



# Implementasi Smart Buoy untuk Prediksi Kualitas Air Tambak Udang dengan Double Exponential Smoothing

Edi\*, I Nyoman Tirtha Yuda, Maksy Sendiang, Deitje Sofie Pongoh

Teknik Elektro, Teknik Informatika, Politeknik Negeri Manado, Manado, Indonesia

Email: <sup>1,\*</sup>ediloupaty@gmail.com, <sup>2</sup>inyomantirthayuda@gmail.com, <sup>3</sup>maksysendiang05@gmail.com, <sup>4</sup>pongohdeitje@gmail.com

Email Penulis Korespondensi: ediloupaty@gmail.com

**Abstrak**—Budidaya udang vaname sangat bergantung pada kestabilan kualitas air, khususnya parameter suhu dan pH yang berpengaruh terhadap pertumbuhan dan kelangsungan hidup udang. Pada praktiknya, pemantauan kualitas air di banyak tambak masih dilakukan secara manual dan periodik sehingga perubahan kondisi lingkungan tidak selalu dapat terdeteksi secara cepat. Selain itu, sebagian besar sistem monitoring yang telah dikembangkan hanya menampilkan kondisi aktual tanpa menyediakan informasi prediktif yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan tindakan preventif. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan *Smart Buoy* berbasis *Internet of Things* untuk melakukan monitoring kualitas air tambak secara *real-time* serta memberikan peringatan dini melalui prediksi jangka pendek. Sistem yang dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor suhu dan pH, komunikasi LoRa, layanan Firebase, serta aplikasi *mobile* sebagai antarmuka pengguna. Metode *Double Exponential Smoothing* diterapkan untuk memprediksi perubahan suhu dan pH pada horizon waktu 30 menit ke depan, dengan parameter model ditentukan melalui proses *walk-forward validation*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem berhasil melakukan akuisisi, transmisi, penyimpanan, dan visualisasi data kualitas air secara berkelanjutan. Evaluasi model prediksi menghasilkan nilai *Mean Absolute Percentage Error* sebesar 0,62% untuk suhu dan 0,32% untuk pH. Sistem juga berhasil mengirimkan notifikasi bahaya dan peringatan dini secara otomatis ketika kondisi kualitas air terdeteksi atau diprediksi berada di luar batas aman. Penelitian ini berkontribusi terhadap pengembangan sistem monitoring dan prediksi kualitas air tambak udang berbasis *Internet of Things* melalui integrasi *Smart Buoy* berbasis IoT sebagai media akuisisi data yang lebih representatif, metode *Double Exponential Smoothing* untuk prediksi jangka pendek, serta aplikasi *mobile* yang mendukung pemantauan *real-time* dan pengambilan keputusan yang lebih cepat serta bersifat preventif dalam pengelolaan tambak udang vaname.

**Kata Kunci:** Smart Buoy; Budidaya Udang Vaname; Kualitas Air Tambak; Internet of Things (IoT); Double Exponential Smoothing

**Abstract**—White shrimp farming is highly dependent on water quality stability, particularly temperature and pH parameters that directly affect shrimp growth and survival. In practice, water quality monitoring in many shrimp ponds is still conducted manually and periodically, causing environmental changes to be detected too late for timely intervention. Furthermore, most existing monitoring systems only provide current condition information without predictive capabilities that can support preventive decision-making. This study aims to design and implement a Smart Buoy based on the Internet of Things for real-time water quality monitoring and short-term early warning generation. The proposed system integrates an ESP32 microcontroller, temperature and pH sensors, LoRa communication, Firebase cloud services, and a mobile application as the user interface. The Double Exponential Smoothing method was employed to predict temperature and pH conditions 30 minutes ahead, while model parameters were determined using a walk-forward validation approach. The results demonstrate that the system successfully performs continuous data acquisition, transmission, storage, and visualization of water quality information. Forecasting evaluation yielded Mean Absolute Percentage Error values of 0.62% for temperature and 0.32% for pH. The system also successfully delivered automatic danger and early warning notifications when water quality conditions were detected or predicted to exceed predefined safety thresholds. This study contributes to the development of an IoT-based shrimp pond water quality monitoring and prediction system by integrating a Smart Buoy for more representative data acquisition, the Double Exponential Smoothing method for short-term forecasting, and a mobile application that supports real-time monitoring and faster, more preventive decision-making in shrimp pond management.

**Keywords:** Smart Buoy; Pacific White Shrimp Aquaculture; Pond Water Quality; Internet of Things (IoT); Double Exponential Smoothing

## 1. PENDAHULUAN

Budidaya udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) merupakan salah satu komoditas unggulan dalam sektor akuakultur Indonesia karena memiliki nilai ekonomi tinggi, laju pertumbuhan yang cepat, serta permintaan pasar domestik dan internasional yang terus meningkat (Darmansyah et al., 2026). Keberhasilan budidaya udang vaname sangat dipengaruhi oleh pengelolaan kualitas air, di mana parameter seperti pH dan suhu merupakan faktor penting yang perlu dijaga untuk mendukung kondisi lingkungan budidaya yang optimal (Gunawan et al., 2024). Penelitian menunjukkan bahwa suhu air optimal bagi pertumbuhan udang vaname berkisar 26–32 °C (Pebrianto et al., 2023), sedangkan pH optimum berada pada kisaran 7,5–8,5 (Anjelyna et al., 2026). Penyimpangan pH di luar kisaran optimal dapat menyebabkan stres pada udang dan mengganggu proses fisiologisnya, sedangkan suhu yang lebih tinggi dari nilai optimum akan mempercepat metabolisme, dan suhu yang lebih rendah dari kisaran optimal akan menurunkan pertumbuhan seiring dengan penurunan nafsu makan (Bias Cahyanurani & Hariri, 2021). Dalam konteks budidaya intensif dan superintensif, pengelolaan parameter kualitas air menjadi semakin penting karena perubahan kondisi lingkungan dapat terjadi lebih cepat dan berdampak langsung terhadap kondisi budidaya. Oleh sebab itu, diperlukan pemantauan yang dilakukan secara berkelanjutan agar perubahan kualitas air dapat terdeteksi lebih dini dan tindakan pengelolaan yang sesuai dapat segera dilakukan (Nurhidayanti, 2025).

Pada praktiknya, banyak tambak rakyat di Indonesia, termasuk Tambak Udang Vaname di Kelurahan Tongkaina, Kecamatan Bunaken, Kota Manado, masih mengandalkan pemantauan kualitas air secara manual yang



dioperasikan secara periodik oleh petambak. Pendekatan manual ini tidak mampu merekam dinamika kualitas air yang bisa berubah drastis dalam hitungan menit. Dinamika kualitas air tambak bersifat fluktuatif secara harian. Suhu air dapat berubah akibat variasi intensitas penyinaran matahari, sementara kadar oksigen terlarut dan pH dipengaruhi oleh proses fotosintesis, respirasi organisme akuatik, serta dekomposisi bahan organik di perairan (Rahmi et al., 2023). Perubahan kualitas air yang tidak terpantau secara tepat waktu berpotensi mengganggu kondisi lingkungan budidaya dan memengaruhi kondisi lingkungan budidaya sehingga dapat berdampak pada pertumbuhan dan produktivitas udang vaname (Farabi & Latuconsina, 2023). Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan yang mampu melakukan pengawasan kualitas air secara berkelanjutan serta menyediakan data yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan tambak.

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) telah mendorong lahirnya solusi sistem monitoring kualitas air secara otomatis dan *real-time* yang mampu meningkatkan efisiensi pengumpulan data lingkungan perairan serta memudahkan pemantauan jarak jauh oleh pengguna (Putra et al., 2024). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis IoT mampu mengakuisisi data dari berbagai sensor, mengirimkan data tersebut ke platform server melalui jaringan komunikasi nirkabel, serta menyajikan informasi kondisi terkini secara *real-time* melalui *dashboard* berbasis web dan aplikasi *mobile* yang dapat diakses oleh pengguna (Jabbar et al., 2022). Meskipun demikian, beberapa penelitian terkait implementasi sistem IoT di tambak saat ini masih berfokus pada pemantauan kondisi secara *real-time* tanpa menyertakan kemampuan peramalan jangka pendek. Sebagai contoh, penelitian oleh (Pandawana et al., 2024) mengembangkan sistem monitoring kualitas air berbasis IoT yang mampu menampilkan kondisi kualitas air secara *real-time* serta memberikan notifikasi ketika parameter yang dipantau berada di luar batas yang telah ditentukan. Pendekatan tersebut memungkinkan pengguna mengetahui kondisi aktual tambak secara cepat, namun belum memberikan informasi prediktif mengenai kecenderungan perubahan parameter pada waktu yang akan datang. Pada penelitian sebelumnya, Alfiansyah et al. (2021) telah berhasil menerapkan teknologi IoT yang dipadukan dengan metode *Double Exponential Smoothing* (DES) model *Holt* sebagai sistem peringatan dini di tambak udang vaname, namun sistem tersebut masih mengandalkan penempatan sensor yang statis di pinggir kolam dan menggunakan antarmuka bot Telegram yang terbatas. Cakupan horizon prediksi dan integrasi antara modul peramalan dengan mekanisme pengambilan keputusan di tingkat pengguna juga masih dapat dioptimalkan. Lebih lanjut, Hong et al. (2025) menunjukkan bahwa kualitas air memiliki variasi spasial yang persisten sehingga lokasi pengambilan sampel menjadi faktor penting dalam memperoleh data yang representatif.

