

# Analisis Pengaruh Kadar Amonia terhadap Biota pada Sistem Akuaponik Berbasis IoT Menggunakan Sensor Fusion dan K-Means

Cindy Pakpahan, Erna Budhiarti Nababan, Baihaqi Siregar\*, Opim Salim Sitompul, Hayatunnufus

Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi, Magister Sains Data Dan Kecerdasan Buatan, Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia

Email: <sup>1</sup>cindy@students.usu.ac.id, <sup>2</sup>ernabr@students.usu.ac.id, <sup>3</sup>baihaqi@usu.ac.id, <sup>4</sup>opim@usu.ac.id, <sup>5</sup>hayatunnufus@usu.ac.id

Email Penulis Korespondensi: \*baihaqi@usu.ac.id

Submitted 21-05-2026; Accepted 17-06-2026; Published 30-06-2026

## Abstrak

Sistem akuaponik menggabungkan budidaya ikan dan tanaman dalam satu siklus produksi, namun keberhasilannya sangat bergantung pada kualitas air, terutama kadar amonia yang dapat membahayakan biota jika tidak terpantau. Penelitian ini membangun sistem pemantauan berbasis IoT menggunakan ESP32 dengan delapan sensor (pH, suhu air, suhu udara, kelembapan, DO, EC, TDS, dan amonia) yang diintegrasikan melalui pendekatan sensor fusion. Data sensor diolah menggunakan mean imputation dan normalisasi Z-score, kemudian dianalisis dengan Pearson Correlation untuk seleksi fitur dan K-Means clustering untuk mendeteksi anomali pada sistem akuaponik *Channa striata* dan *Amaranthus sp.* Hasil menunjukkan bahwa amonia berkorelasi paling kuat dengan pH ( $r = 0,50$ ), sementara parameter lain memiliki korelasi lebih rendah. K-Means berhasil membedakan kondisi normal dari anomali secara otomatis, dan pengujian biologis mengonfirmasi bahwa pertumbuhan optimal terjadi pada kadar amonia di bawah 1 mg/L. Dibanding sistem monitoring berbasis parameter tunggal, pendekatan multivariat ini memberikan gambaran kondisi lingkungan yang lebih menyeluruh dan dapat menjadi dasar pengembangan sistem akuaponik cerdas yang efisien dan berkelanjutan.

**Kata Kunci:** Akuaponik; Amonia; Sensor Fusion; K- Mean Clustering; Pertanian Berkelanjutan

## Abstract

Aquaponic systems integrate fish and plant cultivation in a single production cycle, but their success depends heavily on water quality particularly ammonia levels, which can be harmful to living organisms if left unmonitored. This study develops an IoT-based monitoring system using an ESP32 microcontroller equipped with eight sensors (pH, water temperature, air temperature, humidity, DO, EC, TDS, and ammonia) integrated through a sensor fusion approach. Sensor data were processed using mean imputation and Z-score normalization, then analyzed with Pearson Correlation for feature selection and K-Means clustering for anomaly detection in an aquaponic system cultivating *Channa striata* and *Amaranthus sp.* Results show that ammonia correlates most strongly with pH ( $r = 0.50$ ), while correlations with other parameters were relatively low. K-Means successfully distinguished normal from anomalous conditions automatically, and biological testing confirmed that optimal growth occurred at ammonia levels below 1 mg/L. Compared to single-parameter monitoring systems, this multivariate approach provides a more comprehensive picture of environmental conditions and offers a foundation for developing smart, efficient, and sustainable aquaponic systems.

**Keywords:** Aquaponics; Ammonia; Sensor Fusion; K-Means Clustering; Sustainable Farming

## 1. PENDAHULUAN

Permasalahan ketahanan pangan dan keterbatasan lahan perkotaan mendorong pengembangan sistem budidaya yang efisien dan berkelanjutan. Akuaponik merupakan sistem terintegrasi antara akuakultur dan hidroponik, di mana limbah nitrogen dari ikan dimanfaatkan sebagai nutrisi tanaman, sementara tanaman menyaring air yang dikembalikan ke kolam [1], [2]. Sistem ini terbukti hemat lahan, minim penggunaan pupuk kimia, dan mampu menghasilkan dua komoditas sekaligus dalam satu siklus produksi [3], [4], [5].

Keberhasilan sistem akuaponik sangat bergantung pada kestabilan kualitas air, khususnya kadar amonia. Meskipun amonia dalam jumlah terkendali berperan sebagai sumber nutrisi tanaman, akumulasi amonia bebas ( $\text{NH}_3$ ) yang berlebihan dapat bersifat toksik bagi organisme dalam sistem [6], [7]. Pada ikan, paparan  $\text{NH}_3$  yang melebihi ambang batas dapat menyebabkan kerusakan insang, stres oksidatif, gangguan sistem imun, hingga kematian [8]. Studi pada *Channa striata* menunjukkan bahwa paparan  $\text{NH}_3$  berkelanjutan di atas 0,54 mg/L dapat menghambat pertumbuhan dan meningkatkan risiko kematian [9]. Pada tanaman, kadar amonia yang tinggi mengganggu penyerapan nutrisi dan menyebabkan pertumbuhan terhambat, sebagaimana ditunjukkan oleh studi akuaponik dengan *Amaranthus hybridus* menunjukkan penurunan biomassa pada kondisi akumulasi amonia berlebih [10]. Faktor lingkungan seperti pH dan suhu turut memperparah toksisitas, karena  $\text{NH}_3$  semakin beracun pada kondisi pH dan suhu tinggi [11].

Berbagai penelitian telah mengembangkan sistem monitoring akuaponik berbasis IoT, umumnya menggunakan satu atau dua parameter untuk mendeteksi anomali [12], [13]. Namun, pendekatan parameter tunggal memiliki keterbatasan karena kondisi anomali dalam sistem akuaponik bersifat multivariat — melibatkan interaksi simultan antara pH, suhu, DO, EC, TDS, dan amonia. Kajian yang mengintegrasikan sensor fusion multisensor dengan analisis korelasi dan clustering untuk deteksi anomali amonia pada sistem akuaponik skala kecil, khususnya dengan objek *Channa striata* dan *Amaranthus sp.*, masih sangat terbatas.

