

TirtaSmart: Sistem Pemantauan Kualitas Air Berbasis WSN dan Energi Surya

Bagus Setya Rintyarna*

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember
Jl. Karimata No. 49, Jember, Jawa Timur, Indonesia

E-mail: bagus.setya@unmuhjember.ac.id

Naskah Masuk: 31 Agustus 2026; Diterima: 25 September 2026; Terbit: 30 September 2026

ABSTRAK

Abstrak - TirtaSmart dikembangkan sebagai prototipe sistem pemantauan kualitas air untuk mendukung pengelolaan air bersih perdesaan yang membutuhkan pemantauan multi-parameter, komunikasi data, dan sumber energi yang mandiri. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kesiapan awal prototipe melalui uji subsistem, uji integrasi sistem, uji kinerja energi, dan uji lapangan terbatas. Prototipe mengintegrasikan sensor suhu, total dissolved solids (TDS), pH, dissolved oxygen (DO), dan turbidity dengan node berbasis ESP32, aplikasi Blynk, serta sistem energi surya dengan baterai LiFePO₄. Hasil uji subsistem menunjukkan deviasi terhadap instrumen pembandingan sebesar 0,00% untuk suhu, 0,16% untuk TDS, 0,34% untuk pH, 1,12% untuk DO, dan 0,00% untuk turbidity pada rangkaian pengujian. Nilai deviasi 0,00% untuk turbidity diperoleh dari 20 pembacaan pada sampel yang sama, yaitu 0,96 NTU. Hasil pada titik ukur tunggal ini menunjukkan kesesuaian pembacaan berulang, bukan akurasi atau linearitas sensor pada seluruh rentang ukurnya. Interpretasi serupa berlaku untuk pengujian suhu pada rentang yang sempit. Uji integrasi menghasilkan 109 rekaman multi-parameter pada Blynk selama sekitar 54,7 menit dan menunjukkan keberhasilan pemetaan virtual pin V0-V4. Total beban prototipe sebesar 5,638 W dengan kebutuhan energi 135,312 Wh/hari. Energi fotovoltaik yang tercatat pukul 07.00-16.00 mencapai 241,404 Wh atau 178,4% dari estimasi kebutuhan harian. Dokumentasi lapangan menunjukkan prototipe telah diterapkan pada lingkungan yang relevan. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi sensing, komunikasi, monitoring, dan energi telah berfungsi dan memberikan dasar teknis untuk pengujian operasional jangka panjang.

Kata kunci: Kualitas Air, *Wireless Sensor Network*, *Internet of Things*, Energi Surya, TirtaSmart.

ABSTRACT

Abstract - TirtaSmart was developed as a water-quality monitoring prototype to support rural clean-water management that requires multi-parameter sensing, data communication, and an autonomous energy source. This study evaluates the initial readiness of the prototype through subsystem testing, system-integration testing, energy-performance testing, and limited field testing. The prototype integrates temperature, total dissolved solids (TDS), pH, dissolved oxygen (DO), and turbidity sensors with an ESP32-based node, the Blynk application, and a solar-energy subsystem using a LiFePO₄ battery. Subsystem testing showed deviations from reference instruments of 0.00% for temperature, 0.16% for TDS, 0.34% for pH, 1.12% for DO, and 0.00% for turbidity in the conducted test series. The 0.00% turbidity deviation was obtained from 20 readings of the same 0.96 NTU sample. This single-point result indicates agreement across repeated readings, but does not establish accuracy or linearity over the sensor's full measurement range. The temperature result is likewise limited to the narrow range tested. Integration testing produced 109 multi-parameter records on Blynk for approximately 54.7 minutes and confirmed successful mapping of virtual pins V0-V4. The prototype load was 5.638 W, corresponding to an estimated daily energy demand of 135.312 Wh. Measured photovoltaic energy from 07:00 to 16:00 reached 241.404 Wh, equivalent to 178.4% of the estimated daily demand. Field documentation also confirmed initial deployment in a relevant environment. These results indicate that sensing, communication, monitoring, and energy subsystems operated as an integrated prototype and provide a technical basis for longer-term operational testing.

Keywords: Water Quality, *Wireless Sensor Network*, *Internet Of Things*, Solar Energy, TirtaSmart.

Copyright © 2026 Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)

1. PENDAHULUAN

Pemantauan kualitas air merupakan bagian penting dalam pengelolaan sistem penyediaan air bersih karena perubahan parameter fisik dan kimia dapat terjadi secara dinamis. Pada wilayah perdesaan, pemantauan sering menghadapi keterbatasan infrastruktur komunikasi, sumber energi, ketersediaan instrumen, serta sumber daya manusia.

Kondisi tersebut mendorong kebutuhan terhadap perangkat pemantauan yang mampu melakukan akuisisi data secara otomatis, mengirimkan data secara nirkabel, dan tetap beroperasi pada lokasi yang tidak selalu memiliki pasokan listrik stabil. Pengembangan *Wireless Sensor Network (WSN)*, *Internet of Things (IoT)*, dan *energy harvesting* membuka peluang untuk membangun sistem pemantauan yang lebih kontinu dan terdistribusi [1]-[3].

