

RANCANG BANGUN DAN EVALUASI KINERJA INSTRUMEN pH METER DAN TURBIDITY METER BERBASIS ARDUINO UNO UNTUK PENGUKURAN KUALITAS AIR

Irma Nuril Maryam¹⁾, Lusi Marlina²⁾, Muhammad Irsyad Rosadi³⁾

Program Studi Teknik Kimia, Politeknik TEDC^{1),2),3)}

Email: : irmanuril@poltektedc.ac.id¹⁾, lusi@poltektedc.ac.id²⁾, muhammadirsyadrosadi7@gmail.com³⁾

Abstrak

Ketersediaan instrumen pemantau kualitas air yang terjangkau sangat penting untuk laboratorium pendidikan vokasi dengan keterbatasan anggaran. Penelitian ini bertujuan merancang instrumen pengukur pH dan kekeruhan (*turbidity*) berbasis mikrokontroler Arduino Uno, serta mengevaluasi kinerjanya melalui kalibrasi multi-titik dan pengujian sampel air nyata. Sistem mengintegrasikan sensor pH E-201C, sensor *turbidity*, LCD 16×2, modul kartu SD, dan *buzzer*. Kalibrasi sensor pH pada *buffer* (pH 4,00–10,01) menghasilkan hubungan linier $V = -0,1481\text{pH} + 3,8772$ ($R^2 = 0,9901$) dengan rata-rata *error* 1,44%. Kalibrasi sensor *turbidity* (0–1000 NTU) menghasilkan $V = -0,0012\text{NTU} + 2,9575$ ($R^2 = 0,9978$), meski presisinya menurun pada kekeruhan tinggi (%RSD hingga 5,504%). Pengujian sampel air PDAM, sumur, dan sungai menghasilkan nilai pH 7,15; 6,80; dan 7,45 serta kekeruhan 3,8; 12,5; dan 145 NTU. Prototipe ini terbukti memberikan respons konsisten dan layak dijadikan instrumen alternatif untuk praktikum maupun penelitian skala kecil.

Kata Kunci: Arduino Uno; Kalibrasi; Kualitas Air; pH meter; *Turbidity Meter*.

Abstract

The availability of affordable water quality measurement instruments is essential for vocational education laboratories with limited budgets. This study aims to design an Arduino Uno-based pH and turbidity meter and evaluate its performance through multi-point calibration and real water sample testing. The system integrates an E-201C pH sensor, a turbidity sensor, a 16×2 LCD, an SD card module, and a buzzer. The pH sensor calibration (pH 4.00–10.01) yielded a linear relationship of $V = -0.1481\text{pH} + 3.8772$ ($R^2 = 0.9901$) with a mean relative error of 1.44%. The turbidity sensor calibration (0–1000 NTU) resulted in $V = -0.0012\text{NTU} + 2.9575$ ($R^2 = 0.9978$), although precision decreased at higher turbidity levels (%RSD up to 5.504%). Testing on tap, well, and river water samples yielded pH values of 7.15, 6.80, and 7.45, and turbidity values of 3.8, 12.5, and 145 NTU, respectively. The prototype demonstrates consistent measurement responses, serving as a viable alternative for educational practical work and small-scale research.

Keywords: Arduino Uno; Calibration; pH meter; Turbidity Meter; Water Quality.

I. PENDAHULUAN

Air merupakan kebutuhan dasar manusia yang kualitasnya harus senantiasa terjaga dan terpantau, baik untuk keperluan konsumsi, sanitasi, maupun proses industri. Kualitas air ditentukan oleh berbagai parameter fisika, kimia, dan biologi. Derajat keasaman (pH) dan tingkat kekeruhan (*turbidity*) merupakan dua parameter fundamental yang paling sering diukur dalam pemantauan kualitas air. Nilai pH memberikan informasi mengenai sifat asam atau basa air, sedangkan kekeruhan mencerminkan keberadaan partikel tersuspensi yang memengaruhi kualitas fisik air dan proses pengolahannya. Di Indonesia, baku mutu kedua parameter tersebut diatur dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup untuk air permukaan, serta Peraturan Menteri Kesehatan No. 492/MENKES/PER/IV/2010 untuk persyaratan kualitas air minum.