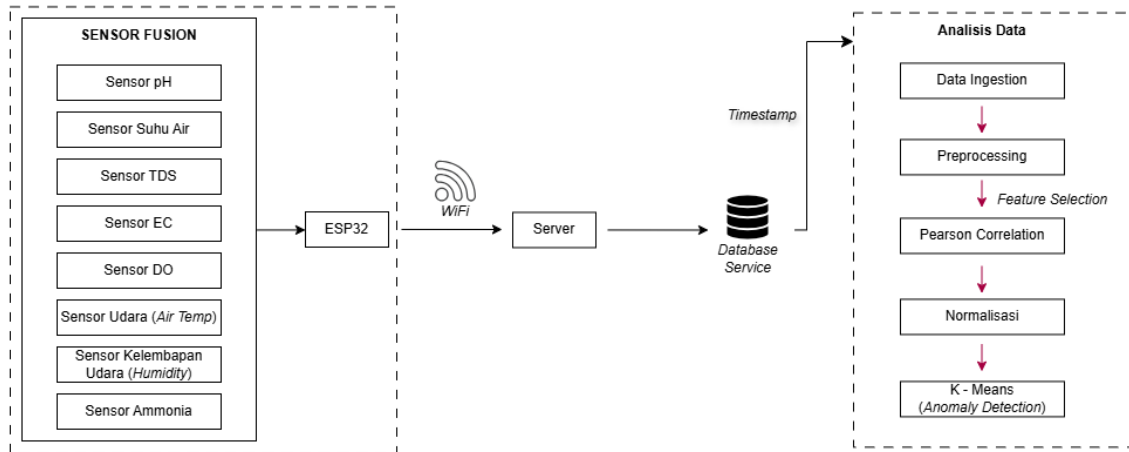
Penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan akuaponik berbasis IoT menggunakan *sensor fusion* delapan parameter yang dianalisis dengan *Pearson Correlation* untuk seleksi fitur dan *K-Means Clustering* untuk deteksi anomali. Berbeda dari sistem sebelumnya yang berbasis parameter tunggal, pendekatan multivariat ini dirancang untuk

memberikan gambaran kondisi lingkungan yang lebih komprehensif dan akurat sebagai dasar pengelolaan sistem akuaponik yang efisien dan berkelanjutan.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1 Arsitektur Umum

Berikut merupakan tahapan penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Arsitektur Umum

Selama periode pengamatan sistem akuaponik berlangsung, data dikumpulkan secara otomatis melalui sistem *sensor fusion* yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32. Sistem ini dirancang untuk memantau berbagai parameter lingkungan meliputi suhu air, pH, oksigen terlarut (DO), daya hantar listrik (EC), jumlah zat padat terlarut (TDS), suhu udara, kelembapan udara, dan konsentrasi amonia (NH<sub>3</sub>). Seluruh parameter direkam secara kontinu setiap 60 detik, menghasilkan lebih dari 22.568 baris data selama kurang lebih satu bulan pengamatan. Setiap data dilengkapi *timestamp*, dikirim melalui *Wi-Fi* ke server, dan disimpan dalam *Database Service* [14]

Arsitektur sistem terdiri dari tiga lapisan utama. Pertama, *Sensor Fusion Layer*, yaitu lapisan pengambilan data dari delapan sensor secara simultan melalui ESP32. Kedua, *Communication Layer*, yang menangani transmisi data nirkabel dari ESP32 ke server secara real-time. Ketiga, *Data Analytics Layer*, tempat berlangsungnya seluruh proses pengolahan data mulai dari *data ingestion*, *preprocessing*, *feature selection*, normalisasi, hingga deteksi anomali menggunakan *K-Means*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.

Pada tahap *preprocessing*, nilai kosong (*missing values*) yang disebabkan oleh gangguan pembacaan sensor ditangani menggunakan metode *mean imputation*, yaitu menggantikan nilai kosong dengan nilai rata-rata parameter yang bersangkutan [15]. Metode ini dipilih karena mampu mempertahankan jumlah observasi dan menjaga kestabilan distribusi data. Selanjutnya, data dinormalisasi menggunakan *Z-score* agar seluruh parameter memiliki skala yang sebanding [16]:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

di mana  $z$  adalah nilai yang dinormalisasi,  $x$  adalah nilai asli,  $\mu$  adalah rata-rata, dan  $\sigma$  adalah standar deviasi kolom tersebut. Hasil normalisasi menghasilkan data dengan rata-rata mendekati 0 dan varians mendekati 1. Setelah normalisasi, dilakukan *feature selection* menggunakan *Pearson Correlation* untuk mengidentifikasi parameter yang paling berpengaruh terhadap kadar amonia [17]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

di mana  $r$  adalah koefisien korelasi,  $x$  adalah nilai parameter lingkungan,  $y$  adalah nilai amonia, dan  $n$  adalah jumlah data. Nilai  $r$  berkisar antara  $-1$  hingga  $+1$ , di mana nilai mendekati  $\pm 1$  menunjukkan korelasi kuat. Tahap akhir adalah deteksi anomali menggunakan algoritma *K-Means* [18]. Penentuan jumlah kluster optimal dilakukan dengan dua metode: *Elbow Method*, yang mengamati penurunan nilai inertia terhadap jumlah kluster, dan *Silhouette Coefficient*, yang mengukur kualitas pemisahan antar kluster. Kedua metode menghasilkan nilai optimal pada  $k = 3$ . Algoritma *K-Means* bekerja secara iteratif melalui dua langkah: (1) penugasan setiap titik data ke kluster terdekat berdasarkan jarak *Euclidean* terhadap centroid, dan (2) pembaruan posisi centroid sebagai rata-rata seluruh titik dalam kluster, diulang hingga konvergen. Jarak *Euclidean* dihitung sebagai [19]:

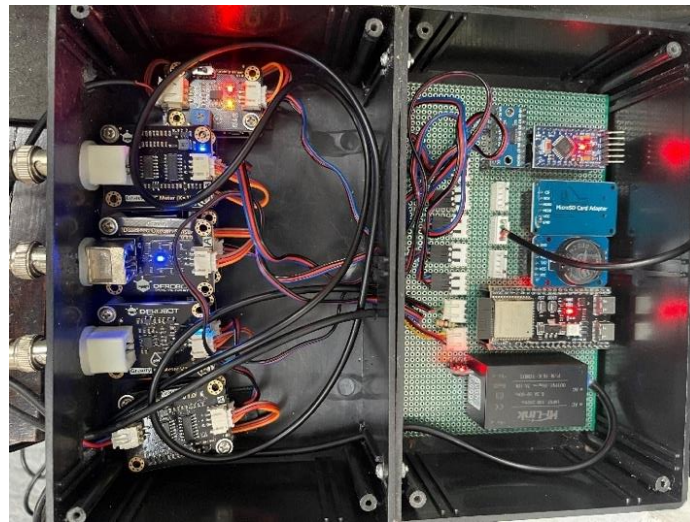
$$d(x, c) = \sqrt{\sum_{j=1}^p (x_j - c_j)^2} \quad (3)$$

Di mana  $x$  adalah titik data,  $c$  adalah centroid klaster, dan  $p$  adalah jumlah fitur. Deteksi anomali dilakukan dengan menetapkan ambang batas berdasarkan persentil ke-95 ( $p_{95}$ ) dari distribusi jarak Euclidean dalam setiap klaster. Titik data yang jaraknya melebihi ambang tersebut dikategorikan sebagai anomali.