Berbagai penelitian menunjukkan perkembangan sensor kualitas air, sistem IoT, dan teknik monitoring real-time. Kerangka evaluasi sensor kualitas air menekankan pentingnya perbandingan terhadap instrumen referensi untuk menilai reliabilitas pembacaan [4]. Pengembangan sistem berbasis TDS dan IoT juga menunjukkan bahwa parameter kualitas air dapat diakuisisi dan dikirim secara digital untuk kebutuhan monitoring [5], [6]. Sensor turbidity berbasis optik serta pendekatan penginderaan kualitas air lainnya semakin memperluas pilihan teknologi untuk pemantauan in situ [7], [8]. Namun, penerapan sistem pada konteks perdesaan tetap memerlukan integrasi yang mempertimbangkan keterbatasan energi, konektivitas, kemudahan pemeliharaan, dan kesiapan pengguna.

TirtaSmart dikembangkan sebagai kelanjutan prototipe pemantauan kualitas air pada Tingkat Kesiapterapan Teknologi (TKT) 5. Sistem dirancang mengintegrasikan sensor multi-parameter, node WSN, gateway/komunikasi, aplikasi monitoring, dan energi surya. Pengembangan tahun 2026 menekankan peningkatan kemandirian energi, pengayaan sensor, integrasi komunikasi dan buffering, serta penyiapan analitik berbasis Neural Network dan dashboard web mandiri. Penggunaan pembangkit fotovoltaik relevan dengan kebutuhan WSN berdaya rendah dan operasi pada lokasi yang jauh dari sumber listrik [1]-[3].

Kebaruan praktis TirtaSmart terletak pada integrasi empat aspek dalam satu prototipe yang diarahkan untuk konteks pengelolaan air perdesaan: sensing multi-parameter, komunikasi data nirkabel, monitoring aplikasi, dan sumber energi surya. Berbeda dari evaluasi yang hanya berfokus pada satu sensor atau satu subsistem, penelitian ini menilai kesiapan awal prototipe melalui rangkaian uji berjenjang dari subsistem, integrasi end-to-end, kinerja energi, hingga penerapan awal pada lingkungan relevan. Tujuan penelitian adalah mengevaluasi kinerja awal TirtaSmart dan mengidentifikasi sejauh mana subsistem utama telah berfungsi sebagai satu prototipe terintegrasi sebelum pengujian algoritma, operasional skala desa, dan pemanfaatan pengguna dilakukan.

Permasalahan teknis pada sistem monitoring air perdesaan bersifat lintas-subsistem. Sensor yang baik tidak cukup apabila data tidak dapat dikirim secara konsisten, sementara komunikasi yang andal tidak memberikan manfaat apabila perangkat tidak memiliki sumber energi yang memadai. Karena itu, penelitian ini menggunakan pendekatan integratif yang memandang prototipe sebagai rantai fungsi dari sensing, akuisisi, komunikasi, pencatatan aplikasi, hingga penyediaan energi. Pendekatan tersebut juga membuat evaluasi lebih dekat dengan kebutuhan implementasi karena setiap kegagalan subsistem dapat ditelusuri sebelum dilakukan demonstrasi skala desa.

Kontribusi artikel ini terdiri atas tiga bagian. Pertama, artikel menyajikan evaluasi terukur terhadap lima sensor kualitas air yang menjadi sumber utama data TirtaSmart. Kedua, artikel memisahkan secara eksplisit validasi sensor dari validasi integrasi komunikasi dengan menganalisis data yang benar-benar telah diterima pada aplikasi Blynk. Ketiga, artikel mengevaluasi neraca energi awal dengan membandingkan kebutuhan beban harian terhadap energi fotovoltaik yang terukur. Kombinasi ketiga bukti tersebut digunakan untuk menilai kesiapan awal prototipe sebelum memasuki pengujian algoritma klasifikasi dan operasi skala desa.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1. Pemantauan kualitas air berbasis IoT dan WSN

WSN memungkinkan sejumlah node sensor melakukan pengukuran dan mengirimkan data menuju gateway atau server. Pada pemantauan kualitas air, pendekatan ini relevan karena parameter dapat diukur pada interval yang lebih rapat dibandingkan pengambilan sampel manual. Sistem IoT selanjutnya menyediakan lapisan komunikasi dan visualisasi sehingga data dapat diakses dari lokasi berbeda. Studi pada sistem monitoring kualitas air berbasis IoT menunjukkan integrasi sensor, mikrokontroler, dan layanan monitoring dapat digunakan untuk memperoleh informasi lingkungan secara berkala [6]. Pada konteks perdesaan, desain sistem perlu memperhatikan kemudahan instalasi, kebutuhan energi, ketahanan perangkat, dan ketersediaan jaringan.

2.2. Sensor multi-parameter dan validasi pembacaan

TirtaSmart menggunakan lima parameter pada tahap pengujian ini, yaitu suhu, TDS, pH, DO, dan turbidity. Evaluasi sensor dilakukan melalui perbandingan dengan instrumen pembandian karena kesesuaian pembacaan merupakan prasyarat sebelum data digunakan untuk monitoring dan analitik. Sebagai arah pengembangan berikutnya, data multi-parameter TirtaSmart direncanakan menjadi masukan bagi model klasifikasi mutu air berbasis *machine learning*, sebagaimana ditunjukkan oleh penelitian terdahulu [14], [15]. Pengembangan dan evaluasi model tersebut belum termasuk dalam pengujian yang dilaporkan pada artikel ini.