Perkembangan sensor *low-cost* dan mikrokontroler *open-source* memberikan peluang untuk merancang sistem pemantauan kualitas air berbiaya lebih rendah dibandingkan instrumen

laboratorium konvensional. Kajian sistematis terhadap 84 penelitian pemantauan kualitas air berbiaya rendah menunjukkan bahwa teknologi sensor murah semakin banyak diterapkan untuk pemantauan komunitas, pendidikan, dan penelitian. Meskipun demikian, prosedur kalibrasi dan validasi antarpublikasi masih sangat bervariasi. Hanya sekitar 63% studi yang dilaporkan melakukan kalibrasi dan sekitar 52% membandingkan hasil sensor dengan peralatan standar. Temuan tersebut menegaskan perlunya pelaporan metode kalibrasi dan validasi secara lebih sistematis (Hacker et al., 2025).

Penggunaan mikrokontroler Arduino telah diterapkan secara luas dalam sistem pemantauan kualitas air. Rahman (2021) mengembangkan alat ukur kekeruhan berbasis Arduino Uno dan melaporkan bahwa kesalahan pengukuran cenderung lebih besar pada tingkat kekeruhan rendah dibandingkan pada kekeruhan tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik respons sensor *turbidity* tidak selalu seragam pada seluruh rentang pengukuran.

Pengembangan sistem yang lebih komprehensif terus dilakukan. Natasya dan Dzulkifli (2023)

merancang alat pendeteksi kualitas air berbasis Arduino dengan parameter pH, *total dissolved solids* (TDS), suhu, dan *turbidity*. Irawan et al. (2024) mengembangkan sistem pemantauan kualitas air rumah tangga berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan mengacu pada Permenkes Nomor 2 Tahun 2023. Sementara itu, Murti et al. (2024) mengembangkan sistem pemantauan kualitas air berbasis *long-range* IoT yang menandai pergeseran teknologi dari pemantauan lokal menuju pemantauan jarak jauh.

Studi eksperimental terhadap 19 sensor *low-cost* oleh Slongo et al. (2024) menunjukkan bahwa kesalahan relatif sensor bervariasi antar-parameter dan jenis sensor. Walaupun sebagian besar sensor menghasilkan kesalahan relatif $\leq 5\%$, variasi yang lebih besar masih ditemukan pada beberapa parameter. Penelitian tersebut menegaskan bahwa sensor *low-cost* merupakan perangkat komplementer yang wajib melalui evaluasi akurasi dan presisi sebelum digunakan secara luas. Selanjutnya, Singh et al. (2025) membuktikan kelayakan platform portabel berbasis Arduino Uno yang dikalibrasi menggunakan standar terukur hingga mencapai akurasi keseluruhan pada kisaran $\pm 5\%$. Pada aspek lain, Vecchio et al. (2024) menekankan pentingnya konfigurasi optik, pengujian performa, dan kalibrasi dalam pengembangan *turbidimeter* hemat biaya. Al Drees et al. (2026) secara khusus memperlihatkan pentingnya kalibrasi multi-titik, di mana kalibrasi enam titik pada *turbidity* dan tiga titik pada pH mampu menurunkan kesalahan pengukuran *turbidity* dari nilai yang sangat besar menjadi di bawah 10%.

