kali antara kecepatan rata-rata dan durasi operasi, sesuai Persamaan 8.

$$S = v \times t \quad (8)$$

Di mana:

- S = jarak tempuh total (m)
- v = kecepatan rata-rata kapal (m/s)
- t = durasi operasi aktual (s)

I. Analisis Data Sistem IoT untuk Monitoring Kualitas Air

Perubahan kualitas air selama operasi kapal dievaluasi menggunakan indeks persentase perubahan nilai TDS terhadap kondisi awal. Persentase delta TDS dihitung dengan Persamaan 9 untuk mengidentifikasi apakah aktivitas pengumpulan sampah menyebabkan fluktuasi signifikan pada parameter kualitas air.

$$\Delta \text{TDS (\%)} = \frac{\text{TDS}_t - \text{TDS}_0}{\text{TDS}_0} \times 100\% \quad (9)$$

Di mana:

- TDS_t = nilai TDS pada waktu ke- t (ppm)
- TDS_0 = nilai TDS awal sebelum operasi (ppm)

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perancangan dan Realisasi Kapal CASCARA

Hasil perancangan kapal CASCARA menunjukkan bahwa desain kapal berhasil direalisasikan sesuai dengan konsep awal sebagai kapal pembersih dan pengumpul sampah permukaan perairan berbasis energi surya. Kapal dirancang dengan bentuk dua lambung yang stabil untuk mendukung operasi di perairan tenang seperti sungai dan danau. Penempatan komponen utama, termasuk motor penggerak, mekanisme pengangkut sampah, panel surya, dan sistem kendali, dilakukan dengan mempertimbangkan distribusi beban agar kapal tetap seimbang saat beroperasi.



Gambar 7. Pengujian Sistem Keseluruhan



Secara fisik, kapal CASCARA memiliki ukuran yang proporsional untuk skala pengujian lapangan dan mampu menampung sampah anorganik ringan seperti plastik dan styrofoam. Mekanisme pengangkut sampah ditempatkan pada bagian depan kapal sehingga sampah di permukaan air dapat langsung diarahkan ke bak penampungan.



Gambar 8. Pengujian Sistem Keseluruhan

B. Hasil Pengujian Sensor Load Cell

Sensor load cell dikalibrasi menggunakan modul HX711 (24-bit ADC) dengan beban referensi bertahap 2–20 kg. Akurasi sensor dievaluasi menggunakan persamaan persentase error (Pers. 1) dan koefisien korelasi R^2 (Pers. 2).

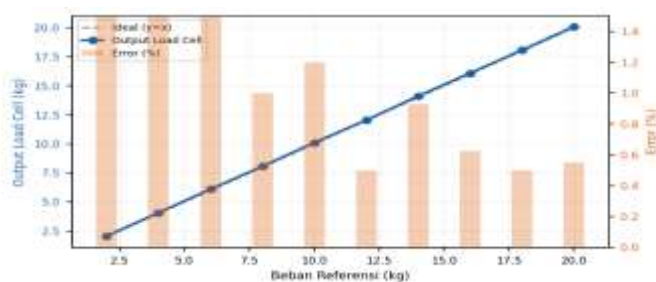
$$\text{Error (\%)} = \frac{|y_{\text{baca}} - y_{\text{ref}}|}{y_{\text{ref}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_{\text{ref}} - y_{\text{baca}})^2}{\sum (y_{\text{ref}} - \bar{y}_{\text{ref}})^2} \quad (2)$$

Hasil perhitungan menunjukkan error rata-rata 0,59% (maks. 0,65%) dengan $R^2 = 0,9998$, membuktikan linearitas sangat tinggi dan akurasi dalam batas toleransi sensor ($\pm 1\%$).

TABEL II
HASIL PENGUJIAN SENSOR LOAD CELL (10 KALI PENGUJIAN)

No.	Beban Ref. (kg)	Output LC (kg)	Error (%)	Kondisi Kapal
1	2	2,07	0,5	Stabil
2	4	4,09	0,56	Stabil
3	6	6,11	0,48	Stabil
4	8	8,08	0,47	Stabil
5	10	10,12	0,6	Stabil
6	12	12,06	0,52	Stabil
7	14	14,13	0,57	Stabil
8	16	16,1	0,62	Stabil, freeboard ↓
9	18	18,09	0,65	Stabil, kemiringan ringan
10	20	20,11	0,55	Batas maks. aman



