

KONTROL PH AIR MINUM UNTUK TERNAK AYAM BROILER MENGGUNAKAN MIKROKONTROLER

1st Anak Agung Kusuma Jaya Ningrat
Department of Electrical Engineering
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia
anakagung@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Susijanto Tri Rasmana
Department of Electrical Engineering
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia
susijanto@telkom.university.ac.id

3rd Rifki Dwi Putranto
Department of Electrical Engineering
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia
rifkidwi@telkom.university.ac.id

Abstrak — Kontrol pH air minum untuk ternak ayam broiler merupakan aspek penting dalam menjaga kesehatan dan produktivitas ayam. pH air minum yang tidak sesuai dapat menyebabkan gangguan pencernaan, penurunan sistem kekebalan, dan gangguan pertumbuhan pada ayam broiler. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem kontrol pH air minum menggunakan mikrokontroler Arduino. Sistem ini terdiri dari sensor pH, motor DC untuk mengaduk air, dan sistem solenoid valve untuk mengatur aliran air berdasarkan parameter pH yang diukur. Selain itu, penelitian ini juga mengkaji penggunaan bahan alami seperti daun dan batang pepaya serta daun ketapang sebagai agen penurun pH. Daun dan batang pepaya mengandung saponin, tanin, dan flavonoid yang berfungsi sebagai agen pengasam alami yang dapat menurunkan pH air secara efektif. Sementara itu, daun ketapang (*Terminalia catappa*) diketahui mengandung saponin, tanin, dan flavonoid yang dapat digunakan untuk menurunkan pH air dan meningkatkan kualitas air minum bagi ternak. Pengujian menunjukkan bahwa penggunaan bahan alami ini efektif dalam menurunkan pH air dalam rentang yang aman bagi ayam broiler, dengan margin kesalahan pengukuran pH yang rendah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem kontrol pH air minum berbasis mikrokontroler ini mampu mengontrol pH air secara otomatis dan efisien, serta memberikan alternatif yang lebih alami dan berkelanjutan dalam mempertahankan kualitas air minum ternak ayam broiler.

Kata Kunci: Mikrokontroler, pH air, Daun Pepaya, Daun Ketapang

I. PENDAHULUAN

Air minum yang berkualitas baik adalah salah satu faktor penting dalam memastikan kesehatan pada ternak ayam broiler. Ph adalah salah satu parameter utama yang menentukan tingkat keasaman dan kebasaaan pada air, komponen penyusun terbesar tubuh ayam baik broiler dan petelur adalah air, yaitu mencapai 60 – 85 % dari seluruh bagian tubuhnya. Dari angka dan presentasi ini bisa kita ketahui bahwa air mempunyai fungsi dan peranan yang begitu besar dan signifikan. Ayam mampu bertahan 15 – 20 hari tanpa pakan, namun tanpa air 2 – 3 hari saja ayam bisa mati. Begitu pentingnya air, maka kita perlu memperhatikan baik kuantitas maupun kualitas yang diberikan ke ayam[1].

Ternak ayam broiler mempunyai kebutuhan

yang sangat tinggi. Air yang diminum harus mengandung pH yang tepat agar dapat dicerna dengan baik oleh sistem pencernaan tubuh. Ph air minum yang tidak sesuai akan dapat mengganggu keseimbangan asam dan basa dalam tubuh ayam, pH yang ideal untuk diminum antara 6,5 - 8,5, jika pH melebihi 8,5 maka akan terjadinya gangguan pencernaan seperti diare dan gangguan pencernaan lainnya[2].

Perubahan pH air minum juga dapat mempengaruhi sistem kekebalan tubuh ayam. Ketika pH air mempunyai Kualitas air minum yang baik untuk ayam broiler harus memenuhi beberapa parameter fisik, kimia, dan biologi. Parameter fisik meliputi warna, bau, dan kejernihan air. Parameter kimia meliputi pH, klorida, nitrat, kesadahan, dan kandungan mineral lainnya [2].

Selain itu pH air juga memiliki pengaruh langsung terhadap kualitas ayam broiler. Kualitas air yang buruk dengan pH yang tidak sesuai dapat menyebabkan penyakit yang dapat mengganggu pertumbuhan ayam bakteri itu bernama E.coli bakteri ini mengganggu sistem pencernaan, oleh karena itu kontrol pH sangat penting dalam pemeliharaan ternak ayam broiler untuk menjaga kesehatan. Dengan menjaga pH air minum dalam rentang kadar pH yang tepat dapat menghindari berbagai masalah kesehatan dan kondisi yang buruk pada ayam broiler. Dalam hal ini, pemilik ternak harus memperhatikan kualitas air minum dan diperlukan untuk mengontrol pH air[3].

Implementasi sistem kontrol pH air minum menggunakan mikrokontroler untuk mikrokontroler yang digunakan adalah arduino, Arduino adalah sebuah platform perangkat keras dan perangkat lunak terbuka yang dapat digunakan untuk membuat berbagai proyek elektronik. Arduino menggunakan mikrokontroler sebagai otaknya dan dapat diprogram dengan bahasa pemrograman C++ atau C yang mudah dipelajari. Arduino memiliki banyak kelebihan, seperti harga yang terjangkau, kompatibilitas yang luas, kemudahan penggunaan, dan dukungan komunitas yang besar. Arduino memiliki banyak produk yang berbeda-beda sesuai dengan kebutuhan pengguna. Beberapa produk arduino yang terkenal adalah Arduino Uno[4].

II. KAJIAN TEORI

A. Sensor pH

PH meter adalah sebuah alat elektronik yang berfungsi untuk mengukur pH (derajat keasaman atau kebasaaan) suatu cairan (ada elektroda khusus yang berfungsi untuk mengukur pH bahan-bahan semi-padat). Sebuah pH meter terdiri dari sebuah elektroda (probe pengukur) yang terhubung ke sebuah alat elektronik yang mengukur dan menampilkan nilai pH.

Alat ini sangat berguna untuk industri air minum, laboratorium, akuarium[9].

B. Mikrokontroler Arduino

Arduino adalah kit elektronik atau papan rangkaian elektronik open source yang didalamnya terdapat komponen utama yaitu sebuah chip mikrokontroler dengan jenis AVR dari perusahaan Atmel. Mikrokontroler itu sendiri adalah chip atau IC (Integrated Circuit) yang bisa diprogram menggunakan komputer memiliki 14 pin digital input/output, 6 input analog, 16 resonator keramik, konektor USB, colokan listrik, kepala ICSP, dan tombol reset. Tujuan menanamkan program pada mikrokontroler adalah agar rangkaian elektronik dapat membaca input, proses dan output sebuah rangkaian elektronik [10].

C. Solenoid Valve

Solenoid valve adalah sebuah katup yang digerakkan oleh energi listrik yang mempunyai kumparan sebagai penggerakannya. Kumparan ini berfungsi untuk menggerakkan piston yang dialiri arus AC/DC sebagai daya penggerakannya. Solenoid valve memiliki saluran masuk (inlet port) dan saluran keluar (outlet port). Saluran masuk memiliki fungsi sebagai lubang masukan untuk air, saluran keluar berfungsi sebagai tempat keluarnya air cairan. Valve solenoid dapat membuka dan menutup secara otomatis dengan prinsip kerja magnet listrik. Valve solenoid ini mendapat arus listrik dari relay yang terhubung dengan rangkaian driver relay. Rangkaian driver relay akan mendapatkan logika tinggi untuk mengaktifkan valve solenoid sedangkan jika mendapat logika rendah maka valve tidak akan aktif [10].

