

Pengembangan Sistem Kontrol Otomatis Berbasis IoT untuk Optimalisasi Kualitas Air Kolam Udang Vaname

1st Rifaldo Diwanda
Department of Computer Engineering
Telkom University
Surabaya, Indonesia
rifaldodiwanda@student.telkomunivers
ity.ac.id

2nd Mohammad Yanuar Hariawan
Department of Computer Engineering
Telkom University
Surabaya, Indonesia
myanuar@telkomuniversity.ac.id

3rd Eka Sari Oktarina
Department of Computer Engineering
Telkom University
Surabaya, Indonesia
ekasario@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Pengendalian kualitas air yang optimal pada kolam budidaya udang Vaname (*Litopenaeus vannamei*) menjadi tantangan penting dalam meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan budidaya. Penelitian ini mengembangkan sistem kontrol otomatis berbasis Internet of Things (IoT) dengan menggunakan sumber energi terbarukan dari panel surya. Sistem ini memantau parameter kualitas air, seperti kadar amonia, pH, dan kekeruhan, secara real-time menggunakan berbagai sensor yang terhubung dengan mikrokontroler ESP32. Data yang diperoleh digunakan untuk mengontrol aerator dan pompa air secara otomatis guna menjaga kondisi optimal kolam. Hasil penelitian diharapkan dapat membantu petani udang meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi risiko penyakit, dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data secara berkelanjutan. Dengan demikian, inovasi ini memberikan solusi yang hemat energi, ramah lingkungan, dan berdaya guna untuk pengelolaan tambak udang Vaname.

Kata kunci - Pengendalian kualitas air, Udang Vaname, Internet of Things (IoT), Sistem otomatis.

I. PENDAHULUAN

Penelitian ini berfokus pada pengendalian kualitas air kolam budidaya udang Vaname (*Litopenaeus vannamei*), yang sangat penting untuk mendukung pertumbuhan, kesehatan udang, serta mengurangi risiko penyakit. Parameter utama yang diperhatikan meliputi kadar amonia, pH, salinitas, dan kekeruhan, yang semuanya berpengaruh langsung terhadap metabolisme dan kesehatan udang. Amonia merupakan polutan berbahaya yang perlu dikendalikan, sementara pH memengaruhi kualitas air dan ekosistem mikroba, serta perlu dipantau secara rutin. Kekeruhan tinggi juga dapat meningkatkan risiko penyakit serius seperti AHPND, EMS, dan white feces disease. Selain itu, keberadaan dan jenis bakteri seperti *Vibrio* spp., *Pseudomonas* spp., hingga *Aeromonas* spp. dipengaruhi oleh kadar oksigen terlarut, sehingga memahami karakteristik oksigen yang dibutuhkan bakteri penting untuk menjaga keseimbangan mikroba dan mencegah dominasi patogen. Untuk meningkatkan efektivitas pengelolaan, teknologi pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) digunakan agar petani dapat merespons perubahan kualitas air secara real-

time, mendukung pengambilan keputusan yang tepat dan meningkatkan produktivitas. Secara keseluruhan, penelitian ini bertujuan untuk membantu peternak dalam mengelola kualitas air dengan lebih mudah dan efektif, khususnya melalui pemantauan amonia, pH, dan kekeruhan, demi meningkatkan kualitas hidup udang.

II. KAJIAN TEORI

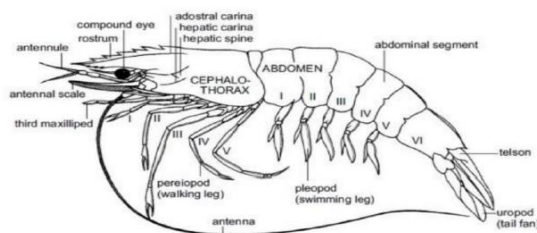
Pengelolaan kualitas air merupakan aspek krusial dalam budidaya udang vaname, karena parameter seperti pH, kekeruhan, salinitas, dan amonia sangat memengaruhi pertumbuhan dan kesehatan udang. Pemanfaatan teknologi Internet of Things (IoT) memungkinkan pemantauan dan pengendalian kualitas air secara otomatis melalui sensor yang membaca parameter tersebut secara real-time. Integrasi energi terbarukan ke dalam sistem ini mendukung operasional yang efisien dan mandiri, terutama di wilayah yang minim akses listrik. Dengan demikian, sistem ini membantu mengoptimalkan kualitas air sekaligus meminimalkan kesalahan manusia dalam pengelolaan tambak.

A. Udang Vaname

Udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) pada GAMBAR 1 menjadi jenis udang yang terlaris di beberapa negara yang termasuk Indonesia, karena keunggulannya dalam hal pertumbuhan, rasio kelangsungan hidup dan permintaan pasar yang tinggi. Namun modal tanam udang vaname secara intensif harus dibarengi dengan optimalnya pengendalian kualitas air untuk snar udang berproduksi dan tetap sehat. Pengelolaan kualitas air yang tidak baik bisa berakibat pada masalah, seperti lambatnya pertumbuhan udang, penyakit, bahkan udang dapat mati secara massal. Salah satu faktor yang paling penting bagi orang yang membudidayakan udang vaname adalah tingkat densitas penanaman dan pemberian pakan yang menyebabkan banyak pengurusan air, disebabkan oleh peningkatan organik dan berbagai jenis ubur-ubur (R. K. Pratiwi et al. 2023). Udang putih Pasifik, yang juga dikenal sebagai udang vaname, termasuk dalam golongan:

1. Kingdom: Animalia
2. Phylum: Arthropoda
3. Subphylum: Crustacea
4. Class: Malacostraca
5. Order: Decapoda
6. Family: Penaeidae
7. Genus: Litopenaeus

8. Species: *Litopenaeus vannamei*



GAMBAR 1
(UDANG VANAME)

Secara morfologi, udang vaname terdiri dari tiga bagian utama, yaitu cephalothorax (kepala dan tubuh yang dilindungi oleh karapaks), abdomen (perut yang bersegmen), dan ekor. Udang jenis penaeid, termasuk vaname, memiliki ciri khas berupa kaki jalan pada segmen pertama hingga ketiga yang dilengkapi capit, serta kulit yang tersusun dari kitin. Sebagai anggota Crustacea, tubuh udang terdiri atas segmen-segmen dengan sepasang kaki pada tiap segmennya, dan termasuk dalam famili Penaeidae yang mencakup udang laut dan air tawar. Pada bagian kepala terdapat mata majemuk bertangkai dan dua pasang antena (antena I dan II) yang dilengkapi flagel sebagai alat indra untuk meraba dan mencium; antena II memiliki cabang eksopodit berbentuk pipih (prosentema) dan endopodit menyerupai cambuk untuk fungsi peraba dan perasa. Kepala juga dilengkapi mandibula untuk menghancurkan makanan keras serta dua pasang maksila untuk mengarahkan makanan ke mandibula. Dada udang terdiri dari delapan ruas, masing-masing memiliki sepasang thoracopoda; thoracopoda ruas 1–3 disebut maxilliped dan membantu mulut dalam memegang serta memindahkan makanan, sedangkan ruas 4–8 adalah kaki jalan (periopoda), dengan periopoda 1–3 memiliki capit kecil sebagai ciri khas udang penaeid.

Abdomen udang terdiri dari enam ruas. Pada ruas pertama hingga kelima, terdapat sepasang kaki renang yang disebut pleopoda atau swimmeret, yang berfungsi untuk membantu pergerakan saat berenang. Pleopoda ini berbentuk pendek dengan ujung yang dilengkapi rambut halus (setae). Sementara itu, pada ruas keenam terdapat uropoda yang bersama telson berperan sebagai alat kemudi dalam pergerakan di air (Effendi, Simanjuntak, and Sahibuddin 2021).

Untuk memastikan kelangsungan hidup dan pertumbuhan udang vaname dalam sistem budidaya intensif, pemantauan kualitas air yang ketat menjadi sangat penting. Parameter utama yang harus diperhatikan mencakup suhu, pH, oksigen terlarut, salinitas, dan konsentrasi senyawa beracun seperti amonia dan nitrit. Pengelolaan kualitas air yang tepat membantu meminimalkan risiko penyakit, yang sering kali disebabkan oleh penumpukan bahan organik dan perubahan parameter fisik-kimia air.

Salah satu masalah umum dalam budidaya intensif adalah peningkatan kadar amonia dan nitrit, yang dapat mengakibatkan toksisitas pada udang. Studi menunjukkan

bahwa tingkat amonia yang tinggi dapat mengganggu proses metabolisme udang dan memicu stres oksidatif, yang berdampak negatif pada kesehatan dan pertumbuhan mereka (Harlina et al. 2022). Pemantauan secara real-time dan pengelolaan yang tepat terhadap parameter ini menjadi kunci untuk mencegah kondisi berbahaya tersebut.

Selain itu, penerapan teknologi seperti sensor dan aplikasi IoT memungkinkan petambak untuk memantau dan merespons perubahan parameter kualitas air dengan cepat. Dengan sistem ini, data pemantauan dapat dikirimkan langsung ke perangkat seluler, yang memungkinkan tindakan korektif segera ketika parameter berada di luar ambang batas yang diinginkan (R. Pratiwi et al. 2021). Hal ini meningkatkan efisiensi pengelolaan tambak dan membantu mengurangi risiko kerugian akibat kualitas air yang buruk.