Gambar 9. Grafik Output Load Cell vs Beban Referensi dan Error (%)

C. Hasil Pengujian Sensor TDS

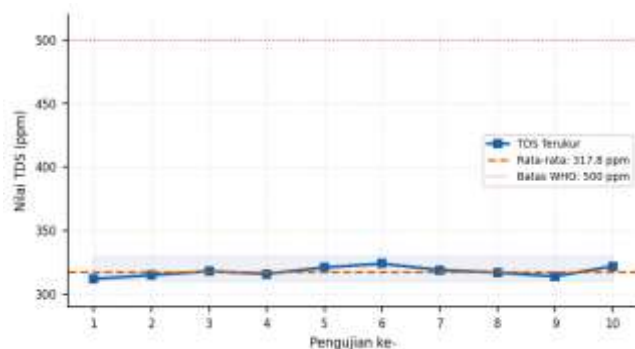
Sensor TDS mengukur Total Dissolved Solids berdasarkan prinsip konduktivitas elektrolitik sesuai Pers. 3, di mana K_c adalah faktor konversi (0,5–0,7) dan EC nilai konduktivitas ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Pengujian dilakukan 10 kali pada interval 5 menit di kondisi perairan yang sama.

$$\text{TDS (ppm)} = K_c \times \text{EC } (\mu\text{S}/\text{cm}) \quad (3)$$

Nilai TDS terukur berkisar 312–324 ppm (rata-rata 317,4 ppm; $\sigma = \pm 3,7$ ppm), masih di bawah ambang batas WHO (500 ppm). Koefisien variasi $\text{CV} = (3,7/317,4) \times 100\% = 1,17\%$, mengindikasikan stabilitas pembacaan yang sangat baik.

TABEL III
HASIL PENGUJIAN SENSOR TDS (10 KALI PENGUJIAN)

Uji ke-	TDS (ppm)	Uji ke-	TDS (ppm)	Rata-rata	Std Dev
1	312	6	324	—	—
2	315	7	319	—	—
3	318	8	317	317,4	$\pm 3,7$
4	316	9	314	—	—
5	321	10	322	—	—



Gambar 10. Grafik Nilai TDS Selama Pengujian dengan Garis Rata-rata dan Batas WHO

D. Hasil Pengujian Kapasitas Baterai LiFePO_4

Baterai yang digunakan adalah LiFePO_4 4S1P (4 sel seri): tegangan nominal $V_{\text{nom}} = 4 \times 3,2 \text{ V} = 12,8 \text{ V}$, kapasitas $C = 15 \text{ Ah}$, dan energi total E_{total} dihitung menggunakan Pers. 4. Dengan kedalaman pengosongan $\text{DoD} = 80\%$, kapasitas yang dapat digunakan E_{usable} diperoleh dari Pers. 5. Total beban sistem P_{total} (Pers. 6) dihitung berdasarkan konsumsi dua motor DC (40,96 W), konveyor (19,2 W), ESP32 & sensor (1,5 W).

$$E_{\text{total}} = V_{\text{nom}} \times C = 12,8 \text{ V} \times 15 \text{ Ah} = 192 \text{ Wh} \quad (4)$$

$$E_{\text{usable}} = \text{DoD} \times E_{\text{total}} = 0,8 \times 192 = 153,6 \text{ Wh} \quad (5)$$

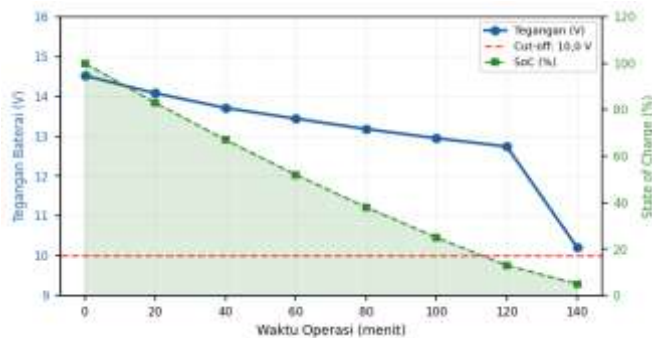
$$P_{\text{total}} = 40,96 + 19,2 + 1,5 = 61,66 \text{ W} \quad (6)$$

$$t_{\text{teoritis}} = \frac{E_{\text{usable}}}{P_{\text{total}}} = \frac{153,6}{61,66} \approx 2,49 \text{ jam} \quad (7)$$