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu tersebut, masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada monitoring kondisi aktual atau menerapkan metode prediksi secara terpisah, sementara aspek representativitas pengambilan data kualitas air akibat adanya variasi spasial di area tambak masih belum banyak diperhatikan. Selain itu, integrasi antara *Smart Buoy* sebagai media akuisisi data yang mampu memperoleh data secara lebih representatif, metode *Double Exponential Smoothing* untuk prediksi jangka pendek, serta aplikasi *mobile* yang mampu menyajikan monitoring *real-time* dan prediksi dalam satu sistem yang masih belum banyak dikembangkan pada penelitian terdahulu.

Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan kebaruan melalui rancang bangun wahana apung pintar (*Smart Buoy*) berbasis IoT yang didesain untuk bergerak mengapung di tengah tambak, sehingga memperluas cakupan titik pemantauan dibandingkan sensor yang ditempatkan secara statis di tepi kolam. Pendekatan ini diharapkan mampu menangkap variasi spasial parameter kualitas air pada berbagai area pengamatan di dalam tambak sehingga data yang diperoleh menjadi lebih representatif, sejalan dengan temuan Hong et al. (2025) mengenai adanya variasi spasial kualitas air dalam satu badan perairan. Sistem ini memanfaatkan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses utama, Firebase Realtime Database untuk penyimpanan awan, dan aplikasi *mobile* berbasis Flutter sebagai dasbor antarmuka pengguna.

Keunggulan komputasi dari sistem ini terletak pada integrasi algoritma peramalan deret waktu *Double Exponential Smoothing* (DES) di dalam sistem. Metode DES atau *Holt's Linear* dipilih karena dirancang sebagai metode pemulusan linier yang sesuai untuk peramalan data runtun waktu dengan pola tren dan karakteristik non-musiman, serta terbukti mampu menghasilkan peramalan jangka pendek dengan tingkat kesalahan yang sangat kecil sehingga efektif digunakan untuk memprediksi kecenderungan data pada periode berikutnya (Wiyanti, 2023). Sistem ini melakukan pembacaan parameter pH dan suhu air secara *real-time* setiap menit untuk kebutuhan pemantauan langsung, sedangkan data historis disimpan ke dalam database Firebase dengan interval setiap 10 menit, yang kemudian datanya digunakan untuk memprediksi kecenderungan nilai pada 30 menit ke depan. Dengan demikian, *Smart Buoy* tidak hanya berfungsi sebagai perangkat monitoring, tetapi juga sebagai modul prediktif yang memberikan informasi kondisi tambak pada horizon waktu dekat secara terintegrasi.

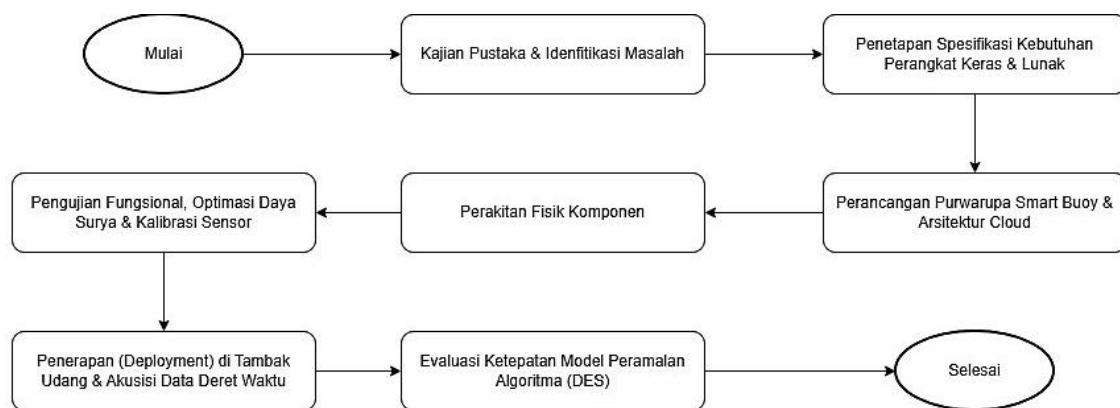
Untuk mengoptimalkan fungsi mitigasi, *Smart Buoy* ini menerapkan mekanisme notifikasi dua tingkat pada perangkat petambak. Tingkat pertama adalah Notifikasi Bahaya, yang dikirimkan secara *real-time* apabila nilai sensor aktual berada di luar batas aman yang telah dikonfigurasi. Tingkat kedua adalah Notifikasi Peringatan Dini, yang dipicu murni oleh hasil proyeksi metode DES; jika nilai peramalan (30 menit ke depan) menunjukkan kecenderungan parameter air akan keluar dari batas aman, sistem akan memberikan peringatan proaktif meskipun kualitas air saat itu masih dalam status normal. Dengan desain tersebut, sistem diharapkan dapat membantu petambak memperoleh informasi kondisi aktual maupun kecenderungan perubahan kualitas air pada waktu yang akan datang, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan bersifat preventif terhadap potensi gangguan kualitas air. Berdasarkan uraian tersebut, permasalahan utama dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut: bagaimana

merancang dan mengimplementasikan *Smart Buoy* berbasis IoT yang tidak hanya dapat melakukan monitoring *real-time*, tetapi juga mampu memprediksi kondisi kualitas air tambak udang vaname dalam jangka pendek serta memberikan notifikasi bertingkat kepada petambak. Sejalan dengan itu, tujuan penelitian ini adalah mengembangkan dan menguji sistem *Smart Buoy* yang mengintegrasikan IoT, wahana apung, metode *Double Exponential Smoothing*, dan dua tingkat notifikasi bahaya-peringatan dini untuk membantu petambak udang di Tongkaina melakukan tindakan preventif yang lebih cepat guna menjaga stabilitas kualitas air dan mendukung produktivitas budidaya udang vaname secara berkelanjutan. Melalui pengembangan sistem tersebut, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan solusi monitoring dan prediksi kualitas air tambak udang berbasis *Internet of Things (IoT)* dengan memanfaatkan *Smart Buoy* sebagai media akuisisi data yang mampu meningkatkan representativitas pengukuran kualitas air, metode *Double Exponential Smoothing* untuk menghasilkan prediksi jangka pendek, serta aplikasi *mobile* yang menyajikan informasi monitoring *real-time*, hasil prediksi, dan notifikasi bahaya maupun peringatan dini secara terintegrasi. Kontribusi tersebut diharapkan dapat mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan bersifat preventif dalam pengelolaan kualitas air tambak udang vaname.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang dilakukan secara sistematis mulai dari identifikasi masalah hingga evaluasi hasil peramalan. Tahapan penelitian mencakup studi literatur, analisis kebutuhan sistem, perancangan *Smart Buoy* dan arsitektur *cloud*, perakitan perangkat, pengujian dan kalibrasi sensor, pengambilan data lapangan, serta evaluasi ketepatan model peramalan yang diterapkan. Alur tahapan penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Tahapan Penelitian

Berdasarkan Gambar 1, penelitian diawali dengan kajian pustaka dan identifikasi masalah untuk memperoleh pemahaman mengenai karakteristik kualitas air tambak udang vaname, teknologi *Internet of Things (IoT)*, serta metode *Double Exponential Smoothing (DES)* yang digunakan dalam penelitian. Tahap berikutnya adalah penetapan spesifikasi kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak yang akan digunakan dalam pengembangan sistem.

Setelah kebutuhan sistem ditetapkan, dilakukan perancangan purwarupa *Smart Buoy* beserta arsitektur *cloud* yang mendukung proses pengiriman, penyimpanan, dan pengolahan data. Tahap selanjutnya adalah perakitan fisik komponen serta integrasi seluruh perangkat yang digunakan pada sistem. Setelah proses perakitan selesai, dilakukan pengujian fungsional, optimasi sistem catu daya berbasis panel surya, dan kalibrasi sensor guna memastikan seluruh komponen bekerja sesuai dengan kebutuhan penelitian.

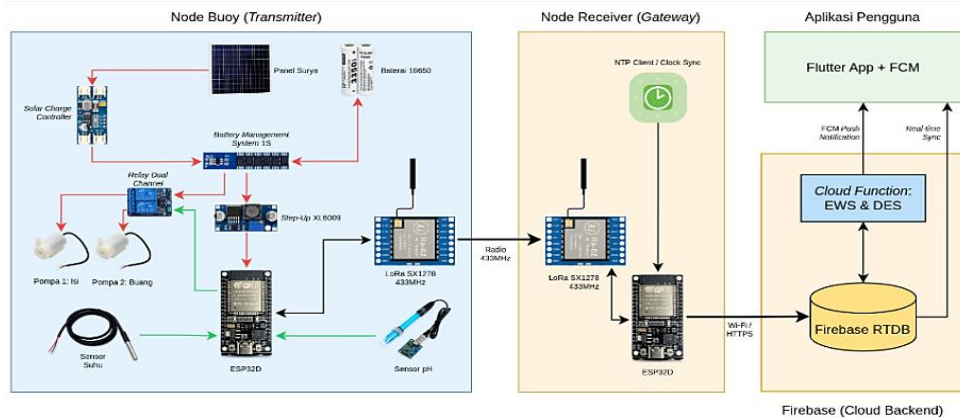
Perangkat yang telah memenuhi kebutuhan fungsional kemudian diterapkan pada lokasi penelitian untuk melakukan akuisisi data kualitas air secara berkala. Data yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk proses peramalan menggunakan metode *Double Exponential Smoothing (DES)*. Tahap terakhir adalah evaluasi ketepatan model peramalan berdasarkan hasil prediksi yang dihasilkan sehingga dapat diketahui kinerja metode DES dalam mendukung sistem monitoring dan peringatan dini kualitas air tambak.