## 2.2 Alur Kerja Sistem Fusi Sensor

Sistem fusi sensor yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi untuk mengintegrasikan delapan sensor lingkungan yang bekerja secara simultan guna memantau kondisi fisik dan kimia pada sistem akuaponik [20]. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2, rangkaian terdiri dari sensor pH, suhu air, TDS, EC, DO, suhu udara, kelembapan udara, dan amonia yang seluruhnya terhubung ke mikrokontroler ESP32 (DoIt DevKit v1) sebagai pusat kendali dan komunikasi data.

Sebelum sistem dijalankan, dilakukan kalibrasi sensor untuk memastikan akurasi pembacaan, terutama pada sensor pH, DO, dan EC, menggunakan larutan standar dan titik referensi yang sesuai kondisi lapangan. Setelah kalibrasi selesai, mikrokontroler melakukan inisialisasi seluruh sensor melalui antarmuka komunikasi analog dan I<sup>2</sup>C. Setiap 60 detik, sistem melakukan pengambilan data (*data acquisition*) secara berurutan dari seluruh sensor. *Sensor fusion* pada penelitian ini dilakukan pada level *data fusion*, di mana data dari berbagai sensor digabungkan berdasarkan *timestamp* menjadi satu paket data lengkap per siklus pembacaan. Data disimpan secara lokal pada modul microSD dalam format .CSV sebagai cadangan jika koneksi jaringan terputus.



**Gambar 1.** Komponen Sistem Fusi Sensor

Rangkaian perangkat keras ditunjukkan pada Gambar 2, yang terdiri atas mikrokontroler ESP32, modul ekspansi sensor (*sensor hub*), sensor DFRobot Gravity, serta modul catu daya dan penyimpanan. Seluruh komponen dipasang dalam wadah pelindung kedap air guna menjaga stabilitas sistem selama pengambilan data.

## 2.3 Pengumpulan Data

Data yang digunakan merupakan data primer yang diperoleh langsung dari sistem *sensor fusion* berbasis ESP32 yang dipasang pada unit akuaponik. Melalui pendekatan ini, data yang dihasilkan mencerminkan kondisi aktual lingkungan akuaponik selama periode pengamatan.



**Gambar** Error! No text of specified style in document.. Akuaponik

Gambar 3 memperlihatkan sistem akuaponik yang digunakan dalam penelitian ini. Sistem terdiri dari wadah pemeliharaan ikan, sistem filtrasi (Filter Air Atas, MBBR Filter, dan Filter Air Susun), serta rangkaian hidroponik tempat tanaman tumbuh. Air dari kolam ikan dialirkan menuju bagian hidroponik untuk menyuplai nutrisi bagi tanaman, kemudian kembali ke kolam setelah melalui proses penyaringan. Desain ini memungkinkan sirkulasi air yang efisien sekaligus memfasilitasi penempatan sensor untuk pemantauan otomatis.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Hasil Pembersihan dan Normalisasi Data

Tahap pembersihan dan normalisasi data dilakukan untuk memastikan dataset hasil pembacaan sensor memiliki kualitas yang baik, bebas dari kesalahan pencatatan, serta siap untuk dianalisis lebih lanjut. Seluruh dataset yang diperoleh dari sistem fusi sensor diperiksa secara manual untuk mendeteksi nilai kosong (*missing values*) yang disebabkan oleh gangguan pembacaan sensor IoT. Nilai-nilai kosong tersebut diperbaiki menggunakan metode *mean imputation*, yaitu mengganti nilai kosong dengan nilai rata-rata parameter yang bersangkutan. Metode ini dipilih karena mampu mempertahankan jumlah observasi dan menjaga kestabilan distribusi data tanpa mengubah struktur utama dataset.

Tabel 1 berikut menampilkan contoh dataset setelah proses *mean imputation* diterapkan. Sebagai ilustrasi, nilai 0 pada parameter *electrical conductivity* (EC) yang mengindikasikan kesalahan pembacaan sensor digantikan dengan nilai rata-rata parameter EC, sehingga data tetap valid dan representatif.

**Tabel 1.** Dataset Setelah Proses *Mean Imputation*

| Date                | Watemp<br>(°C) | DO<br>(mg/L) | Ph   | EC<br>(mS/cm) | TDS<br>(mg/L) | Airtemp<br>(°C) | Airhumid<br>(%RH) | Ammo<br>(mg/L) |
|---------------------|----------------|--------------|------|---------------|---------------|-----------------|-------------------|----------------|
| ...                 | ...            | ...          | ...  | ...           | ...           | ...             | ...               | ...            |
| 2025-06-16 07:18:31 | 28,19          | 2            | 7,85 | 0,4           | 707,15        | 31,79           | 94,31836          | 4,9844         |
| 2025-06-16 07:19:31 | 28,13          | 1,5          | 7,81 | 0,2           | 708,35        | 32,85           | 94,05371          | 4,9831         |
| 2025-06-16 07:20:31 | 28,19          | 2            | 7,81 | 0,4           | 707,15        | 32,82           | 93,62012          | 4,9808         |
| 2025-06-16 07:21:31 | 28,19          | 5            | 7,89 | 0,4           | 707,15        | 32,76           | 91,62012          | 4,9920         |
| 2025-06-16 07:22:31 | 28,19          | 0,5          | 7,81 | 0,2           | 707,15        | 31,71           | 89,29297          | 4,9808         |
| ...                 | ...            | ...          | ...  | ...           | ...           | ...             | ...               | ...            |