2.3. Kemandirian energi pada sistem sensor

Sistem sensor yang ditempatkan di lapangan membutuhkan strategi energi yang sesuai dengan profil beban. *Energy harvesting* berbasis fotovoltaik merupakan pendekatan yang banyak digunakan pada WSN karena dapat memperpanjang waktu operasi dan mengurangi ketergantungan pada penggantian baterai [1], [2]. Penggunaan panel fotovoltaik pada perangkat sensor portabel juga menunjukkan bahwa kombinasi sumber energi surya dan pengelolaan konsumsi daya dapat meningkatkan kemandirian operasi [3]. Dalam TirtaSmart, panel surya, charge controller, baterai LiFePO₄, dan distribusi daya diperlakukan sebagai subsistem yang diuji bersama dengan beban elektronik.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Arsitektur Prototipe

Arsitektur TirtaSmart terdiri atas lima bagian utama: (1) subsistem sensor untuk mengukur parameter kualitas air; (2) node WSN berbasis ESP32 untuk akuisisi dan pengiriman data; (3) gateway/konektivitas untuk meneruskan data; (4) sistem energi surya yang terdiri atas panel surya, charge controller, baterai, dan distribusi daya; serta (5) aplikasi/server untuk pencatatan dan visualisasi data. Pada tahap kemajuan, Blynk digunakan sebagai sumber data pada uji integrasi. Analitik Neural Network dan dashboard web mandiri merupakan bagian pengembangan lanjutan dan belum dievaluasi sebagai hasil utama pada artikel ini.

Pada lapisan sensing, sensor dihubungkan ke node ESP32 melalui antarmuka analog/digital sesuai karakteristik masing-masing modul. Node melakukan pembacaan periodik dan menyiapkan nilai untuk dikirim ke aplikasi. Parameter suhu digunakan untuk memberikan konteks termal, TDS merepresentasikan total zat terlarut, pH menunjukkan derajat keasaman, DO menggambarkan oksigen terlarut, dan turbidity merepresentasikan tingkat kekeruhan. Pemilihan kelima parameter tersebut dimaksudkan untuk membentuk gambaran dasar kondisi air yang lebih komprehensif daripada sistem satu-parameter.

Pada lapisan komunikasi dan monitoring, data dari node dikirim melalui konektivitas yang tersedia menuju Blynk. Pengujian integrasi menempatkan Blynk sebagai titik observasi karena data yang berhasil muncul pada aplikasi telah melewati rangkaian akuisisi, komunikasi, pemetaan virtual pin, dan penyimpanan. Pendekatan ini memungkinkan fungsi end-to-end diuji tanpa mencampurkan evaluasi akurasi sensor dengan evaluasi jalur komunikasi.

Subsistem energi dirancang terpisah agar prototipe dapat beroperasi di lokasi yang memiliki keterbatasan listrik. Panel surya memasok energi melalui charge controller menuju baterai LiFePO₄, sedangkan modul konversi/distribusi daya menyediakan tegangan yang sesuai bagi node, sensor, display, dan perangkat komunikasi. Desain ini memberikan cadangan energi ketika radiasi matahari menurun dan sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap jaringan listrik konvensional.



Gambar 1. Prototipe TirtaSmart pada proses pengujian integrasi perangkat

3.2. Skenario Pengujian

Blueprint TirtaSmart menetapkan tujuh mekanisme pengujian, yaitu Uji Subsistem, Uji Integrasi Sistem, Uji Kinerja Energi, Uji Algoritma Klasifikasi, Uji Lapangan Terbatas, Uji Operasional Skala Desa, dan Uji Pemanfaatan Pengguna. Artikel ini membahas empat pengujian yang telah tersedia pada tahap kemajuan: Uji Subsistem, Uji Integrasi Sistem, Uji Kinerja Energi, dan Uji Lapangan Terbatas. Tiga pengujian lainnya berada pada tahap berikutnya sehingga tidak digunakan untuk menarik kesimpulan pada artikel ini.

Urutan pengujian dirancang mengikuti prinsip peningkatan kompleksitas. Uji subsistem dilakukan lebih dahulu karena kesalahan pada sensor atau catu daya akan memengaruhi pengujian berikutnya. Setelah fungsi dasar terverifikasi, uji integrasi mengevaluasi apakah data dapat bergerak dari perangkat ke aplikasi. Uji energi kemudian menilai apakah arsitektur daya mampu menopang sistem. Uji lapangan terbatas menjadi tahap transisi sebelum sistem dioperasikan pada skala desa dalam durasi yang lebih panjang.

Pada artikel ini, keberhasilan tidak didefinisikan sebagai pencapaian keseluruhan TKT 6-7. Hasil yang dilaporkan merupakan bukti teknis tahap awal. Uji algoritma klasifikasi, uji operasional skala desa, dan uji pemanfaatan pengguna diperlukan untuk melengkapi pembuktian kesiapan pada tahap berikutnya.

Tabel 1. Skenario pengujian prototipe pada tahap penelitian

Skenario	Tujuan	Parameter/Bukti
Uji Subsystem	Memastikan fungsi komponen sebelum integrasi	Pembacaan sensor dan instrumen pembanding
Uji Integrasi Sistem	Memverifikasi aliran data perangkat ke aplikasi	Rekaman Blynk, timestamp, virtual pin V0-V4
Uji Kinerja Energi	Menilai kecukupan suplai energi	Daya beban, baterai, tegangan/arus PV, energi
Uji Lapangan Terbatas	Membuktikan penerapan awal pada lingkungan relevan	Dokumentasi instalasi dan operasi awal

3.3. Uji Subsystem Sensor

Sensor diuji dengan membandingkan pembacaan TirtaSmart terhadap instrumen pembanding. Sensor suhu, TDS, dan pH dibandingkan dengan Water Quality Testing Meter, sensor DO dibandingkan dengan Oxygen Meter, sedangkan turbidity dibandingkan dengan Portable Turbidity Meter AMT21. Jumlah pengamatan berbeda menurut parameter sesuai data pengujian yang tersedia. Kinerja diringkas menggunakan selisih rata-rata dan Mean Absolute Error (MAE).