### 2.2 Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem yang dikembangkan terdiri atas tiga komponen utama, yaitu *Node Buoy (transmitter)*, *Node Receiver (gateway)*, dan aplikasi pengguna yang terhubung melalui layanan *cloud*. Arsitektur sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 2.

Berdasarkan Gambar 2, proses monitoring diawali dengan akuisisi data kualitas air menggunakan sensor suhu dan sensor pH yang terpasang pada *Node Buoy*. Data hasil pengukuran diproses oleh mikrokontroler ESP32 dan dikirimkan secara nirkabel menggunakan modul LoRa SX1278 menuju *Node Receiver* yang berada di daratan. *Gateway* kemudian meneruskan data ke Firebase Realtime Database melalui jaringan internet menggunakan protokol HTTPS.

Data yang tersimpan pada Firebase Realtime Database selanjutnya diproses menggunakan Firebase Cloud Functions yang mengimplementasikan mekanisme *Early Warning System* (EWS) dan algoritma *Double Exponential Smoothing* (DES). Hasil pemrosesan berupa data monitoring aktual, hasil prediksi, dan status peringatan disimpan kembali ke basis data sehingga dapat diakses oleh aplikasi *mobile* berbasis Flutter. Sistem juga memanfaatkan Firebase Cloud Messaging (FCM) untuk mengirimkan notifikasi kepada pengguna secara *real-time*.



Gambar 2. Arsitektur Sistem

### 2.3 Metode Double Exponential Smoothing

Metode *Double Exponential Smoothing* (DES) model *Holt* digunakan untuk memprediksi nilai suhu dan pH berdasarkan data historis yang tersimpan pada Firebase Realtime Database. Metode DES dipilih karena sesuai untuk data runtun waktu yang memiliki pola tren, baik tren naik maupun tren turun, sehingga dapat digunakan untuk melakukan peramalan pada periode mendatang (Tasriq & Kunang, 2023). Pada penelitian ini, DES diterapkan melalui Firebase Cloud Functions untuk menghasilkan prediksi kualitas air pada horizon waktu 30 menit ke depan.

DES bekerja dengan memperbarui dua komponen utama, yaitu level dan tren data pada setiap observasi baru. Komponen level digunakan untuk merepresentasikan kondisi atau nilai dasar data pada waktu tertentu, sedangkan komponen tren digunakan untuk menggambarkan arah perubahan data dari waktu ke waktu. Melalui pembaruan kedua komponen tersebut secara berkelanjutan, metode DES mampu menghasilkan prediksi untuk data runtun waktu yang memiliki kecenderungan tren (Aksakal & Eğrioglu, 2025). Persamaan yang digunakan dalam metode DES ditunjukkan pada Persamaan (1), Persamaan (2), dan Persamaan (3).

$$S_t = \alpha X_t + (1 - \alpha)(S_{t-1} + b_{t-1}) \tag{1}$$

$$b_t = \beta(S_t - S_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \tag{2}$$

$$F_{t+m} = S_t + m \cdot b_t \tag{3}$$

Dengan  $S_t$  menyatakan nilai level pada waktu ke- $t$ ,  $b_t$  menyatakan nilai tren,  $X_t$  merupakan data aktual,  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah parameter pemulusan, sedangkan  $F_{t+m}$  merupakan hasil prediksi untuk  $m$  periode ke depan. Pada implementasinya, data suhu dan pH yang tersimpan pada basis data digunakan sebagai masukan untuk proses peramalan. Hasil prediksi kemudian dibandingkan dengan batas aman kualitas air yang telah ditentukan. Apabila nilai prediksi menunjukkan kecenderungan parameter keluar dari batas aman pada horizon waktu tertentu, sistem akan menghasilkan notifikasi peringatan dini yang dikirimkan kepada pengguna melalui aplikasi *mobile*.

### 2.4 Skenario Pengujian

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja perangkat monitoring, akurasi sensor, akurasi metode peramalan, serta mekanisme notifikasi yang diterapkan pada *Smart Buoy*. Tahapan pengujian meliputi kalibrasi sensor pH, pengujian akurasi sensor, pengujian akurasi metode *Double Exponential Smoothing* (DES), dan pengujian fungsional sistem monitoring serta notifikasi.

Kalibrasi sensor pH dilakukan menggunakan metode kalibrasi dua titik dengan larutan buffer standar pH 4,01 dan pH 6,86. Hasil pembacaan tegangan dari sensor digunakan untuk membentuk persamaan kalibrasi yang kemudian disimpan pada mikrokontroler ESP32 sehingga nilai pH yang diperoleh lebih akurat pada saat pengukuran lapangan (Rezki et al., 2021). Pengujian akurasi sensor dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi yang digunakan sebagai nilai acuan. Sensor pH dibandingkan dengan alat ukur pH referensi, sedangkan sensor suhu dibandingkan dengan termometer digital referensi. Hasil pengujian digunakan untuk menghitung tingkat kesalahan pengukuran serta mengevaluasi kelayakan sensor untuk digunakan pada sistem monitoring kualitas air tambak.

Pengujian metode *Double Exponential Smoothing* (DES) dilakukan menggunakan data historis hasil pengukuran suhu dan pH yang diperoleh selama proses pengamatan. Data historis tersebut digunakan sebagai masukan untuk



menghasilkan prediksi kondisi kualitas air pada horizon waktu 30 menit ke depan. Akurasi hasil prediksi dievaluasi dengan membandingkan nilai prediksi terhadap nilai aktual yang diperoleh pada waktu pengamatan berikutnya. Kinerja metode DES diukur menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dan *Root Mean Square Error* (RMSE). MAPE digunakan untuk mengukur tingkat kesalahan prediksi dalam bentuk persentase, sedangkan RMSE digunakan untuk mengukur rata-rata besarnya kesalahan antara nilai prediksi dan nilai aktual dalam satuan yang sama dengan data asli (Jierula et al., 2021). Nilai MAPE yang semakin kecil menunjukkan tingkat akurasi prediksi yang semakin baik, sementara nilai RMSE yang rendah menunjukkan bahwa hasil prediksi semakin mendekati nilai aktual.

Selain pengujian akurasi prediksi, dilakukan pula pengujian fungsional sistem monitoring dan notifikasi. Pengujian monitoring dilakukan untuk memastikan data hasil pengukuran berhasil dikirim dari *Node Buoy* ke Firebase Realtime Database dan ditampilkan pada aplikasi *mobile*. Pengujian notifikasi dilakukan untuk memastikan sistem mampu mengirimkan notifikasi bahaya ketika nilai aktual parameter kualitas air berada di luar batas aman yang telah ditentukan, serta mengirimkan notifikasi peringatan dini ketika hasil prediksi menunjukkan potensi pelampauan batas aman pada horizon waktu yang telah ditentukan.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil implementasi dan pengujian sistem *Smart Buoy* berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dikembangkan untuk monitoring dan peramalan kualitas air tambak udang vaname. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja perangkat keras, akurasi sensor, keandalan komunikasi data, performa metode *Double Exponential Smoothing* (DES), serta mekanisme notifikasi yang diterapkan pada sistem. Hasil pengujian kemudian dianalisis untuk menilai kemampuan sistem dalam mendukung pemantauan kualitas air secara *real-time* dan memberikan peringatan dini terhadap potensi perubahan kondisi lingkungan tambak.

#### 3.1 Perancangan dan Implementasi Smart Buoy

Hasil penelitian pada bagian ini mencakup proses perancangan dan implementasi *Smart Buoy* berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dikembangkan untuk melakukan pemantauan kualitas air tambak udang vaname secara *real-time* serta menyediakan kemampuan peramalan jangka pendek menggunakan metode *Double Exponential Smoothing* (DES). Pembahasan meliputi perancangan *Node Buoy*, sistem catu daya, mekanisme akuisisi dan transmisi data, hingga implementasi perangkat keras, komunikasi berbasis *cloud*, dan aplikasi *mobile*. Sistem yang dikembangkan terdiri atas *Node Buoy* sebagai perangkat akuisisi data, *Node Receiver* sebagai *gateway* komunikasi, layanan *cloud* berbasis Firebase, serta aplikasi *mobile* berbasis Flutter sebagai antarmuka pengguna.