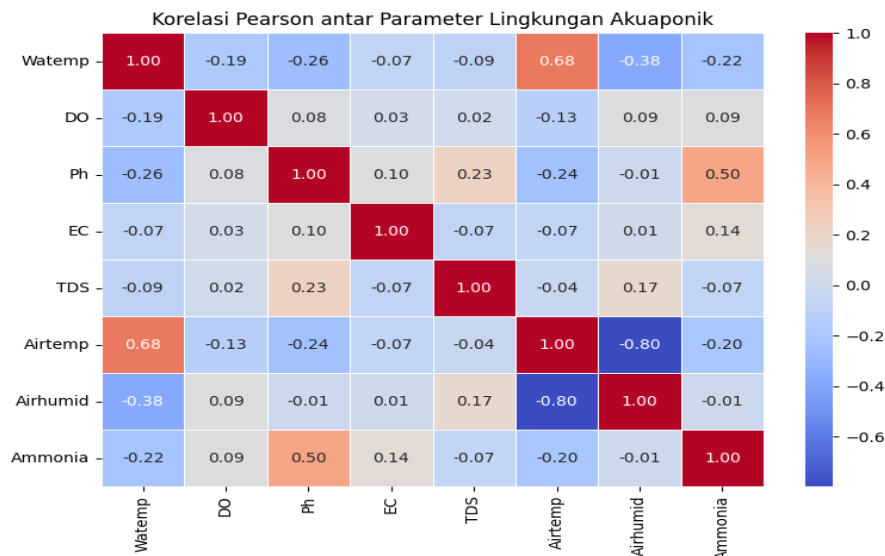
Setelah proses pembersihan selesai, dilakukan normalisasi data menggunakan metode *Standard Scaler* (*Z-score normalization*) untuk menyamakan skala antar parameter sensor [19]. Proses ini penting karena setiap parameter memiliki satuan pengukuran yang berbeda. Hasil normalisasi menghasilkan data dengan rata-rata mendekati 0 dan varians mendekati 1, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Dataset Setelah Normalisasi *Z-score*

| Date                | Watemp   | DO      | Ph     | EC      | TDS     | Airtemp | Airhumid | Ammo   |
|---------------------|----------|---------|--------|---------|---------|---------|----------|--------|
| 2025-06-16 06:59:31 | -0,37643 | 0,8823  | 1,9570 | 0,2760  | -0,4403 | -1,0281 | 1,6755   | 2,8130 |
| 2025-06-16 07:00:31 | -0,37643 | 1,6834  | 1,9177 | 0,2760  | -1,0991 | -1,0991 | 1,6906   | 2,8093 |
| 2025-06-16 07:01:31 | -0,44292 | 0,0811  | 1,7604 | 0,2760  | -1,1760 | -1,1760 | 1,7496   | 2,8128 |
| 2025-06-16 07:02:31 | -0,44292 | -1,5211 | 1,7997 | 0,2760  | -1,2056 | -1,2056 | 1,7900   | 2,8126 |
| 2025-06-16 07:03:31 | -0,37643 | 0,0811  | 1,7604 | -1,3788 | -1,1938 | -1,1938 | 1,8102   | 2,8053 |
| ...                 | ...      | ...     | ...    | ...     | ...     | ...     | ...      | ...    |

#### 3.2 Hasil Analisis Korelasi *Pearson*

Analisis korelasi *Pearson* dilakukan untuk mengetahui hubungan linier antarparameter lingkungan yang dipantau oleh sistem fusi sensor dalam ekosistem akuaponik. Hasil perhitungan divisualisasikan dalam bentuk *heatmap* pada Gambar 4.



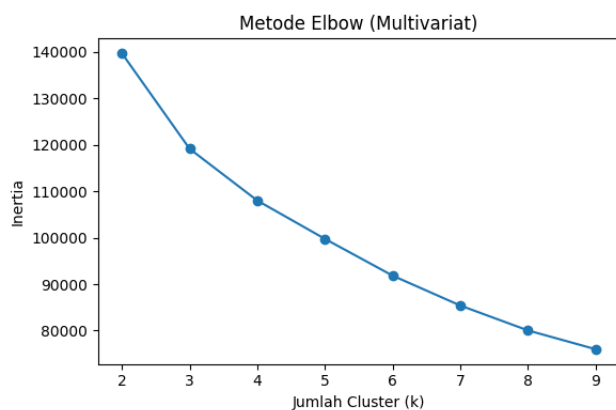
**Gambar Error! No text of specified style in document..** Matriks Korelasi

Korelasi kuat ditemukan antara suhu air (*Watemp*) dan suhu udara (*Airtemp*) dengan nilai  $r = +0,68$ , menunjukkan bahwa perubahan suhu udara secara langsung memengaruhi suhu air dalam tangki. Korelasi negatif kuat antara *Airtemp* dan *Airhumid* ( $r = -0,80$ ) mencerminkan hubungan alamiah di mana peningkatan suhu udara menyebabkan penurunan kelembapan relatif. Selain itu, terdapat korelasi positif sedang antara pH dan amonia ( $r = +0,50$ ), yang konsisten dengan prinsip kesetimbangan kimia air — pada pH lebih tinggi,  $\text{NH}_4^+$  lebih mudah berubah menjadi  $\text{NH}_3$  bebas yang bersifat toksik bagi organisme air [6]. Sebaliknya, TDS dan EC menunjukkan korelasi lemah terhadap amonia ( $r$  antara  $-0,07$  hingga  $+0,23$ ), mengindikasikan pengaruh tidak langsung pada kondisi sistem ini.

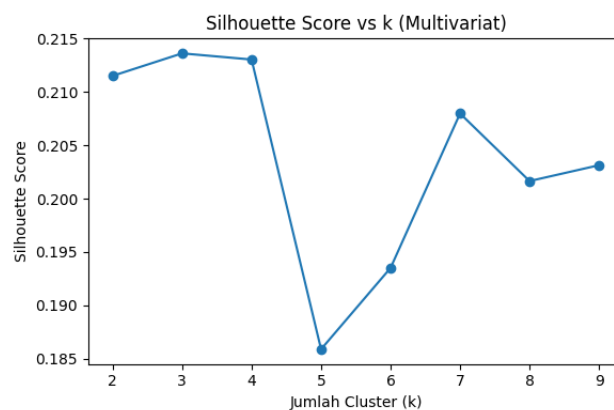
### 3.3 Hasil Deteksi Anomali Menggunakan K-Means

Deteksi anomali dilakukan menggunakan algoritma K-Means pada delapan parameter lingkungan: *Watemp*, DO, pH, EC, TDS, *Airtemp*, *Airhumid*, dan Ammonia [20]. Analisis ini dilakukan setelah proses normalisasi dan korelasi Pearson, dengan fokus pada hubungan amonia–DO yang menunjukkan ketidaksesuaian pada tahap sebelumnya.

