# BAB IV
# HASIL DAN PEMBAHASAN

Perkembangan teknologi digital telah mendorong berbagai inovasi di bidang pengelolaan lingkungan, termasuk dalam hal pemantauan kualitas limbah. Salah satu parameter penting dalam pengelolaan limbah adalah nilai pH, yang secara langsung memengaruhi kelarutan dan potensi bahaya logam berat di dalamnya. Untuk menjawab kebutuhan pemantauan yang cepat, akurat, dan efisien, dirancanglah sebuah sistem monitoring pH otomatis yang terintegrasi dengan sensor suhu dan mampu mengirim data secara *real-time* melalui aplikasi berbasis *Internet of Things* (IoT).

Sistem ini dikembangkan dengan tujuan mempermudah proses pengawasan limbah dari berbagai sektor seperti, kegiatan domestik, pertanian, dan industri, serta mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan limbah berkelanjutan. Proses pengembangan alat ini meliputi perancangan komponen *hardware* dan *software*, proses kalibrasi sensor pH SEN0161, serta pengujian sistem pada tujuh jenis sampel limbah. Kombinasi teknologi mikrokontroler berupa modul ESP32, sensor pH SEN0161, dan aplikasi Blynk menjadikan sistem monitoring pada penelitian ini sebagai solusi praktis dan modern untuk mengawasi potensi pencemaran lingkungan akibat logam berat terlarut dalam limbah.

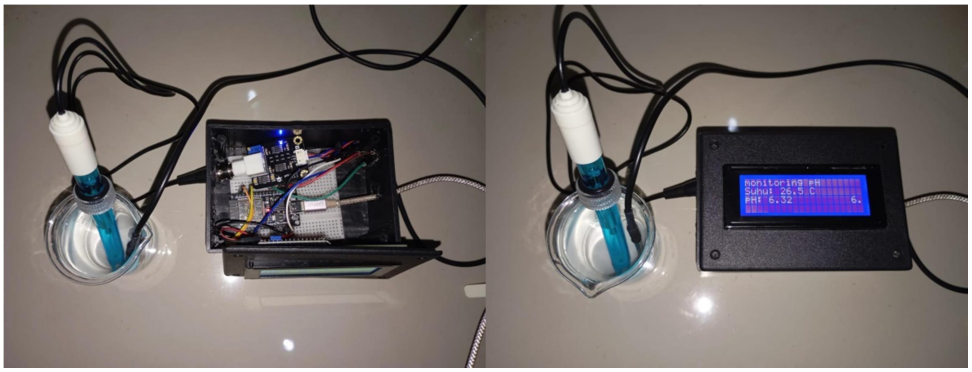
## 4.1 Hasil Rancangan Sistem Monitoring pH Limbah Larutan

Pada penelitian ini, rancang bangun sistem monitoring pH limbah terdiri dari dua komponen utama, yaitu perancangan *hardware* dan *software*. Dengan mengintegrasikan kedua rancangan tersebut, pengguna dapat memantau nilai pH limbah secara jarak jauh dan *real-time* menggunakan *smartphone*, sehingga mendukung pengawasan lingkungan yang lebih efisien dan responsif.

### 4.1.1 Hasil Rancangan *Hardware*

Hasil rancangan sistem pada penelitian ini dirancang untuk memantau nilai pH secara *real-time* dan dilengkapi dengan sensor suhu digital DS18B20 untuk

mengukur suhu larutan. Data suhu digunakan untuk melakukan kompensasi terhadap pembacaan pH, hal ini karena nilai pH dapat berubah tergantung pada suhu larutan.




(a) (b)

**Gambar 4.1** (a) Bagian dalam rancangan alat dan (b) Tampak depan rancangan alat monitoring pH larutan limbah

Hasil pengukuran pH pada hasil rancangan alat ditampilkan secara langsung melalui LCD I2C 20x4, serta dikirimkan ke aplikasi Blynk sebagai platform pemantauan berbasis internet yang memudahkan pengguna untuk memonitor kualitas pH dari jarak jauh melalui *smartphone*. Secara umum, hasil rancangan alat pada penelitian ini mampu melakukan pemantauan pH secara akurat dan stabil, serta dapat merespon setiap terjadi perubahan suhu.

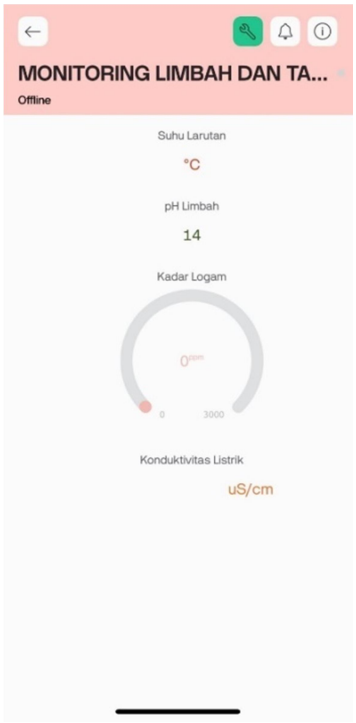
### 4.1.2 Hasil Rancangan *Software*

Rancangan aplikasi Blynk digunakan sebagai antarmuka pengguna untuk memantau data secara *real-time* melalui *smartphone*. Aplikasi ini menampilkan informasi hasil pembacaan sensor pH SEN0161 dan sensor suhu DS18B20 yang dikirimkan oleh modul ESP32 melalui koneksi Wi-Fi. Dengan Blynk, pengguna dapat memantau kondisi limbah dari jarak jauh secara praktis dan efisien.