##### 3.1.1 Perancangan Node Buoy

*Node Buoy* berfungsi sebagai perangkat utama untuk melakukan akuisisi data kualitas air di area tambak. Wahana apung dibangun menggunakan rangka pipa polivinil klorida (PVC) berukuran 20 cm × 40 cm yang dirancang untuk memberikan daya apung dan stabilitas selama proses pengukuran. Sistem memperoleh sumber daya dari panel surya yang terhubung dengan baterai penyimpan melalui modul *Battery Management System* (BMS), sehingga perangkat dapat beroperasi secara mandiri di lingkungan tambak. Komponen utama beserta spesifikasi perangkat yang digunakan pada *Node Buoy* ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Komponen dan Spesifikasi Perangkat Node Buoy

Komponen	Spesifikasi
Mikrokontroler	ESP32 DevKit V4 + Expansion
Sensor pH	PH-4502C + Probe pH
Sensor Suhu	DS18B20 Waterproof
Modul Komunikasi	LoRa RA-02 SX1278 433 MHz
Relay	Relay Dual Channel
Pompa Air	2 Unit Pompa Air Celup DC
Panel Surya	10 W
Baterai	18650 Li-ion 3350 mAh
Solar Charger	CN3791 12 V
Battery Management System	BMS 1S 3,7 V
DC-DC Converter	XL6009

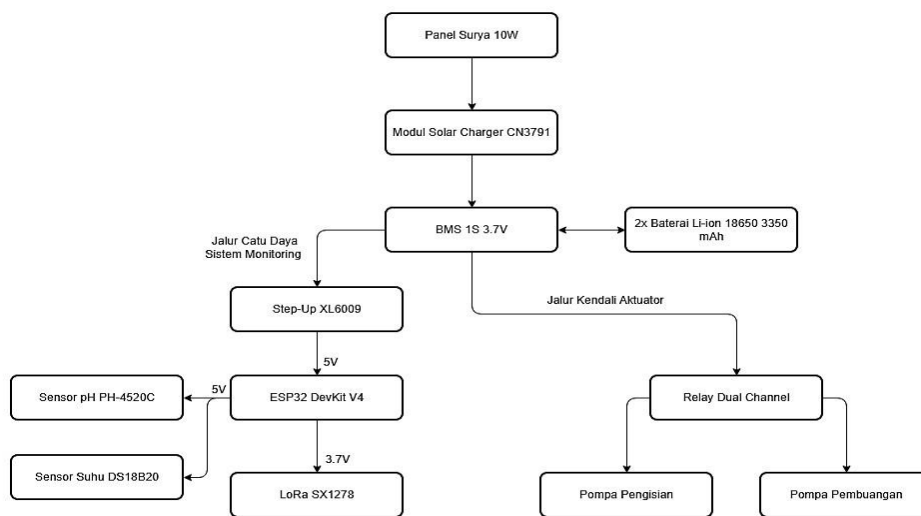
Berdasarkan Tabel 1, *Node Buoy* menggunakan mikrokontroler ESP32 DevKit V4 sebagai pusat kendali yang terintegrasi dengan sensor suhu DS18B20, sensor pH PH-4502C, serta modul komunikasi LoRa SX1278 untuk mendukung proses akuisisi dan transmisi data. Selain itu, sistem dilengkapi dengan modul relay *dual channel*, dua pompa air, panel surya, baterai, dan rangkaian catu daya yang bekerja secara terintegrasi sehingga perangkat mampu melakukan monitoring kualitas air secara otomatis dan beroperasi secara mandiri di lingkungan tambak.

### 3.1.2 Perancangan Sistem Catu Daya

Sistem catu daya dirancang agar *Smart Buoy* dapat beroperasi secara mandiri di lingkungan tambak tanpa bergantung pada sumber listrik eksternal. Sumber energi utama berasal dari panel surya 10 W yang berfungsi mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Energi yang dihasilkan panel surya kemudian dialirkan ke modul *solar charger* CN3791 untuk mengontrol proses pengisian baterai secara aman dan efisien.

Energi listrik disimpan pada dua buah baterai *lithium-ion* tipe 18650 yang masing-masing memiliki kapasitas 3350 mAh. Kedua baterai disusun secara paralel untuk meningkatkan kapasitas penyimpanan energi tanpa mengubah tegangan keluaran sistem sehingga *Smart Buoy* dapat beroperasi lebih lama ketika intensitas cahaya matahari berkurang atau pada malam hari. Seluruh proses pengisian maupun penyaluran daya dilakukan melalui modul *Battery Management System* (BMS) 1S 3,7 V yang memberikan perlindungan terhadap *overcharge*, *overdischarge*, dan arus lebih.

Tegangan keluaran dari baterai kemudian dinaikkan menggunakan modul *step-up* XL6009 sebelum didistribusikan ke mikrokontroler ESP32, sensor suhu DS18B20, sensor pH PH-4520C, modul komunikasi LoRa SX1278, serta perangkat pendukung lainnya. Konfigurasi tersebut memungkinkan seluruh komponen memperoleh suplai daya yang stabil selama proses monitoring berlangsung.

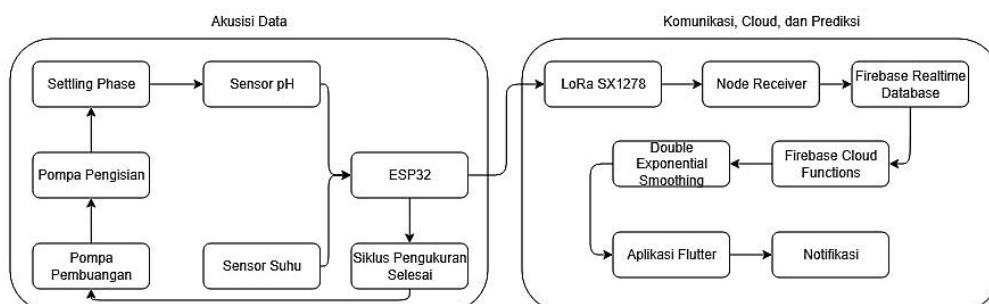


**Gambar 3.** Diagram Blok Sistem Catu Daya

Rancangan sistem catu daya yang digunakan pada *Smart Buoy* ditunjukkan pada Gambar 3. Berdasarkan gambar tersebut, keluaran dari modul *Battery Management System* (BMS) didistribusikan ke dua jalur utama, yaitu jalur catu daya sistem monitoring dan jalur kendali aktuator. Jalur catu daya sistem monitoring menyuplai ESP32, sensor, dan modul komunikasi LoRa melalui modul *step-up* XL6009, sedangkan jalur kendali aktuator menyuplai modul *relay dual channel* yang mengoperasikan pompa pengisian dan pompa pembuangan. Pembagian kedua jalur tersebut memungkinkan proses monitoring dan pengendalian aktuator berlangsung secara bersamaan dengan suplai daya yang stabil.

### 3.1.3 Mekanisme Akuisisi dan Transmisi Data

Akuisisi data pada sistem dilakukan terhadap dua parameter kualitas air, yaitu suhu dan pH. Mekanisme akuisisi dan transmisi data yang diterapkan pada *Smart Buoy* dikelompokkan ke dalam dua tahapan utama, yaitu tahap akuisisi data serta tahap komunikasi, *cloud*, dan prediksi. Integrasi dari kedua tahapan tersebut ditunjukkan pada Gambar 4. Pada tahap akuisisi data, sensor suhu ditempatkan secara langsung pada badan air tambak sehingga dapat mengukur kondisi suhu lingkungan tambak secara kontinu. Sementara itu, sensor pH ditempatkan pada ruang ukur khusus untuk menjaga kestabilan proses pengukuran dan mengurangi gangguan akibat pergerakan air di sekitar wahana apung.



**Gambar 4.** Mekanisme Akuisisi dan Transmisi Data

Untuk memperoleh sampel air yang representatif pada pengukuran pH, sistem menggunakan dua pompa air yang dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 melalui modul relay *dual channel*. Siklus pengukuran diawali dengan proses pengisian ruang ukur selama 30 detik menggunakan pompa pengisian, kemudian dilanjutkan *settling phase* selama 1 menit untuk mengurangi pengaruh riak air terhadap hasil pembacaan sensor pH. Setelah fase diam selesai, sensor pH melakukan pengukuran secara periodik selama 9 menit pada sampel air yang telah stabil. Pada akhir siklus, pompa pembuangan diaktifkan selama 40 detik untuk mengosongkan ruang ukur sehingga sistem siap melakukan siklus pengukuran berikutnya. Selama proses tersebut berlangsung, sensor suhu tetap melakukan pengukuran secara langsung pada air tambak.

Tahap berikutnya merupakan proses komunikasi, *cloud*, dan prediksi. Data hasil pengukuran suhu dan pH diproses oleh mikrokontroler ESP32 dan dikirimkan melalui modul LoRa SX1278 menuju *Node Receiver*. *Node Receiver* berfungsi sebagai penghubung antara jaringan LoRa dengan layanan berbasis internet dengan meneruskan data ke Firebase Realtime Database sebagai data historis. Selanjutnya, Firebase Cloud Functions memproses data historis menggunakan metode *Double Exponential Smoothing* (DES) untuk menghasilkan prediksi yang ditampilkan pada aplikasi Flutter serta digunakan sebagai dasar pengiriman notifikasi kepada pengguna.

### 3.1.4 Implementasi Perangkat Smart Buoy

Setelah proses perancangan selesai, seluruh komponen dirakit dan diintegrasikan ke dalam wahana apung untuk membentuk prototipe *Smart Buoy*. Implementasi perangkat dilakukan dengan menempatkan mikrokontroler ESP32, sensor suhu DS18B20, sensor pH PH-4502C, modul komunikasi LoRa SX1278, serta sistem catu daya berbasis panel surya ke dalam satu sistem yang mampu beroperasi secara mandiri di lingkungan tambak. Implementasi *Smart Buoy* yang telah direalisasikan ditunjukkan pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Implementasi Smart Buoy

Berdasarkan Gambar 5, seluruh komponen berhasil diintegrasikan pada wahana apung berbahan pipa PVC sehingga perangkat memiliki daya apung yang baik dan mampu beroperasi di atas permukaan air tambak. Panel surya ditempatkan pada bagian atas wahana untuk memperoleh paparan sinar matahari secara optimal, sedangkan komponen elektronik ditempatkan di dalam kotak pelindung guna mengurangi risiko kerusakan akibat paparan air dan kondisi lingkungan. Konfigurasi tersebut memungkinkan *Smart Buoy* melakukan proses monitoring kualitas air secara mandiri selama pengujian lapangan.

Pada tahap pengujian lapangan, *Smart Buoy* ditempatkan pada area Tambak Udang Vaname di Kelurahan Tongkaina, Kecamatan Bunaken, Kota Manado. Sistem berhasil melakukan akuisisi data suhu dan pH secara berkelanjutan selama periode pengamatan dengan menghasilkan sebanyak 145 titik data historis dalam rentang waktu sekitar 24 jam. Selama pengujian, mekanisme pengambilan sampel air menggunakan pompa otomatis dapat beroperasi sesuai rancangan, sehingga sensor pH memperoleh sampel air yang stabil untuk proses pengukuran.