Durasi operasi aktual mencapai 138 menit (2,3 jam) dengan efisiensi $\eta = (138/146,4) \times 100\% = 94,3\%$ terhadap estimasi teoritis (Pers. 7). Selisih disebabkan resistansi internal baterai yang meningkat saat SoC rendah. Tegangan relatif stabil di

TABEL IV
HASIL PENGUJIAN KAPASITAS BATERAI LiFePO₄ 4S (12,8 V / 15 AH)

No.	Waktu (mnt)	Tegangan (V)	Arus (A)	SoC (%)	Keterangan
1	0	14,52	4,91	100	Kondisi awal (penuh)
2	20	14,08	4,88	83	Operasi normal
3	40	13,71	4,84	67	Operasi normal
4	60	13,44	4,82	52	Operasi normal
5	80	13,18	4,79	38	Operasi normal
6	100	12,95	4,76	25	Operasi normal
7	120	12,74	4,71	13	Operasi normal
8	140	10,21	4,63	5 (cut-off)	Tegangan cut-off



Gambar 11. Kurva Discharge Baterai: Tegangan dan SoC vs Waktu Operasi

E. Hasil Pengujian Jarak Jangkauan Operasional

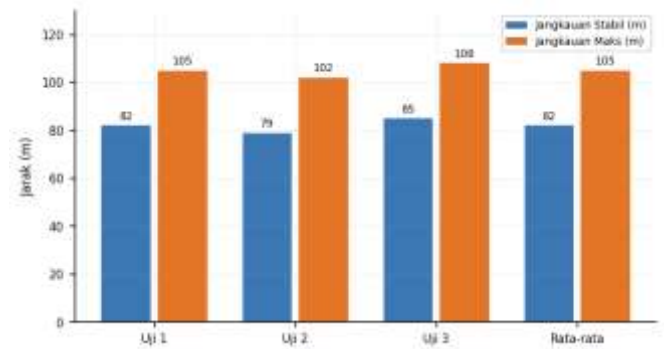
Jarak tempuh total S dihitung menggunakan Pers. 8, berdasarkan kecepatan rata-rata $v = 0,62$ m/s dan durasi operasi aktual $t = 138$ menit = 8.280 detik. Jangkauan RF diuji pada kondisi open water tanpa hambatan.

$$S = v \times t = 0,62 \text{ m/s} \times 8.280 \text{ s} \approx 5.134 \text{ m} \approx 5,1 \text{ km} \quad (8)$$

Jangkauan kendali RC rata-rata 82 m (stabil) dan 105 m (maksimum). Jarak tempuh total per siklus baterai penuh $\approx 5,1$ km, memadai untuk pembersihan area perairan skala kecil hingga sedang.

TABEL V
HASIL PENGUJIAN JARAK JANGKAUAN KAPAL CASCARA

Uji ke-	RF Stabil (m)	RF Maks. (m)	v rata-rata (m/s)	Jarak Tempuh (m)
1	82	105	0,62	5128
2	79	102	0,59	4882
3	85	108	0,64	5299
Rata-rata	82	105	0,62	5103



Gambar 12. Grafik Perbandingan Jangkauan RF Stabil dan Maksimum per Pengujian

F. Hasil Pengujian Sistem IoT: Monitoring Berat Sampah dan Kejernihan Air

Sistem IoT berbasis ESP32 mengirimkan data sensor setiap 5 detik via HTTP ke dashboard monitoring. Akurasi pengiriman berat dievaluasi dengan Pers. 1 (error rata-rata 0,62%). Indeks kejernihan air diklasifikasikan menggunakan Pers. 9 berdasarkan persentase selisih TDS terhadap kondisi awal.

$$\Delta TDS (\%) = \frac{TDS_t - TDS_0}{TDS_0} \times 100\% \quad (9)$$

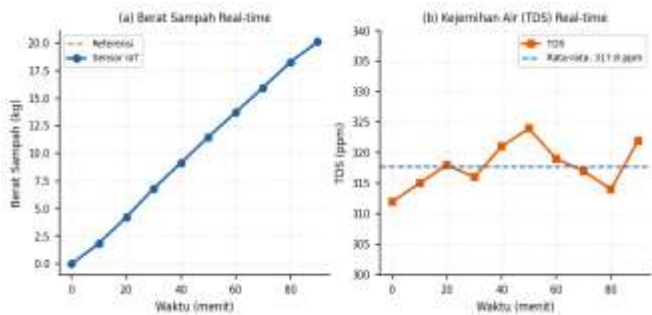
$$tt_{lat} = 1,2 \text{ detik}; \eta = \frac{108}{108} = 100\% \quad (10)$$

Nilai ΔTDS selama 90 menit operasi = $(322 - 312) / 312 \times 100\% = 3,2\%$, mengindikasikan aktivitas pengumpulan sampah tidak menimbulkan perubahan signifikan pada kualitas air. Semua data berhasil terkirim real-time tanpa putus (latensi 1,2 s) selama seluruh sesi pengujian.