Jumlah pengamatan yang tersedia adalah 12 data untuk suhu, 13 data untuk TDS, 10 data untuk pH, 10 data untuk DO, dan 20 data untuk turbidity. Nilai pembacaan sensor dan alat pembanding dicatat pada kondisi pengujian yang sama. Untuk setiap parameter dihitung nilai rata-rata sensor, rata-rata instrumen pembanding, selisih absolut, dan persentase kesalahan relatif bila relevan.

MAE dipilih karena memberikan ukuran rata-rata besar kesalahan tanpa mempertimbangkan arah kesalahan. Nilai yang semakin kecil menunjukkan bahwa pembacaan sensor semakin dekat dengan instrumen pembanding pada rangkaian data uji. Untuk turbidity, seluruh pembacaan sensor dan AMT21 sama-sama 0,96 NTU, sehingga MAE pada seri data tersebut adalah nol. Hasil ini tidak dimaksudkan sebagai sertifikasi kalibrasi, melainkan verifikasi teknis sebelum integrasi lapangan.

$$MAE = (1/n) \sum |y_i - \hat{y}_i| \quad (1)$$

Di mana n menyatakan jumlah pasangan pengamatan, y_i pembacaan instrumen pembanding pada pengamatan ke- i , dan $\hat{y}_i$ pembacaan sensor TirtaSmart pada pengamatan yang sama.

3.4. Uji integrasi sistem

Uji integrasi menggunakan data yang telah diterima dan direkam pada aplikasi Blynk, bukan data mentah yang dibaca langsung dari sensor. Evaluasi difokuskan pada keberadaan rekaman multi-parameter, kontinuitas timestamp, pemetaan parameter ke virtual pin, dan kemampuan data untuk direkam pada sisi aplikasi. Karena tidak tersedia log pasangan jumlah paket yang dikirim dari node/gateway, packet loss tidak dihitung pada tahap ini.

Data Blynk dievaluasi menggunakan jumlah rekaman, rentang timestamp, statistik deskriptif tiap parameter, dan catatan status pengiriman virtual pin. Keberhasilan integrasi dinyatakan apabila data lima parameter tersedia pada aplikasi dan dapat direkam secara berurutan selama periode uji. Karena pengujian hanya memiliki log sisi aplikasi, indikator packet delivery ratio, latency jaringan, dan packet loss belum dihitung agar tidak menghasilkan klaim yang tidak didukung pasangan log sisi pengiriman.

3.5. Uji kinerja energi

Kinerja energi dievaluasi melalui perhitungan total daya beban dan pencatatan aktual tegangan serta arus panel fotovoltaik dari pukul 07.00 sampai 16.00. Beban meliputi ESP32 + Wi-Fi, DS18B20, sensor DO, pH, TDS, turbidity, LCD 20×4, dan MiFi Orbit. Penyimpanan energi menggunakan baterai LiFePO4 12,8 V 30 Ah dengan kapasitas nominal 384 Wh. Energi efektif dihitung dengan asumsi depth of discharge (DOD) 80%. Energi harian beban dihitung dari daya total dikalikan 24 jam, sedangkan energi PV dihitung sebagai penjumlahan daya rata-rata pada setiap interval satu jam.

Total daya beban diperoleh dengan menjumlahkan estimasi daya setiap perangkat. Nilai beban utama berasal dari MiFi Orbit sekitar 4 W, ESP32 dan Wi-Fi sekitar 0,75 W, serta sensor dan display sebagai beban tambahan. Kebutuhan energi harian kemudian dihitung dengan mengalikan total daya terhadap 24 jam operasi. Estimasi durasi backup baterai dihitung sebagai energi efektif baterai dibagi total daya beban.

Pencatatan PV dilakukan setiap satu jam. Daya pada setiap titik dihitung menggunakan hubungan $P = V \times I$. Energi untuk interval satu jam kemudian diasumsikan setara dengan daya rata-rata pada interval tersebut dikalikan satu jam. Penjumlahan seluruh interval menghasilkan estimasi energi yang

terkumpul selama periode 07.00-16.00. Rasio kecukupan energi dihitung dengan membandingkan total energi PV yang tercatat terhadap kebutuhan energi beban selama 24 jam.

3.6. Uji lapangan terbatas

Uji lapangan terbatas digunakan untuk membuktikan bahwa prototipe telah dipindahkan dari pengujian laboratorium menuju lingkungan yang relevan. Bukti pada tahap ini terutama berupa dokumentasi foto penerapan prototipe dan pengujian subsistem energi. Oleh karena itu, pengujian lapangan tidak digunakan untuk menghasilkan klaim kuantitatif mengenai uptime, packet delivery ratio, atau kestabilan multi-hari tanpa log operasional yang sesuai.

Dokumentasi pengujian digunakan untuk memverifikasi tiga hal: kesiapan fisik prototipe, keterhubungan komponen saat ditempatkan pada lingkungan relevan, dan kemampuan subsistem energi untuk dioperasikan di luar meja pengujian sensor. Pada tahap ini dokumentasi juga berfungsi sebagai bukti bahwa prototipe telah melewati transisi dari perakitan dan pengujian laboratorium menuju penggunaan awal pada kondisi lapangan.