Penentuan jumlah kluster optimal dilakukan dengan *Elbow Method* dan *Silhouette Coefficient* (Gambar 5 dan 6). Hasil *Elbow Method* menunjukkan penurunan inerti yang signifikan hingga  $k = 3$  dan mulai landai setelahnya. Nilai *Silhouette Score* tertinggi juga diperoleh pada  $k = 3$  ( $\approx 0,214$ ), sehingga klasterisasi dilanjutkan dengan  $k = 3$ .

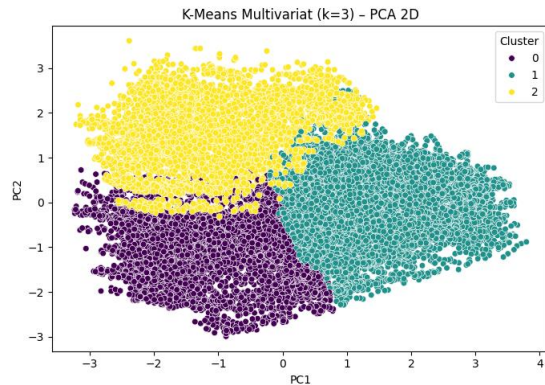


**Gambar 5.** Grafik Hasil Dari Metode Elbow

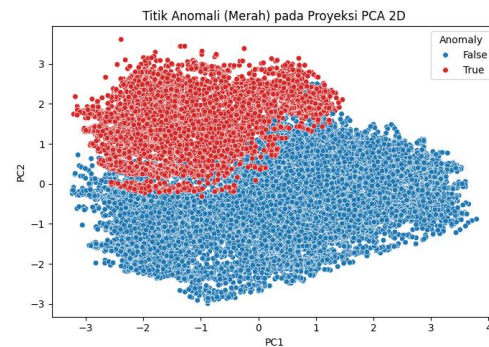


**Gambar 6.** Grafik Hasil Dari Silhouette Score

Hasil klasterisasi pada proyeksi PCA 2D (Gambar 7) memperlihatkan tiga kelompok dengan distribusi yang cukup jelas. Titik anomali ditampilkan pada Gambar 8, dan ringkasan statistik per kluster disajikan pada Tabel 3. Kluster 1 menjadi kluster dominan ( $n = 10.023$ ) yang mewakili kondisi operasional normal, sedangkan kluster 2 menunjukkan kadar amonia tinggi disertai peningkatan pH — selaras dengan hasil korelasi sebelumnya.



**Gambar 7.** Klasterisasi Multivariat PCA 2D

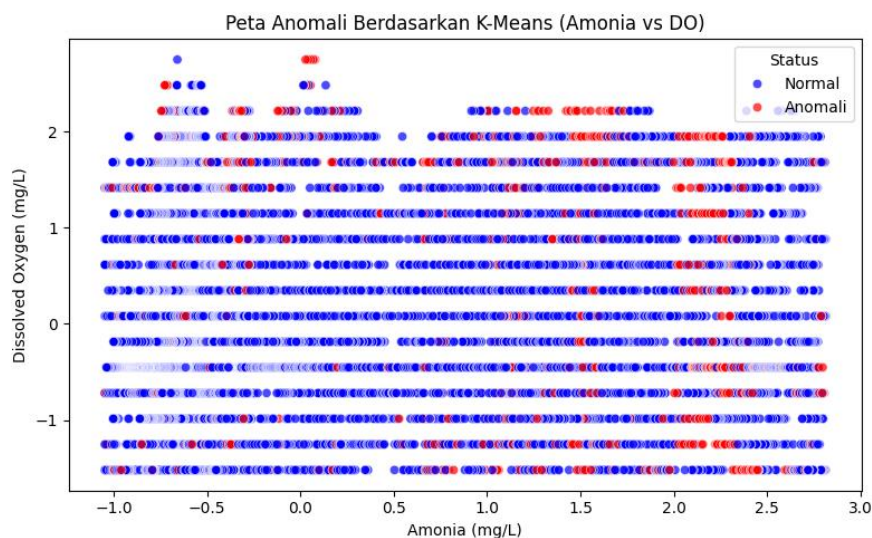


**Gambar 8.** Anomali pada Proyeksi PCA 2D

**Tabel 3.** Ringkasan Statistik Rata-Rata Dan Jumlah Titik Per Klaster

| Parameter        | Klaster 0 | Klaster 1 | Klaster 2 | Interpretasi Umum                                                                                  |
|------------------|-----------|-----------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Watemp           | -0,712    | 0,727     | -0,402    | Suhu air lebih rendah pada klaster 0 dan 2, sedangkan lebih tinggi pada klaster 1 (kondisi hangat) |
| DO               | 0,148     | -0,211    | 0,196     | DO relatif tinggi pada klaster 0 dan 2; rendah pada klaster 1                                      |
| pH               | -0,233    | -0,351    | 0,980     | pH meningkat signifikan pada klaster 2 (indikasi pH basa tinggi)                                   |
| EC               | -0,123    | -0,113    | 0,980     | EC sedikit meningkat pada klaster 2, menunjukkan ion terlarut lebih banyak                         |
| TDS              | 0,327     | -0,173    | -0,120    | TDS tinggi di klaster 0, menandakan padatan terlarut lebih besar                                   |
| Airtemp          | -0,843    | 0,815     | -0,390    | Suhu udara tinggi pada klaster 1, rendah pada klaster 0                                            |
| Airhumid         | 0,942     | -0,675    | -0,010    | Kelembapan tinggi pada klaster 0, lebih kering pada klaster 1                                      |
| Ammonia          | -0,495    | -0,502    | 1,622     | Kadar amonia tinggi pada klaster 2, rendah pada klaster 0 dan 1                                    |
| Jumlah titik (n) | 7.237     | 10.023    | 5.308     | Klaster 1 paling dominan, mewakili kondisi operasional normal                                      |

Anomali ditentukan berdasarkan jarak *Euclidean* terhadap centroid dengan ambang batas persentil ke-95, menghasilkan sekitar 5% dari total data sebagai anomali. Peta sebaran pada Gambar 9 menunjukkan titik anomali (merah) tersebar di luar zona kepadatan normal (biru), mengindikasikan penyimpangan pola parameter dari kondisi operasional sistem.



**Gambar 9.** Peta Anomali (Amonia vs DO)

### 3.4 Interpretasi Hasil Deteksi Anomali

Dari visualisasi Gambar 9, sebagian besar data berada dalam pola normal dengan hubungan yang relatif stabil antara amonia dan DO. Titik anomali (merah) muncul pada nilai DO yang tidak mengikuti tren ekologis normal — secara biologis, kenaikan amonia seharusnya diikuti penurunan DO akibat meningkatnya aktivitas dekomposisi organik dan kebutuhan oksigen untuk nitrifikasi. Ketidaksesuaian ini mengindikasikan kemungkinan deviasi pembacaan sensor DO atau dinamika kualitas air yang tidak sepenuhnya terwakili oleh hubungan linier antara kedua parameter.