#### 4.1.2.1 Hasil Rancangan *Software* Aplikasi Blynk

Hasil rancangan *software* untuk sistem monitoring pada *smartphone* melalui aplikasi Blynk dapat dilihat pada Gambar 4.2 di bawah. Dari Blynk tersebut dapat dilakukan monitoring nilai pH dan suhu larutan secara *real-time*.

Dalam tampilan tersebut, setiap parameter ditampilkan dalam bentuk widget digital yang mudah dibaca oleh pengguna. Komponen seperti *value display* digunakan untuk memberikan visualisasi data yang informatif serta memungkinkan pemantauan kondisi limbah secara terus-menerus dari *smartphone* dan dapat diakses dari jarak jauh. Penggunaan Blynk sebagai platform IoT memberikan fleksibilitas dan kemudahan dalam mengintegrasikan sensor fisik dengan aplikasi *mobile* berbasis Android atau iOS. Rancangan ini menunjukkan keberhasilan integrasi antara *hardware* dan *software* dalam sistem monitoring berbasis IoT.




**Gambar 4.2** Tampilan Monitoring pada Blynk

### 4.1.2.2 Hasil Rancangan *Software* Arduino IDE

Hasil rancangan *software* pada Arduino IDE dikembangkan untuk melakukan pembacaan dan pengolahan data dari sensor pH SEN0161 dan sensor suhu DS18B20. *Output* yang ditampilkan ke serial monitor mencakup nilai pH dan suhu yang dibaca oleh kedua sensor. Berikut program yang menunjukkan

integrasi logika perhitungan nilai pH dan kompensasi suhu dalam sistem monitoring pH limbah:

```
// Koneksi ke Blynk
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL6FqeCIwtS"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "MONITORING LIMBAH"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "jYGG7y4mVQ_rsGfv1x1J__35t--OZVL0"

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <WiFi.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>

// Koneksi ESP32 ke Wi-Fi
#define WIFI_SSID "@net-unsri-new"
#define WIFI_PASSWORD ""

// Definisikan pin dan konstanta
#define PH_SENSOR_PIN 34 // Pin analog untuk sensor pH (GPIO34)
#define DS18B20_PIN 4    // Pin untuk sensor suhu DS18B20 (GPIO4)
#define NUM_SAMPLES 50   // Jumlah sampel untuk rata-rata
#define TEMP_REF 25.0    // Suhu referensi larutan buffer (°C)
#define COMP_FACTOR -0.01 // Faktor kompensasi pH per °C

// Inisialisasi OneWire dan DallasTemperature untuk DS18B20
OneWire oneWire(DS18B20_PIN);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

// Inisialisasi LCD I2C (alamat 0x27, 20 kolom, 4 baris)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

float nilaiPH, suhu, nilaiADC;

void setup() {
  Serial.begin(115200); // Memulai komunikasi serial
  sensors.begin();      // Memulai sensor DS18B20

  // Inisialisasi LCD
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Memproses...");
```

```
  // Menghubungkan ke Wi-Fi dan Blynk
  WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Menghubungkan ke Wi-Fi...");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("\nWi-Fi terhubung");

  Blynk.begin(BLYNK_AUTH_TOKEN, WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD);
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("Menghubungkan ke Blynk...");
  while (!Blynk.connected()) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("\nBlynk terhubung");

  lcd.clear();
  delay(1000);
}

void loop() {
  Blynk.run(); // Menjalankan Blynk

  static unsigned long timepoint = millis();
  if (millis() - timepoint > 1000U) { // Membaca setiap 1 detik
    timepoint = millis();

    // Membaca suhu dari DS18B20
    sensors.requestTemperatures();
    suhu = sensors.getTempCByIndex(0);

    // Membaca 50 sampel ADC dari sensor pH
    float sumADC = 0;
    for (int i = 0; i < NUM_SAMPLES; i++) {
      sumADC += analogRead(PH_SENSOR_PIN); // Nilai ADC ESP32 (0-
4095)
      delay(1); // Jeda kecil antar sampel untuk stabilitas
    }
    nilaiADC = sumADC / NUM_SAMPLES; // Rata-rata ADC sebagai float

    // Menghitung nilai pH menggunakan regresi linier
```

```
    nilaiPH = 0.0081 * nilaiADC - 9.4524;

    // Menerapkan kompensasi suhu
    nilaiPH += COMP_FACTOR * (suhu - TEMP_REF);

    // Mengirim data ke Blynk
    Blynk.virtualWrite(V3, suhu);    // Suhu ke Virtual Pin V0
    Blynk.virtualWrite(V0, nilaiPH); // pH ke Virtual Pin V1

    // Menampilkan hasil di Serial Monitor
    Serial.print("Suhu: ");
    Serial.print(suhu, 1);
    Serial.print(" Nilai pH: ");
    Serial.println(nilaiPH, 2);

    // Menampilkan hasil di LCD (20x4)
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Monitoring...");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Suhu: ");
    lcd.print(suhu, 1);
    lcd.print(" C");
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("pH: ");
    lcd.print(nilaiPH, 2);

  }
}
```

## 4.2 Hasil Kalibrasi Sensor pH SEN0161 dan Sensor Suhu DS18B20

### 4.2.1 Hasil Kalibrasi Sensor pH SEN0161

Untuk memastikan akurasi pembacaan suhu dari sensor suhu DS18B20, dilakukan proses kalibrasi dengan membandingkan hasil pengukuran sensor suhu DS18B20 dengan termometer digital. Tabel 4.1 berikut menyajikan hasil pengukuran suhu dari sensor DS18B20 dan nilai suhu dari termometer digital:

**Tabel 4. 1** Perbandingan Pembacaan Sensor Suhu DS18B20

| No | Sampel Uji | Pembacaan Nilai Suhu (°C) | | | | | | Rata-rata | Error (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Termometer Digital | Sensor Suhu DS18B20 | | | | | | |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| 1 | Air mineral | 46,4 | 46,5 | 46,5 | 46,5 | 46,5 | 46,5 | 46,5 | 0,0022 |
| 2 | | 35,4 | 35,5 | 35,5 | 35,5 | 35,5 | 35,5 | 35,5 | 0,0028 |
| 3 | | 30,4 | 30,5 | 30,5 | 30,5 | 30,5 | 30,5 | 30,5 | 0,0033 |
| 4 | | 25,9 | 26,0 | 26,0 | 26,0 | 26,0 | 26,0 | 26,0 | 0,0039 |
| 5 | | 22,0 | 22,0 | 22,0 | 22,0 | 22,0 | 22,0 | 22,0 | 0,0000 |
| **Total** | | | | | | | | **32,1** | **0,0024** |

Untuk melihat karakteristik sensor suhu DS18B20, dilakukan perhitungan parameter statistik berupa bias, standar deviasi, presisi, akurasi, dan *error* yang memberikan gambaran kuantitatif terhadap sejauh mana hasil pengukuran sensor suhu mendekati nilai termometer digital pembanding, serta sejauh mana kestabilan pengukuran sensor dalam kondisi berulang. Hasil perhitungan parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.2 sebagai berikut:

**Tabel 4. 2** Hasil Perhitungan Parameter Statistik Sensor Suhu DS18B20

| No | Sampel Uji | Pembacaan Nilai Suhu (°C) | | Error (%) | Bias | Standar Deviasi | Presisi (%) | Akurasi (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Termometer Digital | Sensor Suhu DS18B20 | | | | | |
| 1 | Air mineral | 46,4 | 46,5 | 0,2155 | 0,0000 | 0,0000 | 100,00 | 99,7845 |
| 2 | | 35,4 | 35,5 | 0,2825 | 0,0000 | 0,0000 | 100,00 | 99,7175 |
| 3 | | 30,4 | 30,5 | 0,3289 | 0,0000 | 0,0000 | 100,00 | 99,6711 |
| 4 | | 25,9 | 26,0 | 0,3861 | 0,0000 | 0,0000 | 100,00 | 99,6139 |
| 5 | | 22,0 | 22,0 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 100,00 | 100,0000 |

| No | Sampel Uji | Pembacaan Nilai Suhu (°C) | | Error (%) | Bias | Standar Deviasi | Presisi (%) | Akurasi (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Termometer Digital | Sensor Suhu DS18B20 | | | | | |
| | **Total** | | | **0,2426** | **0,0000** | **0,0000** | **100,00** | **99,7574** |

Dari data pada Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa nilai *error*nya berkisar antara 0,0000% hingga 0,3861%, dengan rata-rata keseluruhan sebesar 0,2426%. *Error* tertinggi tercatat pada sampel dengan suhu 25,9 dengan nilai 0,3861%, yang masih berada dalam ambang toleransi untuk pengukuran suhu lingkungan. Sementara itu, pada suhu 22,0°C (sampel ke-5), pembacaan nilai suhu pada sensor suhu DS18B20 benar-benar identik dengan pembacaan pada termometer digital.

Nilai bias untuk seluruh pengukuran adalah 0,0000, yang menandakan tidak terdapat penyimpangan antara nilai suhu hasil pembacaan sensor suhu DS18B20 dan termometer digital pembanding. Selanjutnya, nilai standar deviasi dari masing-masing pengukuran sebesar 0,0000, yang menunjukkan tingkat kestabilan dan konsistensi pembacaan sangat tinggi. Hal tersebut memperlihatkan bahwa sensor memberikan *output* yang sangat seragam dalam setiap sampel uji yang sama. Tingkat presisi dari seluruh pengukuran diperoleh sebesar 100,00%, hal ini memperkuat hasil sebelumnya pada perhitungan standar deviasi bahwa sensor memiliki performa yang baik dalam hal kestabilan pembacaan.

Adapun nilai akurasi, yang menggambarkan kedekatan hasil pengukuran dengan nilai termometer digital pembanding, berada di kisaran 99,6139% hingga 100,0000%, dengan rata-rata keseluruhan sebesar 99,7574%. Hasil tersebut menandakan bahwa sensor suhu DS18B20 dapat diandalkan dalam aplikasi pemantauan suhu seperti pada sistem monitoring otomatis berbasis IoT.

### 4.2.2 Hasil Kalibrasi Sensor pH SEN0161

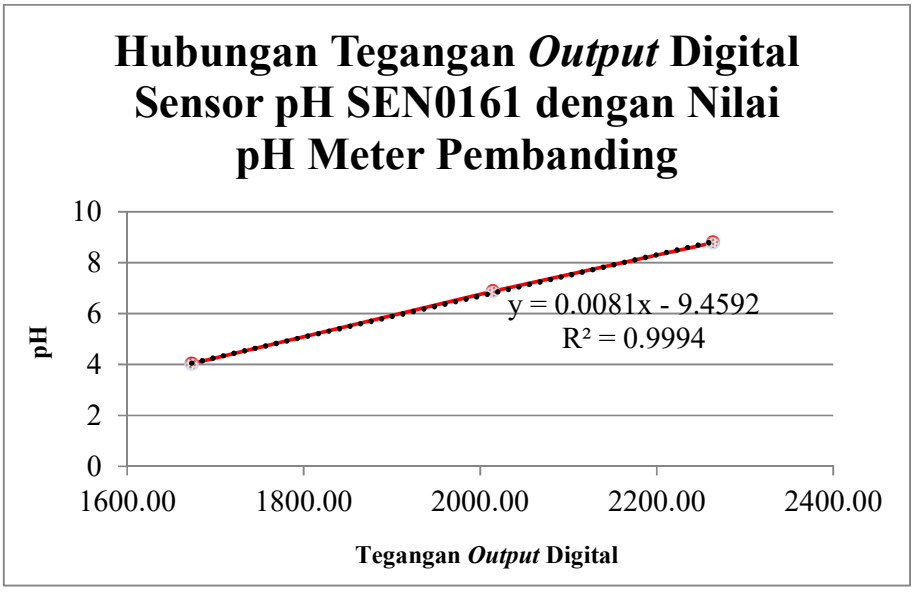
Kalibrasi sensor pH SEN0161 dilakukan dengan memanfaatkan hubungan linier antara tegangan *output* sensor dan nilai pH aktual dari tiap larutan *buffer* yang dibaca oleh pH meter pembanding. Tegangan yang dihasilkan sensor pH SEN0161 di setiap larutan *buffer* dimasukan ke dalam Tabel 4.3, kemudian