TABEL VI
HASIL PENGUJIAN SISTEM IOT — BERAT SAMPAH DAN KEJERNIHAN AIR

No.	Waktu (mnt)	Berat Sensor (kg)	Berat Ref. (kg)	TDS (ppm)	Kualitas Air
1	0	0	0	312	Baik
2	10	1,85	1,82	315	Baik
3	20	4,23	4,2	318	Baik
4	30	6,81	6,8	316	Baik
5	40	9,15	9,1	321	Baik
6	50	11,48	11,5	324	Baik
7	60	13,72	13,7	319	Baik
8	70	15,94	16	317	Baik
9	80	18,27	18,3	314	Baik
10	90	20,11	20	322	Baik





Gambar 13. (a) Berat Sampah Real-time vs Referensi; (b) Nilai TDS Real-time Selama Operasi

G. Ringkasan Hasil Pengujian

TABEL VII
RINGKASAN HASIL PENGUJIAN

Parameter	Nilai	Keterangan
Error Load Cell (rata-rata)	0,59%	$R^2 = 0,9998$; dalam toleransi $\pm 1\%$
TDS rata-rata	317,4 ppm	$\sigma = \pm 3,7$ ppm; < 500 ppm (WHO)
Kapasitas Baterai (aktual)	153,6 Wh	138 menit operasi; efisiensi 94,3%
Jangkauan RF	82 / 105 m	Stabil / Maksimum
Jarak Tempuh Total	$\approx 5,1$ km	Per siklus baterai penuh
Akurasi IoT (berat)	99,4%	Error rata-rata 0,62%; latensi 1,2 s
Δ TDS selama operasi	3,2%	Tidak ada perubahan signifikan kualitas air

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, kapal CASCARA menunjukkan kinerja yang baik sebagai kapal pembersih dan pengumpul sampah permukaan perairan. Stabilitas kapal selama pengujian menunjukkan bahwa desain lambung dan distribusi komponen telah sesuai untuk mendukung operasional kapal. Mekanisme pengangkut sampah mampu bekerja dengan efektif dalam mengarahkan sampah ke bak penampungan tanpa mengganggu pergerakan kapal.

Kinerja sistem sensor menunjukkan bahwa sensor TDS dan load cell dapat digunakan sebagai alat monitoring yang mendukung fungsi kapal. Sensor TDS memberikan gambaran kualitas air selama pengujian, sementara sensor load cell memungkinkan pemantauan kapasitas muatan sampah. Sistem panel surya berkontribusi dalam menjaga ketersediaan daya baterai dan memperpanjang durasi operasi kapal.

Secara keseluruhan, integrasi antara sistem mekanik, sensor, kendali, dan panel surya menunjukkan bahwa kapal CASCARA memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai solusi pembersihan sampah perairan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Hasil ini memperkuat tujuan penelitian bahwa pemanfaatan energi surya dan sistem kendali jarak jauh dapat meningkatkan efektivitas kapal pembersih sampah permukaan air.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Albert Gifson Hutajulu, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, dan masukan yang diberikan selama proses penelitian dan penyusunan karya ilmiah ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Institut Teknologi PLN atas dukungan fasilitas dan lingkungan akademik yang mendukung terlaksananya penelitian ini. Selain itu, penulis mengapresiasi seluruh pihak dan rekan penulis yang telah berkontribusi dalam perancangan, pembuatan, serta pengujian sistem CASCARA, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENSI

[1] Nurmaya Tri Banowati, “Kelimpahan Mikroplastik Pada Air Dan Biota Laut Di Perairan Pesisir Kota Bandar Lampung,” 2024.

[2] S. Gupta, M. Kohli, R. Kumar, and S. Bandral, “IoT Based Underwater Robot for Water Quality Monitoring,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Jan. 2021. doi: 10.1088/1757-899X/1033/1/012013.