Meskipun penelitian tentang pemantauan berbasis Arduino semakin berkembang, studi yang secara khusus berfokus pada karakteristik kalibrasi, presisi, kesalahan pada berbagai titik pengukuran, serta penerapannya di laboratorium pendidikan vokasi masih perlu diperkuat. Dalam konteks Program Studi D3 Teknik Kimia, instrumen yang dapat dirakit, dikalibrasi, diprogram, dan digunakan ulang memiliki nilai praktis tinggi untuk praktikum instrumentasi, analisis kualitas air, maupun penelitian terapan.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) merancang dan membangun instrumen pH meter dan *turbidity meter* berbasis Arduino Uno; (2) melakukan kalibrasi sensor pH dan *turbidity* menggunakan larutan standar; (3) mengevaluasi karakteristik respons sensor melalui analisis regresi linier, koefisien determinasi (R^2), simpangan baku, dan %RSD; serta (4) menguji kinerja instrumen pada sampel air nyata. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penerapan kalibrasi multi-titik dan evaluasi kinerja dua parameter secara sistematis pada satu prototipe yang dirancang untuk kebutuhan laboratorium pendidikan.

II. LANDASAN TEORI

A. Prinsip Kerja dan Mekanisme Pengukuran pH Meter

pH meter merupakan instrumen elektrokimia berbasis metode potensiometri yang dirancang untuk

mengukur derajat keasaman atau kebasaan suatu larutan berdasarkan aktivitas ion hidrogen (H^+). Secara elektrokimia, sistem ini memanfaatkan elektroda kombinasi yang terdiri atas elektroda indikator (sensitif terhadap ion H^+) dan elektroda pembanding (*reference electrode*). Kontak antara elektroda dengan larutan sampel memicu pertukaran ion pada membran kaca khusus, sehingga menghasilkan beda potensial listrik yang nilainya sebanding dengan konsentrasi ion H^+ . Secara teoritis, hubungan antara beda potensial yang dihasilkan (E) dan aktivitas ion dalam larutan diatur oleh Persamaan Nernst:

$$E = E_0 - \left(\frac{2,303 \cdot R \cdot T}{n \cdot F} \right) \cdot \text{pH}$$

Pada sistem pemantauan modern yang terintegrasi dengan mikrokontroler, sinyal listrik analog berbentuk beda potensial mikro-volt dari elektroda dikondisikan terlebih dahulu oleh modul penguat sinyal (*signal conditioner/amplifier*). Modul ini memperkuat dan mengonversi sinyal menjadi tegangan analog yang proporsional agar dapat dibaca oleh *Analog-to-Digital Converter* (ADC) pada mikrokontroler, untuk selanjutnya dihitung menjadi nilai pH aktual melalui persamaan kalibrasi.

Namun demikian, respons elektroda di lapangan sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor eksternal, seperti perubahan suhu lingkungan, penurunan kualitas larutan penyangga (*buffer*), kontaminasi membran kaca, hingga penuaan komponen elektronik sensor. Oleh karena itu, penerapan kalibrasi multi-titik (*multi-point calibration*) menggunakan beberapa larutan penyangga standar bersertifikat menjadi tahap yang sangat mutlak dilakukan sebelum instrumen digunakan pada sampel nyata (Slongo et al., 2024; Al Drees et al., 2026). Pengembangan pH meter hemat biaya (*low-cost*) berbasis mikrokontroler Arduino telah banyak disajikan dalam literatur ilmiah, antara lain oleh Astria et al. (2014), Ihsanto dan Hidayat (2014), Ngafifuddin et al. (2017), serta Pratami et al. (2020), yang mencatat bahwa prosedur kalibrasi yang tepat mampu menghasilkan tingkat kesalahan relatif (*relative error*) berkisar antara 1,04% hingga 5,39%.