dianalisis menggunakan metode regresi linier untuk memperoleh nilai *slope* dan *intersept* menjadi persamaan konversi nilai pH dalam bentuk persamaan $pH = slope * adc + intersept$. Dimana $adc$ merupakan tegangan *output* sensor dalam bentuk digital. Berikut Tabel 4.3 berupa tabel hubungan antara tegangan *output* digital sensor pH SEN0161 dan pH aktual hasil pembacaan pH meter pembanding

**Tabel 4. 3** Nilai Tegangan *Output* (Analog) Sensor pH SEN0161 Terhadap Nilai pH Meter Alat Pembanding

| No | pH Buffer Standar | Suhu (°C) | Nilai pH dari pH meter | Tegangan *Output* Digital Sensor pH SEN0161 (V) Perulangan Ke- | | | | | | | | | | Rata-rata Tegangan *Output* Digital dari Sensor pH SEN0161 (V) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 1 | 4,01 | 27,0 | 4,03 | 1670,98 | 1973,84 | 1674,68 | 1673,74 | 1673,34 | 1673,10 | 1671,98 | 1673,04 | 1675,52 | 1672,74 | 1673,06 |
| 2 | 6,86 | 27,0 | 6,88 | 2012,42 | 2014,00 | 2015,02 | 2017,34 | 2015,20 | 2013,02 | 2013,12 | 2014,56 | 2015,68 | 2014,74 | 2014,07 |
| 3 | 9,18 | 27,0 | 8,79 | 2263,98 | 2262,84 | 2263,18 | 2262,94 | 2263,92 | 2263,24 | 2263,94 | 2263,50 | 2263,90 | 2263,38 | 2263,48 |

Gambar 4.3 memperlihatkan grafik hubungan antara tegangan digital hasil pembacaan sensor pH SEN0161 dan nilai pH yang terbaca pada pH meter pembanding. Grafik ini menggambarkan pola konversi tegangan terhadap nilai pH. Hubungan linier yang terbentuk mencerminkan akurasi persamaan regresi pada proses kalibrasi yang digunakan, sekaligus memperkuat ketepatan metode pemrosesan sinyal yang diterapkan pada sistem. Dari Tabel 4.3 diperoleh grafik seperti Gambar 4.3 berikut:




**Gambar 4.3** Grafik Hubungan Tegangan *Output* Digital Sensor pH SEN0161 terhadap pH

Berdasarkan Gambar 4.3, terlihat adanya hubungan linier antara tegangan digital hasil keluaran sensor SEN0161 dengan nilai pH larutan. Grafik tersebut menunjukkan bahwa kenaikan nilai tegangan digital sebanding dengan peningkatan nilai pH. Persamaan regresi linier yang diperoleh adalah $y = 0{,}0081x - 9{,}4592$, dengan koefisien korelasi $R^2 = 0{,}9994$. Nilai $R^2$ yang mendekati 1 menandakan bahwa model linier tersebut memiliki tingkat akurasi yang sangat tinggi dalam merepresentasikan hubungan antara variabel tegangan dan nilai pH.

Tiga titik kalibrasi yang digunakan, yakni pH 4,03, 6,88, dan 8,79, masing-masing menghasilkan tegangan digital sekitar 1673,06, 2014,07 dan 2263,48. Hal

ini membuktikan bahwa sensor memiliki sensitivitas yang baik terhadap perubahan kadar ion hidrogen dalam larutan. Selain itu, distribusi titik-titik data yang berada tepat di sekitar garis regresi menunjukkan bahwa tidak terdapat deviasi signifikan atau anomali selama proses kalibrasi, yang sekaligus mengindikasikan kestabilan dan reliabilitas sensor.

Dengan demikian, grafik ini mengonfirmasi bahwa metode kalibrasi yang diterapkan sudah sesuai, dan persamaan regresi yang diperoleh dapat digunakan untuk mengkonversi tegangan digital menjadi nilai pH secara akurat dalam implementasi sistem monitoring pH otomatis. Hubungan linier yang ditunjukkan pada grafik menggambarkan bahwa semakin meningkat nilai pH maka tegangannya akan semakin tinggi. Berikut perhitungan hasil regresi linier sensor pH secara teori:

**Menghitung nilai koefisien korelasi Pearson (r)**

Nilai R ini diperoleh dari tegangan *output* digital sensor pH SEN0161 dengan nilai pH aktual yang dibaca oleh pH meter pembanding yang diperoleh pada Tabel 4.1 sebelumnya menggunakan persamaan berikut:

$$R^2 = \frac{n(\Sigma xy) - (\Sigma x)(\Sigma y)}{\sqrt{n(\Sigma x^2) - (\Sigma \mathrm{x})^2}\sqrt{n(\Sigma y^2) - (\Sigma \mathrm{y})^2}}$$

$$R^2 = \frac{3(40495{,}2226) - (5950{,}60)(19{,}70)}{\sqrt{3(11978949{,}4389) - (5950{,}60)^2}\sqrt{3(140{,}8394) - (19{,}70)^2}}$$

$$R^2 = \frac{121485{,}6678 - 117226{,}82}{\sqrt{35936848{,}3167 - 35409640{,}36}\sqrt{422{,}5182 - 388{,}09}}$$

$$R^2 = \frac{4258{,}8478}{\sqrt{527207{,}9567}\sqrt{34{,}4282}}$$

$$R^2 = \frac{4258{,}8478}{4260{,}3780319191}$$

$$R^2 = 0{,}9996408225$$

**Menghitung nilai *slope* dan *intersept***

Rumus regresi linier $y = ax + b$, berikut perhitung nilai *slope* dan *intersept* secara teori:

Menghitung nilai *slope:*

$$a = \frac{\Sigma(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\Sigma(x_i^2 - \bar{x}^2)}$$

$$a = \frac{1419{,}550268}{175700{,}3358}$$

$$a = 0{,}0080793828$$

Menghitung nilai *intersept*:

$$b = \bar{y} - a\bar{x}$$

$$b = 6{,}56667 - (0{,}0080793828)(1983{,}53)$$

$$b = -9{,}4590981312$$

Diperoleh persamaan regresi liniernya sebagai berikut $pH = 0{,}0081 * voltage - 9{,}4592$. Nilai koefisien korelasi Pearson (R) yang diperoleh sebesar 0,9994 (mendekati 1) menunjukkan akurasi pembacaan nilai pH oleh sensor pH SEN0161 tinggi. Untuk perbandingan pembacaan nilai pH antara sensor pH SEN0161 dan pH meter pembanding dapat di lihat pada Tabel 4.2.

**Tabel 4. 4** Pengujian Nilai pH dari Sensor pH SEN0161 dengan Alat Pembanding

| No | pH Buffer Standar | pH Meter | Sensor pH SEN0161 Perulangan Ke- | | | | | | | | | | Rata-rata | *Error* (%) | Rata-rata *Error* (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| 1 | 4,01 | 4,04 | 4,05 | 4,05 | 4,05 | 4,05 | 4,05 | 4,04 | 4,05 | 4,05 | 4,05 | 4,06 | 4,0500 | 0,2475 | |
| 2 | 6,86 | 6,85 | 6,83 | 6,79 | 6,80 | 6,80 | 6,83 | 6,84 | 6,83 | 6,82 | 6,81 | 6,84 | 6,8190 | 0,4526 | 0,2478 |
| 3 | 9,18 | 9,25 | 9,26 | 9,25 | 9,25 | 9,23 | 9,24 | 9,25 | 9,23 | 9,26 | 9,24 | 9,25 | 9,2460 | 0,0432 | |

Hasil pengujian sensor pH SEN0161 terhadap tiga larutan buffer standar (pH 4,01, 6,86, dan 9,18) menunjukkan bahwa sensor pH SEN0161 memiliki tingkat akurasi dan presisi yang sangat baik. Pada larutan buffer pH 4,01 dengan pembacaan referensi dari pH meter sebesar 4,04, hasil rata-rata pembacaan sensor pH SEN0161 tercatat sebesar 4,0500, menghasilkan *error* 0,2475%. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi asam, sensor mampu membaca nilai pH dengan presisi tanpa penyimpangan yang signifikan. Pada larutan buffer netral (pH 6,86), pH meter menunjukkan nilai 6,85 sedangkan sensor pH SEN0161 menghasilkan rata-rata pembacaan 6,8190 dengan *error* 0,4526%, yang masih tergolong sangat rendah dan menunjukkan kemampuan sensor yang baik. Selanjutnya, untuk larutan buffer basa (pH 9,18), pH meter mencatat nilai 9,25, dan sensor pH SEN0161 menunjukkan rata-rata pembacaan sebesar 9,2460, menghasilkan *error* 0,0432%. Nilai *error* tertingginya sebesar 0,4526%, dan rata-rata *error* dari ketiga pengujian adalah 0,2478%, menunjukkan bahwa sensor pH SEN0161 sangat layak digunakan dalam sistem monitoring pH otomatis.Konsistensi nilai antar perulangan pembacaannya juga terlihat stabil, menandakan bahwa sensor pH SEN0161 memiliki performa yang tidak hanya akurat tetapi juga presisi.

## 4.3 Pembahasan Uji Karekteristik Sensor

Pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian terhadap larutan limbah yang digunakan untuk sistem monitoring otomasi pH larutan limbah. Pengujian sistem monitoring otomasi pH larutan limbah ini dilakukan dengan pengujian pembacaan nilai pH larutan limbah dari sensor pH SEN0161 dengan pH meter, pengujian validasi data pada serial monitor, LCD dan Blynk, dan pengujian waktu komunikasi data aplikasi Blynk untuk mengetahui rancang bangun otomasi pH larutan limbah sesuai dengan parameter kelayakan instrumen yang berlaku.