Namun, tantangan dalam implementasi teknologi ini melibatkan biaya dan pelatihan untuk petambak agar dapat memanfaatkannya secara optimal. Edukasi dan dukungan teknis menjadi aspek penting untuk memastikan bahwa sistem pemantauan modern digunakan secara efektif dan konsisten dalam budidaya udang vaname (Hukom et al. 2020).

Dengan mengintegrasikan praktik manajemen kualitas air yang canggih dan teknologi digital, produksi udang vaname yang sehat dan berkelanjutan dapat dicapai, memberikan keuntungan ekonomi dan kelestarian lingkungan.

B. Salinitas

Salinitas merupakan parameter penting dalam kualitas air budidaya udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) karena berpengaruh langsung terhadap fungsi fisiologis seperti osmoregulasi, pertumbuhan, nafsu makan, kelangsungan hidup, dan daya tahan tubuh. Salinitas, yang mengacu pada jumlah total garam terlarut dalam air dan diukur dalam satuan ppt (part per thousand), sangat menentukan efisiensi metabolisme udang. Udang vaname termasuk spesies euryhaline yang mampu bertahan dalam salinitas 0–40 ppt, namun rentang optimal untuk pertumbuhan dan kelangsungan hidupnya adalah 15–25 ppt, karena pada kisaran ini udang tidak perlu mengeluarkan banyak energi untuk osmoregulasi, sehingga energi dapat dialihkan untuk pertumbuhan dan reproduksi. Sebaliknya, salinitas di bawah 5 ppt atau di atas 35 ppt dapat menyebabkan stres osmotik yang berdampak negatif terhadap pertumbuhan, kekebalan tubuh, dan meningkatkan risiko kematian.

C. pH

pH merupakan parameter kunci dalam pengelolaan kualitas air tambak udang vanamei. pH yang stabil dalam kisaran yang sesuai dengan kebutuhan udang sangat penting untuk memastikan lingkungan hidup yang kondusif yang mendukung pertumbuhan dan kesehatan udang secara keseluruhan. Dalam budidaya vanamei, kisaran pH optimal adalah antara 7,5 dan 8,5, yang juga memberikan kondisi paling menguntungkan bagi proses biologis udang serta mikroorganisme yang membantu menjaga kualitas air (Hamsinar, Hasiri, and Zannah 2022).

Udang vaname sangat sensitif terhadap fluktuasi pH, karena ketidakseimbangan pH dapat menyebabkan stres fisiologis, menghambat pertumbuhan, dan meningkatkan kerentanan terhadap penyakit. pH rendah (asam) meningkatkan toksisitas logam berat, sedangkan pH tinggi (basa) memperbesar risiko keracunan amonia—salah satu penyebab kematian utama udang. Stabilitas pH menjadi faktor kunci dalam keberhasilan budidaya, karena perubahan pH tidak hanya berdampak langsung pada udang, tetapi juga memengaruhi kualitas air secara keseluruhan. Pertama, pH tinggi meningkatkan konsentrasi amonia bebas (NH_3) yang sangat beracun, terutama di atas pH 8, yang dapat menyebabkan stres akut atau kematian udang. Kedua, pH rendah menghambat efisiensi proses nitrifikasi oleh bakteri *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*, sehingga meningkatkan risiko penumpukan amonia dan nitrit. Ketiga, fluktuasi pH juga memengaruhi kesadahan air karena gangguan terhadap ion kalsium dan magnesium yang menjaga kestabilan pH dan kualitas cangkang udang.

Untuk menjaga kualitas air di kolam udang vaname, pengawasan pH secara real-time sangat diperlukan. Teknologi monitoring berbasis mikrokontroler, seperti Esp32, telah banyak digunakan karena kemampuannya untuk memberikan data pH secara terus-menerus dan akurat. Sistem ini biasanya dilengkapi dengan sensor pH yang mampu mendeteksi perubahan kecil dalam kimia air. Mikrokontroler kemudian memproses data tersebut dan memberikan peringatan kepada operator jika pH berada di luar rentang aman (Hamsinar, Hasiri, and Zannah 2022).

D. Kekeruhan Air

Kekeruhan air merupakan parameter penting dalam menentukan kualitas air tambak yang sangat memengaruhi keberhasilan budidaya udang vaname (*Litopenaeus vannamei*), karena kekeruhan yang tidak terkontrol dapat menurunkan produktivitas dan meningkatkan risiko kesehatan udang. Kekeruhan merujuk pada keberadaan partikel terlarut yang mengurangi transparansi air dan diukur menggunakan sensor turbidity dalam satuan NTU. Partikel penyebab kekeruhan mencakup lumpur halus, sedimen, mikroorganisme seperti alga dan bakteri, bahan organik seperti sisa pakan, kotoran udang, detritus, serta input eksternal seperti limpasan air hujan. Faktor utama penyebab kekeruhan dalam tambak antara lain aktivitas udang yang mengaduk dasar kolam, sisa pakan dan limbah metabolik yang membusuk, pengelolaan air yang tidak optimal, serta kondisi lingkungan sekitar tambak yang membawa material tambahan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap penyebab, dampak, dan metode pengukuran kekeruhan sangat penting untuk menjaga kualitas air dan kesehatan udang. Dampak kekeruhan pada ekosistem tambak:

1. Gangguan pada Fotosintesis: Kekeruhan yang tinggi membatasi penetrasi cahaya matahari ke dalam air, yang mengurangi proses fotosintesis oleh fitoplankton. Fitoplankton adalah sumber oksigen utama dalam tambak, sehingga kekeruhan dapat menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut (Setiyawan et al., 2020).
2. Peningkatan Toksisitas Amonia: Penumpukan bahan organik akibat kekeruhan memicu proses dekomposisi

anaerobik yang menghasilkan amonia beracun. Konsentrasi amonia tinggi dapat menyebabkan stres pada udang dan meningkatkan risiko kematian.

3. Infeksi Patogen: Partikel tersuspensi sering menjadi tempat berkembang biaknya patogen. Udang yang terpapar lingkungan keruh lebih rentan terhadap infeksi mikroorganisme, seperti *Vibrio* spp.

4. Keseimbangan Ekosistem: Tingkat kekeruhan yang tinggi dapat mengganggu keseimbangan biologis tambak, memengaruhi populasi mikroorganisme yang bermanfaat.

E. Amonia

Amonia merupakan senyawa yang dihasilkan dari dekomposisi bahan organik di tambak, seperti sisa pakan, limbah, dan hasil metabolisme udang, dan menjadi salah satu parameter utama dalam pengelolaan kualitas air budidaya udang vaname (*Litopenaeus vannamei*). Amonia hadir dalam dua bentuk: amonia bebas (NH_3) yang bersifat toksik, dan amonium (NH_4^+) yang relatif tidak berbahaya. Peningkatan kadar pH dalam kolam dapat memperbesar proporsi NH_3 , yang berdampak negatif pada kesehatan udang, seperti stres, penurunan aktivitas, perubahan warna tubuh, kerusakan insang yang mengganggu pernapasan, serta gangguan proses moulting yang menyebabkan kulit menjadi lunak atau keropos. Dalam kondisi parah, paparan NH_3 tinggi dapat menyebabkan kematian mendadak secara massal. Selain menghambat pertumbuhan dan daya tahan hidup, amonia juga mengganggu keseimbangan elektrolit tubuh udang. Oleh karena itu, pemantauan rutin terhadap kadar amonia dan pH sangat penting untuk menjaga kesehatan serta produktivitas udang di tambak.

Kontrol kualitas air yang baik sangat penting untuk menjaga kadar amonia tetap pada level yang aman. Beberapa strategi pengelolaan yang umum digunakan antara lain:

1. Aerasi dan Filtrasi: Proses aerasi dapat membantu meningkatkan oksigen terlarut dan mengurangi konsentrasi amonia bebas dengan meningkatkan laju oksidasi amonia menjadi nitrit dan nitrat. Sementara itu, filtrasi dapat mengurangi akumulasi bahan organik yang menjadi sumber pembentukan amonia.
2. Sistem Polikultur: Penanaman tanaman akuatik seperti *Gracilaria* sp. dapat berfungsi sebagai bioremediator yang menyerap amonia dari air tambak.
3. Pengelolaan Pakan dan Kepadatan Udang: Pengelolaan jumlah pakan yang diberikan serta kepadatan udang dalam tambak harus diperhatikan untuk meminimalkan akumulasi sisa-sisa organik yang dapat meningkatkan kandungan amonia (Suhendar, Zaidy, and Sachoemar 2020).

pH to Amonia	TINGKAT AMONIA					
	Rendah	Normal	Mulai Berisiko	Bahaya Ringan	Bahaya Sedang	Bahaya Tinggi
KADAR PH						
<6.5						
6.5 - 7.5						
7.6 - 8.0						
8.1 - 8.5						
8.6 - 9.0						
> 9.0						