B. Konsep Dasar dan Dinamika Optik *Turbidity* Meter

Turbidity atau kekeruhan merupakan parameter fisika air yang mengukur tingkat pelemahan atau hamburan cahaya akibat ketiadaan transparansi yang disebabkan oleh keberadaan partikel-partikel tersuspensi, seperti lumpur, bahan organik, plankton, dan mikroorganisme. Pengukuran kekeruhan umumnya dinyatakan dalam satuan *Nephelometric Turbidity Unit* (NTU). Sensor *turbidity low-cost* umumnya bekerja menggunakan prinsip optik *nephelometry*, di mana sistem terdiri atas sumber cahaya emisi (seperti LED inframerah) dan detektor penerima optik (seperti fotodiode atau fototransistor). Sinar cahaya dipancarkan menembus media air;

sebagian cahaya akan diteruskan secara lurus, sedangkan sebagian lainnya dibiaskan dan dihamburkan oleh partikel tersuspensi. Detektor optik mengukur intensitas cahaya yang berhasil ditangkap dan mengubahnya menjadi sinyal perubahan tegangan listrik.

Meskipun demikian, respons sensor optik ini tidak selalu bersifat linier sempurna. Faktor-faktor seperti variasi ukuran partikel, warna sampel air, distribusi bentuk padatan, serta konfigurasi jarak geometri antara pemancar dan penerima optik dapat menyebabkan hubungan antara tegangan keluaran dan konsentrasi kekeruhan (NTU) menunjukkan sifat nonlinier, terutama jika diukur pada rentang rentang yang sangat luas (Vecchio et al., 2024). Pengaplikasian mikrokontroler Arduino untuk pengembangan alat ukur kekeruhan air telah dilaporkan oleh Putri dan Harmadi (2018) menggunakan susunan fotodiode, serta Fakhri et al. (2022) untuk pemantauan konsentrasi sedimen tersuspensi.

Meskipun pengintegrasian multi-sensor (pH, *turbidity*, TDS, dan suhu) dalam satu platform mikrokontroler makin marak dilakukan (Novenpa & Dzulkifli, 2020; Reforma et al., 2022), pelaporan metodologis mengenai rinci jumlah replikasi pengukuran, batas deviasi presisi, serta evaluasi statistik pendukung masih sangat terbatas disajikan dalam publikasi-publikasi terdahulu. Padahal, penerapan kalibrasi multi-titik yang dikombinasikan dengan analisis statistik terbukti mampu meningkatkan keandalan instrumen secara signifikan, bahkan berhasil menekan kesalahan pengukuran kekeruhan dari skala ratusan persen (15,75% – 422%) turun hingga di bawah 10% (Al Drees et al., 2026).

III. METODE PENELITIAN

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental yang mencakup perancangan *hardware*, pemrograman mikrokontroler, kalibrasi sensor, serta pengujian sampel.

B. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Unit Input: Sensor pH E-201C beserta modulnya, dan sensor kekeruhan (*turbidity*) beserta modulnya.
2. Unit Pemroses: Mikrokontroler Arduino Uno.
3. Unit Output: Layar LCD 16×2 dengan modul I²C, modul kartu SD, dan *buzzer*.
4. Catu Daya: Baterai 9V dan *power bank*.
5. Instrumen Pembandingan & Bahan Kimia: pH meter digital komersial (ROFA, ketelitian 0,1), larutan penyangga (*buffer*) pH standar (4,00; 6,86; 7,00; 9,18; dan 10,01), serta larutan standar *turbidity* (0, 200, 400, 600, 800, dan 1000 NTU).

C. Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian dilaksanakan melalui urutan berikut:

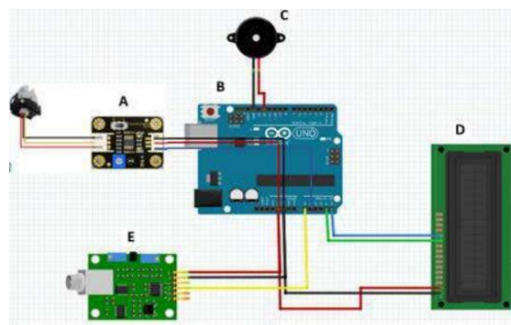
1. Perancangan skematik dan alur rangkaian elektronik.
2. Perakitan komponen periferal dan mikrokontroler.
3. Pemrograman skrip pada ide Arduino (Arduino IDE).
4. Kalibrasi sensor pH menggunakan larutan penyangga standar secara triplikat ($n = 3$).
5. Kalibrasi sensor *turbidity* menggunakan larutan standar kekeruhan secara triplikat ($n = 3$).
6. Pengujian dan validasi instrumen pada sampel air riil (air PDAM, air mineral, air sumur, dan air sungai).