Analisis statistik terhadap data anomali (Tabel 4) menunjukkan rentang nilai yang lebar pada setiap parameter, mencerminkan fluktuasi kondisi lingkungan saat penyimpangan terjadi. Nilai rata-rata amonia anomali (0,781) dan EC (1,002) yang lebih tinggi dibanding normal mengindikasikan bahwa anomali dominan terjadi pada kondisi ion terlarut dan amonia tinggi. Penting dicatat bahwa anomali tidak berarti setiap sensor terganggu, melainkan kombinasi nilai antarparameter pada waktu tertentu menyimpang dari pola kluster normal.

**Tabel 4.** Nilai Min, Maks, dan Rata-Rata Parameter Sensor pada Data Anomali

| Parameter | Minimum | Maksimum | Rata-Rata |
|-----------|---------|----------|-----------|
| Watemp    | -2,249  | 2,050    | -0,219    |
| DO        | -1,521  | 2,751    | 0,503     |
| pH        | -2,465  | 1,839    | 0,063     |
| EC        | -1,461  | 5,323    | 1,002     |
| TDS       | -2,583  | 1,026    | -0,817    |
| Airtemp   | -2,187  | 2,540    | -0,135    |
| Airhumid  | -1,991  | 1,856    | -0,074    |
| Ammonia   | -1,047  | 2,806    | 0,781     |

Secara keseluruhan, anomali cenderung muncul saat kadar amonia meningkat disertai fluktuasi DO yang tidak stabil, mengindikasikan gangguan pada proses nitrifikasi — umumnya dipicu oleh akumulasi sisa pakan, ekskresi ikan, atau ketidakstabilan aerasi. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan *sensor fusion* dan *K-Means* efektif dalam menandai periode kritis yang memengaruhi kestabilan sistem akuaponik.

### 3.5 Validasi, Evaluasi, dan Implikasi Model

Secara kualitatif, hasil *K-Means* dengan  $k = 3$  memperlihatkan pemisahan yang jelas antara data normal dan anomali. Pola penyebaran ini konsisten dengan indikasi *outlier* yang ditemukan pada analisis korelasi Pearson sebelumnya. Validasi lapangan menunjukkan bahwa beberapa periode anomali bertepatan dengan waktu pemberian pakan berlebih dan peningkatan suhu air pada siang hari — kondisi yang dapat menurunkan DO secara mendadak dan memicu peningkatan amonia. Hal ini memperkuat validitas model bahwa anomali yang terdeteksi memiliki dasar fenomenologis yang nyata.

Secara kuantitatif, hasil evaluasi disajikan pada Tabel 5. Persentase anomali dihitung sebagai:

$$\text{Outlier Rate} = \frac{n_a}{N} \times 100\% = \frac{1128}{22568} \times 100\% = 5\%$$

Keterangan:

$n_a$  = Jumlah titik data anomali  
N = Total data keseluruhan

Nilai ini sesuai dengan teori distribusi normal di mana 95% data berada dalam rentang wajar. Stabilitas kluster dievaluasi menggunakan Rasio Konsistensi Kluster ( $R_c$ ):

$$R_c = \frac{\text{mean}(Var_{intra})}{Var_{total}} \quad (4)$$

Nilai  $R_c = 1,006$  — mendekati 1 — menunjukkan pembagian kluster yang stabil tanpa *overfitting* atau *overlap* signifikan antar kelompok data.

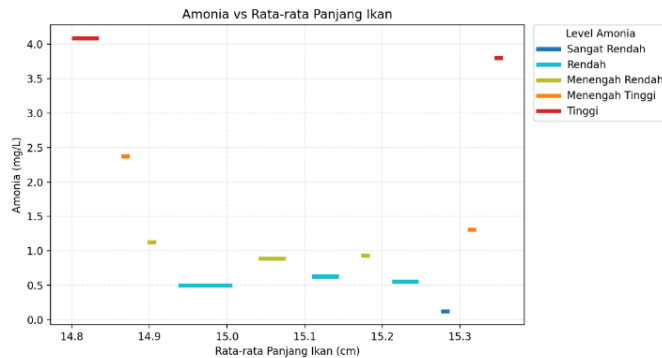
**Tabel 5.** Hasil Evaluasi Kuantitatif Model *K-Means*

| Parameter                       | Nilai  |
|---------------------------------|--------|
| Total Data                      | 22.568 |
| Jumlah Kluster ( $k$ )          | 3      |
| Varians Total ( $Var_{total}$ ) | 1.000  |
| Varians intra C1                | 0.887  |
| Varians intra C2                | 0.905  |
| Varians intra C3                | 1.227  |
| Rata – rata $Var_{intra}$       | 1.006  |
| Rasio Konsistensi ( $R_c$ )     | 1.006  |
| Persentase Anomali              | 5%     |

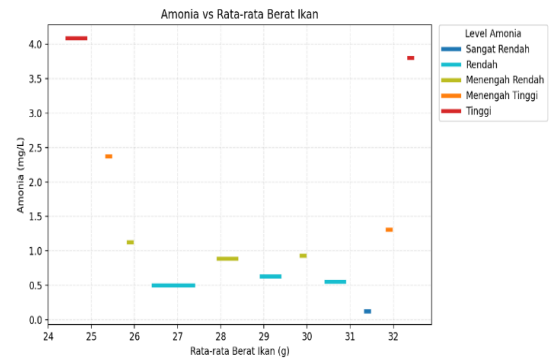
Dari sisi implementasi, sistem fusi sensor berbasis ESP32 dan sensor DFRobot terbukti stabil untuk akuisisi data real-time. Hasil deteksi anomali dapat diintegrasikan dengan dashboard visualisasi atau modul kontrol otomatis, sehingga sistem tidak hanya bersifat reaktif tetapi juga prediktif dalam mengenali pola perubahan kualitas air sebelum mencapai kondisi kritis.

### 3.6 Analisis Hubungan Amonia terhadap Pertumbuhan Biota Akuaponik

Bagian ini membahas pengaruh fluktuasi kadar amonia terhadap pertumbuhan *Channa striata* dan *Amaranthus sp.* yang terdeteksi melalui sistem fusi sensor. Secara fisiologis, amonia berasal dari sisa pakan dan ekskresi metabolik ikan yang diuraikan bakteri nitrifikasi menjadi  $\text{NO}_2^-$  dan  $\text{NO}_3^-$ . Apabila  $\text{NH}_3$  bebas melebihi ambang toleransi, dapat mengganggu respirasi ikan dan menghambat penyerapan nutrisi oleh tanaman.