GAMBAR 2
(TINGKAT KADAR pH PADA AMONIA)

TABEL 1
(KETERANGAN KONDISI KADAR pH AMONIA)

Kadar pH	Kondisi	Keterangan
< 6.5	Rendah	Amonia hampir seluruhnya berada dalam bentuk ion amonium (NH_4^+), yang tidak beracun. Aman untuk organisme akuatik.
6.5 - 7.5	Normal	Sebagian besar amonia masih dalam bentuk NH_4^+ , tetapi ada sedikit NH_3 . Risiko toksisitas sangat rendah.
7.6 - 8.0	Mulai Berisiko	Amonia bebas (NH_3) mulai terbentuk dalam jumlah lebih besar. Risiko toksisitas mulai meningkat, terutama jika konsentrasi total nitrogen amonia tinggi.
8.1 - 8.5	Bahaya Ringan	Proporsi NH_3 cukup signifikan untuk menyebabkan stres pada organisme akuatik. Situasi ini bisa berbahaya jika berlangsung dalam jangka waktu lama dan akan mulai ada perubahan fisik di udang seperti cangkang yang menjadi lebih lunak.
8.6 - 9.0	Bahaya Sedang	Konsentrasi NH_3 meningkat secara signifikan, berisiko membahayakan organisme akuatik, terutama warna udang berubah menjadi lebih pucat.
> 9.0	Bahaya Tinggi	NH_3 mendominasi. Sangat beracun bagi organisme hidup,

		bahkan dalam waktu singkat. Dapat menyebabkan kematian pada ikan dan biota akuatik.
--	--	---

F. Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan jaringan perangkat yang terintegrasi melalui internet, memungkinkan pertukaran data secara langsung untuk meningkatkan efisiensi berbagai sistem. Dalam budidaya udang Vaname (*Litopenaeus vannamei*), IoT dimanfaatkan untuk memonitor dan mengelola kualitas air tambak secara otomatis. Teknologi ini menjadi kunci utama dalam menjaga kondisi air yang optimal, sehingga mendukung keberhasilan dan produktivitas budidaya.

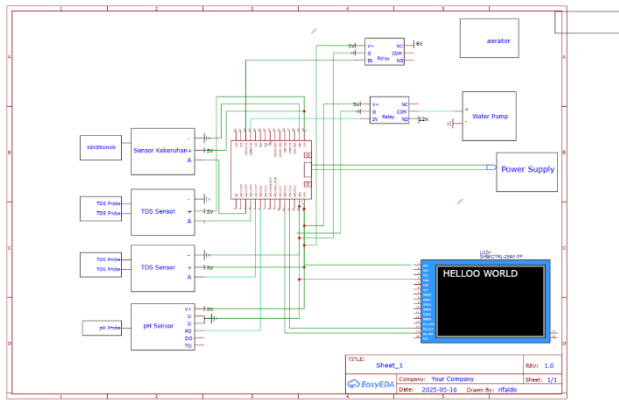
Teknologi IoT dalam pengelolaan kualitas air kolam udang mencakup berbagai perangkat seperti sensor, mikrokontroler, dan aplikasi berbasis web atau mobile. Perangkat ini bekerja bersama untuk memantau parameter penting seperti pH, Kekeruhan air dan Amonia, Data yang dikumpulkan oleh sensor dikirimkan ke sistem pusat melalui koneksi internet, di mana data tersebut diproses untuk memberikan informasi real-time kepada petambak. Jika kadar Amonia melebihi dari ambang batas yang telah ditentukan, sistem IoT dapat secara otomatis mengaktifkan perangkat seperti aerator atau pompa untuk mengembalikan kondisi air ke tingkat optimal (Nurba et al. 2022). Keunggulan IoT dalam Pengelolaan Kualitas Air:

1. Aksesibilitas Data: Memberikan akses data yang mudah melalui aplikasi, memungkinkan pengelolaan tambak dari lokasi mana saja.
2. Keberlanjutan Operasional: Menggunakan energi terbarukan dan pengendalian otomatis untuk mengurangi biaya operasional.
3. Optimasi Produktivitas: Membantu menjaga kondisi lingkungan kolam yang optimal, meningkatkan pertumbuhan dan kelangsungan hidup udang.

III. METODE

A. Perancangan Sistem

Perangkat ini merupakan sistem monitoring kualitas air berbasis IoT yang dirancang untuk mendukung keberlanjutan ekosistem perairan. Sistem tersebut berfungsi mengukur parameter kualitas air secara real-time melalui sensor-sensor utama dan menggunakan sumber energi terbarukan sebagai daya utama. Desain sistem secara keseluruhan ditampilkan pada GAMBAR 3.



GAMBAR 3
(DESAIN SISTEM)

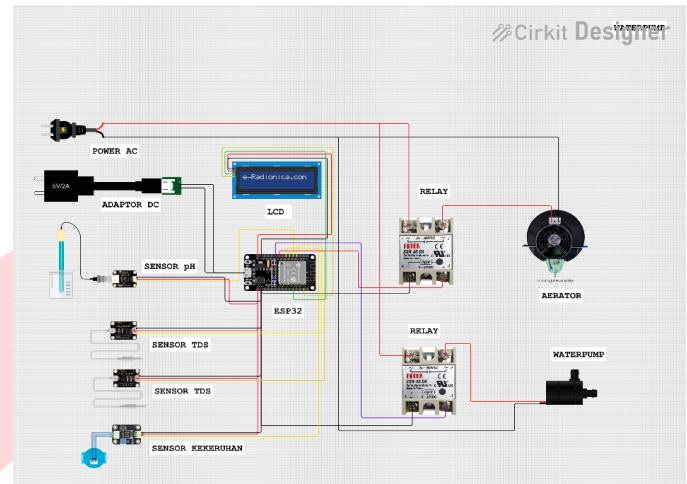
B. Komponen Desain

Sistem perangkat monitoring kualitas air berbasis IoT dalam budidaya udang vaname melibatkan sejumlah komponen penting yang saling terintegrasi. Sensor pH digunakan untuk memantau tingkat keasaman atau kebasaan air secara real-time guna mencegah stres dan penyakit pada udang. Sensor TDS mengukur kadar garam, memastikan salinitas tetap optimal, sedangkan sensor turbidity mendeteksi tingkat kekeruhan air akibat partikel tersuspensi. Mikrokontroler ESP32, yang dilengkapi Wi-Fi dan Bluetooth, menjadi pusat pengolahan dan pengiriman data secara real-time ke cloud menggunakan protokol MQTT atau ESP-NOW. LCD digunakan untuk menampilkan data sensor, sedangkan aerator berfungsi meningkatkan kadar oksigen terlarut yang juga berpengaruh terhadap pH. Water pump memastikan sirkulasi air yang merata, menjaga kebersihan sensor, dan mendukung penggantian air otomatis. Sistem filtrasi terdiri dari tiga tahap: mekanik (menyaring partikel kasar dan halus), biologis (menguraikan amonia melalui koloni bakteri nitrifikasi di media bioball), dan kimiawi (menyerap senyawa organik menggunakan karbon aktif). Filter memiliki kapasitas sirkulasi 500 liter per jam untuk kolam berisi 150 liter air, memenuhi standar sirkulasi 3–5 kali volume kolam per jam. Filter biologis memerlukan waktu pematangan 7–14 hari sebelum digunakan, agar koloni bakteri berkembang optimal; selama periode ini, sistem dijalankan tanpa udang dan dapat dipercepat dengan starter bakteri atau media bekas. Seluruh komponen ini bekerja secara terpadu untuk memastikan kualitas air tetap optimal, mendukung kesehatan, pertumbuhan, dan keberlanjutan budidaya udang vaname.

C. Desain Alat

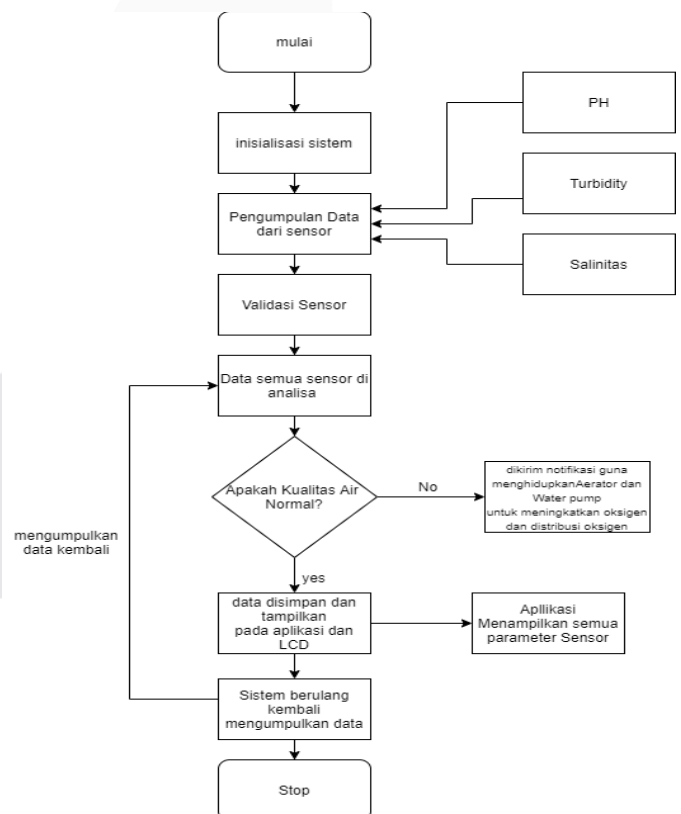
Desain alat yang ditunjukkan pada GAMBAR 4 dirancang untuk memantau dan mengendalikan kualitas air kolam budidaya udang secara otomatis dengan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali. Sistem ini menggunakan adaptor DC 5V 2A sebagai sumber tegangan utama untuk mengaktifkan ESP32 dan sensor-sensor yang memerlukan daya 3.3V dan 5V, sementara relay dikendalikan oleh listrik AC untuk mengatur perangkat berdaya tinggi seperti pompa air dan aerator. ESP32 membaca data dari sensor pH (untuk keasaman), dua sensor TDS (untuk salinitas), dan sensor turbidity (untuk kekeruhan), lalu mengonversi sinyal analog atau digital menjadi nilai pH, ppt, dan NTU melalui proses kalibrasi. Hasil pembacaan ditampilkan secara real-time pada LCD I2C 20x4 agar pengguna dapat memantau kondisi air secara langsung. Dua