Tidak adanya log operasional multi-hari menyebabkan indikator reliabilitas jangka panjang belum dapat dihitung. Karena itu, uji lapangan terbatas ditempatkan sebagai validasi penerapan awal, bukan pengujian reliabilitas final. Desain penelitian berikutnya perlu menggunakan logging lokal pada node/gateway, pencatatan energi yang kontinu, dan rekaman status komunikasi untuk memisahkan kegagalan sensor, jaringan, dan daya.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Uji Subsistem

Tabel 2 menunjukkan bahwa kelima sensor menghasilkan pembacaan yang dekat dengan instrumen pembanding pada rangkaian uji.

Tabel 2. Hasil verifikasi sensor TirtaSmart

Parameter	Instrumen pembanding	n	Rata-rata sensor	Rata-rata referensi	Deviasi/MAE
Suhu	Water Quality Testing Meter	12	28,60 °C	28,60 °C	0,00 °C (0,00%)
TDS	Water Quality Testing Meter	13	345,46 ppm	346,00 ppm	0,54 ppm (0,16%)
pH	Water Quality Testing Meter	10	7,523	7,549	0,026 (0,34%)
DO	Oxygen Meter	10	6,32 mg/L	6,25 mg/L	0,07 mg/L (1,12%)
Turbidity	Portable Turbidity Meter AMT21	20	0,96 NTU	0,96 NTU	0,00 NTU (0,00%)

Suhu menunjukkan kesesuaian penuh pada 12 pengamatan. TDS memiliki MAE 0,54 ppm atau sekitar 0,16%, sedangkan pH memiliki MAE 0,026 atau sekitar 0,34%. DO menunjukkan deviasi relatif terbesar, yaitu 1,12%, tetapi masih menunjukkan kedekatan pembacaan terhadap Oxygen Meter pada kondisi pengujian. Turbidity menunjukkan nilai 0,96 NTU pada sensor TirtaSmart maupun AMT21 untuk seluruh pengambilan data.

Pada 12 pengamatan suhu, sensor TirtaSmart dan instrumen pembanding menampilkan nilai yang sama, yaitu 28,60 °C. Demikian pula, pada 20 pengamatan turbidity terhadap sampel yang sama sebesar 0,96 NTU, pembacaan sensor sama dengan AMT21. Deviasi 0,00% pada kedua seri ini menunjukkan kesesuaian pembacaan berulang pada kondisi dan titik ukur yang diuji, dalam batas resolusi angka yang dilaporkan. Hasil tersebut belum membuktikan akurasi, linearitas, atau keberhasilan kalibrasi pada rentang ukur penuh. Evaluasi lanjutan perlu menggunakan beberapa titik standar yang mewakili rentang suhu dan kekeruhan yang dituju. Pada TDS, selisih rata-rata hanya 0,54 ppm dari referensi 346,00 ppm. Dengan kesalahan relatif sekitar 0,16%, sensor mampu mengikuti nilai referensi pada sampel uji. pH memperlihatkan MAE 0,026 pada nilai sekitar netral, sedangkan DO memberikan MAE 0,07 mg/L. Meskipun DO memiliki persentase deviasi terbesar, nilainya tetap berada dalam kisaran kecil pada seri pengamatan yang dilakukan.

Kesamaan pembacaan turbidity sebesar 0,96 NTU pada 20 pengamatan mengindikasikan kesesuaian sangat tinggi untuk sampel yang diuji. Akan tetapi, karena seluruh data berada pada satu tingkat kekeruhan, penelitian lanjutan perlu menggunakan larutan standar atau sampel dengan beberapa tingkat NTU untuk mengevaluasi respons sensor pada rentang yang lebih luas.

Hasil tersebut penting karena kualitas integrasi sistem tidak dapat dipisahkan dari kualitas data pada lapisan sensing. Deviasi yang rendah menunjukkan bahwa data sensor dapat diteruskan ke tahap komunikasi dan visualisasi tanpa adanya indikasi perbedaan besar terhadap instrumen pembanding pada sampel uji. Meskipun demikian, hasil ini belum dapat dianggap sebagai karakterisasi metrologi penuh. Pengujian pada rentang konsentrasi yang lebih luas, variasi kondisi lingkungan, dan replikasi antarmuka tetap diperlukan untuk menilai linearitas, drift, hysteresis, dan stabilitas jangka panjang [4].

4.2. Hasil Uji Integrasi Sistem

Tabel 3. Ringkasan data yang diterima pada aplikasi Blynk

Parameter	Jumlah data	Rata-rata	Minimum	Maksimum
Suhu	109	25,00 °C	25,00 °C	25,00 °C
pH	109	6,987	5,31	7,30
DO	109	7,384 mg/L	6,61 mg/L	10,39 mg/L
TDS	109	351,32 ppm	297 ppm	423 ppm
Turbidity	109	1,00 NTU	1,00 NTU	1,00 NTU

Sebanyak 109 rekaman numerik multi-parameter tercatat pada aplikasi Blynk selama sekitar 54,7 menit, dari pukul 12:20:47 sampai 13:15:27. Log sistem juga mencatat dua status yang menyatakan virtual pin V0-V4 berhasil dikirim ke Blynk. Hal ini menunjukkan bahwa pada periode pengujian, data dari lima parameter telah mencapai lapisan aplikasi dan dapat direkam secara berurutan.

Dari sisi statistik, pH yang diterima aplikasi memiliki rata-rata 6,987 dengan minimum 5,31 dan maksimum 7,30; DO memiliki rata-rata 7,384 mg/L dengan rentang 6,61-10,39 mg/L; sedangkan TDS memiliki rata-rata 351,32 ppm pada rentang 297-423 ppm. Variasi pada ketiga parameter ini memperlihatkan bahwa aplikasi tidak hanya merekam nilai tetap, tetapi menerima perubahan nilai numerik selama periode uji.