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perangkaian

Rangkaian komponen terintegrasi dengan Arduino Uno ditunjukkan pada Gambar 1, sedangkan hasil perakitan instrumen secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 2.

1. Wiring Diagram

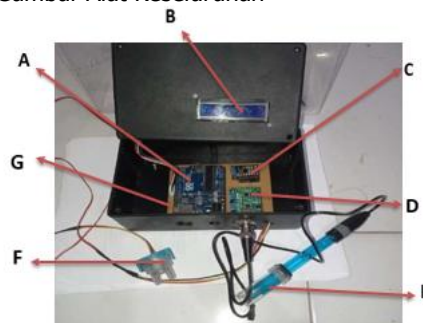


Gambar 1. Wiring Diagram Arduino

Keterangan gambar:

- a. Modul sensor *turbidity*
- b. Arduino uno
- c. Buzzer
- d. LCD 16x2
- e. Modul sensor pH

2. Gambar Alat Keseluruhan



Gambar 2. Alat keseluruhan

Keterangan gambar:

- a. Arduino uno
- b. LCD 16x2
- c. Modul sensor *turbidity*
- d. Modul sensor pH

- e. Sensor pH
- f. Sensor *turbidity*
- g. Buzzer

B. Hasil Kalibrasi Sensor pH.

Hasil pengukuran tegangan output sensor pH pada kelima titik larutan buffer standar, masing-masing dengan tiga kali pengulangan, disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Hasil Kalibrasi Sensor pH (Triplikat, n=3)

Buffer pH	V1	V2	V3	Rata2 (V)
4,00	3,25	3,25	3,25	3,25
6,86	2,89	2,89	2,89	2,89
7,00	2,88	2,88	2,88	2,88
9,18	2,52	2,52	2,52	2,52
10,01	2,36	2,36	2,36	2,36

Berdasarkan hasil analisis regresi linier terhadap data rerata pada Tabel 1, diperoleh persamaan kalibrasi sensor pH sebagai berikut:

$$V = -0,1481 \cdot \text{pH} + 3,8772$$

$$(R^2 = 0,9901)$$

Nilai $R^2 = 0,9901$ mengindikasikan korelasi linier yang sangat kuat antara tegangan keluaran dan nilai pH, sesuai dengan karakteristik potensiometri elektroda kaca berdasarkan hukum Nernst. Persamaan ini kemudian diinversi untuk menghitung nilai pH terukur. Hasil validasi akurasi pembacaan sensor pH disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Validasi Akurasi Sensor pH terhadap Larutan Buffer Standar

pH Std	pH Terukur				% Error
	I	II	III	Rata2	
4,00	4,06	4,04	4,08	4,06	1,50
6,86	6,79	6,84	6,81	6,81	0,73
7,00	7,08	7,11	7,06	7,08	1,14
9,18	9,00	9,12	9,07	9,06	1,31
10,01	10,20	9,98	10,6	10,26	2,5

Rata-rata % *Error* pengukuran pH pada penelitian ini adalah 1,44%, berada dalam rentang yang dilaporkan oleh Pratami dkk. (2020) yang memperoleh error kalibrasi berkisar 1,04%–5,39% pada buffer pH 4, 7, dan 10. Error terbesar terjadi pada titik pH 4,00 dan pH 10,01 (masing-masing 1,5% dan 2,5%), yang mengindikasikan bahwa persamaan regresi tunggal berbasis lima titik belum sepenuhnya menangkap sedikit non-linieritas respons elektroda pada rentang asam hingga netral. Hal ini sejalan dengan prinsip yang ditekankan oleh Ihsanto dan Hidayat (2014) dan Ngafifuddin et al., (2017) mengenai pentingnya kalibrasi multi-titik untuk meningkatkan akurasi sensor pH berbasis Arduino, dan menunjukkan bahwa penambahan titik kalibrasi di sekitar rentang asam-netral berpotensi menurunkan error lebih lanjut.