relay solid state digunakan untuk mengontrol aerator dan pompa air berdasarkan batas ambang atau jadwal tertentu yang diprogram dalam ESP32. Selain mengontrol perangkat output, sistem ini juga dirancang untuk mengirim data secara real-time ke Firebase dan Google Spreadsheet, sehingga pengguna dapat mengakses informasi jarak jauh, menjadikan sistem ini efisien, responsif, dan mendukung keberlanjutan budidaya udang secara modern.



GAMBAR 4
(DESAIN ALAT)

D. Alur Kerja Sistem



GAMBAR 5
(ALUR KERJA SISTEM)

Alur sistem seperti pada GAMBAR 5 diawali dengan inisialisasi perangkat, yang memastikan semua komponen siap beroperasi. Setelah itu, data kualitas air dikumpulkan

dari sensor pH, turbidity, dan salinitas. Data ini kemudian divalidasi untuk memastikan keakuratannya sebelum dianalisis lebih lanjut. Sistem menganalisis apakah kualitas air berada dalam kondisi normal. Jika tidak, sistem mengirimkan notifikasi untuk mengaktifkan aerator dan water pump guna meningkatkan kadar oksigen dan mendistribusikannya secara merata. Jika kualitas air normal, data disimpan dan ditampilkan melalui aplikasi untuk memantau semua parameter sensor. Proses ini berlangsung secara berulang untuk memastikan pemantauan kualitas air berjalan secara real-time dan berkelanjutan hingga sistem dihentikan.

E. Pengumpulan Data

Sensor turbidity, pH dan Salinitas digunakan untuk mengukur parameter kualitas air secara real-time. Sensor turbidity mendeteksi tingkat kekeruhan air dengan menganalisis intensitas cahaya yang tersebar akibat partikel di dalam air. Sementara itu, sensor pH mengukur tingkat keasaman atau kebasaan air melalui elektrode pH. Untuk sensor turbidity dan modul 5403C untuk sensor pH, sebelum dikirimkan ke mikrokontroler ESP32. Pada tahap ini, sirkulasi air yang dihasilkan oleh water pump berperan penting untuk memastikan bahwa sampel air yang diukur oleh sensor berasal dari seluruh area dan bersifat representatif, sehingga meningkatkan akurasi data yang dikumpulkan.

F. Pemrosesan Data

Mikrokontroler ESP32 menerima data dari ketiga sensor dan melakukan analisis untuk menilai kualitas air berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Sebagai contoh, jika tingkat kekeruhan berada di atas ambang batas atau nilai pH menunjukkan kondisi yang tidak ideal (terlalu asam atau basa), sistem akan merespons dengan mengaktifkan perangkat yang relevan, seperti aerator untuk meningkatkan kadar oksigen terlarut, atau mengatur water pump untuk mendukung sirkulasi air. Analisis data dilakukan secara cepat dan otomatis untuk memastikan respons sistem terhadap perubahan kualitas air dapat segera dilakukan.

G. Pengendalian Perangkat

Mikrokontroler ESP32 akan mengontrol modul relay untuk mengaktifkan atau menonaktifkan perangkat eksternal, seperti aerator dan water pump. Water pump diaktifkan untuk menjaga sirkulasi air, yang berfungsi tidak hanya untuk mendistribusikan oksigen secara merata tetapi juga untuk memastikan air yang melewati sensor terus bergerak sehingga mencegah endapan partikel atau gangguan lainnya. Aerator diaktifkan bila diperlukan untuk meningkatkan kadar oksigen dalam air. Dengan pengendalian perangkat yang terintegrasi, sistem dapat beradaptasi secara otomatis terhadap berbagai kondisi kualitas air.

H. Tampilan Data

Data yang dihasilkan dari sensor turbidity dan sensor pH, serta status perangkat seperti aerator dan water pump, ditampilkan pada layar Aplikasi Mobile. Informasi ini meliputi nilai parameter kekeruhan air, tingkat pH, dan status operasional perangkat. Tampilan data pada Aplikasi Mobile memberikan kemudahan bagi pengguna untuk memantau kondisi air secara langsung di lokasi. Pengguna juga dapat mengetahui apakah perangkat, seperti aerator dan water

pump, sedang aktif atau tidak, sehingga dapat memahami tindakan yang sedang dilakukan oleh sistem.

I. Pembersihan dan Pergantian Air

Dalam situasi di mana kualitas air terus memburuk dan tidak dapat diperbaiki hanya dengan aerasi, sistem dapat mengandalkan water pump untuk membantu proses pembersihan atau penggantian air. Mikrokontroler ESP32 dapat mengontrol water pump untuk menyaring air yang tercemar dan memfilter dengan filter air bersih. Fungsi ini sangat penting dalam menjaga keberlanjutan kualitas air, terutama jika sistem digunakan di lingkungan yang sensitif terhadap perubahan kondisi air, seperti kolam udang atau budidaya perairan.

J. Sumber Daya Sistem

Semua komponen sistem, termasuk mikrokontroler ESP32, sensor turbidity, sensor pH, water pump dan aerator mendapatkan pasokan daya dari panel surya. Panel surya memastikan bahwa sistem dapat beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan pada sumber daya listrik konvensional. Energi yang dihasilkan dari panel surya juga lebih ramah lingkungan dan mendukung keberlanjutan sistem dalam jangka panjang. Dengan pemanfaatan energi terbarukan, sistem ini sangat cocok untuk diterapkan di lokasi terpencil atau area yang sulit dijangkau oleh jaringan listrik.

K. Metode Empiris

Metode empiris dalam penelitian ini dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor pH, salinitas, dan kekeruhan dengan alat ukur manual yang telah terstandarisasi, menggunakan sampel air yang sama pada waktu bersamaan. Sensor pH diuji menggunakan larutan buffer standar pH 4.01 dan 6.86, lalu dibandingkan dengan hasil dari pH meter digital untuk menilai akurasi. Pengukuran salinitas menggunakan refraktometer sebagai pembanding dengan data dari sensor EC/TDS yang telah dikonversi ke satuan ppt. Sementara itu, kekeruhan diamati secara visual dan dibandingkan dengan hasil sensor turbidity, yang diklasifikasikan dalam tiga kategori: Bersih, Keruh, dan Kotor. Seluruh data perbandingan dicatat dalam tabel dan dihitung nilai deviasinya untuk mengevaluasi sejauh mana sensor mampu merepresentasikan kondisi air secara akurat dalam sistem monitoring ini.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kalibrasi Sensor

Kalibrasi dilakukan untuk menjamin akurasi pembacaan setiap sensor agar sesuai dengan nilai yang sebenarnya. Dalam sistem ini digunakan tiga jenis sensor, yaitu sensor pH, sensor salinitas (TDS), dan sensor kekeruhan (turbidity). Masing-masing sensor dikalibrasi menggunakan metode yang sesuai, seperti larutan buffer untuk sensor pH atau referensi standar lainnya sesuai jenis sensornya.

a. Kalibrasi Sensor pH

Tujuan dari kalibrasi sensor pH adalah untuk menghubungkan nilai tegangan output dari sensor dengan nilai pH aktual dari larutan yang diketahui. Kalibrasi dilakukan dengan larutan buffer standar pH 4 dan pH 6.86.