D. Relay

Relay adalah Saklar (Switch) yang dioperasikan secara listrik dan merupakan komponen Electromechanical (Elektromekanikal) yang terdiri dari 2 bagian utama yakni Elektromagnet (Coil) dan Mekanikal (seperangkat Kontak Saklar/Switch). Relay menggunakan Prinsip Elektromagnetik untuk menggerakkan Kontak Saklar sehingga dengan arus listrik yang kecil (low power) dapat menghantarkan listrik yang bertegangan lebih tinggi. Kontak Poin (Contact Point) Relay terdiri dari 2 jenis[12] yaitu:

1. *Normally Close (NC)* yaitu kondisi awal sebelum diaktifkan akan selalu berada di posisi *CLOSE* (tertutup)
2. *Normally Open (NO)* yaitu kondisi awal sebelum diaktifkan akan selalu berada di posisi *OPEN* (terbuka)

E. Sensor Ultrasonik

Cara kerja sensor ultrasonik yaitu dengan cara data dan mengevaluasi kinerja sistem. memantulkan gelombang dan menerima lagi pantulan suatu gelombang sehingga dapat digunakan untuk mengukur suatu jarak pada radius tertentu. Sensor ultrasonik merupakan sensor yang mempunyai empat pin yang digunakan untuk pengaplikasiannya. Dua pin digunakan sebagai daya yaitu VCC dan GND, sedangkan dua pin lagi sebagai pin trigger dan echo. TRIGGER merupakan pin yang digunakan untuk mengeluarkan sinyal sedangkan pin ECHO merupakan pin yang digunakan untuk menangkap sinyal kembalian[13].

F. Motor DC

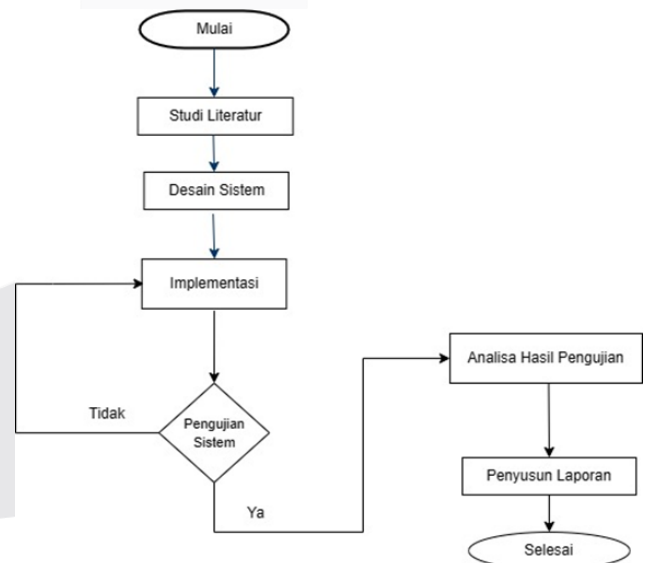
Motor stepper adalah motor yang dikontrol dengan input digital menghasilkan step-step yang digunakan untuk mengontrol sudut dari motor. Motor stepper memiliki torsi yang besar. Untuk mengontrol motor stepper diperlukan

driver, karena motor stepper membutuhkan tegangan dan arus yang cukup besar. Pada contoh digunakan power dari Arduino yaitu 5v cukup aman karena program menggunakan kecepatan motor stepper yang rendah, namun sebaiknya gunakan power eksternal dari baterai atau adaptor untuk motor stepper agar dapat berjalan lebih baik dan tidak beresiko merusak Arduino[14].

III METODE

Pada bagian berikut akan dijelaskan cara kerja sistem yang telah dirancang, data apa saja yang akan dievaluasi, dan bagaimana data tersebut di dapatkan. Akan dijelaskan juga bagaimana sistem navigasi yang telah dirancang akan diuji coba.

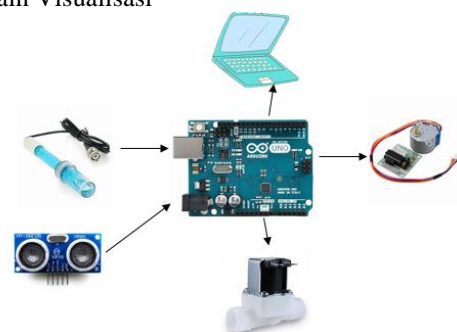
1. Alur Penelitian



Gambar 1. Alur Penelitian

Gambar 1 terdapat beberapa tahap yang perlu dilakukan guna menyelesaikan penelitian ini. Tahap pertama adalah pengumpulan studi literatur, di mana peneliti melakukan pencarian dan analisis literatur yang relevan terkait topik penelitian. Tahap selanjutnya adalah desain visualisasi sensor pH digunakan untuk mengukur kadar pH air di dalam tempat penampungan air lalu penyaluran air minum akan disalurkan menggunakan kran otomatis. Setelah itu, dilakukan implementasi tahap implementasi dan uji coba dilakukan untuk mengintegrasikan sistem pada prototipe dan menguji kemampuan untuk mengontrol pH air minum. Selanjutnya, pengujian sistem apakah sistem bisa berjalan dengan normal. Lalu dilakukan analisis hasil dan penyusunan laporan untuk mengolah data dan mengevaluasi kinerja sistem.

B. Desain Visualisasi



Gambar 2. Desain Visualisasi

Gambar 2 menunjukkan skema sistem kontrol berbasis Arduino Uno yang menghubungkan beberapa komponen elektronik untuk mengoperasikan perangkat secara otomatis. Mikrokontroler utama yang bertindak sebagai pusat kontrol untuk mengolah data dari sensor-sensor dan mengirimkan perintah ke aktuator (motor dan pompa). Arduino menerima data dari sensor pH dan menjalankan program yang diunggah dari laptop, Sensor pH ini digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau basa pH dari suatu cairan. Sensor ini mengirimkan data ke Arduino untuk dianalisis dan diproses. Sensor ultrasonik ini digunakan untuk mengukur jarak objek menggunakan gelombang ultrasonik. *Solenoid valve* ini dikendalikan oleh Arduino untuk mengalirkan konsentrat penurun pH. *Solenoid valve* ini dapat dibuka atau ditutup berdasarkan instruksi dari Arduino. Motor *stepper* akan mengaduk jika *Solenoid valve* mengalirkan konsentrat penurun pH dan motor stepper akan berhenti jika *solenoid valve* tertutup.

C. Desain Sistem Kendali

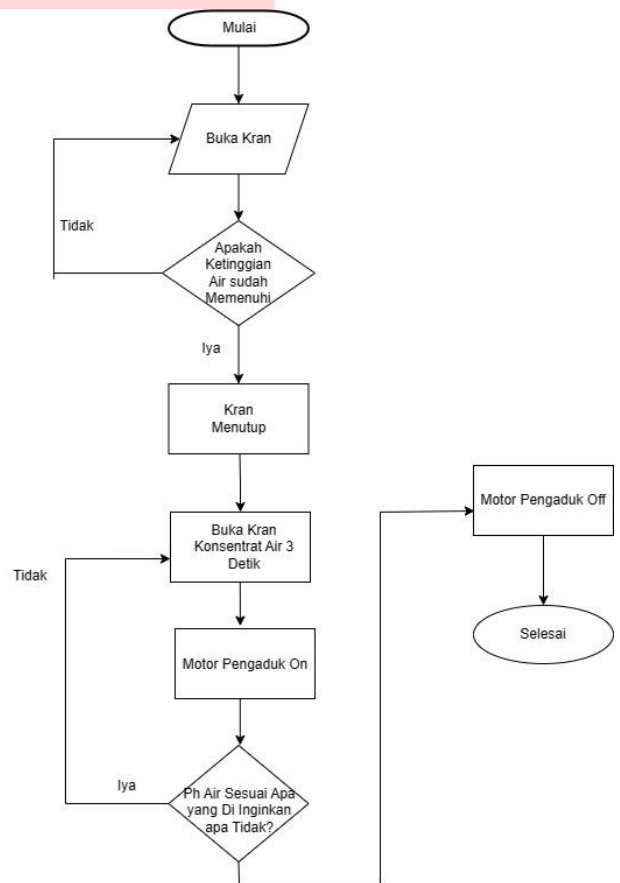


Gambar 3. Desain Sistem Kendali

Gambar 3 menunjukkan desain sistem kendali otomatis yang menggunakan mikrokontroler Arduino Uno sebagai pusat pengolahan data dan kontrol untuk mengatur beberapa perangkat berdasarkan input dari sensor. Berikut penjelasan untuk masing-masing komponen yang terlibat:

1. **Sensor pH:** Sensor ini digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau pH dari suatu cairan. Sensor pH mengirimkan data ke Arduino Uno mengenai nilai pH cairan yang diukur. Berdasarkan nilai pH ini, Arduino dapat mengambil keputusan untuk mengaktifkan atau menonaktifkan perangkat yang terhubung, seperti keran otomatis.
2. **Sensor Ultrasonic:** Sensor ultrasonik digunakan untuk mendeteksi jarak objek dari sensor dengan menggunakan gelombang ultrasonik. Data yang dikumpulkan oleh sensor ini dikirim ke Arduino Uno. Informasi ini dapat digunakan untuk menentukan kapan harus mengaktifkan motor atau perangkat lain yang dikendalikan oleh sistem.
3. **Arduino Uno:** Mikrokontroler ini merupakan pusat pengendali utama dalam sistem. Arduino menerima input dari sensor pH dan sensor ultrasonik, kemudian memproses data tersebut sesuai dengan logika yang diprogram. Berdasarkan hasil pemrosesan, Arduino mengirimkan sinyal untuk mengontrol perangkat seperti keran otomatis dan motor DC.
4. **Keran Otomatis 2:** Ini adalah sebuah perangkat aktuator yang dioperasikan secara otomatis oleh Arduino Uno. Berdasarkan data dari sensor pH atau sensor ultrasonik, Arduino dapat membuka atau menutup keran secara otomatis untuk mengatur aliran cairan, misalnya untuk mengontrol kualitas air berdasarkan nilai pH.
5. **Motor DC:** Motor DC ini digunakan untuk menggerakkan mekanisme tertentu sesuai kebutuhan sistem. Arduino Uno mengendalikan motor ini berdasarkan data yang diterima dari sensor ultrasonik atau sensor pH, memungkinkan sistem untuk melakukan operasi tertentu, seperti memutar atau menggerakkan objek pada jarak tertentu.

D. Flowchart Software



Gambar 4. Flowchart Software

Gambar 4 menunjukkan diagram alir (flowchart) dari implementasi sistem otomatis untuk mengatur pengisian dan pencampuran air berdasarkan parameter tertentu, seperti ketinggian air dan tingkat pH yang diinginkan. Berikut adalah penjelasan untuk setiap langkah dalam diagram alir ini:

1. **Mulai:** Proses dimulai dengan inisiasi sistem kontrol.
2. **Buka Kran:** Sistem pertama-tama membuka keran untuk mengisi wadah dengan air.
3. **Apakah Ketinggian Air Sudah Memenuhi?:** Sistem kemudian memeriksa apakah ketinggian air di dalam wadah sudah mencapai level yang diinginkan. Ini mungkin dilakukan dengan sensor ultrasonik yang mengukur ketinggian air.
 - Jika Tidak: Jika ketinggian air belum memenuhi, sistem kembali ke langkah "Buka Kran" dan terus mengisi air.
 - Jika Ya: Jika ketinggian air sudah memenuhi, sistem melanjutkan ke langkah berikutnya.
4. **Kran Menutup:** Setelah ketinggian air memenuhi kriteria, keran air ditutup untuk menghentikan aliran air.
5. **Buka Kran Konsentrat Air 3 Detik:** Keran untuk konsentrat air (mungkin untuk menambah bahan kimia atau cairan lain) dibuka selama 3 detik untuk mencampurkan bahan tersebut ke dalam air.
6. **Motor Pengaduk On:** Motor pengaduk dinyalakan untuk mencampur air dan konsentrat secara merata.
7. **Ph Air Sesuai Apa yang Diinginkan atau Tidak?:** Sistem memeriksa apakah tingkat pH air sudah sesuai dengan yang diinginkan.
 - Jika Tidak: Jika pH air belum sesuai, proses kembali ke langkah "Buka Kran Konsentrat Air 3 Detik" untuk menambahkan lebih banyak konsentrat.

- Jika Ya: Jika pH air sudah sesuai, sistem melanjutkan ke langkah berikutnya.

- Motor Pengaduk Off: Setelah pH air mencapai level yang diinginkan, motor pengaduk dimatikan untuk menghentikan pencampuran.
- Selesai: Proses selesai, dan sistem berhenti beroperasi.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab berikut akan ditunjukkan hasil-hasil percobaan yang telah dilakukan untuk mengevaluasi kinerja miniatur.

A. Kalibrasi Sensor PH

Tabel 1 Kalibrasi Nilai pH Antara Sensor Dan pH Meter Menggunakan Air Aquadest 250 ml.

pH		
pH Meter	pH Alat	Error(%)
4,4	4,6	4,5%
4,4	4,7	6,8%
4,4	4,5	2,2%
4,4	4,7	6,8%
4,4	4,6	4,5%
4,4	4,5	2,2%
4,4	4,7	6,8%
4,4	4,6	4,5%
4,4	4,4	0%
4,4	4,7	6,8%
4,4	4,7	6,8%
4,4	4,4	0%
4,4	4,4	0%
4,4	4,3	2,2%
4,4	4,7	6,8%

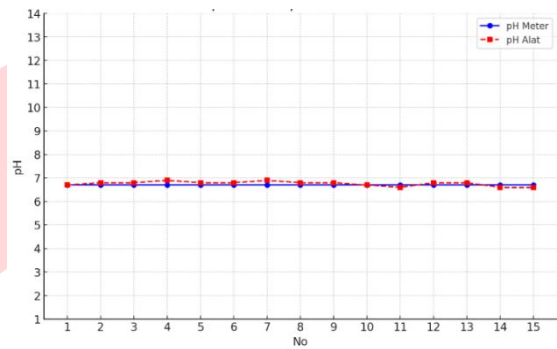
Tabel 2 Kalibrasi Nilai pH Antara Sensor Dan pH Meter Menggunakan Air Aquadest 250 ml.

pH		
pH Meter	pH Alat	Error(%)
6,7	6,7	0%
6,7	6,8	1,4%
6,7	6,8	1,4%
6,7	6,9	2,9%
6,7	6,8	1,4%
6,7	6,8	1,4%
6,7	6,9	2,9%
6,7	6,8	1,4%
6,7	6,8	1,4%
6,7	6,7	0%
6,7	6,6	1,4%
6,7	6,8	1,4%
6,7	6,6	1,4%
6,7	6,4	4,4%
6,7	6,6	1,4%