### 4.4.1 Hasil Pengujian Sistem Monitoring Otomasi pH pada Sampel Limbah Larutan

Pengujian sistem rancang bangun alat monitoring otomasi pH limbah ini bertujuan untuk mengevaluasi performa sensor pH SEN0161 dalam mendeteksi pH berbagai jenis sampel limbah secara akurat dan presisi. Sistem diuji

menggunakan enam jenis sampel, berupa aquades sebagai kontrol, limbah buatan dengan konsentrasi timbal (0,002 dan 0,003 gram), serta air sungai dari Pasar Indralaya, Desa Bakung, Danau Perumahan, dan Danau Teluk Seruo. Kalibrasi dilakukan menggunakan larutan *buffer* standar pH 4,01, 6,86, dan 9,18, dengan pembanding berupa pH meter. Kalibrasi dilakukan berdasarkan hasil pembacaan tegangan dan pH aktual dari larutan buffer standar yang telah dilakukan sebelumnya. Pengambilan data dilakukan sebanyak 10 kali untuk setiap sampel. Evaluasi karakteristik alat dilakukan dengan menghitung nilai rata-rata, bias, standar deviasi, akurasi, presisi, dan *error*, sebagai dasar penilaian performa alat monitoring otomasi pH limbah. Data hasi pengujian diperoleh pada Tabel 4.5 di bawah ini:

**Tabel 4. 5** Hasil Pengujian Sistem Monitoring Otomasi pH pada Sampel Limbah Larutan

| No | Larutan Uji | Suhu (°C) | pH Meter | Sensor pH SEN0161 | | | | | | | | | | Rata-rata | Error (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| 1 | Aquades | 26.5 | 6.90 | 6.90 | 6.89 | 6.89 | 6.91 | 6.90 | 6.91 | 6.91 | 6.93 | 6.91 | 6.93 | 6.9080 | 0.1159 |
| 2 | Timbal 0,002 mg | 27.0 | 6.87 | 6.68 | 6.69 | 6.69 | 6.7 | 6.7 | 6.67 | 6.69 | 6.69 | 6.69 | 6.69 | 6.6890 | 2.6346 |
| 3 | Timbal 0,003 mg | 27.0 | 6.84 | 6.65 | 6.65 | 6.65 | 6.68 | 6.66 | 6.65 | 6.66 | 6.66 | 6.65 | 6.65 | 6.6560 | 2.6901 |
| 4 | Air sungai Pasar Indralaya | 26.5 | 6.67 | 6.65 | 6.67 | 6.67 | 6.66 | 6.68 | 6.66 | 6.67 | 6.67 | 6.67 | 6.68 | 6.6680 | 0.0300 |
| 5 | Air sungai Desa Bakung | 27.0 | 5.71 | 5.72 | 5.72 | 5.71 | 5.71 | 5.71 | 5.71 | 5.71 | 5.73 | 5.71 | 5.73 | 5.7160 | 0.1051 |
| 6 | Air danau perumahan | 26.5 | 6.71 | 6.70 | 6.71 | 6.72 | 6.71 | 6.71 | 6.71 | 6.70 | 6.71 | 6.71 | 6.71 | 6.7090 | 0.0149 |
| 7 | Air danau Teluk Seruo | 26.5 | 4.10 | 3.99 | 3.99 | 3.99 | 3.99 | 3.99 | 3.99 | 3.99 | 3.99 | 3.99 | 3.98 | 3.9890 | 2.7073 |

Berdasarkan data hasil pembacaan nilai sensor pada ketujuh sampel pada Tabel 4.3 di atas, selanjutnya dilakukan analisis terhadap karakteristik sensor pH SEN0161 untuk mengetahui kinerja dan keakuratannya. Analisis karakteristik sensor pH SEN0161 dilakukan berdasarkan perhitungan nilai bias, standar deviasi, akurasi, presisi, dan *error*. Berikut contoh perhitungan teorinya pada sampel aquades:

- **Rata-rata**

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}$$

$$\bar{X} = \frac{6{,}90+\ \ ,89+6.89+6{,}91+6{,}90+6{,}91+6{,}91+\ \ ,93+6{,}91+6{,}93}{10}$$

$$\bar{X} = \frac{69{,}08}{10}$$

$$\bar{X} = 6{,}908$$

- **Bias**

$$Bias = |X_b - \bar{X}|$$

$$Bias = |6{,}90 - 6{,}9080|$$

$$Bias = 0{,}0080$$

- **Standar deviasi**

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(|X_i - \bar{X}|)^2}{9-1}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{0{,}00176}{9}}$$

$$\sigma = \sqrt{0{,}0001955556}$$

$$\sigma = 0{,}013984118$$

- **Akurasi**

$$Akurasi = \left(1 - \frac{Bias+3\sigma}{X_b}\right) x100\%$$

$$Akurasi = \left(1 - \frac{0{,}0080+3(0{,}013984118)}{6{,}90}\right) x100\%$$

$$Akurasi = \left(1 - \frac{0{,}049952354}{6{,}90}\right) x100\%$$

$$Akurasi = 99{,}2760528406$$

- **Presisi**

$$Presisi(\%) = \left(1 - \frac{3(0{,}013984118)}{6{,}91}\right) x100\%$$

$$Presisi(\%) = (0{,}9939287476)x100\%$$

$$Presisi(\%) = 99{,}3928747612\%$$

- ***Error***

$$Error\ (\%) = \left|\frac{\overline{X_b} - \bar{X}}{\overline{X_b}}\right| x100\%$$

$$Error\ (\%) = \left|\frac{6{,}90 - 6{,}9080}{6{,}90}\right| x100\%$$

$$Error\ (\%) = 0{,}115942029\%$$

Nilai parameter statistik tiap sampel dapat dilihat pada Tabel 4.6 berikut:

**Tabel 4. 6** Nilai Hasil Uji Karakteristik Sensor pH SEN0161

| No | Larutan Uji | Suhu (°C) | Nilai PH | | Bias | Standar Deviasi | Akurasi (%) | Presisi (%) | Error (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | pH Meter | Sensor pH SEN0161 | | | | | |
| 1 | Aquades | 26,5 | 6,90 | 6,9080 | 0,0080 | 0,0140 | 99,2761 | 99,3927 | 0,1159 |
| 2 | Timbal 2,0 mg | 27,0 | 6,87 | 6,6890 | 0,1810 | 0,0088 | 97,3654 | 99,6073 | 2,6346 |
| 3 | Timbal 3,0 mg | 27,0 | 6,84 | 6,6560 | 0,1840 | 0,0097 | 97,3099 | 99,5646 | 2,6901 |
| 4 | Air sungai Pasar Indralaya | 26,5 | 6,67 | 6,6680 | 0,0020 | 0,0092 | 99,6167 | 99,5866 | 0,0300 |
| 5 | Air sungai Desa Bakung | 27,0 | 5,71 | 5,7160 | 0,0060 | 0,0084 | 99,4519 | 99,5574 | 0,1051 |
| 6 | Air danau perumahan | 26,5 | 6,71 | 6,7090 | 0,0010 | 0,0057 | 99,7611 | 99,7462 | 0,0149 |
| 7 | Air danau Teluk Seruo | 26,5 | 4,10 | 3,9890 | 0,1110 | 0,0032 | 97,2927 | 99,7622 | 2,7073 |
| **Rata-rata** | | | | | 0,0704 | 0,0084 | 98,5820 | 99,6024 | 1,1854 |

Pengujian sensor pH SEN0161 dilakukan terhadap tujuh jenis larutan, termasuk aquades sebagai larutan pembanding. Hasil pengukuran dibandingkan dengan nilai pH dari pH meter pembanding sebagai acuan. Pengambilan data nilai pH larutan diuji dilakukan sebanyak sepuluh kali perulangan untuk memperoleh rata-rata pembacaan sensor dan menghitung presentase *error* terhadap nilai pembanding. Secara umum, sensor pH SEN0161 menunjukkan kestabilan pembacaan yang baik, dengan selisih antar data yang kecil, meskipun akurasinya terhadap pH meter bervariasi tergantung jenis larutan yang diuji.

Aquades sebagai larutan kontrol menunjukkan performa yang sangat baik dengan rata-rata pembacaan 6,9080 dan *error* hanya 0,1159%. Hal ini menunjukkan bahwa sensor bekerja sangat baik dalam larutan dengan kondisi netral dan minim ion. Pengujian pada air sungai Pasar Indralaya juga menunjukkan *error* relatif kecil sebesar 0,0300% dan pada air sungai Desa Bakung menunjukkan kinerja sensor yang sangat baik dengan *error* hanya 0,1051%, hal tersebut menunjukkan bahwa sensor cukup optimal untuk mengukur pH pada air dengan keasaman ringan. Pada air danau perumahan, sensor mencatatkan performa terbaik dengan *error* terendah yakni 0,0149%, mengindikasikan bahwa sensor sangat sesuai digunakan pada air yang cenderung stabil dan minim kontaminan. Berbeda dengan yang ditunjukkan pada air danau Teluk Seruo, yang memiliki pH asam (3,99), sensor memberikan pembacaan dengan *error* tertinggi sebesar 2,7073%. Dilihat dari lokasinya dan aktivitas manusia disekitar danau tersebut, pH air yang bersifat asam dapat saja disebabkan oleh karakteristik alami lingkungan yang mengandung berbagai senyawa yang dapat memengaruhi pH air dan memengaruhi elektroda sensor sehingga hasil pembacaannya memiliki *error* yang lebih tinggi dibanding sampel air limbah lingkungan lainnya. Nilai *error* pada pembacaan pH air danau Teluk Seruo ini dekat dengan nilai *error* pembacaan pH pada larutan limbah buatan yang mengandung logam berat timbal.

Pada larutan yang mengandung timbal (0,002 gram dan 0,003 gram), sensor juga menunjukkan penurunan akurasi dengan *error* masing-masing 2,6346% dan

2,6901%. Meskipun nilai ini masih dalam batas toleransi yaitu sebesar 5% (Shcherbina et al., 2017), peningkatan *error* ini menunjukkan bahwa keberadaan ion logam berat seperti $Pb^{2+}$ dapat memengaruhi sensitivitas sensor. Hal tersebut karena ion $Pb^{2+}$ dapat mengganggu pembacaan pH karena sifatnya yang mudah berinteraksi dengan permukaan elektroda sensor pH SEN0161. Ion ini bisa mengganggu kerja sensor dengan menempel atau bereaksi di permukaan elektroda, sehingga mengubah sinyal yang seharusnya hanya dipengaruhi oleh ion $H^+$.

Dari semua hasil pengujian terhadap tujuh sampel larutan, sensor pH SEN0161 menunjukkan tingkat akurasi tinggi dan presisi yang tinggi dengan nilai *error* pengukuran selalu berada di bawah 1,2%. Hal tersebut membuktikan bahwa sensor pH SEN0161 mampu menghasilkan pembacaan pH yang sangat dekat dengan standar alat pembanding, sehingga membuat sensor pH SEN0161 layak untuk digunakan dalam berbagai aplikasi pemantauan kualitas air.

### 4.4.2 Pengaruh Suhu terhadap Nilai pH

Tabel 4.7 menyajikan data pengaruh suhu terhadap tegangan *output* digital dari sensor pH SEN0161 pada sampel air sungai Pasar Indralaya. Pengukuran dilakukan dalam lima variasi suhu, mulai dari 14,0°C hingga 50,5°C, dengan masing-masing suhu diukur sebanyak sepuluh kali perulangan. Data ini bertujuan untuk mengevaluasi hubungan antara suhu larutan dengan respon tegangan dari sensor pH secara kuantitatif.