1. Metode Kalibrasi:

- Sensor dicolokan ke pin 34 pada ESP32
- Pembacaan dilakukan melalui ADC 12-bit (4095 level)
- Kalibrasi dilakukan dengan metode dua titik, Buffer pH 4.01 dan 6.86 yang menghasilkan Buffer pH 7 → tegangan = 1.372 V

Buffer pH 4 → tegangan = 1.803 V

2. Rumus Kalibrasi

$$\text{slope} = \frac{pH_2 - pH_1}{V_2 - V_1} = \frac{4.01 - 6.86}{1.803 - 1.372} = \frac{-2.85}{0.431} = -6.61$$

$$\begin{aligned} \text{offset} &= pH_1 - (\text{slope} \times V_1) \\ &= 6.86 - (-6.61 \times 1.372) \\ &= 6.86 + 9.07 = 15.93 \end{aligned} \quad (1)$$

$$pH = -6.61 \times \text{tegangan} + 15.93$$

TABEL 2
(TABEL KALIBRASI PH)

Larutan Uji	Tegangan (V)	pH Sensor	pH Referensi	Selisih
Buffer 6.86	1.372	6.91	6.86	0.05
Buffer 4.01	1.803	6.15	4.01	0.14

b. Kalibrasi Sensor TDS

Tujuan kalibrasi sensor salinitas adalah Mengonversi tegangan analog dari sensor EC menjadi nilai salinitas dalam satuan ppt (parts per thousand).

1. Metode Kalibrasi:

- Siapkan larutan air garam dengan konsentrasi tertentu (misal: 5 ppt, 10 ppt, 15 ppt) yang diukur dengan refraktometer.
- Ukur tegangan output dari sensor salinitas (pada pin 34 dan 32).
- Gunakan rumus berikut untuk konversi:

```

250 float ecVoltage1 = analogRead(ecPin1) * VREF / 4095.0;
251 float ec1 = (ecVoltage1 / 0.1631) * 0.9167;
252 float salinitas1 = ec1 * 2.33;
253

```

GAMBAR 6
(RUMUS KALIBRASI)

- Bandingkan hasil pembacaan dengan nilai salinitas yang ditampilkan alat ukur refraktometer.
- Jika ada selisih, sesuaikan konstanta konversi (0.1631, 0.9167, 2.33) berdasarkan hasil pengukuran.

2. Rumus Kalibrasi

Sensor salinitas bekerja dengan mengukur tegangan analog yang dihasilkan saat elektroda mendeteksi tingkat konduktivitas listrik dalam air. Tegangan ini kemudian dibaca oleh mikrokontroler ESP32 melalui pin analog dengan resolusi ADC 12-bit (0 hingga 4095). Untuk mengubah nilai ADC menjadi tegangan sebenarnya, digunakan rumus.

$$V = \frac{\text{analogRead} - V_{REF}}{4095} \quad (2)$$

c. Kalibrasi Sensor Turbidity

Kalibrasi sensor turbidity dilakukan dengan menentukan nilai ambang ADC yang mewakili kondisi air bersih dan air keruh. Sensor membaca intensitas cahaya yang tersebar akibat partikel dalam air, dan hasilnya dikonversi ke nilai ADC oleh mikrokontroler. Langkah kalibrasi dilakukan dengan mencelupkan sensor ke dalam air jernih (misalnya air mineral) dan mencatat nilai ADC, kemudian ke dalam air keruh (dicampur tanah atau lumpur) dan mencatat kembali nilai ADC-nya. Berdasarkan perbandingan ini, ditentukan batas ambang klasifikasi, misalnya nilai ADC di bawah 1000 dikategorikan sebagai "Bersih" dan di atasnya sebagai "Kotor". Nilai ambang ini dapat disesuaikan lebih lanjut berdasarkan kebutuhan dan kondisi lingkungan kolam.

B. Pengujian Alat

Pengujian alat dilakukan untuk memastikan seluruh komponen sistem bekerja dengan baik, mencakup keakuratan sensor dan respons sistem terhadap data yang diperoleh. Komponen yang diuji meliputi sensor pH, salinitas (EC), kekeruhan (turbidity), serta aktuator seperti aerator, pompa air masuk dan keluar, serta protein skimmer yang dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32. Pengujian dilakukan langsung di kolam budidaya udang, dimulai dengan sensor pH yang dikalibrasi menggunakan metode dua titik dan menunjukkan akurasi tinggi dalam mendeteksi perubahan pH, serta mampu mengaktifkan aerator secara otomatis saat pH melebihi 8.4 untuk mengurangi toksisitas amonia. Sensor salinitas diuji dengan larutan garam berbagai konsentrasi dan memberikan respons linier dan stabil, sementara dua sensor EC digunakan untuk memastikan keandalan pembacaan dari dua titik berbeda. Sensor turbidity menunjukkan konsistensi dalam mengklasifikasikan kondisi air sebagai "Bersih" atau "Kotor" berdasarkan nilai ambang ADC sebesar 1000. Aktuator diuji melalui perintah dari Firebase Realtime Database, di mana ESP32 berhasil mengaktifkan perangkat sesuai instruksi dari aplikasi, dan data sensor berhasil dikirim secara otomatis setiap 10 detik. Secara keseluruhan, sistem terbukti akurat dalam membaca parameter kualitas air, responsif terhadap perubahan kondisi, dan stabil dalam pengiriman data serta pengambilan keputusan otomatis, sehingga cocok untuk budidaya udang skala kecil dengan dukungan energi terbarukan.

a. Pengujian Mikrokontroler ESP32

Pengujian alat dilakukan untuk memastikan seluruh komponen sistem berfungsi optimal, termasuk akurasi sensor dan respons sistem terhadap data yang diperoleh. Sistem terdiri dari sensor pH, salinitas (EC), dan kekeruhan (turbidity), serta aktuator berupa aerator, pompa air masuk dan keluar, serta protein skimmer, yang dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 dan diuji langsung di kolam budidaya udang. Sensor pH menunjukkan akurasi baik setelah dikalibrasi dengan larutan buffer standar dan mampu memicu aerator otomatis saat pH melebihi 8.4 untuk mengurangi toksisitas amonia. Sensor salinitas memberikan respons stabil dan linier terhadap kadar garam yang berbeda, sementara dua sensor EC digunakan untuk memastikan keandalan pembacaan dari dua titik. Sensor turbidity mampu membedakan kondisi air "Bersih" dan "Kotor" berdasarkan ambang ADC sebesar 1000 dengan konsistensi yang baik. Aktuator diuji melalui perintah dari

Firestore Realtime Database dan ESP32 merespons dengan menyalakan perangkat sesuai instruksi, serta data sensor berhasil dikirim secara otomatis setiap 10 detik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem berfungsi secara fungsional dan stabil dalam membaca parameter kualitas air, merespons kondisi secara otomatis, serta cocok untuk budidaya udang skala kecil berbasis energi terbarukan.

b. Pengujian Sensor pH



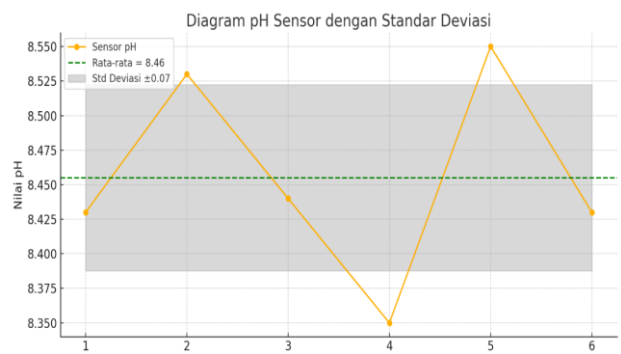
GAMBAR 7
(PENGUJIAN SENSOR pH)

Sensor pH diuji dengan mencelupkannya ke dalam larutan buffer standar (misalnya pH 4.01, 7.00, dan 10.01). Hasil pembacaan dibandingkan dengan alat ukur pH digital sebagai acuan. Sensor ini dikalibrasi menggunakan metode regresi linier untuk memperoleh nilai slope dan offset. Pengujian juga mencakup pengamatan kestabilan pembacaan melalui filter moving average. Perbandingan hasil sensor pH dengan pH manual ditunjukkan pada TABEL 3.

TABEL 3
(TABEL PERBANDINGAN pH)

Sensor pH	TDS pH Meter	Error
8.43	8.52	1.06 %
8.53	8.72	2.18 %
8.44	8.56	1.40 %
8.35	8.49	1.65 %
8.55	8.79	2.73 %
8.43	8.61	2.09 %

Berdasarkan data dari enam kali pengukuran, sensor pH menunjukkan deviasi yang relatif kecil dibandingkan alat ukur standar (TDS pH Meter), dengan rata-rata error sebesar 1,85%, yang masih berada dalam batas toleransi untuk monitoring kualitas air kolam. Meskipun terdapat sedikit variasi antar pengukuran, hasil yang konsisten membuktikan bahwa sensor pH cukup andal untuk penggunaan di lapangan, terutama dalam pemantauan real-time dan otomatisasi sistem. Kalibrasi awal menggunakan larutan buffer juga membantu sensor merepresentasikan kondisi nyata secara cukup presisi.