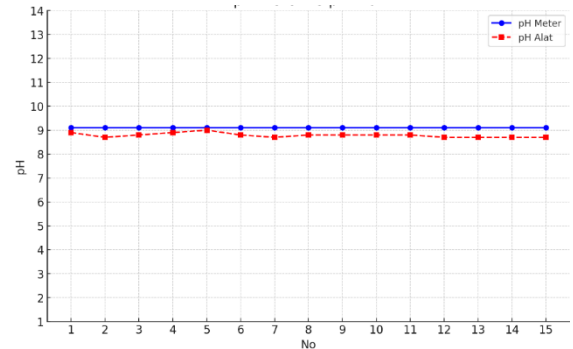
Tabel 3 Kalibrasi Nilai pH Antara Sensor Dan pH Meter Menggunakan Air Aquadest 250 ml.

pH		
pH Meter	pH Alat	Error(%)
9,1	8,9	2,1%
9,1	8,7	4,3%
9,1	8,8	3,2%

9,1	8,9	2,1%
9,1	9,0	1%
9,1	8,8	3,2%
9,1	8,7	4,3%
9,1	8,8	3,2%
9,1	8,8	3,2%
9,1	8,8	3,2%
9,1	8,7	4,3%
9,1	8,7	4,3%
9,1	8,7	4,3%
9,1	8,7	4,3%
9,1	8,7	4,3%

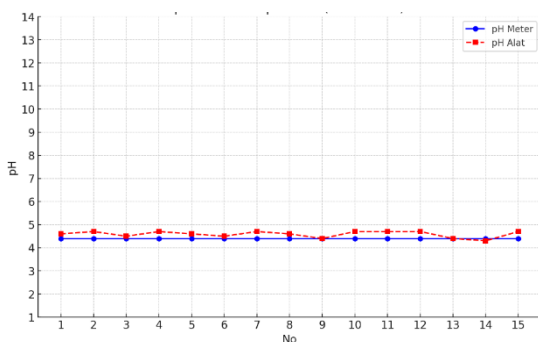


(b) Grafik pH 6,7



(c) Grafik pH 9,1

Berdasarkan Tabel 1,2 dan 3 diatas pengambilan data dilakukan setiap 1 menit, dari data tersebut kemudian dihitung nilai error antara hasil sensor pH dengan hasil pH Buffer menggunakan perhitungan persamaan pada gambar 4.1. Berdasarkan dari hasil perhitungan persamaan tersebut sensor mampu membaca kondisi pH dengan margin error lumayan tinggi, hal ini terbukti dari ketiga percobaan pada kondisi pH yang berbeda diperoleh nilai error terbesar yaitu 6.8% terjadi pada saat pembacaan pH 4.4 larutan asam. Berikut grafik pengujian pH pada volume 250 ml air aquadest dengan kondisi pH yang berbeda.



(a) Grafik pH 4,4

Pengujian sensor pH dilakukan dengan cara kalibrasi nilai kadar pH meter terhadap nilai tegangan yang terukur pin masukan analog Arduino. Nilai yang direkam oleh pH meter pada pengujian kali ini yaitu pH asam sampai pH basa, Jadi pengujian sensor pH ini dilakukan dengan cara kalibrasi nilai kadar pH meter terhadap nilai tegangan yang terukur pin masukan analog Arduino.

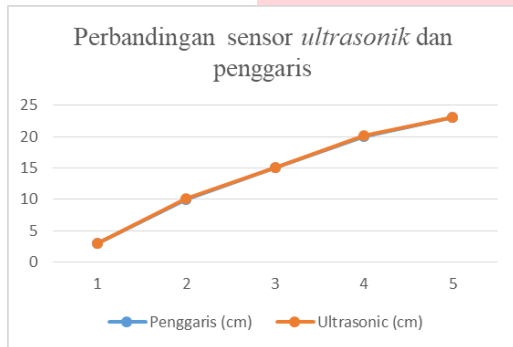
B. Hasil Pengujian Kalibrasi Pada Sensor Ultrasonic

Berdasarkan hasil dari kalibrasi tersebut, maka diperoleh hasil data pada tabel 4. Perbandingan untuk sensor Ultrasonic terhadap jarak benda dengan pengukuran jarak manual menggunakan sebuah penggaris.

Tabel 4. Perbandingan Hasil Jarak Pada suatu Benda Antara Sensor dan Penggaris pada diluar air.

Sensor <i>Ultrasonic</i>			
No	Penggaris (cm)	<i>Ultrasonic</i> (cm)	Selisih (cm)
1	3	3	0
2	10	10,05	0,02
3	15	15	0
4	20	20,1	0,01
5	23	23,10	0,1

Berdasarkan data pada tabel 4 terlihat bahwa hasil pembacaan nilai sensor ultrasonik dapat dinyatakan bagus, sebab selisih hasil nilai sensor dengan pembacaan menggunakan penggaris sebesar 0-0,1 cm.

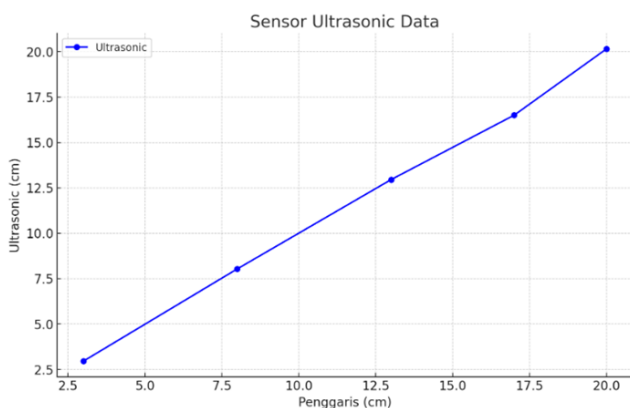


Gambar 5 Perbandingan sensor ultrasonik dan penggaris di luar air

Tabel 1 perbandingan Hasil Jarak Pada suatu Benda Antara Sensor dan Penggaris pada didalam air

Sensor Ultrasonic			
No	Penggaris (cm)	Ultrasonic (cm)	Selisih (cm)
1	3	2,95	0.05
2	8	8,03	0.03
3	13	12.95	0.05
4	17	16.50	0.50
5	20	20.15	0.15

Berdasarkan data pada tabel 4.5 terlihat bahwa hasil pembacaan nilai sensor ultrasonik dapat dinyatakan bagus, sebab selisih hasil nilai sensor dengan pembacaan menggunakan penggaris sebesar 0.03-0,5 cm



Gambar 6 Perbandingan Hasil Jarak Pada suatu Benda Antara Sensor dan Penggaris pada didalam air

C. Pengujian Penurun pH Menggunakan Daun Ketapang

Pada eksperimen ini, dilakukan pengukuran nilai pH air sebelum dan sesudah penambahan endapan daun ketapang. Daun ketapang mengandung senyawa saponin, tanin, dan flavonoid yang mampu menurunkan pH air[8]. Daun ketapang dapat menurunkan pH air menjadi 16,5% selama kurang lebih 7 jam [15].