**Gambar 10.** Kadar Amonia Terhadap Rata-Rata Panjang Ikan Pada Sistem Akuaponik



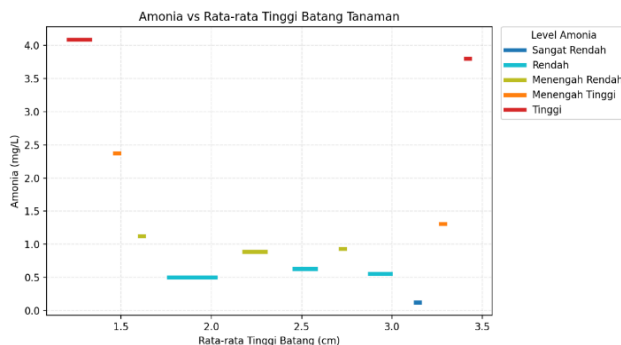
**Gambar 11.** Kadar Amonia Terhadap Rata-Rata Bobot Ikan Pada Sistem Akuaponik

Rentang kadar amonia terukur berada antara 0,2–4,0 mg/L dan diklasifikasikan dalam lima level (Tabel 6). Gambar 10 dan 11 menunjukkan hubungan kadar amonia dengan panjang dan bobot ikan. Sebagian besar data terdistribusi pada level rendah hingga menengah rendah (0,5–1,1 mg/L). Pertumbuhan optimal ikan terjadi pada kadar <1 mg/L, di mana aktivitas makan dan konversi pakan lebih stabil. Peningkatan amonia di atas 1,5 mg/L diikuti kecenderungan penurunan pertumbuhan, dan kadar >3 mg/L menunjukkan indikasi stres fisiologis akibat gangguan fungsi insang — konsisten dengan batas toleransi  $\text{NH}_3$  pada *Channa striata* sebesar 0,54 mg/L dan efek toksik amonia terhadap parameter hematologis ikan.

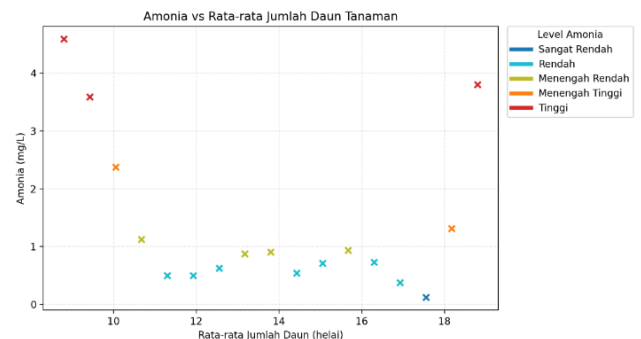
**Tabel 6.** Klasifikasi Level Konsentrasi Amonia dalam Sistem Akuaponik

| Level           | Rentang Konsentrasi Amonia |
|-----------------|----------------------------|
| Sangat Rendah   | < 0,2 mg/L                 |
| Rendah          | 0,2 – 0,8 mg/L             |
| Menengah Rendah | 0,8 – 1,2 mg/L             |
| Menengah Tinggi | 1,2 – 3,0 mg/L             |
| Tinggi          | > 3,0 mg/L                 |

Gambar 12 dan 13 menampilkan hubungan kadar amonia dengan tinggi batang dan jumlah daun *Amaranthus sp.* Pertumbuhan vegetatif terbaik terjadi pada kisaran 0,5–1,2 mg/L, dengan peningkatan tinggi batang 2,5–3,5 cm dan jumlah daun 15–18 helai untuk varietas *Amaranthus Green* dan *bi-color*. Pada konsentrasi >2 mg/L, pertumbuhan cenderung melambat. Kondisi ini sejalan dengan studi akuaponik dengan *Amaranthus*, di mana stabilitas amonia rendah merupakan indikator keseimbangan nitrifikasi optimal untuk penyerapan  $\text{NO}_3^-$  oleh tanaman.



**Gambar 12.** Kadar Amonia Dengan Rata-Rata Tinggi Batang *Amaranthus Sp.*



**Gambar 13.** Kadar Amonia Dengan Rata-Rata Jumlah Daun Tanaman *Amaranthus Sp.*

Secara keseluruhan, kadar amonia <1 mg/L menjadi ambang optimal yang menjaga produktivitas biota dan efisiensi ekosistem akuaponik berbasis fusi sensor.

## 4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan sistem fusi sensor multisensor dengan algoritma K-Means untuk deteksi anomali amonia pada sistem akuaponik berbasis *Channa striata* dan *Amaranthus sp.* Analisis korelasi Pearson mengidentifikasi korelasi positif sedang antara pH dan amonia ( $r = 0,50$ ), yang menjadi dasar fokus deteksi anomali. Algoritma K-Means dengan  $k = 3$  kluster optimal menghasilkan deteksi anomali sebesar 5% dari total data (1.128 dari 22.568 titik), dengan Rasio Konsistensi Kluster ( $R_c$ ) sebesar 1,006 yang mengindikasikan stabilitas model. Secara biologis, pertumbuhan optimal *Channa striata* dan *Amaranthus sp.* terjadi pada kadar amonia  $<1$  mg/L, di mana aktivitas nitrifikasi berlangsung efisien dan tanaman dapat menyerap  $\text{NO}_3^-$  sebagai sumber nitrogen tanpa tambahan pupuk kimia. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan sensor fusion dan K-Means mampu mendukung pemantauan akuaponik secara cerdas, responsif, dan berkelanjutan.