Suhu dan turbidity pada data Blynk tercatat konstan masing-masing 25,00 °C dan 1,00 NTU. Karena tujuan uji integrasi adalah memeriksa aliran data, nilai konstan tersebut tetap merupakan bukti bahwa variabel berhasil dipetakan dan direkam. Namun, data ini tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan sensitivitas kedua sensor terhadap perubahan lingkungan.

Keterbatasan utama uji integrasi adalah tidak tersedianya nomor urut paket atau timestamp pasangan pada sisi node. Dengan demikian, 109 rekaman membuktikan keberadaan data di aplikasi, tetapi tidak menentukan berapa persen data yang hilang selama transmisi. Pada uji selanjutnya, setiap paket perlu diberi sequence number sehingga packet delivery ratio, packet loss, jitter, dan latency dapat dianalisis secara objektif.

Rentang data pada Tabel 3 menggambarkan data yang telah diterima aplikasi dan tidak boleh diinterpretasikan sebagai hasil validasi akurasi sensor. Perbedaan konteks antara uji subsistem dan uji integrasi menjadi penting: uji subsistem membandingkan sensor terhadap alat referensi, sedangkan uji integrasi membuktikan alur data end-to-end dari sisi aplikasi. Dengan demikian, keberhasilan 109 rekaman merupakan bukti fungsi integrasi, tetapi bukan bukti bahwa seluruh paket yang dikirim telah diterima. Pengukuran packet loss memerlukan log jumlah paket pada sisi pengirim dan penerima.

4.3. Hasil Uji Kinerja Energi

Tabel 4. Indikator kinerja energi TirtaSmart

Indikator	Hasil
Total daya beban prototipe	5,638 W
Kebutuhan energi 24 jam	135,312 Wh/hari
Kapasitas nominal baterai	384 Wh
Energi efektif baterai (DOD 80%)	307 Wh
Estimasi backup tanpa pengisian	±54,5 jam (2,27 hari)
Energi PV aktual 07.00-16.00	241,404 Wh
Daya PV maksimum	57,268 W pada pukul 12.00
Rasio energi PV terhadap kebutuhan harian	178,4%
Margin energi terhadap kebutuhan harian	+106,092 Wh

Total beban 5,638 W menghasilkan estimasi kebutuhan energi 135,312 Wh untuk operasi 24 jam. Dengan kapasitas nominal baterai 384 Wh dan energi efektif sekitar 307 Wh pada DOD 80%, baterai secara teoritis dapat menopang beban sekitar 54,5 jam tanpa pengisian. Nilai ini merupakan estimasi berbasis daya beban dan belum memasukkan seluruh rugi-rugi konversi maupun degradasi baterai.

Komposisi beban menunjukkan bahwa perangkat komunikasi merupakan kontributor daya yang dominan. MiFi Orbit sekitar 4 W menyumbang lebih dari separuh total beban, sedangkan node ESP32 + Wi-Fi sekitar 0,75 W. Temuan ini penting bagi optimasi desain karena penghematan energi paling efektif dapat diarahkan pada strategi komunikasi, interval transmisi, atau penggunaan modem berdaya lebih rendah.

Baterai LiFePO₄ dipilih karena memiliki siklus hidup tinggi dan karakteristik yang sesuai untuk aplikasi penyimpanan energi surya. Dengan energi efektif 307 Wh, cadangan teoritis sekitar 2,27 hari memberikan buffer ketika pembangkitan surya menurun. Akan tetapi, durasi aktual dapat lebih pendek karena efisiensi converter, konsumsi puncak modem, self-discharge, dan degradasi kapasitas.

Kurva daya harian menunjukkan pola peningkatan dari pagi menuju tengah hari dan penurunan setelah pukul 12.00. Pola tersebut konsisten dengan perubahan radiasi matahari. Puncak 57,268 W jauh di atas beban rata-rata 5,638 W sehingga selama kondisi irradiance memadai terdapat ruang untuk mengisi baterai sekaligus menjalankan perangkat.

Pencatatan panel fotovoltaik dari pukul 07.00 sampai 16.00 menghasilkan energi 241,404 Wh, dengan daya maksimum 57,268 W pada pukul 12.00. Energi yang tercatat setara 178,4% dari estimasi kebutuhan energi harian dan memberikan margin 106,092 Wh. Pada kondisi pengujian tersebut, pembangkitan PV secara energi menunjukkan kapasitas yang memadai untuk menutup estimasi konsumsi prototipe. Temuan ini konsisten dengan konsep pemanfaatan energy harvesting untuk meningkatkan keberlanjutan WSN [1], [2]. Namun, surplus energi pada satu hari pengujian tidak secara otomatis menjamin kemandirian sepanjang tahun karena variasi cuaca, orientasi panel, efisiensi charge controller, rugi kabel, pola komunikasi, dan kondisi baterai dapat mengubah neraca energi.



Gambar 2. Dokumentasi pengujian subsistem energi surya TirtaSmart

4.4. Penerapan Awal Pada Lingkungan Relevan

Dokumentasi lapangan menunjukkan prototipe telah dibawa dan diuji pada lingkungan yang relevan di Jember pada Agustus 2026. Dokumentasi memperlihatkan perangkat, proses pengujian oleh personel laboratorium, serta subsistem energi surya. Perpindahan dari meja laboratorium menuju lingkungan relevan merupakan tahap penting dalam peningkatan kesiapterapan teknologi karena gangguan lingkungan, kebutuhan instalasi, dan integrasi antarperangkat mulai muncul dalam konteks yang lebih dekat dengan penggunaan sebenarnya.