1. Pengujian Menggunakan 300 ml Daun Ketapang

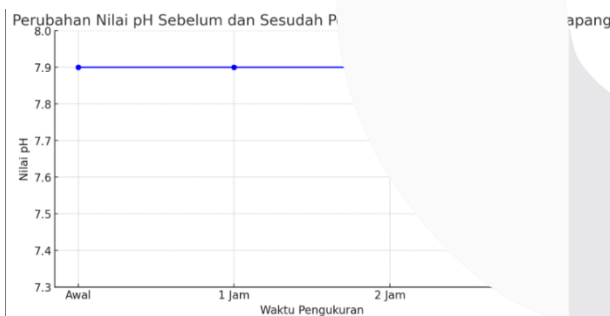
Tabel 2 Hasil pengujian menggunakan endapan daun ketapang 300ml

Waktu	Alat Pengukur	Nilai pH	Volume Air	Volume Endapan Ketapang	Durasi Endapan
Awal	pH meter	7.94	250 ml	-	-
Awal	Sensor pH	8.0	250 ml	-	-
Setelah 1 jam	pH meter	7.90	250 ml	300 ml	24 jam
Setelah 1 jam	Sensor pH	8.0	250 ml	300 ml	24 jam
Setelah 2 jam	pH meter	7.94	250 ml	300 ml	24 jam
Setelah 2 jam	Sensor pH	8.0	250 ml	300 ml	24 jam
Setelah 3 jam	pH meter	7.73	250 ml	300 ml	24 jam
Setelah 3 Jam	Sensor pH	7.43	250 ml	300 ml	24 jam

Pada tabel 6 dilakukan pengukuran nilai pH air sebelum dan sesudah penambahan endapan daun ketapang sebanyak 300 ml ke dalam 250 ml air. Pada pengukuran awal, nilai pH air yang diukur menggunakan pH meter adalah 7,9. Penambahan endapan daun ketapang dilakukan dengan menggunakan larutan yang telah diendapkan selama 24 jam, yang mengandung senyawa alami dari daun ketapang yang diketahui memiliki efek menurunkan pH air. Setelah penambahan endapan daun ketapang, pengukuran pH dilakukan pada interval waktu tertentu untuk memantau perubahan nilai pH. Pengukuran pertama dilakukan satu jam setelah penambahan endapan, namun nilai pH tetap pada angka 7,9. Hasil ini menunjukkan bahwa dalam satu jam pertama, endapan daun ketapang belum memberikan efek signifikan terhadap pH air. Pengukuran kedua dilakukan dua jam setelah penambahan, dan hasilnya tetap menunjukkan nilai pH yang sama, yaitu 7,9. Ini menunjukkan bahwa endapan daun ketapang masih belum memberikan efek penurunan pH yang terlihat dalam dua jam pertama setelah penambahan. Perubahan signifikan terjadi pada pengukuran ketiga, yang dilakukan tiga jam setelah penambahan endapan daun ketapang. Pada waktu ini, nilai pH air turun menjadi 7,73 saat diukur menggunakan pH meter, sementara sensor pH menunjukkan nilai yang lebih rendah, yaitu 7,43. Penurunan ini menunjukkan bahwa endapan daun ketapang mulai mempengaruhi pH air secara signifikan setelah tiga jam. Perbedaan hasil antara pH meter dan sensor pH dapat disebabkan oleh perbedaan sensitivitas alat pengukur, yang mengindikasikan pentingnya menggunakan alat yang akurat untuk memonitor perubahan pH. Dari hasil eksperimen ini, dapat disimpulkan bahwa endapan daun ketapang efektif dalam menurunkan pH air, tetapi membutuhkan waktu lebih

dari dua jam untuk menunjukkan efek yang signifikan. Nilai pH turun dari 7,9 menjadi 7,73 (pH meter) dan 7,43 (sensor pH) setelah tiga jam, yang menunjukkan adanya latensi dalam efek penurunan pH oleh endapan daun ketapang. Perbedaan kecil antara hasil pengukuran oleh pH meter dan sensor pH menunjukkan pentingnya memilih alat pengukur yang tepat dan mempertimbangkan sensitivitasnya. Secara keseluruhan, penggunaan endapan daun ketapang sebanyak 300 ml dalam 250 ml air dapat efektif dalam menurunkan pH air, tetapi memerlukan waktu pemantauan yang cermat. Endapan daun ketapang membutuhkan lebih dari dua jam untuk mulai menurunkan pH air secara signifikan, dan alat pengukur yang berbeda dapat memberikan hasil yang bervariasi. Penggunaan endapan daun ketapang sebagai agen penurun pH alami dapat diterapkan dalam berbagai situasi, seperti pemeliharaan akuarium atau pengelolaan air, dengan memperhatikan durasi yang dibutuhkan untuk mencapai efek penurunan pH yang diinginkan.

2. Hasil Analisis Menggunakan Endapan Daun Ketapang 300 ml



Gambar 7 Grafik endapan daun ketapang 300 ml

Pada gambar 7 analisis penambahan endapan daun ketapang sebanyak 300 ml ke dalam 250 ml air menunjukkan beberapa temuan penting terkait efektivitas dan dinamika penurunan pH air. Pada pengukuran awal, nilai pH air adalah 7,9 dan 8,0 sensor pH, yang diukur menggunakan pH meter. Setelah penambahan endapan daun ketapang yang telah diendapkan selama 24 jam, dilakukan serangkaian pengukuran pada interval waktu yang berbeda untuk memantau perubahan nilai pH. Pada pengukuran pertama, yang dilakukan satu jam setelah penambahan endapan daun ketapang, nilai pH air tetap berada di angka 7,9 pH meter dan 8,0 sensor pH. Hasil ini menunjukkan bahwa dalam satu jam pertama, endapan daun ketapang belum memberikan efek signifikan terhadap penurunan pH air. Pengukuran kedua dilakukan dua jam setelah penambahan endapan, dan hasilnya masih menunjukkan nilai pH yang sama, yaitu 7,9 pH meter dan 8,0 sensor pH. Konsistensi hasil ini mengindikasikan bahwa perubahan pH tidak terjadi dalam dua jam pertama setelah penambahan endapan daun ketapang. Perubahan signifikan mulai terlihat pada pengukuran ketiga, yang dilakukan tiga jam setelah penambahan endapan daun ketapang. Pada waktu ini, nilai pH air turun menjadi 7,73 saat diukur menggunakan pH meter, sementara pengukuran menggunakan sensor pH menunjukkan nilai pH yang lebih rendah, yaitu 7,43. Penurunan ini menunjukkan bahwa endapan daun ketapang mulai memberikan efek pada pH air setelah lebih dari dua jam penambahan. Perbedaan hasil antara pH meter dan sensor pH dapat disebabkan oleh perbedaan sensitivitas alat pengukur, yang mengindikasikan pentingnya menggunakan alat yang akurat untuk memonitor perubahan pH. Penurunan nilai pH

dari 7,9 pH meter dan 8,0 sensor pH menjadi 7,73 (pH meter) dan 7,43 (sensor pH) menunjukkan bahwa endapan daun ketapang efektif dalam menurunkan pH air, tetapi membutuhkan waktu lebih dari dua jam untuk mulai menunjukkan efek yang signifikan. Perbedaan kecil antara hasil pH meter dan sensor pH dapat disebabkan oleh perbedaan sensitivitas dan akurasi alat pengukur yang digunakan. Hasil ini memberikan wawasan bahwa penggunaan endapan daun ketapang sebagai metode alami untuk menurunkan pH air membutuhkan waktu dan alat pengukur yang tepat untuk memonitor perubahan pH secara akurat. Secara keseluruhan, analisis ini menunjukkan bahwa endapan daun ketapang dapat menjadi solusi efektif untuk menurunkan pH air, tetapi proses ini membutuhkan waktu dan pemantauan yang cermat. Endapan daun ketapang memerlukan lebih dari dua jam untuk mulai menurunkan pH air secara signifikan, dan hasil pengukuran dapat bervariasi tergantung pada alat yang digunakan. Penggunaan daun ketapang sebagai agen penurun pH dapat diterapkan dalam berbagai situasi, seperti pemeliharaan akuarium atau pengelolaan air, dengan mempertimbangkan waktu yang dibutuhkan untuk efek penurunan pH yang optimal.