### 3.1.5 Implementasi Komunikasi dan Cloud Backend

Selain *Node Buoy*, sistem juga dilengkapi dengan *Node Receiver* yang berfungsi sebagai *gateway* komunikasi antara perangkat di tambak dengan layanan *cloud*. *Gateway* menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan modul LoRa SX1278 untuk menerima data dari *Node Buoy* dan meneruskannya ke Firebase Realtime Database melalui jaringan internet. Implementasi perangkat *gateway* ditunjukkan pada Gambar 6.

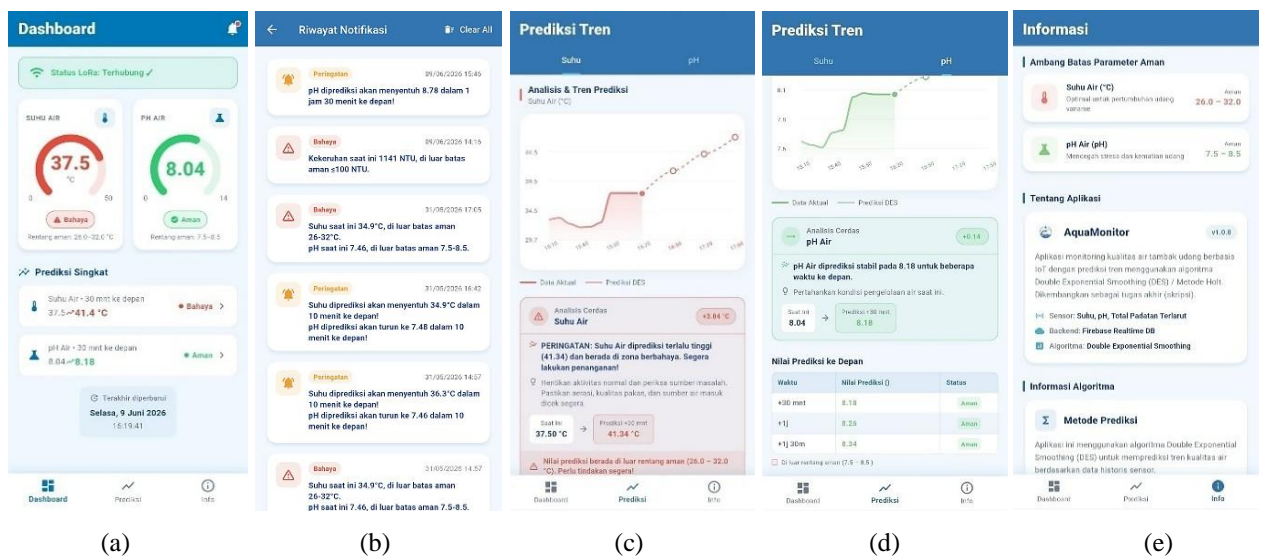


**Gambar 6.** Implementasi Node Receiver (Gateway)

Berdasarkan Gambar 6, *Node Receiver* diimplementasikan sebagai penghubung antara jaringan komunikasi LoRa dengan layanan *cloud*. Perangkat ini menerima data hasil pengukuran dari *Node Buoy*, kemudian mengirimkannya ke Firebase Realtime Database melalui koneksi internet sehingga data dapat diakses secara *real-time* oleh aplikasi maupun layanan *backend*. Selama pengujian, komunikasi data antara *Node Buoy* dan *Node Receiver* menggunakan modul LoRa SX1278 pada frekuensi 433 MHz mampu melakukan pengiriman data secara stabil pada jarak sekitar 150–200 meter. Data yang tersimpan pada Firebase Realtime Database selanjutnya diproses oleh Firebase Cloud Functions untuk menjalankan proses peramalan serta pengelolaan notifikasi kepada pengguna.

### 3.1.6 Implementasi Aplikasi Mobile

Informasi hasil pengukuran dan prediksi ditampilkan melalui aplikasi *mobile* yang dikembangkan menggunakan framework Flutter. Aplikasi menyediakan fitur monitoring *real-time*, visualisasi data historis, hasil prediksi kualitas air, serta notifikasi bahaya dan peringatan dini yang dikirim melalui Firebase Cloud Messaging (FCM). Implementasi antarmuka aplikasi yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 7.



**Gambar 7.** Tampilan Aplikasi (a) Dashboard. (b) Riwayat Notifikasi. (c) Prediksi Suhu. (d) Prediksi pH. (e) Informasi Aplikasi

Berdasarkan Gambar 7, aplikasi *mobile* menyediakan antarmuka yang mengintegrasikan fungsi monitoring, prediksi, dan penyampaian notifikasi dalam satu sistem. Setiap halaman dirancang untuk menyajikan informasi yang berbeda sesuai kebutuhan pengguna, mulai dari pemantauan kondisi kualitas air secara *real-time*, hasil peramalan, hingga informasi pendukung mengenai sistem yang dikembangkan.

Halaman *dashboard* pada Gambar 7(a) menyajikan informasi kondisi suhu dan pH secara *real-time* beserta status keamanan parameter yang dipantau. Riwayat notifikasi pada Gambar 7(b) digunakan untuk menampilkan catatan peringatan dini maupun notifikasi bahaya yang pernah dikirimkan oleh sistem. Halaman prediksi suhu dan pH yang ditunjukkan pada Gambar 7(c) dan Gambar 7(d) menyajikan hasil peramalan menggunakan metode *Double Exponential Smoothing* (DES) dalam bentuk grafik tren, nilai prediksi, serta analisis kondisi parameter pada horizon waktu yang ditentukan. Sementara itu, Gambar 7(e) menampilkan informasi aplikasi, batas aman parameter kualitas air, serta ringkasan metode yang digunakan dalam sistem. Melalui integrasi fitur-fitur tersebut, pengguna dapat memantau kondisi aktual, melihat kecenderungan perubahan kualitas air, dan menerima informasi peringatan secara terpusat melalui perangkat *mobile*.

Secara keseluruhan, hasil implementasi menunjukkan bahwa seluruh komponen sistem berhasil terintegrasi dengan baik. Data yang diperoleh dari sensor pada *Node Buoy* dapat dikirimkan melalui jaringan LoRa menuju *gateway*, diteruskan ke layanan *cloud*, diproses menggunakan Firebase Cloud Functions, dan ditampilkan secara *real-time* pada aplikasi *mobile*. Integrasi tersebut memungkinkan sistem menjalankan fungsi monitoring dan peringatan dini kualitas air tambak secara terpusat sehingga dapat membantu pengguna dalam memantau kondisi tambak secara lebih efektif.

### 3.2 Hasil Pengujian Sensor

Pengujian sensor dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi sensor suhu DS18B20 dan sensor pH PH-4502C yang digunakan pada *Smart Buoy*. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi pada kondisi pengukuran yang sama. Hasil pengujian digunakan untuk mengetahui tingkat kesalahan pengukuran serta memastikan bahwa data yang diperoleh memiliki tingkat akurasi yang memadai untuk digunakan dalam proses monitoring dan peramalan kualitas air tambak.

### 3.2.1 Pengujian Sensor Suhu

Pengujian sensor suhu DS18B20 dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi pada beberapa kondisi pengukuran. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Hasil Pengujian Sensor Suhu

Percobaan	Alat Ukur (°C)	Sensor (°C)	Selisih (°C)	Error (%)
1	34,7	35,5	0,8	2,31
2	36,4	36,1	0,3	0,82
3	36,5	36,2	0,3	0,82
4	36,2	36,2	0,0	0,00
5	36,6	36,0	0,6	1,64
6	36,7	36,3	0,4	1,09
7	36,8	36,3	0,5	1,36
8	36,8	36,8	0,0	0,00
9	36,7	36,7	0,0	0,00
10	37,0	36,8	0,2	0,54
Rata-rata			0,31	0,86

Berdasarkan Tabel 2, hasil pembacaan sensor suhu memiliki selisih yang relatif kecil terhadap alat ukur referensi pada seluruh percobaan. Dari 10 sampel pengujian diperoleh rata-rata *error* absolut sebesar 0,31 °C dengan nilai MAPE sebesar 0,86%, sehingga tingkat akurasi sensor mencapai 99,14%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor DS18B20 mampu memberikan hasil pengukuran yang mendekati nilai referensi dan cukup andal untuk digunakan dalam sistem monitoring kualitas air tambak secara *real-time*.

### 3.2.2 Pengujian Sensor pH

Pengujian sensor pH PH-4502C dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur pH referensi setelah proses kalibrasi diterapkan pada sistem. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Hasil Pengujian Sensor pH

Percobaan	Alat Ukur (pH)	Sensor (pH)	Selisih (pH)	Error (%)
1	7,40	7,26	0,14	1,89
2	7,40	7,32	0,08	1,08
3	7,50	7,35	0,15	2,00
4	7,50	7,38	0,12	1,60
5	7,50	7,39	0,11	1,47
6	7,50	7,40	0,10	1,33
7	7,50	7,40	0,10	1,33
8	7,50	7,43	0,07	0,93
9	7,50	7,43	0,07	0,93
10	7,60	7,44	0,16	2,11
Rata-rata			0,11	1,47

Berdasarkan Tabel 3, hasil pembacaan sensor pH menunjukkan selisih yang relatif kecil terhadap alat ukur referensi pada seluruh percobaan. Dari 10 sampel pengujian diperoleh rata-rata *error* absolut sebesar 0,11 pH dengan nilai MAPE sebesar 1,47%, sehingga tingkat akurasi sensor mencapai 98,53%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor pH PH-4502C mampu memberikan hasil pengukuran yang mendekati nilai referensi setelah proses kalibrasi dan layak digunakan sebagai instrumen pemantauan kualitas air pada *Smart Buoy* yang dikembangkan.