Dari perspektif rekayasa, uji lapangan terbatas juga digunakan untuk mengevaluasi kemudahan instalasi fisik, tata letak enclosure, akses terhadap konektor, pemasangan sumber daya, dan proses troubleshooting. Aspek-aspek tersebut tidak selalu muncul pada pengujian meja laboratorium, tetapi sangat menentukan ketika perangkat akan dipasang dan dipelihara oleh operator di lapangan.

Hasil dokumentasi memperlihatkan sistem dapat dirakit dan dioperasikan dengan subsistem sensor, pengendali, komunikasi, dan energi dalam satu konfigurasi. Meski demikian, artikel ini membatasi kesimpulan pada bukti penerapan awal. Validasi ketahanan enclosure, respons terhadap hujan dan suhu lingkungan, serta operasi kontinyu perlu dilakukan pada tahap demonstrasi skala desa.



Gambar 3. Dokumentasi pengujian prototipe pada tahap penerapan awal

Pada tahap ini, bukti lapangan masih bersifat dokumentatif sehingga penelitian tidak mengklaim uptime, packet delivery ratio, ataupun stabilitas operasi multi-hari. Pembatasan klaim tersebut penting agar hasil tetap konsisten dengan bukti yang tersedia. Uji operasional skala desa dengan durasi lebih panjang diperlukan untuk memperoleh indikator reliabilitas komunikasi, kontinuitas data, konsumsi energi aktual, dan kebutuhan pemeliharaan.

4.5. Implikasi hasil dan keterbatasan

Secara keseluruhan, empat pengujian menunjukkan bahwa TirtaSmart telah memiliki rantai fungsi dasar yang terintegrasi: sensor dapat menghasilkan data dengan deviasi rendah terhadap alat pembanding pada rangkaian uji, data multi-parameter dapat mencapai aplikasi Blynk, dan sistem energi surya menunjukkan kecukupan awal untuk kebutuhan daya prototipe. Integrasi ini menjadi nilai utama karena sistem monitoring air perdesaan tidak hanya membutuhkan sensor yang akurat, tetapi juga komunikasi yang berfungsi dan sumber energi yang mampu mempertahankan operasi.

Jika dilihat sebagai satu rantai kesiapan teknologi, hasil sensor mengurangi ketidakpastian pada lapisan akuisisi, log Blynk mengurangi ketidakpastian pada lapisan komunikasi dan visualisasi, sedangkan hasil PV mengurangi ketidakpastian pada lapisan energi. Kombinasi tersebut memberikan bukti bahwa kegagalan sistem tidak lagi hanya diuji secara parsial, tetapi mulai dievaluasi sebagai prototipe terintegrasi.

Temuan juga menunjukkan beberapa prioritas penyempurnaan. Pertama, data sensor perlu diperluas ke lebih banyak level konsentrasi dan kondisi air. Kedua, protokol logging harus memasukkan sequence number dan timestamp tersinkronisasi. Ketiga, evaluasi energi perlu dilakukan selama beberapa hari dengan kondisi cuaca berbeda. Keempat, hasil sensor lapangan perlu dihubungkan dengan model klasifikasi dan dashboard web mandiri. Kelima, operator desa perlu dilibatkan untuk menilai usability, interpretasi informasi, dan kebutuhan pemeliharaan.

Penelitian masih memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, jumlah dan rentang sampel pada uji sensor belum mencakup variasi kualitas air yang luas. Kedua, uji integrasi hanya menggunakan data sisi aplikasi sehingga packet loss dan latency belum dapat dihitung secara valid. Ketiga, pengujian energi merupakan pencatatan terbatas dan belum mewakili variasi cuaca musiman. Keempat, uji lapangan terbatas belum menghasilkan dataset operasi multi-hari. Kelima, performa Neural Network dan usability pengguna belum menjadi bagian hasil penelitian ini. Keterbatasan tersebut sekaligus menentukan agenda pengujian berikutnya.

Tahap lanjutan diarahkan pada tiga pengujian: Uji Algoritma Klasifikasi untuk menilai performa model pada data lapangan, Uji Operasional Skala Desa untuk mengevaluasi reliabilitas sistem dalam durasi lebih panjang, dan Uji Pemanfaatan Pengguna untuk menilai kemudahan penggunaan serta manfaat informasi bagi pengelola. Pendekatan machine learning untuk klasifikasi kualitas air telah menunjukkan potensi pada penelitian terdahulu [14], [15], sehingga integrasinya dengan data TirtaSmart menjadi arah pengembangan yang relevan.

5. KESIMPULAN

TirtaSmart telah diuji pada empat aspek awal, yaitu subsistem sensor, integrasi sistem, kinerja energi, dan penerapan lapangan terbatas. Uji subsistem menunjukkan deviasi 0,00% untuk suhu, 0,16% untuk TDS, 0,34% untuk pH, 1,12% untuk DO, dan 0,00% untuk turbidity pada rangkaian pengujian. Uji integrasi menghasilkan 109 rekaman multi-parameter pada Blynk selama sekitar 54,7 menit serta menunjukkan pemetaan virtual pin V0-V4 telah berfungsi. Total daya prototipe 5,638 W setara kebutuhan 135,312 Wh/hari, sedangkan energi PV yang tercatat pukul 07.00-16.00

mencapai 241,404 Wh atau 178,4% dari estimasi kebutuhan harian. Dokumentasi lapangan membuktikan penerapan awal prototipe pada lingkungan relevan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa fungsi sensing, komunikasi, monitoring, dan energi telah terintegrasi dan memberikan dasar teknis untuk pengujian operasional lebih lanjut. Penelitian berikutnya perlu memperluas rentang kalibrasi sensor, merekam log komunikasi sisi pengirim dan penerima, melakukan uji energi multi-hari, mengevaluasi model Neural Network, dan melaksanakan uji operasional serta usability pada pengguna akhir.