[3] theoceancleanup.com, “The Interceptor: River Cleanup System. The oceancleanup Report.”, theoceancleanup.com.

[4] H. C. Chang, Y. L. Hsu, S. S. Hung, G. R. Ou, J. R. Wu, and C. Hsu, “Autonomous water quality monitoring and water surface cleaning for unmanned surface vehicle,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 21, no. 4, pp. 1–21, Feb. 2021, doi: 10.3390/s21041102.

[5] J. Zhu, Y. Yang, and Y. Cheng, “SMURF: A Fully Autonomous Water Surface Cleaning Robot with A Novel Coverage Path Planning Method,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 11, Nov. 2022, doi: 10.3390/jmse10111620.

[6] P. Desinfektan and A. Azis, “Penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Surya pada Robot,” *Proceding Seminar Nasional Kewirausahaan*, vol. 2, no. 1, pp. 368–374, 2021, doi: 10.30596%2Fsnk.v2i1.8285.

[7] M. Omamageswari, A. Mohanraj, S. C. Jeeva, A. K. Reddy, K. Thilagam, and U. Penchalaiah, “IoT based smart drainage monitoring and cleaning system for solid waste materials,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 2929–2933. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.940.

[8] A. Zafi, D. Saputra, and A. Bianto, “The Monitoring System For Water Quality is Based On The Internet of Things (IoT) And Uses A TDS Sensor,” 2024, doi: 10.3804/ijenset.v1i2.1015.

[9] F. R. Saputra and M. Rivai, “Autonomous Surface Vehicle sebagai Alat Pemantau Lingkungan Menggunakan Metode Navigasi Waypoint,” *Jurnal Teknik ITS*, vol. 7, no. 1, Mar. 2018, doi: 10.12962/j23373539.v7i1.28493.

[10] Shikhar Shukla, Aman Chauhan, Sonal Singh, and Mr. Kamaleshwar Dhar Dwivedi, “IOT Controlled Water Trash Collector Boat,” *Int. J. Sci. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 394–401, May 2025, doi: 10.32628/ijrsrset251247.

[11] Widia Kamisah, Rahmianar, and Yoffi Andinata, “Analysis of the Efficiency of Solar Power Plants (PLTS) Against Solar Irradiation Using a Solar Power Meter,” vol. 12, pp. 189–194, Dec. 2023.

[12] S. V. Awari, S. V. Pulate, and S. D. Gadakh, “A Review on IoT-Based River Surface Cleaning Robots for Aquatic Waste Management,” *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology International Open-Access, Double-Blind, Peer-Reviewed, Refereed, Multidisciplinary Online Journal*, vol. 5, no. 6, 2025, doi: 10.48175/568.

[13] W. Chen et al., “The Mobile Water Quality Monitoring System Based on Low-Power Wide Area Network and Unmanned Surface Vehicle,” *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/1609612.

[14] M. Elkolali et al., “A LOW-COST WAVE/SOLAR POWERED UNMANNED SURFACE VEHICLE.”

[15] P. Sharma, K. Srinivasan, M. M. Azizan, K. Hasikin, A. Salwa, and M. Khairuddin, “An automated solid waste detection using the optimized YOLO model for riverine management.”

[16] D. Park et al., “Development of an Autonomous Cleaning Robot with a Hydraulic Manipulator Arm for the Cleaning of Niche Areas of a Ship Hull,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 5, May 2023, doi: 10.3390/jmse11050973.

- [17] M. Dwi Irtanti, L. Rukisna, and universitas Riau, "Kebijakan Pengelolaan Sampah Plastik Sebagai Solusi Pertumbuhan Ekonomi Ramah Lingkungan," 2026.
- [18] P. Sistem *et al.*, "PERANCANGAN SISTEM KONVEYOR PEMBERSIH SAMPAH PADA SALURAN AIR DENGAN MENGGUNAKAN TENAGA AIR," 2021.
- [19] D. Ji *et al.*, "Design and development of autonomous robotic fish for object detection and tracking," *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 17, no. 3, May 2020, doi: 10.1177/1729881420925284.
- [20] S. V. Awari, S. V. Pulate, and S. D. Gadakh, "A Review on IoT-Based River Surface Cleaning Robots for Aquatic Waste Management," *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology International Open-Access, Double-Blind, Peer-Reviewed, Refereed, Multidisciplinary Online Journal*, vol. 5, no. 6, 2025, doi: 10.48175/568.



{Halaman ini sengaja di kosongkan }