## 3.3 Hasil Monitoring dan Akuisisi Data

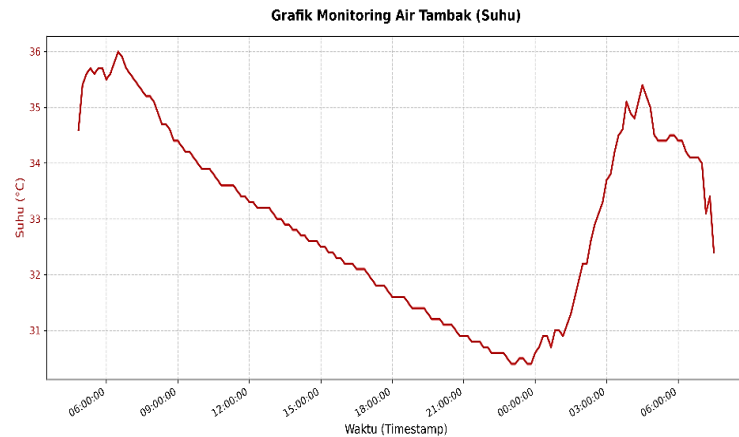
Pengujian monitoring dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan *Smart Buoy* dalam melakukan akuisisi, transmisi, dan penyimpanan data kualitas air secara berkelanjutan. Selama pengujian lapangan, sistem berhasil melakukan pengukuran parameter suhu dan pH serta mengirimkan data hasil pengukuran dari *Node Buoy* menuju Firebase Realtime Database melalui *Node Receiver*. Data yang tersimpan kemudian dapat diakses secara *real-time* melalui aplikasi.

Berdasarkan hasil pengujian, sistem berhasil mengumpulkan sebanyak 161 data pengamatan yang terdiri atas parameter suhu, pH, dan waktu pengukuran (*timestamp*). Data direkam secara berkala dengan interval sekitar 10 menit dan tersimpan secara otomatis pada Firebase Realtime Database. Hasil monitoring suhu selama periode pengujian ditunjukkan pada Gambar 8, sedangkan hasil monitoring pH ditunjukkan pada Gambar 9.

### 3.3.1 Monitoring Suhu

Untuk mengamati dinamika perubahan suhu air selama periode pengujian, data hasil monitoring divisualisasikan dalam bentuk grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8. Visualisasi ini memberikan gambaran mengenai pola

perubahan suhu yang terjadi selama proses pemantauan secara *real-time*. Melalui penyajian grafik tersebut, perubahan suhu dari waktu ke waktu dapat diamati dengan lebih jelas sehingga memudahkan interpretasi terhadap kondisi kualitas air selama periode pengujian.



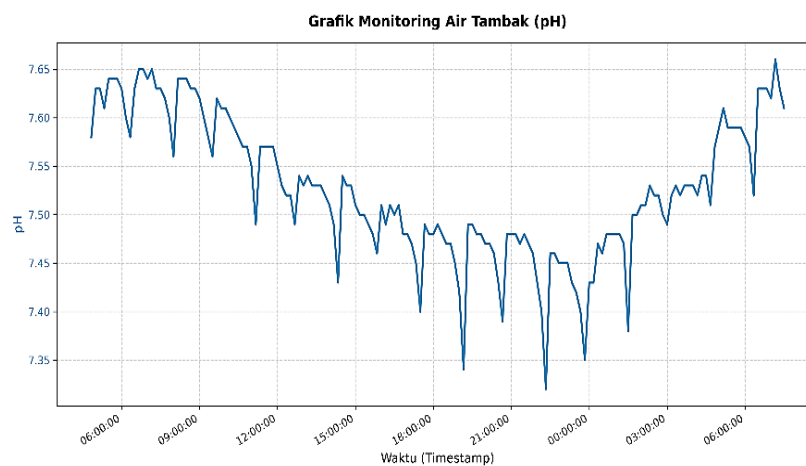
**Gambar 8.** Grafik Monitoring Suhu Air Tambak

Berdasarkan Gambar 8, nilai suhu air tambak selama periode pengamatan berada pada rentang 30,4°C hingga 36,0°C. Pada awal pengamatan, suhu berada pada kisaran 34,6–36,0°C, kemudian mengalami penurunan secara bertahap hingga mencapai nilai terendah sekitar 30,4°C pada malam hari. Setelah itu, suhu kembali meningkat menjelang dini hari hingga pagi hari sebelum kembali mengalami penurunan pada akhir periode pengamatan.

Pola perubahan tersebut menunjukkan adanya pengaruh siklus harian terhadap kondisi suhu perairan tambak. Suhu cenderung lebih tinggi pada periode siang hingga sore hari akibat peningkatan intensitas penyinaran matahari, sedangkan pada malam hingga dini hari suhu mengalami penurunan seiring berkurangnya energi panas yang diterima oleh perairan. Fluktuasi suhu yang berhasil direkam secara kontinu menunjukkan bahwa sistem *Smart Buoy* mampu melakukan monitoring suhu secara *real-time* dan menyimpan data historis secara berkelanjutan.

### 3.3.2 Monitoring pH

Untuk mengamati perubahan nilai pH selama periode pengujian, data hasil monitoring divisualisasikan dalam bentuk grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 9.



**Gambar 9.** Grafik Monitoring pH Air Tambak

Berdasarkan Gambar 9, nilai pH air tambak selama periode pengamatan berada pada rentang 7,32 hingga 7,66. Secara umum, nilai pH menunjukkan fluktuasi yang relatif kecil dibandingkan suhu, namun tetap memperlihatkan perubahan secara bertahap sepanjang periode pengamatan. Pada awal pengamatan, nilai pH berada pada kisaran 7,58–7,65, kemudian mengalami penurunan hingga mencapai nilai terendah sekitar 7,32 pada malam hari sebelum kembali meningkat hingga mendekati 7,66 pada akhir periode pengamatan.

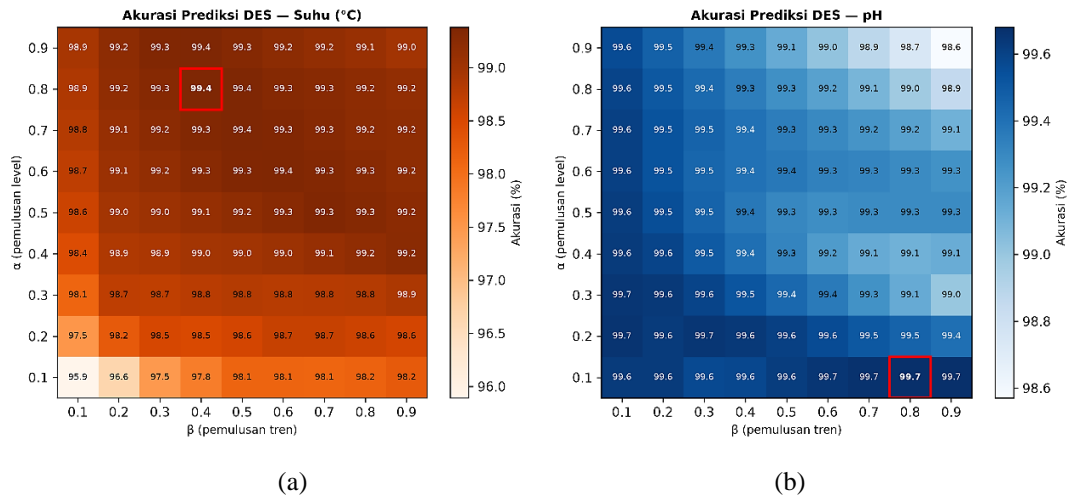
Fluktuasi pH yang terjadi masih berada dalam rentang yang relatif stabil dan tidak menunjukkan perubahan yang ekstrem selama pengamatan berlangsung. Variasi nilai pH tersebut dapat dipengaruhi oleh aktivitas biologis dan kimia yang terjadi di lingkungan tambak, seperti proses fotosintesis, respirasi organisme akuatik, serta perubahan kondisi lingkungan perairan. Hasil monitoring menunjukkan bahwa sistem *Smart Buoy* mampu merekam dinamika perubahan

pH secara kontinu dan menyimpan data historis yang dapat digunakan sebagai dasar dalam proses peramalan kualitas air.

Secara keseluruhan, hasil monitoring menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan akuisisi, transmisi, dan penyimpanan data kualitas air secara berkelanjutan. Data historis yang berhasil dikumpulkan menjadi dasar penting dalam penerapan metode *Double Exponential Smoothing* (DES) untuk memprediksi kecenderungan perubahan suhu dan pH.

### 3.4 Hasil Peramalan DES

Sebelum proses peramalan dilakukan, parameter pemulusan  $\alpha$  (*level*) dan  $\beta$  (*trend*) ditentukan melalui proses optimasi menggunakan metode *walk-forward validation*. Proses ini dilakukan dengan menguji beberapa kombinasi parameter  $\alpha$  dan  $\beta$  pada rentang 0,1 hingga 0,9, kemudian memilih kombinasi yang menghasilkan tingkat akurasi prediksi tertinggi.