GAMBAR 8
(STANDAR DEVIASI pH)

Berdasarkan hasil pengukuran nilai pH sensor sebanyak 6 kali, diperoleh rata-rata (mean) sebesar 8.455 dengan standar deviasi sekitar ± 0.066 . Nilai standar deviasi yang kecil menunjukkan bahwa hasil pembacaan sensor pH relatif konsisten dan stabil, dengan variasi yang sangat rendah antar pengukuran. Seluruh data berada dalam rentang ± 1 standar deviasi dari rata-rata, yang mengindikasikan bahwa sensor pH memiliki akurasi yang baik dan tidak menunjukkan fluktuasi yang signifikan pada kondisi yang sama. Hal ini memperkuat bahwa sensor layak digunakan dalam sistem pemantauan kualitas air secara real-time, khususnya untuk memantau parameter pH.

c. Pengujian sensor TDS

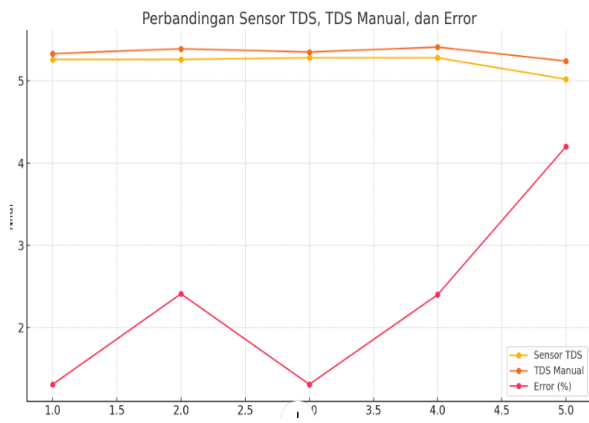


GAMBAR 9
(PENGUJIAN KEAKURATAN SENSOR SALINITAS)

Sensor salinitas menggunakan sensor TDS yang dikalibrasi untuk menampilkan nilai dalam satuan ppt (parts per thousand). Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil sensor terhadap alat refraktometer digital. Tegangan keluaran sensor dikompensasi berdasarkan suhu, kemudian dihitung menjadi nilai salinitas. Pengujian menunjukkan bahwa nilai sensor relatif konsisten dengan alat acuan setelah kalibrasi.

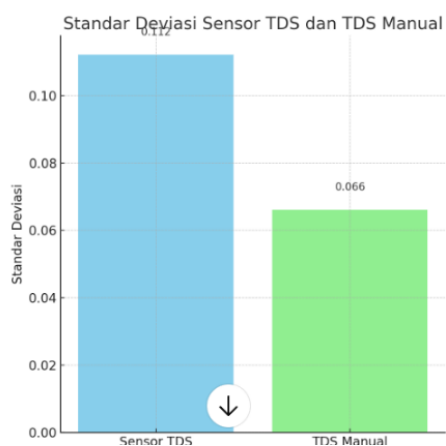
TABEL 4
(TABEL PERBANDINGAN TDS)

Sensor TDS	TDS pH Meter	Error
5.26	5.33	1.31 %
5.26	5.39	2.41 %
5.28	5.35	1.31 %
5.28	5.41	2.40 %
5.02	5.24	4.20 %



GAMBAR 10
(GRAFIK PERBANDINGAN SENSOR TDS, TDS
MANUAL DAN ERROR)

Hasil pengukuran Sensor TDS dibandingkan dengan alat ukur TDS pH meter menunjukkan adanya selisih yang relatif kecil seperti pada Tabel 4.2.1. Persentase error dari lima sampel berkisar antara 1.31% hingga 4.20%, dengan rata-rata error sebesar 2.33%. Nilai ini menunjukkan bahwa akurasi sensor TDS cukup baik dan dapat digunakan sebagai alat monitoring kadar salinitas dalam sistem. Namun, tetap diperlukan kalibrasi secara berkala untuk mempertahankan ketepatan pengukuran, terutama jika digunakan dalam jangka panjang atau dalam lingkungan air yang bervariasi.

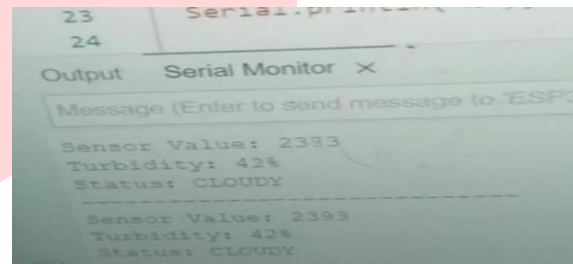


GAMBAR 11
(DIAGRAM STANDAR DEVIASI SENSOR TDS (BIRU)
DAN TDS MANUAL (HIJAU))

Berdasarkan diagram standar deviasi yang membandingkan hasil pengukuran Sensor TDS dan TDS Manual, dapat disimpulkan bahwa pengukuran TDS

Manual menunjukkan tingkat konsistensi yang lebih tinggi dibandingkan Sensor TDS. Hal ini terlihat dari nilai standar deviasi TDS Manual yang lebih rendah (± 0.066) dibandingkan dengan Sensor TDS (± 0.112). Standar deviasi yang lebih tinggi pada Sensor TDS mengindikasikan adanya variasi data yang lebih besar, yang bisa disebabkan oleh faktor seperti gangguan sinyal, noise elektronik, atau kondisi lingkungan yang memengaruhi kinerja sensor. Sementara itu, pengukuran manual cenderung lebih stabil dan terpusat pada nilai rata-rata. Oleh karena itu, agar hasil pengukuran dari Sensor TDS dapat mendekati akurasi dan konsistensi metode manual, diperlukan proses kalibrasi atau penyesuaian pada algoritma pengukuran sensor tersebut.

d. Pengujian Sensor Kekeruhan



GAMBAR 12
(KALIBRASI SENSOR TURBIDITY)

Sensor kekeruhan yang digunakan adalah sensor turbidity optik (TS-300B). Sensor diuji dalam kondisi air jernih hingga keruh. Nilai ADC dari sensor dikonversi ke Tingkat ke keruhan air menggunakan rumus kalibrasi linier, yang disusun dari Datasheet penelitian. Untuk meningkatkan akurasi, digunakan metode moving average sebagai penyaring noise pembacaan.

e. Pengujian Estimasi Nilai Amonia

Karena tidak menggunakan sensor amonia secara langsung, pengujian dilakukan terhadap metode estimasi amonia berbasis nilai pH. Rentang pH digunakan untuk mengklasifikasikan tingkat amonia menjadi lima kategori: sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan pH dan memastikan bahwa klasifikasi berjalan sesuai aturan yang ditetapkan berdasarkan literatur kualitas air budidaya udang.



GAMBAR 13
(PENGUJIAN LCD I2C)

LCD I2C digunakan untuk menampilkan data sensor secara real-time. Pengujian dilakukan dengan memastikan tampilan inisialisasi, kemudian pengujian berkelanjutan untuk memantau pembaruan data sensor. Pengujian membuktikan bahwa LCD dapat menampilkan data dengan jelas dan konsisten.

f. Pengujian WiFi

A1		20/07/2025 14:57:02				
	A	B	C	D	E	F
37	20/07/2025 15:16:18	11,67179	4,916078	5,229276	Kotor	Sangat Tinggi
38	20/07/2025 15:16:45	11,48573	4,366119	5,34486	Kotor	Sangat Tinggi
39	20/07/2025 15:17:13	11,26003	4,835915	5,285203	Kotor	Sangat Tinggi
40	20/07/2025 15:17:39	11,05406	4,552546	5,132333	Kotor	Sangat Tinggi
41	20/07/2025 15:18:05	10,84847	5,020477	5,203176	Kotor	Sangat Tinggi
42	20/07/2025 15:18:31	10,64313	4,271041	5,070813	Kotor	Sangat Tinggi
43	20/07/2025 15:18:58	10,43819	4,326969	5,274018	Kotor	Sangat Tinggi
44	20/07/2025 15:19:25	10,25296	4,563731	5,274018	Kotor	Sangat Tinggi
45	20/07/2025 15:19:51	10,08947	4,757615	5,160297	Kotor	Sangat Tinggi
46	20/07/2025 15:20:18	9,945386	4,761344	5,339267	Kotor	Sangat Tinggi
47	20/07/2025 15:20:44	9,822606	4,19647	5,266561	Kotor	Sangat Tinggi

GAMBAR 14
(PENGUJIAN DENGAN PENGIRIMAN DATA KE SPREADSHEET)

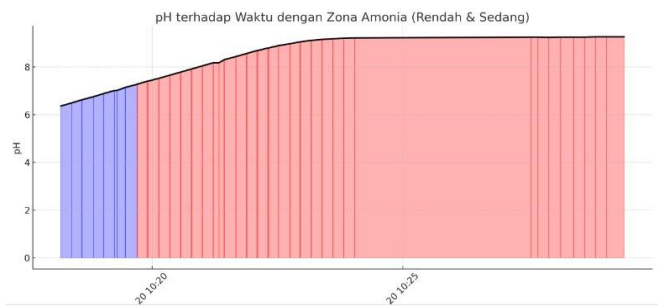
ESP32 diuji untuk konektivitas internet menggunakan jaringan WiFi lokal. Pengujian meliputi: keberhasilan Pengiriman Data Ke Firebase, keberhasilan pengiriman data ke Google Spreadsheet menggunakan layanan Google Apps Script, penanganan error jika koneksi terputus. Dapat disimpulkan Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengirim data secara berkala dengan jeda pengiriman stabil dan minim kehilangan data

g. Pengujian Control Relay

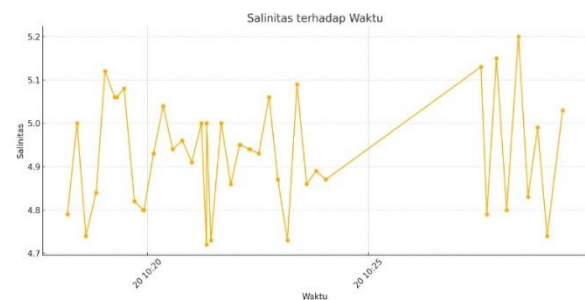
Pengujian kontrol relay dilakukan untuk memastikan sistem dapat mengaktifkan dan menonaktifkan aktuator seperti aerator dan pompa air secara otomatis maupun manual melalui Firebase Realtime Database. Tujuannya adalah untuk memverifikasi apakah perintah dari database berhasil dieksekusi oleh mikrokontroler ESP32 dan diteruskan ke relay yang mengendalikan perangkat output. Pengujian dilakukan dengan mengubah nilai logika (true atau false) pada Firebase untuk masing-masing perangkat, lalu mengamati respons di lapangan, baik melalui lampu indikator maupun aktuator, serta mencatat waktu respons sistem.