C. Hasil Kalibrasi Sensor *Turbidity*.

Hasil pengukuran tegangan output sensor *turbidity* pada enam titik larutan standar (0–1000 NTU), masing-masing dengan tiga kali pengulangan, disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Hasil Kalibrasi Sensor *Turbidity* (Triplikat, n=3)

NT U Stan	V1	V2	V3	Rata 2	SD (V)	%RSD
0	2,96	2,97	2,97	2,967	0,0047	0,159
200	2,73	2,74	2,75	2,740	0,0082	0,298
400	2,46	2,44	2,46	2,453	0,0094	0,384
600	2,23	2,23	2,24	2,233	0,0047	0,211
800	2,00	2,02	2,08	2,033	0,0340	1,671
1000	1,67	1,80	1,89	1,787	0,0903	5,504

Berdasarkan hasil analisis regresi linier terhadap data rerata pada Tabel 3, diperoleh persamaan kalibrasi sensor *turbidity* dengan nilai $R^2 = 0,9978$ yang mendekati 1 menunjukkan hubungan linier yang sangat baik antara tegangan output sensor dan nilai *turbidity* larutan standar yaitu:

$$V = -0,0012 \cdot \text{NTU} + 2,9575$$

$$(R^2 = 0,9978)$$

Tabel 4. Validasi Akurasi Sensor *Turbidity* terhadap Larutan Standar

NTU Stand	NTU Terukur		% Error
	I-V	Rata2	
200	227, 236, 220, 227, 234	228,8	14,4
400	413, 422, 434, 417, 427	422,6	5,65
600	622, 610, 606, 615, 622	615	2,5
800	833, 812, 827, 846, 830	829,6	3,7
1000	1000, 1000, 1000, 1000, 982	996,4	0,36

Rata-rata % *Error* pengukuran *turbidity* (tidak termasuk titik 0 NTU, karena persentase kesalahan tidak terdefinisi pada nilai standar nol) pada penelitian ini adalah 5,32%, dengan error terbesar pada titik 200 NTU (14,4%) dan error terendah pada titik 1000 NTU (0,36%). Uji pada Sampel Air.

D. Pembahasan Kinerja dan Pengujian Sampel Air

Secara keseluruhan, sensor pH menunjukkan performa linier yang stabil ($R^2 = 0,9901$) dengan kesalahan relatif yang konsisten rendah pada seluruh rentang pengukuran (0,73%–2,50%). Di sisi lain, sensor *turbidity* menunjukkan dinamika fenomena yang menarik. Nilai % RSD meningkat secara gradual dari 0,159% (0 NTU) menjadi 5,504% (1000 NTU). Peningkatan % RSD ini mengindikasikan penurunan presisi pada tingkat kekeruhan tinggi akibat fluktuasi pembiasan dan hamburan cahaya yang lebih

kompleks. Sebaliknya, nilai % *Error* justru membesar pada NTU rendah (14,40% pada 200 NTU) dan mengecil pada NTU tinggi (0,36% pada 1000 NTU). Besarnya % *Error* pada NTU rendah ini disebabkan oleh sifat matematis perhitungan persentase galat relatif yang sangat sensitif terhadap pembagi berskala kecil, meskipun selisih mutlak pembacaannya relatif kecil. Fenomena ini menegaskan bahwa sensor *turbidity low-cost* memerlukan kalibrasi khusus berfokus pada rentang kekeruhan rendah (< 200 NTU) apabila ingin diperuntukkan bagi pemantauan air bersih atau air minum (Al Drees et al., 2026; Hacker et al., 2025).