**Gambar 10.** Hasil optimasi parameter  $\alpha$  dan  $\beta$  menggunakan walk-forward validation (a) Suhu (b) pH

Berdasarkan Gambar 10, parameter terbaik untuk prediksi suhu diperoleh pada  $\alpha = 0,8$  dan  $\beta = 0,4$  dengan tingkat akurasi sebesar 99,4%. Sementara itu, parameter terbaik untuk prediksi pH diperoleh pada  $\alpha = 0,1$  dan  $\beta = 0,8$  dengan tingkat akurasi sebesar 99,7%. Parameter tersebut kemudian digunakan pada proses peramalan suhu dan pH pada horizon waktu 30 menit ke depan.

#### 3.4.1 Prediksi Suhu

Sebelum proses peramalan dilakukan, parameter  $\alpha$  dan  $\beta$  ditentukan melalui proses optimasi menggunakan metode *walk-forward validation*. Berdasarkan hasil optimasi pada Gambar 8, kombinasi parameter terbaik untuk prediksi suhu diperoleh pada  $\alpha = 0,8$  dan  $\beta = 0,4$  dengan tingkat akurasi sebesar 99,4%.

**Tabel 4.** Hasil Prediksi Suhu

Waktu Aktual	Nilai Aktual (°C)	Nilai Prediksi (°C)	Selisih (°C)
03:00	33.7	33.69	0.01
03:30	34.5	34.52	0.02
04:00	34.9	35.37	0.47
04:30	35.4	35.47	0.07
05:00	34.5	35.89	1.39
05:30	34.4	33.99	0.41
06:00	34.4	34.12	0.28
06:30	34.1	34.35	0.25
07:00	34	33.82	0.18
07:30	32.4	33.84	1.44

Hasil prediksi suhu menggunakan metode DES ditunjukkan pada Tabel 4. Secara umum, nilai prediksi yang dihasilkan mampu mengikuti pola perubahan suhu aktual dengan selisih yang relatif kecil pada sebagian besar titik pengamatan. Hasil ini menunjukkan bahwa metode DES mampu digunakan untuk memprediksi kecenderungan perubahan suhu air tambak dalam jangka pendek.

#### 3.4.2 Prediksi pH

Berdasarkan hasil optimasi parameter pada Gambar 8, kombinasi terbaik untuk prediksi pH diperoleh pada  $\alpha = 0,1$  dan  $\beta = 0,8$  dengan tingkat akurasi sebesar 99,7%.

**Tabel 5.** Hasil Prediksi pH

Waktu Aktual	Nilai Aktual (pH)	Nilai Prediksi (pH)	Selisih (pH)
03:00	7.49	7.53	0.04
03:30	7.52	7.52	0
04:00	7.53	7.52	0.01
04:30	7.54	7.53	0.01
05:00	7.59	7.54	0.05
05:30	7.59	7.57	0.02
06:00	7.58	7.63	0.05
06:30	7.63	7.64	0.01
07:00	7.62	7.6	0.02
07:30	7.61	7.62	0.01

Hasil prediksi pH menggunakan metode DES ditunjukkan pada Tabel 5. Nilai prediksi yang dihasilkan memiliki kedekatan yang tinggi terhadap data aktual dengan selisih yang relatif kecil pada seluruh titik pengamatan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode DES mampu mengikuti tren perubahan pH dan dapat digunakan untuk mendukung sistem peringatan dini kualitas air tambak.

### 3.5 Evaluasi Akurasi Metode DES

Untuk mengetahui tingkat akurasi model *Double Exponential Smoothing* (DES), dilakukan evaluasi dengan membandingkan nilai prediksi terhadap nilai aktual menggunakan metrik *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dan *Root Mean Square Error* (RMSE). MAPE digunakan untuk mengukur rata-rata persentase kesalahan prediksi, sedangkan RMSE digunakan untuk mengukur besarnya kesalahan prediksi dalam satuan asli parameter yang diamati. Hasil evaluasi akurasi metode DES ditunjukkan pada Tabel 6.

**Tabel 6.** Hasil Evaluasi Akurasi Metode DES

Parameter	$\alpha$	$\beta$	MAPE (%)	RMSE
Suhu	0,8	0,4	0,62	0.2076
pH	0,1	0,8	0,32	0.0241

Berdasarkan Tabel 6, metode DES menghasilkan tingkat kesalahan yang rendah pada parameter suhu maupun pH. Nilai MAPE dan RMSE yang diperoleh menunjukkan bahwa hasil prediksi memiliki kedekatan yang baik terhadap data aktual sehingga model dapat digunakan untuk mendukung sistem peringatan dini kualitas air tambak. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode DES mampu memberikan performa prediksi yang baik untuk parameter suhu maupun pH pada horizon waktu 30 menit ke depan. Dengan tingkat kesalahan yang rendah, model peramalan yang diterapkan dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam mendukung mekanisme peringatan dini pada sistem *Smart Buoy*.

### 3.6 Pengujian Sistem Notifikasi

Pengujian sistem notifikasi dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam memberikan informasi kondisi kualitas air secara otomatis kepada pengguna. Notifikasi dikirim melalui Firebase Cloud Messaging (FCM) ketika nilai parameter aktual maupun hasil prediksi menunjukkan kondisi yang berada di luar rentang aman yang telah ditentukan.



**Gambar 11.** Riwayat Notifikasi pada Aplikasi



Berdasarkan Gambar 11, sistem berhasil menghasilkan dua jenis notifikasi, yaitu notifikasi peringatan dini (*warning*) dan notifikasi bahaya (*danger*). Notifikasi peringatan dini dikirim ketika hasil prediksi menunjukkan bahwa parameter kualitas air berpotensi keluar dari batas aman dalam 30 menit ke depan. Sementara itu, notifikasi bahaya dikirim ketika nilai aktual yang diperoleh dari sensor telah berada di luar rentang aman yang ditetapkan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa notifikasi berhasil diterima dan ditampilkan pada aplikasi sesuai dengan kondisi yang terdeteksi oleh sistem. Mekanisme ini memungkinkan pengguna memperoleh informasi secara lebih cepat sehingga tindakan pengelolaan kualitas air dapat dilakukan sebelum kondisi lingkungan tambak berdampak terhadap proses budidaya udang vaname.

### 3.7 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *Smart Buoy* yang dikembangkan mampu melakukan akuisisi, transmisi, penyimpanan, dan visualisasi data kualitas air tambak secara real-time melalui integrasi sensor, komunikasi LoRa, Firebase Realtime Database, dan aplikasi *mobile*. Temuan ini sejalan dengan penelitian Jabbar et al. (2022) yang menunjukkan bahwa teknologi *Internet of Things* (IoT) mampu mendukung sistem monitoring lingkungan secara real-time melalui komunikasi nirkabel dan platform cloud. Selain itu, penelitian Pandawana et al. (2024) juga menunjukkan bahwa aplikasi *mobile* berbasis IoT dapat mempermudah pengguna dalam memantau kondisi kualitas air dan menerima notifikasi ketika parameter berada di luar batas aman. Berbeda dengan penelitian terdahulu, penelitian ini mengintegrasikan proses monitoring, prediksi, dan mekanisme notifikasi dalam satu sistem yang dirancang untuk mendukung pengelolaan kualitas air tambak udang vaname.

Implementasi metode *Double Exponential Smoothing* (DES) menghasilkan nilai MAPE sebesar 0,62% untuk suhu dan 0,32% untuk pH, yang menunjukkan bahwa model mampu mengikuti kecenderungan perubahan kedua parameter dalam jangka pendek dengan tingkat kesalahan yang rendah. Temuan ini sejalan dengan penelitian Alfiansyah et al. (2021) yang juga menerapkan metode DES sebagai dasar sistem peringatan dini pada tambak udang vaname. Namun demikian, penelitian ini tidak hanya memanfaatkan hasil prediksi sebagai informasi tambahan, tetapi mengintegrasikannya dengan aplikasi *mobile* dan mekanisme notifikasi peringatan dini sehingga pengguna memperoleh informasi prediktif yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan tindakan preventif sebelum kondisi kualitas air berada di luar batas aman.

Selain aspek monitoring dan prediksi, penelitian ini juga mengembangkan *Smart Buoy* sebagai media akuisisi data yang ditempatkan pada area tambak sehingga mampu memperoleh data pengukuran yang lebih representatif dibandingkan pendekatan sensor statis di tepi kolam. Pendekatan tersebut didukung oleh temuan Hong et al. (2025) yang menunjukkan bahwa kualitas air dapat memiliki variasi spasial sehingga lokasi pengambilan sampel menjadi faktor penting dalam memperoleh data yang merepresentasikan kondisi perairan. Meskipun penelitian ini belum melakukan analisis kuantitatif terhadap distribusi spasial kualitas air, penggunaan *Smart Buoy* menunjukkan potensi untuk mendukung pengambilan data yang lebih representatif pada berbagai area pengamatan di dalam tambak.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi *Smart Buoy* berbasis IoT, metode *Double Exponential Smoothing*, dan aplikasi *mobile* mampu menghasilkan sistem monitoring dan prediksi kualitas air yang bekerja secara terpadu. Integrasi tersebut tidak hanya mendukung pemantauan kondisi kualitas air secara real-time, tetapi juga memberikan informasi prediktif serta notifikasi otomatis yang dapat membantu petambak mengambil keputusan secara lebih cepat dan bersifat preventif. Dengan demikian, penelitian ini melengkapi penelitian-penelitian terdahulu dengan mengintegrasikan proses akuisisi data, peramalan jangka pendek, dan penyampaian informasi melalui aplikasi *mobile* dalam satu sistem monitoring kualitas air berbasis IoT.