C. Pemantauan Kualitas Air

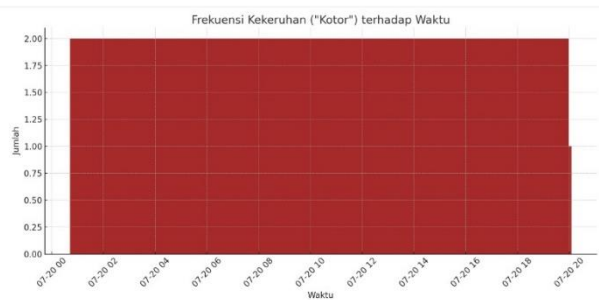
Pemantauan kualitas air meliputi parameter pH, salinitas, kekeruhan, dan amonia dilakukan secara real-time dan ditampilkan melalui aplikasi mobile yang telah dirancang. Pada pelaksanaannya, pengukuran salinitas menggunakan dua sensor, yang kemudian dirata-ratakan oleh sistem untuk menghasilkan nilai yang lebih representatif. Sementara itu, parameter pH, kekeruhan, dan amonia masih diperoleh dari satu sensor utama dan langsung ditampilkan pada aplikasi. Hasil pemantauan tersebut dirangkum dalam grafik berikut:



GAMBAR 15
(pH TERHADAP WAKTU DENGAN AMONIA)

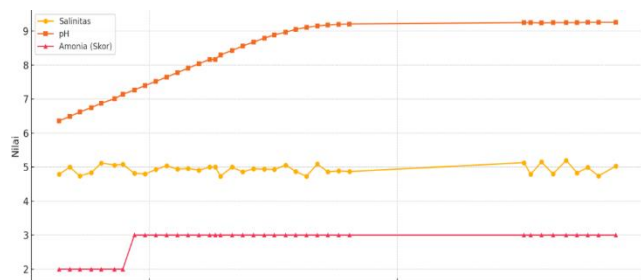


GAMBAR 16
(SALINITAS TERHADAP WAKTU)



GAMBAR 17
(KEKERUHAN AIR TERHADAP WAKTU)

Berdasarkan hasil pengukuran kualitas air yang mencakup salinitas, pH, kekeruhan, dan klasifikasi amonia, diketahui bahwa kondisi air kolam mengalami perubahan perlahan dalam rentang waktu tertentu. Salinitas terpantau stabil antara 4,72 hingga 5,20 ppt, masih dalam batas optimal untuk budidaya udang vaname. Nilai pH menunjukkan penurunan bertahap dari 9,26 ke 6,36, yang mengindikasikan proses alami seperti respirasi mikroorganisme atau peningkatan CO₂, serta memengaruhi status amonia dari "Sedang" menjadi "Rendah" seiring turunnya pH di bawah 7,2, sesuai teori bahwa amonia berbentuk NH₄⁺ pada pH rendah lebih tidak beracun. Namun, seluruh hasil pengukuran kekeruhan menunjukkan kondisi "Kotor" (NTU > 100), menandakan banyaknya partikel tersuspensi seperti lumpur, sisa pakan, atau feses yang berpotensi mengganggu pernapasan udang dan menurunkan kualitas air. Secara keseluruhan, sistem monitoring sensor berhasil mendeteksi tren perubahan kualitas air, terutama pada pH dan amonia, meskipun penanganan terhadap kekeruhan tinggi masih diperlukan untuk menjaga kesehatan kolam budidaya.

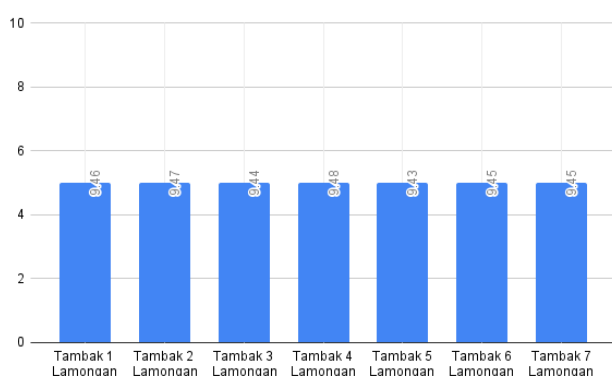


GAMBAR 18
(GRAFIK LINE SALINITAS, TDS DAN AMONIA)

Hasil pengukuran pH dan salinitas yang dilakukan secara manual dari lokasi tambak udang tradisional dituliskan pada TABEL 5 dengan grafik pH yang diperoleh ditunjukkan oleh GAMBAR 19.

TABEL 5
(HASIL PENGUKURAN pH DAN SALINITAS)

Tambak/Kolam	pH (Manual)	Salinitas (ppt)
Tambak 1 Lamongan	9.46	5
Tambak 2 Lamongan	9.47	5
Tambak 3 Lamongan	9.44	5
Tambak 4 Lamongan	9.48	5
Tambak 5 Lamongan	9.43	5
Tambak 6 Lamongan	9.45	5
Tambak 7 Lamongan	9.45	5



GAMBAR 19
(GRAFIK pH TAMBAK TRADISIONAL)

D. Pengolahan Data

Integrasi data merupakan proses penggabungan hasil pembacaan sensor pH, salinitas, dan kekeruhan oleh mikrokontroler ESP32 ke dalam satu paket data dalam format JSON yang ringan dan kompatibel dengan Firebase Realtime Database. Data ini mencakup nilai pH terkini, salinitas dari dua sensor, status kekeruhan (Bersih/Kotor), dan klasifikasi amonia berdasarkan nilai pH. Pengiriman dilakukan setiap 10 detik melalui koneksi WiFi menggunakan metode HTTP PUT dengan autentikasi token Firebase untuk menjaga

keamanan. Sistem memantau respon HTTP dari Firebase untuk memastikan keberhasilan pengiriman dan akan mencoba ulang jika terjadi kegagalan. Data yang berhasil dikirim disimpan dalam node berdasarkan UID perangkat agar mudah diakses oleh pengguna melalui aplikasi mobile atau dashboard web secara real-time. Setelah data terkirim, ESP32 melakukan pengambilan keputusan otomatis tanpa intervensi pengguna, berdasarkan ambang nilai yang telah ditentukan. Misalnya, aerator akan aktif jika pH > 8.4 dan amonia tinggi; pompa air keluar dan masuk diaktifkan jika kekeruhan tinggi (ADC > 1000); dan sistem memberi peringatan otomatis jika salinitas di luar rentang ideal. Selain itu, pengguna juga dapat mengontrol perangkat secara manual melalui Firebase, sementara ESP32 tetap memprioritaskan logika keamanan. Dengan sistem ini, pengendalian kualitas air pada kolam udang Vaname menjadi lebih cerdas, responsif, dan efisien, serta mampu meminimalkan risiko penurunan kualitas air yang berdampak pada kesehatan dan produktivitas udang.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian sistem dan analisis data lapangan, peningkatan nilai pH yang disertai tingginya kadar amonia berdampak nyata terhadap kondisi fisik dan fisiologis udang Vaname, karena amonia dalam bentuk bebas (NH_3) yang meningkat saat pH melebihi 8.5 bersifat sangat toksik dan dapat merusak jaringan tubuh udang melalui insang. Dampaknya terlihat dari perubahan warna tubuh, respons lambat terhadap rangsangan, kerusakan insang, perilaku mencari oksigen di permukaan, serta gangguan moulting seperti kulit lunak dan rapuh. Jika tidak segera ditangani, kondisi ini dapat menyebabkan kematian massal, terutama pada larva dan benur yang lebih sensitif. Sistem monitoring yang dikembangkan terbukti mampu mendeteksi perubahan pH dan amonia secara real-time dan mengaktifkan aerator otomatis saat nilai pH berisiko, sehingga mendukung pengambilan keputusan manajemen air yang lebih responsif. Dengan data yang akurat dan fitur kontrol otomatis, sistem ini tidak hanya menjadi alat bantu teknis dalam budidaya, tetapi juga instrumen ilmiah untuk memahami hubungan antara kualitas air dan respons fisiologis udang, serta menjadi solusi aplikatif berbasis IoT dalam menjaga stabilitas lingkungan dan mencegah kerugian biologis maupun ekonomis.