## REFERENCES

- [1] M. E. Abd El-Hack et al., "Effect of environmental factors on growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 66, no. 11, pp. 2183–2194, Nov. 2022, doi: 10.1007/s00484-022-02347-6.
- [2] K. Dimitrov, N. Chivarov, S. Chivarov, T. Paunova-Krasteva, E. Filipov, and A. Daskalova, "Concept of a Cyber-Physical System for Control of a Self-Cleaning Aquaponic Unit," *AgriEngineering*, vol. 6, no. 4, pp. 3843–3874, Dec. 2024, doi: 10.3390/agriengineering6040219.
- [3] C. N. Udanor, N. I. Ossai, B. O. Ogbuokiri, O. E. Nweke, P. O. Ugwoke, and U. K. Ome, "A Pilot Implementation of a Remote IoT Sensors for Aquaponics System Datasets Acquisition," *Journal of Computer Science and Its Application*, vol. 28, no. 2, pp. 1–8, Aug. 2022, doi: 10.4314/jcsia.v28i2.1.
- [4] P. Y. Leksono, S. Ratnanto, B. Zaman, R. Kurniawan, and M. Z. Sasongko, "Optimalisasi Budidaya Ikan Lele Berbasis Aquaponik Sebagai Solusi Ketahanan Pangan Dan Efisiensi Lahan Perkotaan Di Kelurahan Campurejo," *Abdimas Akademika*, vol. 6, no. 02, pp. 79–92, 2025.
- [5] M. I. Alif, A. Prabowo, and S. Amir, "Implementation of IoT-Based Aquaponics Technology to Enhance Food Security and Economic Independence at Berkah Box Mosque," *Dinamisia : Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, vol. 8, no. 5, pp. 1458–1471, Oct. 2024, doi: 10.31849/dinamisia.v8i5.20673.
- [6] I. A. Sánchez Ortiz, R. K. Xavier Bastos, E. A. Teixeira Lanna, F. de F. Viana Santana, T. C. Teixeira, and S. L. P. da Matta, "Evaluation of acute toxicity of ammonia in Genetically Improved Farmed Tilapia," *Aquac. Rep.*, vol. 27, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.aqrep.2022.101325.
- [7] A. Meidiana, Prayogo, and B. S. Rahardja, "The effect of different stocking densities on ammonia ( $\text{NH}_3$ ) and nitrate ( $\text{NO}_3$ ) concentration on striped snakehead (*Channa striata*) culture in the bucket," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1036/1/012109.
- [8] M. Alwateer, E.-S. Atlam, M. M. A. El-Raouf, O. A. Ghoneim, and I. Gad, "Missing Data Imputation: A Comprehensive Review," *Journal of Computer and Communications*, vol. 12, no. 11, pp. 53–75, 2024, doi: 10.4236/jcc.2024.1211004.
- [9] K. Vyshniakova et al., "Aqueous Ammonia Sensor with Neuromorphic Detection," *Adv. Electron. Mater.*, vol. 10, no. 12, Dec. 2024, doi: 10.1002/aelm.202400509.
- [10] Okta Bryan Yudi Pratama, Muhammad Virsa Irawan, and Ardhan Ardiansyah Kawakibi, "Pengembangan Sistem Akuaponik : Sinergi Hidroponik dan Kolam untuk Ketahanan Pangan dan Ekonomi Lokal pada Desa Sukolilo Kabupaten Malang," *Panggung Kebaikan : Jurnal Pengabdian Sosial*, vol. 2, no. 1, pp. 116–129, Feb. 2025, doi: 10.62951/panggungkebaikan.v2i1.1200.
- [11] R. Hayati and Al-Amin, "Inovasi Teknologi Urban Farming: Analisis Literatur Tentang Efektivitas Hidroponik, Vertikultur, Dan Akuaponik Di Perkotaan," *CAPITALIS: JOURNAL OF SOCIAL SCIENCES*, vol. 2, no. 3, pp. 197–207, 2025.
- [12] Marni Putri Gea, Restu Jaya Zendrato, Septian Oktani Telaumbanua, and Ayler Beniah Ndraha, "Pertanian Perkotaan, Solusi Inovatif untuk Ketahanan Pangan di Tengah Kota," *Flora : Jurnal Kajian Ilmu Pertanian dan Perkebunan*, vol. 2, no. 1, pp. 188–198, Feb. 2025, doi: 10.62951/flora.v2i1.265.
- [13] M. A. F. Sutikno, D. Rahmawati, Y. S. Prahmani, A. Haris, T. D. Wulandari, and D. F. Astutianingtyas, "Program Penguatan Ketahanan Pangan, Pengelolaan Sampah, Air dan Sanitasi Guna Mewujudkan Kampung Iklim Kelurahan Tugurejo," *Jurnal Pemberdayaan Masyarakat*, vol. 2, no. 2, pp. 89–99, Oct. 2023, doi: 10.46843/jmp.v2i2.291.
- [14] A. Sabila, D. J. Pratama, F. Yansha, I. Dwisaputra, and S. Andriyanto, "Sistem Kontrol Otomatis Parameter Air Pada Akuponik Berbasis IoT," *Technologia : Jurnal Ilmiah*, vol. 16, no. 4, p. 891, Oct. 2025, doi: 10.31602/tji.v16i4.20928.
- [15] M. J. Gulo, S. Azzahra, D. I. Manafe, and A. Penelitian, "Sistem Urban Portable Agriculture Berbasis IoT: Validasi Teknis dan Analisis Kinerja Platform Monitoring Hidroponik Berbiaya Rendah," *Jurnal Kolaboratif Sains*, vol. 8, no. 11, pp. 6640–6653, 2025, doi: 10.56338/jks.v8i11.8560.
- [16] M. Nabil Zamzami and Imam, "Integrasi WSN dan IoT Untuk Sistem Monitoring Rumah Cerdas Berbasis MQTT," *Karapan Network Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 612–623, 2025, doi: 10.20473/KNJ.II.612-623.
- [17] A. Sabila, D. J. Pratama, F. Yansha, I. Dwisaputra, and S. Andriyanto, "Integrasi Sistem Akuaponik IoT Dengan Aplikasi Mobile Untuk Pemantauan Jarak Jauh," *Jurnal Ilmiah BETRIK*, vol. 16, no. 03, pp. 541–554, 2025.
- [18] A. Riyadi, M. Kovacs, U. Serdült, and V. Kryssanov, "IndoGovBERT: A Domain-Specific Language Model for Processing Indonesian Government SDG Documents," *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 8, no. 11, Nov. 2024, doi: 10.3390/bdcc8110153.
- [19] P. Palinggik Allorerung, A. Erna, M. Bagussahrir, and S. Alam, "Analisis Performa Normalisasi Data untuk Klasifikasi K-Nearest Neighbor pada Dataset Penyakit," *Jurnal Informatika Sunan Kalijaga*, vol. 9, no. 3, pp. 178–191, 2024.
- [20] A. Nur et al., "Implementasi Perbandingan Algoritma k-Means dan DB-Scan Pada Beban Listrik Rumah Tangga 85 Implementasi Perbandingan Algoritma k-Means dan DB-Scan Pada Beban Listrik Rumah Tangga," *INTEGER: Journal of Information Technology*, vol. 10, no. 1, 2025.