## 4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan *Smart Buoy* berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk pemantauan kualitas air tambak udang vaname secara *real-time* dengan memanfaatkan sensor suhu, sensor pH, komunikasi LoRa, layanan *cloud* Firebase, dan aplikasi *mobile*. Sistem yang dikembangkan mampu melakukan akuisisi, transmisi, penyimpanan, dan visualisasi data kualitas air secara berkelanjutan sehingga kondisi tambak dapat dipantau dengan lebih mudah oleh pengguna. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor yang digunakan memiliki tingkat akurasi yang baik dan mampu menghasilkan data yang layak digunakan untuk proses monitoring maupun peramalan. Implementasi metode *Double Exponential Smoothing* (DES) pada sistem juga mampu mengikuti kecenderungan perubahan suhu dan pH dalam jangka pendek dengan tingkat kesalahan prediksi yang rendah, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai MAPE di bawah 1% dan nilai RMSE yang relatif kecil untuk kedua parameter. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model peramalan yang diterapkan cukup andal untuk mendukung mekanisme peringatan dini kualitas air tambak. Integrasi antara proses monitoring, peramalan, dan notifikasi otomatis memungkinkan pengguna memperoleh informasi kondisi aktual maupun potensi perubahan kualitas air sebelum parameter berada di luar batas aman, sehingga tindakan penanganan dapat dilakukan lebih cepat. Dengan demikian, tujuan penelitian untuk mengembangkan sistem monitoring dan peringatan dini kualitas air tambak berbasis *Smart Buoy* telah berhasil dicapai. Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan sistem monitoring dan prediksi kualitas air tambak udang berbasis *Internet of Things* (IoT) melalui integrasi *Smart Buoy* sebagai media akuisisi data yang mampu meningkatkan representativitas pengukuran, metode *Double Exponential Smoothing* untuk prediksi jangka pendek, serta aplikasi



*mobile* yang menyajikan informasi monitoring *real-time*, hasil prediksi, dan notifikasi bahaya maupun peringatan dini secara terintegrasi. Berdasarkan hasil pengujian, sistem yang dikembangkan mampu mendukung penyediaan informasi kondisi aktual dan prediksi kualitas air sebagai dasar pengambilan keputusan yang lebih cepat dan bersifat preventif dalam pengelolaan tambak udang vaname. Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan, di antaranya jumlah parameter kualitas air yang diamati masih terbatas pada suhu dan pH serta proses pengujian yang dilakukan dalam rentang waktu pengamatan yang relatif singkat. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan menambahkan parameter kualitas air lainnya, memperpanjang periode pengambilan data, serta mengeksplorasi metode peramalan yang lebih kompleks untuk meningkatkan kemampuan prediksi dan keandalan sistem dalam mendukung kegiatan budidaya udang vaname.

## REFERENCES

- Aksakal, S. Ş., & Eğrioglu, E. (2025). Modified Holt's Linear Trend Method Based on Particle Swarm Optimization. *Turkish Journal of Forecasting*, 9(2), 44–50. <https://doi.org/10.34110/forecasting.1792276>
- Alfiansyah, M. W., Wedashwara, I. G. P. W., & Mardiansyah, A. Z. (2021). Implementasi IoT Untuk EWS Menggunakan Metode DES Model Holt Pada Tambak Udang Vaname (Implemented of IoT for EWS Using the Holt Model Des Method in Vaname Shrimp Ponds). *Journal of Computer Science and Informatics Engineering (J-Cosine)*, 5(1), 20–29. <https://doi.org/10.29303/jcosine.v5i1.351>
- Anjelyna, A., Kusyairi, A., & Madyowati, S. O. (2026). Pengaruh Perubahan Suhu terhadap Panjang Standar dan Kelangsungan Hidup Nauplius Udang Vaname (*Litopenaeus vannamei*). *Zebra: Jurnal Ilmu Peternakan Dan Ilmu Hewani*, 4(1), 1–8. <https://doi.org/10.62951/zebra.v4i1.320>
- Bias Cahyanurani, A. ', & Hariri, A. (2021). Pembesaran Udang Vanname (*Litopenaeus vannamei*) Secara Intensif pada Kolam Bundar di CV. Tirta Makmur Abadi Desa Lombang, Kecamatan Batang-Batang, Sumenep, Jawa Timur. *Jurnal Grouper*, 12(2), 35–46. <https://doi.org/10.30736/grouper.v12i2.93>
- Darmansyah, F. R., Suyono Suyono, & Nurjanah Nurjanah. (2026). Analisa Kelayakan Usaha Budidaya Udang Vannamei (*Litopenaeus Vannamei*) Tambak Semi Intensif dan Intensif di Desa Dampyak, Kecamatan Kramat, Kabupaten Tegal. *Zoologi: Jurnal Ilmu Peternakan, Ilmu Perikanan, Ilmu Kedokteran Hewan*, 4(1), 34–46. <https://doi.org/10.62951/zoologi.v4i1.299>
- Farabi, A. I., & Latuconsina, H. (2023). Manajemen Kualitas Air pada Pembesaran Udang Vaname (*Litopenaeus vannamei*) di UPT. BAPL (Budidaya Air Payau dan Laut) Bangil Pasuruan Jawa Timur. *Jurnal Riset Perikanan Dan Kelautan (JRPK)*, 5(1), 1–13. <https://doi.org/10.33506/jrpk.v5i1.2097>
- Gunawan, A. I., Ariwibowo, T. H., Nurmaida, F. P., Ariyanto, F., Kamaluddin, M. W., Sanaba, U., Habibulloh, M. A., & Tambunan, O. P. (2024). Inovasi Teknologi dalam Budidaya Udang: Penggunaan Water Quality Meter untuk Meningkatkan Produktivitas Udang di Sidoarjo. *Sewagati: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 8(3), 1697–1708. <https://doi.org/10.12962/j26139960.v8i3.982>
- Hong, S., Morgan, B. J., Stocker, M. D., Smith, J., & Pachepsky, Y. A. (2025). Spatial patterns of water quality and remote sensing indices from UAV-based multispectral imagery across an irrigation pond. *Heliyon*, 11(4), e42622. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42622>
- Jabbar, W. A., Subramaniam, T., Ong, A. E., Shu'ib, M. I., Wu, W., & de Oliveira, M. A. (2022). LoRaWAN-Based IoT System Implementation for Long-Range Outdoor Air Quality Monitoring. *Internet of Things (Netherlands)*, 19, 100540. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100540>
- Jierula, A., Wang, S., Oh, T. M., & Wang, P. (2021). Study on accuracy metrics for evaluating the predictions of damage locations in deep piles using artificial neural networks with acoustic emission data. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(5), 1–21. <https://doi.org/10.3390/app11052314>
- Nurhidayanti, M. (2025). Evaluasi Pengelolaan Kualitas Air untuk Budidaya Udang Vannamei secara Intensif. *Jurnal Perikanan Indonesia*, 01(01), 22–28. <https://ojs.samudrailmu.com/index.php/jpikan>
- Pandawana, I. D. G. A., Partama, I. G. Y., Dwipa, I. M. S., Sari, P. A. P., & Kumara, D. G. A. (2024). Prototype of water quality monitoring mobile application as early warning system based on internet of things. *Informatika Dan Sains*, 14(01), 1069–1078. <https://doi.org/10.54209/infosains.v14i01>
- Pebrianto, D. H., Sumahradewi, L. G., Rahmawati, A., & Rizal, L. S. (2023). Pengaruh Salinitas Terhadap Pertumbuhan Udang Vaname (*Litopenaeus Vannamei*). *Al-Qalbu: Jurnal Pendidikan, Sosial Dan Sains*, 1(2), 52–57. <https://doi.org/10.59896/qalbu.v4i1>
- Putra, F. P. E., Ubaidi, U., Saputra, R. N., Haris, F. M., & Barokah, S. N. R. (2024). Application of Internet of Things Technology in Monitoring Water Quality in Fishponds. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 356–361. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4231>
- Rahmi, I., Arfiati, D., Musa, M., & Karimah, K. (2023). Dynamics of Physics and Chemistry of Vanamei Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) Pond Water with Semi Biofloc System. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(1), 249–256. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i1.2528>
- Rezki, R., Nugroho, B. S., & Nurhasanah, N. (2021). Rancang Bangun Alat Ukur Kualitas Air Berdasarkan pH Air dan Kekeruhan. *Jurnal PRISMA FISIKA*, 9(3), 297–303. <https://doi.org/10.26418/pf.v9i3.51573>
- Tasriq, T., & Kunang, S. O. (2023). Penerapan Metode Double Exponential Smoothing Dan Visualisasi Dashboard Untuk Menganalisa Data Transaksi Penjualan Pada Kemitraan PT Natural Nusantara (Studi Kasus : Stockis



## **TIN: Terapan Informatika Nusantara**

Vol 7, No 1, June 2026, page 544-558

ISSN 2722-7987 (Media Online)

Website <https://ejournal.seminar-id.com/index.php/tin>

DOI 10.47065/tin.v7i1.10321

BG.3005 Muara Enim). *JIPi (Jurnal Ilmiah Penelitian Dan Pembelajaran Informatika)*, 8(1), 254–265. <https://doi.org/10.29100/jipi.v8i1.3441>

Wiyanti, W. (2023). Effectiveness of Single and Double Exponential Smoothing: SES, ARSES and Holt's Linear for Time Series Data Prediction with Trend and Non-seasonal Characteristic (Covid-19 Vaccinate Case). *Jurnal Matematika, Statistika Dan Komputasi*, 20(1), 52–64. <https://doi.org/10.20956/j.v20i1.27193>