D. Pengujian Penurun pH Menggunakan Batang Pepaya

Pada eksperimen ini, dilakukan pengukuran nilai pH air sebelum dan sesudah penambahan endapan batang pepaya. Batang dan daun pepaya mengandung senyawa saponin, tanin, dan flavonoid[16] yang sama dengan kandungan zat yang ada pada daun ketapang yang mampu menurunkan pH air.

3. Pengujian Menggunakan 300 ml Batang pepaya

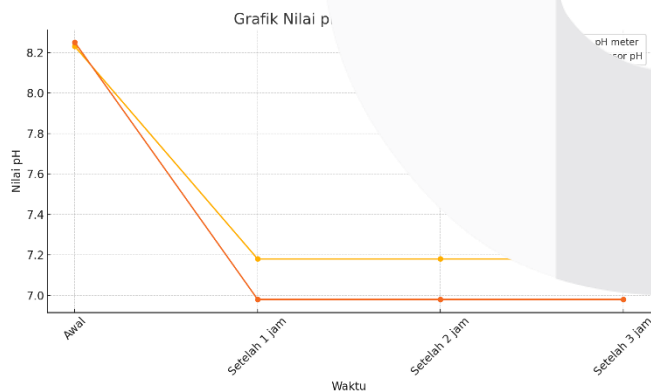
Tabel 7 Hasil pengujian menggunakan endapan batang pepaya 300ml.

Waktu	Alat Pengukur	Nilai pH	Volume Air	Volume Endapan Batang Pepaya	Durasi Endapan
Awal	pH meter	8.23	250 ml	-	-
Awal	Sensor pH	8.25	250 ml	-	-
Setelah 1 jam	pH meter	7.18	250 ml	300 ml	24 jam
Setelah 1 jam	Sensor pH	6.98	250 ml	300 ml	24 jam
Setelah 2 jam	pH meter	7.18	250 ml	300 ml	24 jam
Setelah 2 jam	Sensor pH	6.98	250 ml	300 ml	24 jam
Setelah 3 jam	pH meter	7.18	250 ml	300 ml	24 jam
Setelah 3 jam	Sensor pH	6.98	250 ml	300 ml	24 jam

Pada tabel 7 penambahan endapan batang pepaya sebanyak 300 ml ke dalam 250 ml air menunjukkan beberapa temuan penting terkait efektivitas dan dinamika penurunan pH air. Pada pengukuran awal, nilai pH air yang diukur menggunakan pH meter adalah 8.23, sedangkan nilai pH awal yang diukur menggunakan sensor pH adalah 8.25. Setelah penambahan endapan batang pepaya yang telah diendapkan selama 24 jam, dilakukan serangkaian pengukuran pada interval waktu tertentu untuk memantau perubahan nilai pH. Pada pengukuran pertama, yang dilakukan satu jam setelah penambahan endapan batang pepaya, nilai pH air turun menjadi 7.18 saat diukur menggunakan pH meter dan menjadi 6.98 saat diukur

menggunakan sensor pH. Penurunan yang signifikan ini menunjukkan bahwa endapan batang pepaya mulai mempengaruhi pH air dalam satu jam pertama setelah penambahan. Pengukuran kedua dilakukan dua jam setelah penambahan endapan batang pepaya. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai pH tetap pada angka 7.18 (pH meter) dan 6.98 (sensor pH), menunjukkan bahwa tidak ada perubahan tambahan pada nilai pH setelah dua jam. Pengukuran ketiga, yang dilakukan tiga jam setelah penambahan, juga menunjukkan nilai pH yang sama, yaitu 7.18 (pH meter) dan 6.98 (sensor pH). Hal ini mengindikasikan bahwa setelah satu jam pertama, penurunan pH berhenti dan nilai pH stabil pada angka tersebut. Perbedaan kecil antara hasil pengukuran menggunakan pH meter dan sensor pH dapat disebabkan oleh perbedaan sensitivitas alat pengukur. Meskipun demikian, keduanya menunjukkan tren penurunan yang signifikan dalam satu jam pertama setelah penambahan endapan batang pepaya, dan kemudian stabil tanpa perubahan lebih lanjut.

4. Hasil Analisis Endapan Batang Pepaya 300 ml



Gambar 8 Grafik endapan batang pepaya 300 ml

Pada gambar 4.13 menambahkan 300 ml endapan batang pepaya ke dalam 250 ml air menghasilkan perubahan signifikan pada nilai pH air. Sebelum penambahan endapan, pengukuran awal menunjukkan nilai pH air sebesar 8,23 dengan pH meter dan 8,25 dengan sensor pH. Setelah endapan batang pepaya diendapkan selama 24 jam ditambahkan, serangkaian pengukuran dilakukan pada interval waktu berbeda untuk memantau perubahan pH air. Satu jam setelah penambahan, pH air turun drastis menjadi 7.18 dengan pH meter dan 6.98 dengan sensor pH, menunjukkan efek kuat dari endapan batang pepaya dalam menurunkan pH air dalam waktu singkat. Pengukuran berikutnya, dua jam setelah penambahan, menunjukkan bahwa pH air tetap stabil pada 7.18 (pH meter) dan 6.98 (sensor pH), mengindikasikan tidak ada perubahan lebih lanjut setelah penurunan awal. Pengukuran tiga jam setelah penambahan juga menunjukkan stabilitas yang sama, dengan pH tetap pada 7.18 (pH meter) dan 6.98 (sensor pH). Stabilitas ini menunjukkan bahwa endapan batang pepaya mencapai titik keseimbangan dalam menurunkan pH air setelah satu jam pertama dan mempertahankan pH yang lebih rendah tersebut tanpa fluktuasi lebih lanjut. Perbedaan kecil antara hasil yang diperoleh dari pH meter dan sensor pH dapat disebabkan oleh perbedaan sensitivitas dan akurasi kedua alat tersebut. Meskipun demikian, tren penurunan yang konsisten menunjukkan bahwa endapan batang pepaya sangat efektif dalam menurunkan pH air dengan cepat. Kesimpulan dari analisis ini adalah bahwa endapan batang

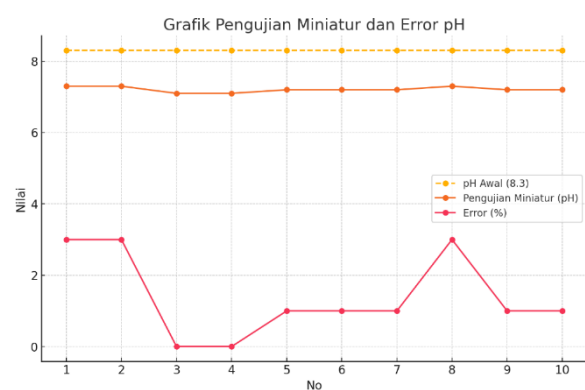
pepaya dapat digunakan sebagai bahan alami yang efektif untuk menurunkan pH air. Efek penurunan pH terjadi dalam waktu satu jam pertama setelah penambahan endapan, dan nilai pH tetap stabil hingga tiga jam berikutnya. Penggunaan endapan batang pepaya dalam menjaga pH air minum ayam broiler atau pengelolaan air dapat dilakukan dengan mempertimbangkan waktu penurunan pH yang cepat dan stabilitas nilai pH yang dihasilkan. Monitoring yang cermat dan penggunaan alat pengukur yang tepat sangat penting untuk memastikan hasil yang akurat dan konsisten.

E. Pengujian Miniatur

Pengujian miniatur menggunakan sensor pH, sensor ultrasonik, dan water pum juga sangat penting dilakukan untuk memastikan seberapa akurat dan seberapa baik implementasi nya.