REFERENSI

- Abu Sneineh, Anees, and Arafat A.A. Shabaneh. 2023. "Design of a Smart Hydroponics Monitoring System Using an ESP32 Microcontroller and the Internet of Things." *MethodsX* 11. doi:10.1016/j.mex.2023.102401.
- Anjasmara, Bagus, Pande Gde Sasmita Julyantoro, and Endang Wulandari Suryaningtyas. 2022. Current Trends in Aquatic Science I Total Bakteri Dan Kelimpahan Vibrio Pada Budidaya Udang Vannamei (*Litopenaeus Vannamei*) Sistem Resirkulasi Tertutup Dengan Padat Tebar Berbeda.
- Chuyen, Tran Duc, Dien Duc Nguyen, Nguyen Cao Cuong, and Vu Viet Thong. 2023. "Design and Manufacture Control System for Water Quality Based on IoT Technology for Aquaculture in the Vietnam." *Bulletin of Electrical*

Effendi, Irzal, Abung Maruli Simanjuntak, and Muhammad Qustam Sahibuddin. 2021. "Standard Operasional Dan Prosedur (Sop) Budidaya Udang Putih (Litopenaeus Vannamei) Kepulauan Seribu." Pusat Kajian Sumberdaya Pesisir dan Lautan (1): 1–38.

Ghazali, Nurarina Ayuni, Nurul Aini Abdul Halim, Ninie Diana Baharuddin, Fatimah Md. Yusoff, Murni Karim, and Ikhsan Natrah. 2024. "Ammonia Removal and Nitrogen Preferences Evaluation of Indigenous Malaysian Microalga *Halamphora* Sp. on White Shrimp *Penaeus Vannamei* Wastewater." *Journal of Aquatic Research and Sustainability* 01(02): 10–17. doi:10.69517/jars.2024.01.02.0003.

Hamsinar, Henny, Ery Muchyar Hasiri, and Nur Aisyah Raudatul Zannah. 2022. "IMPLEMENTASI MIKROKONTROLER UNTUK MONITORING DAN PENGONTROLAN KADAR PH AIR TAMBAK UNTUK BUDIDAYA UDANG BERBASIS INTERNET OF THINGS." *JURNAL INFORMATIKA* 11(1). doi:10.55340/jiu.v11i1.1050.

Harlina, Harlina, Ilmiah Ilmiah, Andi Hamdillah, Dewi Virgiastuti Jarir, and Ahmad Darul Salam. 2022. "The Water Quality Monitoring of *Vannamei* Shrimp (*Litopenaeus Vannamei*) Ponds in East Tanete Riattang District, Bone Regency, Indonesia." *Depik* 11(1). doi:10.13170/depik.11.1.21663.

Hukom, Venticia, Rasmus Nielsen, Mette Asmild, and Max Nielsen. 2020. "Do Aquaculture Farmers Have an Incentive to Maintain Good Water Quality? The Case of Small-Scale Shrimp Farming in Indonesia." *Ecological Economics* 176. doi:10.1016/j.ecolecon.2020.106717.

Islam, Md Monirul, Mohammad Abul Kashem, Salem A. Alyami, and Mohammad Ali Moni. 2023. "Monitoring Water Quality Metrics of Ponds with IoT Sensors and Machine Learning to Predict Fish Species Survival." *Microprocessors and Microsystems* 102. doi:10.1016/j.micpro.2023.104930.

Kim, Su Kyoung, Jaeho Song, Meora Rajeev, Su Kyoung Kim, Innam Kang, In Kwon Jang, and Jang Cheon Cho. 2022. "Exploring Bacterioplankton Communities and Their Temporal Dynamics in the Rearing Water of a Biofloc-Based Shrimp (*Litopenaeus Vannamei*) Aquaculture System." *Frontiers in Microbiology* 13. doi:10.3389/fmicb.2022.995699.

Marappan, Jayanthi, Balasubramaniam Ambattaiyanpatti Anathaikamatchi, Suryaprakash Sakkarai, Ravisankar Thiagarajan, Duraisamy Muthusamy, Manimaran Kuppusamy, Muralidhar Moturi, et al. 2020. "Assessment of the New Generation Aeration Systems Efficiency and Water Current Flow Rate, Its Relation to the Cost Economics at Varying Salinities for *Penaeus Vannamei* Culture." *Aquaculture Research* 51(5). doi:10.1111/are.14562.

Musa, Muhammad, Evellin Dewi Lusiana, Nanik Retno Buwono, Sulastri Arsad, and Mohammad Mahmudi. 2020. "The Effectiveness of Silvofishery System in Water Treatment in Intensive Whiteleg Shrimp (*Litopenaeus Vannamei*) Ponds, Probolinggo District, East Java, Indonesia." *Biodiversitas* 21(10). doi:10.13057/biodiv/d211031.

Mustafa, Akhmad, Rachman Syah, Mudian Paena, Ketut Sugama, Endhay Kusnendar Kontara, Irwan Muliawan, Hidayat Suryanto Suwoyo, et al. 2023. "Strategy for Developing Whiteleg Shrimp (*Litopenaeus Vannamei*) Culture Using Intensive/Super-Intensive Technology in Indonesia." *Sustainability (Switzerland)* 15(3). doi:10.3390/su15031753.

Nurba, Hardy Purnama, Yopi Fauzi, Aldo Geraldie Djatnika, and Ketut Abimanyu Munastha. 2022. "IMPLEMENTASI PANEL SURYA UNTUK PERANGKAT BATERAI PORTABEL." *Infotronik : Jurnal Teknologi Informasi dan Elektronika* 7(2). doi:10.32897/infotronik.2022.7.2.2259.

Okomoda, V. T., M. Ikhwanuddin, A. S. Oladimeji, M. Najiah, K. I. Alabi, A. I. Abd Salam, I. Jauhari, and N. A. Kasan. 2022. "Rearing Water Quality and Zootechnical Parameters of *Litopenaeus Vannamei* in Rapid Biofloc® and Conventional Intensive Culture System." *Journal of King Saud University - Science* 34(1). doi:10.1016/j.jksus.2021.101729.

Othman, Nor Azlan, Nor Salwa Damanhuri, Mohamad Amirul Syafiq Mazalan, Sarah Addayani Shamsuddin, Mohd Hussaini Abbas, and Belinda Chong Chiew Meng. 2020. "Automated Water Quality Monitoring System Development via LabVIEW for Aquaculture Industry (Tilapia) in Malaysia." *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* 20(2). doi:10.11591/ijeecs.v20.i2.pp805-812.

Pratiwi, Rifqah, I Nyoman Sudiarsa, Pieter Amalo, and Yusuf Widyandana Wiarto Utomo. 2021. "Production Performance of Super Intensive *Vannamei* Shrimp *Litopenaeus Vannamei* at PT. Sumbawa Sukses Lestari Aquaculture, West Nusa Tenggara." *Journal of Aquaculture and Fish Health* 11(1). doi:10.20473/jafh.v11i1.21143.

Pratiwi, Rizky Kusma, Mohammad Mahmudi, Abdul Rahem Faqih, and Diana Arfiati. 2023. "Dynamics of Water Quality for *Vannamei* Shrimp Cultivation in Intensive Ponds in Coastal Areas." *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA* 9(10). doi:10.29303/jppipa.v9i10.4322.

Sallam, Ghada R., Yusuf Jibril Habib, Mohammed F. El Basuini, Walied M. Fayed, and Akram Ismael Shehata. 2024. "Synergistic Interactions of Zeolite, Stocking Density, and Water Exchange: A Holistic Approach to Optimizing Aquaculture Performance of Juvenile European Seabass (*Dicentrarchus Labrax*)." *Scientific African* 23. doi:10.1016/j.sciaf.2023.e02043.

Suhendar, Dita Tania, Azam Bachur Zaidy, and Suhendar I Sachoemar. 2020. "Profil Oksigen Terlarut, Total Padatan

Tersuspensi, Amonia, Nitrat, Fosfat Dan Suhu Pada Tambak Intensif Udang Vanamei.” Jurnal Akuatek 1(1).

Tarunamulia, Muhammad Ilman, Jesmond Sammut, Mudian Paena, Basir, Kamariah, Imam Tauhid, et al. 2024. “Impact of Soil and Water Quality on the Sustainable Management of Mangrove-Compatible Brackishwater Aquaculture Practices in Indonesia.” Environmental Research Communications 6(8). doi:10.1088/2515-7620/ad6caa.

Zhang, Haihan, Miaomiao Yan, Tinglin Huang, Xin Huang, Shangye Yang, Nan Li, and Na Wang. 2020. “Water-Lifting Aerator Reduces Algal Growth in Stratified Drinking Water Reservoir: Novel Insights into Algal Metabolic Profiling and Engineering Applications.” Environmental Pollution 266. doi:10.1016/j.envpol.2020.115384.