**Tabel 4. 7** Pengaruh Suhu Larutan Sampel Air Sungai Pasar Indralaya terhadap Tegangan *Output*

| No | Sampel | Suhu (°C) | Tegangan *Output* Digital Sensor pH SEN0161 (V) Perulangan Ke- | | | | | | | | | | Rata-rata Tegangan *Output* Digital dari Sensor pH SEN0161 (V) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 1 | Air sungai pasar Indralaya | 14,0 | 2453,92 | 2469,39 | 2466,52 | 2463,38 | 2468,18 | 2460,65 | 2471,32 | 2454,06 | 2461,09 | 2461,59 | 2463,01 |
| 2 | | 23,5 | 2388,78 | 2380,32 | 2382,84 | 2382,04 | 2378,48 | 2375,19 | 2376,79 | 2380,01 | 2381,89 | 2380,71 | 2380,71 |
| 3 | | 30,5 | 2225,64 | 2222,53 | 2215,70 | 2209,29 | 2203,42 | 2201,29 | 2195,79 | 2193,77 | 2196,11 | 2195,63 | 2205,92 |
| 4 | | 37,5 | 2007,44 | 2008,22 | 2006,45 | 2008,14 | 2008,39 | 2008,11 | 2008,23 | 2007,93 | 2007,02 | 2008,39 | 2007,83 |
| 5 | | 50,5 | 1986,55 | 1984,40 | 1986,71 | 1987,02 | 1987,2 | 1986,48 | 1985,97 | 1985,69 | 1987,16 | 1986,78 | 1986,50 |

Berdasarkan data pada Tabel 4.7 di atas, terlihat bahwa peningkatan suhu larutan air sungai dari Pasar Indralaya berbanding terbalik dengan tegangan *output* digital yang dihasilkan oleh sensor pH SEN0161. Rata-rata tegangan yang terbaca menurun secara konsisten seiring naiknya suhu dari 14,0°C hingga 50,5°C. Tegangan tertinggi tercatat pada suhu terendah yaitu 2463,01 pada 14,0°C, sedangkan tegangan terendah sebesar 1986,50 yang terjadi pada suhu tertinggi 50,5°C. Secara kuantitatif, penurunan total tegangan mencapai 476,51 dalam rentang suhu 36,5°C, yang menunjukkan adanya penurunan rata-rata sekitar 13,06 per derajat Celsius. Pola penurunan ini menandakan bahwa sensor memiliki sensitivitas terhadap suhu, dan tanpa adanya kompensasi suhu, pembacaan pH dapat mengalami deviasi yang cukup signifikan. Oleh karena itu, kompensasi suhu menjadi salah satu aspek penting dalam penerapan sensor pH SEN0161 untuk sistem monitoring pH yang presisi dan akurat di lingkungan nyata.

### 4.4.3 Hasil Pengujian Validasi Data *Output* Pada Media Antarmuka Pengguna

Pada pengujian validasi data *output*, dilakukan analisis hasil pengujian validasi data *output* pH yang diperoleh dari berbagai media antarmuka pengguna, yaitu Serial Monitor, LCD I2C 20x4, dan aplikasi Blynk melalui pengamatan manual. Pengujian bertujuan untuk memastikan konsistensi antara nilai pH yang ditampilkan pada setiap media dengan nilai pH yang dijadikan referensi utama dari pembacaan sensor pH SEN0161. Data yang dikumpulkan akan dibandingkan dan dianalisa untuk menilai akurasi sistem dalam menampilkan nilai pH pada antarmuka pengguna. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 4.8, di bawah ini:

**Tabel 4. 8** Pengujian Validasi *Output* Hasil Pembacaan pH pada Media Tampilan

| No | Serial Monitor | LCD | Blynk | Keterangan |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | Valid |
| 2 | 5,73 | 5,73 | 5,73 | Valid |
| 3 | 5,76 | 5,76 | 5,76 | Valid |

| No | Serial Monitor | LCD | Blynk | Keterangan |
|---|---|---|---|---|
| 4 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | Valid |
| 5 | 5,76 | 5,76 | 5,76 | Valid |

Berdasarkan Tabel 4.8, pengujian dilakukan untuk memverifikasi kesesuaian nilai pH yang ditampilkan pada tiga media antarmuka, yaitu Serial Monitor, LCD, dan Aplikasi Blynk. Masing-masing media menerima *input* data yang sama dari sensor pH yang telah diproses melalui mikrokontroler ESP32. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa seluruh data yang ditampilkan pada ketiga media tersebut konsisten dan identik. Tidak ditemukan perbedaan nilai maupun keterlambatan tampilan pada media antarmuka dalam kondisi pengujian yang stabil. Seluruh nilai pH yang ditampilkan pada tiap media antarmuka dalam tiap waktu pengambilan data menunjukkan nilai pembacaan yang sama (valid), yang mengindikasikan bahwa integrasi sistem antara *hardware* dan *software* telah berjalan dengan baik. Hal ini menunjukkan bahwa komunikasi data *real-time* dari sensor ke berbagai media antarmuka telah berhasil dilakukan.

### 4.5 Hasil Monitoring pH Limbah

Berdasarkan data hasil monitoring pengukuran pH pada sampel limbah selama dua hari pengamatan yang dapat dilihat pada Lampiran 7 data monitoring pH limbah, terlihat adanya penurunan nilai pH yang signifikan dari waktu ke waktu. Pada awal pengukuran tanggal 14 Mei 2025 pukul 07.19, nilai pH tercatat sebesar 5,72. Namun, seiring berjalannya waktu, nilai pH mulai mengalami penurunan bertahap, hingga mencapai sekitar 4,88 pada pukul 22.33. Pada pembacaan hari berikutnya, 15 Mei 2025, nilai pH terus menurun dengan kecepatan penurunan yang lebih lambat dibandingkan hari sebelumnya, di mana nilai pH mencapai titik terendah sebesar 3,98. Penurunan pH ini bisa diakibatkan oleh karakteristik limbah yang berubah, penurunan pembacaan pH yang terjadi, juga disebabkan dari performa sensor yang menurun akibat kontaminasi dari limbah yang mempengaruhi elektroda sensor pH SEN0161.