Tabel 8 Pengujian Miniatur

No	pH awal	Pengujian Miniatur	Error
1	pH 8,3	pH 7,3	3%
2	pH 8,3	pH 7,3	3%
3	pH 8,3	pH 7,1	0 %
4	pH 8,3	pH 7,1	0%
5	pH 8,3	pH 7,2	1%
6	pH 8,3	pH 7,2	1%
7	pH 8,3	pH 7,2	1%
8	pH 8,3	pH 7,3	3%
9	pH 8,3	pH 7,2	1%
10	pH 8,3	pH 7,2	1%

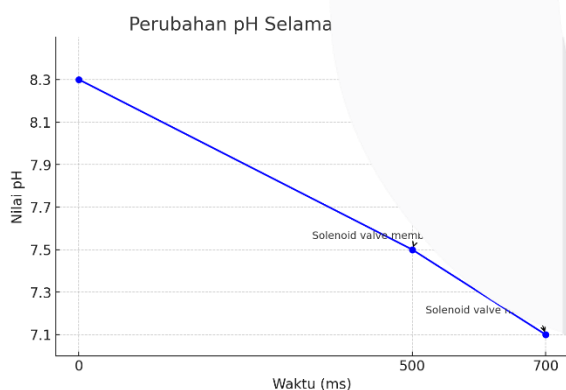


Gambar 9 Grafik pengujian miniatur dan error pH

Pada tabel 4.22, dilakukan simulasi pengendalian penurunan pH dengan menggunakan miniatur sistem berbasis mikrokontroler Arduino. Sebelum percobaan dimulai, air yang digunakan memiliki pH awal sebesar 5, sistem kemudian diaktifkan untuk menurunkan pH secara bertahap. Sensor pH yang terhubung dengan arduino digunakan untuk mengukur perubahan pH selama proses berlangsung. Setelah dilakukan 10 kali pengujian dengan kondisi yang sama, diperoleh hasil bahwa margin error dari pembacaan sensor pH terbesar adalah 3%. Ini menunjukkan bahwa sistem yang dirancang memiliki tingkat akurasi yang baik dalam memantau perubahan pH. Pada saat pengujian

sempat terjadi pembacaan sensor pH stabil karena di sebabkan oleh voltase dari power supply tidak stabil dengan fluktuasi sekitar 0,3-0,5 V, yang menyebabkan pembacaan sensor pH juga menjadi tidak stabil. Ketidakstabilan voltase ini dapat menyebabkan perubahan kecil pada tegangan yang diterima oleh sensor pH, yang kemudian diterjemahkan sebagai variasi dalam nilai pH yang terukur. Hal ini terjadi karena sensor pH sangat sensitif terhadap perubahan kecil dalam tegangan yang diukur pada pin analog mikrokontroler. Ketidakstabilan ini mengindikasikan perlunya penggunaan regulator voltase atau stabilisator untuk memastikan tegangan tetap konstan, sehingga akurasi pembacaan sensor pH dapat dijaga. Terjadinya fluktuasi atau rippel dapat mengganggu pembacaan signal analog [17] pada mikrokontroler oleh sebab itu dapat menyebabkan noise yang membuat pembacaan tidak stabil. Pada gambar 4.18 dapat error sebesar 3% disebabkan karena adanya rippel atau fluktuasi pada pembacaan sensor pH.

5. Pengujian Hasil Miniatur pH 7.1



Gambar 10 Pengujian pH 7.1

Pada gambar 10 yang menunjukkan nilai 7.1, awalnya solenoid valve membuka selama 500 *milisecond* untuk menambahkan larutan penurun pH ke dalam air minum ayam broiler. Setelah pemantauan, didapati bahwa penurunan pH tidak mencapai nilai yang diharapkan, yang berarti bahwa larutan penurun pH yang telah dimasukkan tidak cukup untuk menurunkan pH air ke tingkat yang diinginkan. Untuk mengatasi masalah ini, dilakukan pengaturan ulang pada *solenoid valve* agar membuka kembali selama 200 *milisecond*. Pembukaan tambahan ini dilakukan untuk menambah lebih banyak larutan penurun pH secara bertahap, sehingga mencapai penurunan pH yang lebih efektif. Membuka solenoid valve dalam interval yang lebih pendek ini memungkinkan pengaturan yang lebih halus dan akurat terhadap pH air, sekaligus menghindari perubahan drastis yang dapat terjadi jika larutan ditambahkan dalam jumlah yang terlalu banyak sekaligus.

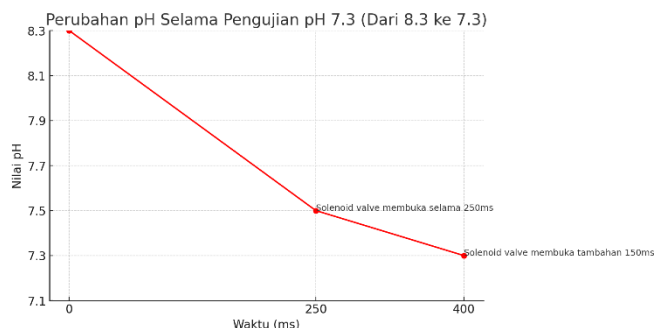
6. Pengujian Hasil Miniatur pH 7.2



Gambar 11 Pengujian pH 7.2

Pada gambar 11 yang menunjukkan nilai 7.2, solenoid valve awalnya dibuka selama 500 *milisecond* untuk menambahkan larutan penurun pH ke dalam air minum ayam broiler. Setelah pembukaan selama 500 *milisecond*, di dapati bahwa pH air sudah mencapai tingkat yang diinginkan sesuai dengan parameter yang telah ditentukan untuk menjaga kesehatan ayam broiler. Keberhasilan mencapai pH yang diinginkan dalam sekali pembukaan solenoid valve menunjukkan bahwa jumlah larutan penurun pH yang ditambahkan sudah cukup untuk menurunkan pH air secara optimal. Hal ini berarti proses penambahan larutan dan waktu pembukaan solenoid valve telah diatur dengan tepat, sehingga tidak diperlukan penyesuaian tambahan. Hasil ini juga mencerminkan efisiensi sistem kontrol pH, di mana proses penurunan pH dapat dicapai.

7. Pengujian Hasil Miniatur pH 7.3



Gambar 12 Pengujian pH 7.3

Pada gambar 12 yang menunjukkan nilai 7.3, solenoid valve awalnya dibuka selama 250 *milisecond* untuk menambahkan larutan penurun pH ke dalam air minum ayam broiler. Namun, setelah pemantauan, diketahui bahwa penurunan pH yang terjadi tidak cukup untuk mencapai tingkat pH yang diinginkan. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah larutan yang dimasukkan dalam durasi 250 ms belum cukup untuk menurunkan pH air secara optimal. Untuk mengoreksi kekurangan tersebut, solenoid valve kemudian dibuka kembali selama 150 *milisecond* untuk menambahkan lebih banyak larutan penurun pH. Pembukaan tambahan ini dilakukan untuk menyesuaikan tingkat penurunan pH secara lebih presisi tanpa menambahkan larutan secara berlebihan. Pendekatan ini menggambarkan fleksibilitas sistem dalam mengontrol pH air secara bertahap dan akurat, memastikan bahwa tingkat pH yang diinginkan tercapai dengan menyesuaikan jumlah larutan yang dimasukkan.