Meskipun demikian, secara umum akurasi alat ini (rata-rata % *Error* pH 1,44% dan *turbidity* 5,32%) telah memenuhi kualifikasi perangkat *low-cost* berbasis Arduino (Slongo et al., 2024; Singh et al., 2025). Pengujian instrumen pada berbagai sampel air riil disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengukuran Sampel Air

Sampel	pH	Turbidity (NTU)	Keterangan
Air PDAM	7,15	3,8	Memenuhi baku mutu Kepmenkes 492/2010
Air Mineral	7,09	1	Memenuhi baku mutu Kepmenkes 492/2010
Air Sumur	6,80	12,5	pH memenuhi syarat; kekeruhan melebihi baku mutu air minum
Air Sungai	7,45	145	Kekeruhan tinggi, perlu pengolahan lanjutan

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Instrumen pH meter dan *turbidity meter* berbasis Arduino Uno berhasil dirancang, dirakit, serta dikalibrasi secara sistematis. Kalibrasi sensor pH memberikan persamaan $V = -0,1481 \cdot \text{pH} + 3,8772$ ($R^2 = 0,9901$) dengan rata-rata kesalahan relatif sebesar 1,44%. Kalibrasi sensor *turbidity* menghasilkan persamaan $V = -0,0012 \cdot \text{NTU} + 2,9575$ ($R^2 = 0,9978$) dengan rata-rata kesalahan relatif sebesar 5,32%. Prototipe terbukti mampu membedakan tingkat kualitas sampel air riil (PDAM, mineral, sumur, dan sungai) sesuai baku mutu lingkungan yang berlaku. Dengan demikian, instrumen ini layak diaplikasikan sebagai alternatif alat ukur yang terjangkau untuk kegiatan praktikum dan penelitian skala kecil di lingkungan pendidikan vokasi.

B. Saran

Untuk pengembangan dan penyempurnaan riset ini di masa mendatang, disarankan beberapa hal sebagai berikut:

1. Menambahkan titik kalibrasi pada rentang kekeruhan rendah (< 200 NTU) dan rentang pH mendekati batas ekstrim untuk meningkatkan akurasi spesifik.
2. Menerapkan model regresi nonlinier (seperti polinomial derajat dua) atau metode kalibrasi terfragmentasi (*piecewise calibration*) guna

mengkompensasi ketidaklinieran sensor *turbidity*.