Secara metodologis, hasil artikel ini masih merupakan evaluasi tahap awal dan tidak dimaksudkan sebagai klaim reliabilitas jangka panjang. Keterbatasan utama terdapat pada rentang pengujian sensor yang sempit, tidak tersedianya log komunikasi sisi pengirim, periode pengukuran energi yang terbatas, dan belum dilaksanakannya uji operasional multi-hari serta uji pengguna.

Pengembangan berikutnya disarankan menggunakan desain eksperimen yang mencakup variasi standar kualitas air, logging komunikasi dua sisi, pencatatan energi multi-hari, evaluasi model Neural Network menggunakan data lapangan, serta pengukuran usability oleh pengelola air desa. Tahap tersebut diperlukan untuk mengubah bukti fungsi awal menjadi bukti kesiapan operasional yang lebih kuat menuju TKT 6-7.

REFERENSI

- [1] M. U. Mushtaq, H. Venter, and A. Singh, "Advances in Energy Harvesting for Sustainable Wireless Sensor Networks: Challenges and Opportunities," *Hardware*, vol. 3, no. 1, pp. 1–26, 2025, doi: 10.3390/hardware3010001
- [2] B. Ávila, C. Vázquez, O. Baluja, D. Cofas, and P. Cofas, "Energy harvesting techniques for wireless sensor networks: A systematic literature review," *Energy Strategy Reviews*, vol. 57, Art. no. 101617, pp. 1–29, 2025, doi: 10.1016/j.esr.2024.101617
- [3] K. Luo, Y. Chen, R. Lin, C. Liang, and Q. Zhang, "A Portable Agriculture Environmental Sensor with a Photovoltaic Power Supply and Dynamic Active Sleep Scheme," *Electronics*, vol. 13, Art. no. 2606, pp. 1–16, 2024, doi: 10.3390/electronics13132606
- [4] N. Sahu and A. Maldhure, "Framework for evaluating the performance of water quality sensors," *Clean Water*, vol. 4, Art. no. 100144, pp. 1–8, 2025, doi:10.1016/j.clwat.2025.100144.
- [5] M. L. Mahendra, H. L. Raj, and M. Manisaketh, "Water Quality Monitoring System Using TDS," *International Journal of Science Engineering and Technology*, vol. 13, no. 1, pp. 1–7, 2025, doi: 10.61463/ijset.vol.13.issue1.105 .
- [6] R. Eso, H. T. Mokui, and L. Safiuddin, "Water Quality Monitoring System Based on the Internet of Things (IoT) for Vannamei Shrimp Farming," *ComTech*, vol. 15, no. 1, pp. 53–63, 2024, doi: 10.21512/comtech.v15i1.10657 .
- [7] K. Vatitsi, S. Siachalou, D. Latinopoulos, I. Kagalou, C. S. Akratos, and G. Mallinis, "Monitoring Water Quality Parameters in Small Rivers Using SuperDove Imagery," *Water*, vol. 16, Art. no. 758, pp. 1–17, 2024, doi: 10.3390/w16050758 .
- [8] C. T. V. Vu, A. A. Zahrani, L. Duan, and T. Wu, "A Glass-Fiber-Optic Turbidity Sensor for Real-Time In Situ Water Quality Monitoring," *Sensors*, vol. 23, Art. no. 7271, pp. 1–9, 2023, doi: 10.3390/s23167271.
- [9] V. Abungu, K. Adanu, M. Dadashi, B. Wasonga, and M. A. Elliott, "Multiple household water sources and uses in rural ASALs: Evidence and proposed solutions from Turkana, Kenya," *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 31, Art. no. 101531, pp. 1–12, 2025, doi: 10.1016/j.gsd.2025.101531
- [10] R. Cronk, J. W. Tracy, and J. Bartram, "The influence of seasonality and multiple water source use on household water service levels," *Clean Water*, vol. 1, Art. no. 100012, pp. 1–9, 2024.
- [11] S. K. Dewangan and S. K. Shrivastava, "A Correlation Between EC and TDS in water: a review," *IJPREMS*, vol. 5, no. 4, pp. 180–186, 2024.
- [12] A. Escobar-Díaz, A. Villarreal, B. Zárate-Nicolas, and A. Rojas-Olivos, "System design for monitoring REDOX potential in treated water using an ORP sensor," *HardwareX*, vol. 24, Art. no. e00717, pp. 1–10, 2025, doi: 10.1016/j.ohx.2025.e00717 .
- [13] C. L. Chiang et al., "Two-Minute Onsite Detection of Agricultural Water Nitrogen Pollution with an Ammonia Gas Sensing System," *ACS ES&T Water*, vol. 5, no. 6, pp. 2965–2974, 2025, doi: 10.1021/acsestwater.4c01143 .
- [14] P. Singh et al., "An ensemble-driven machine learning framework for enhanced water quality classification," *Discover Sustainability*, vol. 6, Art. no. 552, pp. 1–32, 2025, doi: 10.1007/s43621-025-01467-4 .
- [15] W. Chen, D. Xu, B. Pan, Y. Zhao, and Y. Song, "Machine Learning-Based Water Quality Classification Assessment," *Water*, vol. 16, Art. no. 2951, pp. 1–29, 2024, doi: 10.3390/w16202951.