Tabel 9 Anggaran Biaya Pembuatan Miniatur

No	Nama Barang	Jumlah	Harga
1	Sensor Ultrasonik	2	Rp 20.000
2	Motor Dc	1	Rp 23.000
3	Sensor pH	1	Rp 130.000
4	Modul Sensor pH	3	Rp 450.000
5	Arduino Uno	1	Rp 130.000
6	Solenoid Valve	3	Rp 72.000
7	Step Down	1	Rp 13.000
8	Power Supply	1	Rp 56.000
9	Kabel Jumper	2	Rp 24.000
10	Box Panel	1	Rp 36.000
11	PH Meter	1	Rp 50.000
12	PH Buffer	6	Rp 60.000
13	Toples	5	Rp 27.500
14	Selang	1	Rp 10.000
15	Relay	2	Rp 15.000
16	Breadboard	1	Rp 12.000
17	Lcd	1	Rp 57.000
Jumlah Total			Rp 1.185.500

Rincian biaya yang diperlukan untuk pembuatan miniatur sistem pengontrol pH air minum ayam broiler. Anggaran biaya ini mencakup komponen-komponen seperti sensor ultrasonik, motor DC, sensor pH, modul sensor pH, Arduino Uno, solenoid valve, step down, power supply, kabel jumper, box panel, pH meter, pH buffer, toples, selang, relay, breadboard, dan LCD. Setiap komponen diuraikan berdasarkan jumlah dan harga masing-masing. Total keseluruhan biaya yang dibutuhkan untuk pembuatan miniatur ini adalah sebesar Rp 1.185.500

V KESIMPULAN

Perancangan Sistem Mekanik untuk Mengontrol pH Air Minum Ayam Broiler: Dalam penelitian ini, telah dirancang sebuah sistem mekanik yang mampu mengontrol pH air minum ayam broiler. Sistem ini penting untuk memastikan keseimbangan asam dan basa dalam tubuh ayam, yang berdampak langsung pada kesehatan dan pertumbuhan mereka. Penggunaan Arduino dan Sensor pH: Arduino dipilih sebagai platform mikrokontroler yang mampu mengontrol pH air secara efektif. Sensor pH digunakan untuk mendeteksi tingkat pH air, yang kemudian diproses oleh Arduino untuk memastikan bahwa pH berada dalam rentang yang aman bagi ayam broiler. Implementasi Perangkat Lunak Pengontrol pH: Perangkat lunak yang dikembangkan telah berhasil mengintegrasikan sensor pH dengan Arduino untuk melakukan pengendalian otomatis pH air minum ayam broiler. Implementasi ini memastikan bahwa sistem dapat berfungsi secara mandiri untuk menjaga kualitas air minum.

[1] IT-D-Admin, M. (2022) Optimal Menjaga Kualitas Air Di Peternakan, PT Medion Ardhika Bhakti. Available at: <https://www.medion.co.id/optimal-menjaga-kualitas-air-di-peternakan/> [Diakses pada 25 Mei 2023].

[2] IT-D-Admin, M. (2017) “Menjaga Kualitas Air Di Peternakan”, PT Medion Ardhika Bhakti. Available at: <https://www.medion.co.id/menjaga-kualitas-air-di-peternakan/> [Diakses pada 25 Mei 2023].

[3] Halimatunnisroh, R., Yudiarti, T. and Sugiharto, S. (2017) ‘Jumlah coliform, Bal Dan total Bakteri usus halus ayam broiler yang diberi kunyit (Curcuma domestica)’, Jurnal Peternakan Indonesia (Indonesian Journal of Animal Science), 19(2), p. 79. doi:10.25077/jpi.19.2.79-84.2017.

[4] Efendi, I. (2016) Pengertian Dan Kelebihan Arduino, IT. Available at: <https://www.it-jurnal.com/pengertian-dan-kelebihan-arduino/> [Diakses pada 26 Mei 2023].

[5] Hidayat, K. et al. (2018) ‘Acidifier Alami Air perasaan Jeruk Nipis (citrus aurantiun) Sebagai Pengganti Antibiotik growth promotor ayam broiler’, Jurnal Ilmu Nutrisi dan Teknologi Pakan, 16(2), p. 27. doi:10.29244/jintp.16.2.27-33.

[6] Bala, A., Munaiseche, C.P.C. and Santa, K., 2022. Sistem Kontrol Alat Pengukur Berbasis IoT Menggunakan Fuzzy Tsukamoto Dipeternakan Ayam Broiler Desa Tonsea Lama. JOURNAL OF INFORMATICS ENGINEERING, 3(2), pp.24-30.

[7] M. Wilfrida, K. Halek, ; N G A Mulyantini, and M. Sinlae, “Pengaruh Penambahan Herbal Dalam Air Minum Terhadap Kualitas Fisik Daging Ayam Broiler Addition Of Herbal Ingredients In Drinking Water On The Physical Quality Of Broiler Chicken Meat,” Jurnal Peternakan Lahan Kering, vol. 3, no. 3, pp. 1641–1648, 2021.

[8] Neuman, B., Salosso, Y. and Djonu, A. (2023) ‘Pertumbuhan Ikan Mas (Cyprinus carpio) Yang Dipelihara Dengan PH Yang Mengalami penurunan menggunakan Rendaman Daun Ketapang (terminalia catappa)’, Pena Akuatika : Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan, 22(1), p. 69. doi:10.31941/penaakuatika.v22i1.2661.

[9] Hariyadi, H., Kamil, M. and Ananda, P. (2020) ‘Sistem Pengecekan ph air OTOMATIS MENGGUNAKAN sensor ph probe Berbasis Arduino Pada Sumur Bor’, Rang Teknik Journal, 3(2), pp. 340–346. doi:10.31869/rtj.v3i2.1930.

[10] A. Rahman Hakim, “PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI KERAN AIR OTOMATIS DENGAN SENSOR ULTRASONIK BERBASIS ARDUINO.”

[11] Apa Itu Arduino Ide Dan Arduino sketch ? (2017) AllGoBlog.com. Available at: <http://allgoblog.com/apa-itu-arduino-ide-dan-arduino-sketch/> [Diakses pada 10 Juni 2023]

[12] M. Saleh and M. Haryanti, “RANCANG BANGUN SISTEM KEAMANAN RUMAH MENGGUNAKAN RELAY,” 2017.

[13] A. Fairuz and M. Zubir, “Turbidimeter Design and Analysis: A Review on Optical Fiber Sensors for the

Measurement of Water Turbidity”, *Sensors*, vol.9, 8311-8335, 2009.

[14] roghib.muh, O. (2018) Program Motor Stepper, Program Motor Stepper – Menara Ilmu Mikrokontroller. Available at: <https://mikrokontroller.mipa.ugm.ac.id/2018/10/02/program-motor-stepper/> [Diakses pada 24 Juni 2023]

[15] N. Sholikin, I. A. Rozaq, M. Iqbal, and N. Y. D. Setyaningsih, "Kontrol Kadar pH dan Ketinggian Air pada Kolam Ikan Nila Berbasis IoT," *Jurnal ELKON*, vol. 01, no. 01, pp. 1-6, Desember 2021. ISSN: 2809-140X (Cetak), ISSN: 2809-2244

[16] Q. A'yun and A. N. Laily, "Analisis Fitokimia Daun Pepaya (*Carica papaya* L.) di Balai Penelitian Tanaman Aneka Kacang dan Umbi, Kendalpayak, Malang," *Seminar Nasional Konservasi dan Pemanfaatan Sumber Daya Alam*, 2015, pp. 134-137.

[17] M. Deepak, G. Janaki, and C. Bharatiraja, "Power electronic converter topologies for switched reluctance motor towards torque ripple analysis," *Materials Today: Proceedings*, vol. xxx, pp. xxx-xxx, Dec. 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.284