3. Menambahkan fitur kompensasi suhu otomatis (*Automatic Temperature Compensation/ATC*) pada modul sensor pH.
4. Melakukan analisis kalkulasi ketidakpastian pengukuran (*measurement uncertainty*) secara formal.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Drees, M., Rahma, A. E., Daffalla, S., Alsudais, R., Alsubaie, N. F., Albrahim, M., Alghanim, H. A., & Almaghasla, M. I. (2026). IoT-based system for real-time water quality monitoring and advanced turbidity and pH sensor calibration to improve accuracy and reliability using ThingSpeak. *IoT*, 7(2), 42. <https://doi.org/10.3390/iot7020042>
- Astria, F., Subito, M., & Nugraha, D. W. (2014). Rancang bangun alat ukur pH dan suhu berbasis short message service (SMS) gateway. *Jurnal Mektrik*, 1(1), 47–55.
- Fakhrizal, A. B., Romdania, Y., Wahono, E. P., & Herison, A. (2022). Kalibrasi alat ukur sedimen tersuspensi berbasis turbidity sensor. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain (JRSDD)*, 10(4), 591–604. <https://doi.org/10.23960/jrsdd.v10i4.2857>
- Hacker, J., Iqbal, F., Osuna, M., Perea, O., Sánchez, K., Page, C., Torres, J., Uddin, M. N., Walden, H., Westerbeke, M., Woody, A., Rubio Murillo, N. E., Cubas, F., Díaz-Arriaga, F. A., & Rowles, L. S. (2025). Aquatic quality watch informed by communities (AQWIC) facilitating the adoption of low-cost sensor systems for underserved communities: A review and tutorial. *Environmental Science: Advances*, 4, 512–529. <https://doi.org/10.1039/d4va00332b>
- Ihsanto, E., & Hidayat, S. (2014). Rancang bangun sistem pengukuran pH meter dengan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno. *Jurnal Teknologi Elektro*, 5(3), 130–137.
- Irawan, E. H., N., & W. (2024). Prototype of Household Water Quality Monitoring System by Utilizing Internet of Things. *Jurnal Inotera*. <https://doi.org/10.31572/inotera.vol9.iss2.2024.i.d373>
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2010). Peraturan Menteri Kesehatan No. 492/MENKES/PER/IV/2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum. Jakarta: Kemenkes RI.
- Murti, M. A., Saputra, A. R. A., Alinursafa, I., Ahmed, A. N., Yafouz, A., & El-Shafie, A. (2024). Smart system for water quality monitoring utilizing long-range-based Internet of Things. *Applied Water Science*, 14. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02128-z>
- Natasya, A. N., & Dzulkifli, D. (2023). Rancang Bangun Alat Pendeteksi Kualitas Air Minum Berbasis Arduino. *Inovasi Fisika Indonesia*. <https://doi.org/10.26740/ifi.v13n1.p27-33>
- Ngafifuddin, M., Sunarno, & Susilo. (2017). Penerapan rancang bangun pH meter berbasis Arduino pada mesin pencuci film radiografi

- sinar-X. Jurnal Sains Dasar, 6(1), 66–71.
<https://doi.org/10.21831/jsd.v6i1.14081>
- Novenpa, N. N., & Dzulkiflih. (2020). Alat pendeteksi kualitas air portable dengan parameter pH, TDS, dan suhu berbasis Arduino Uno. *Inovasi Fisika Indonesia*, 9, 85–92.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Jakarta: Sekretariat Negara.
- Pratami, L. W. D., Ariswati, H. G., & Titisari, D. (2020). Effect of temperature on pH meter based on Arduino Uno with internal calibration. *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics*, 2(1), 23–27.
<https://doi.org/10.35882/jeeemi.v2i1.5>
- Putri, A. O., & Harmadi. (2018). Rancang bangun alat ukur tingkat kekeruhan air menggunakan fotodiode array berbasis mikrokontroler ATmega328. *Jurnal Fisika Unand*, 7(1), 27–32.
- Rahman, R. (2021). Uji Alat Kekeruhan Air Menggunakan Turbidity Sensor Berbasis Arduino. *Jurnal Ilmu Fisika dan Pembelajarannya (JIFP)*.
<https://doi.org/10.19109/jifp.v5i1.6916>
- Reforma, B., dkk. (2022). Alat pengukur kualitas air bersih berdasarkan tingkat kekeruhan dan jumlah padatan terlarut. *Jurnal Teknologi Elektro*, 13(2), 1–10.
- Singh, A., Arya, R., Choudhary, N., Poudel, N., Arora, P., Maurya, K. K., Mandal, T. K., Sharma, S. K., Kumar, P., Pathak, S., & Pant, R. P. (2025). Design and validation of a low-cost, portable Arduino-based platform for assessing physicochemical drinking water quality across urban and peri-urban areas of Delhi and surrounding regions. *Water Conservation Science and Engineering*, 10(2), 69.
- Slongo, J., Lindino, C., Martins, L. D., Spanhol, F. A., Carneiro, E., & Camargo, E. T. (2024). Evaluation of low-cost sensors to integrate in a water quality monitor for real-time measurements. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(8), 716.
- Vecchio, A., Bini, M., Lazzarotti, M., Luppichini, M., & Palmieri, M. (2024). A Smart, Multi-configuration, and Low-cost System for Water Turbidity Monitoring. *Results in Engineering*.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103116>