© 2026 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP
JURNAL ILMU LINGKUNGAN
Volume 24 Issue 6 (2026) : 1551-1560 *ISSN 1829-8907*

Analisis Distribusi Spasial dan Perubahan Temporal Kualitas Air Sungai Menggunakan Metode *K-Means* di Provinsi Gorontalo Tahun 2022-2024

A. Fahmi Indrayani[1*] , Risti Ristianingsih Badu[2], Aprianti S. Ano[2], dan Frans Mitran Ajami[2]

[1]Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, Indonesia, e-mail: fahmiindrayani@ulm.ac.id
[2]Universitas Nahdlatul Ulama Gorontalo, Gorontalo, Indonesia

ABSTRAK

Kualitas air sungai di Provinsi Gorontalo menunjukkan dinamika yang dipengaruhi oleh aktivitas permukiman, pertanian, dan industri. Pemantauan berbasis analisis data diperlukan untuk mengidentifikasi pola perubahan karakteristik kualitas air pada berbagai lokasi pengamatan serta mendukung penentuan lokasi yang memerlukan perhatian lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi pola *cluster* kualitas air selama periode 2022–2024 berdasarkan 20 pos pengamatan menggunakan algoritma K-Means dengan lima parameter fisikokimia, yaitu oksigen terlarut (DO), pH, suhu, daya hantar listrik (DHL), dan total suspended solids (TSS), serta mengevaluasi perubahan keanggotaan *cluster* selama tiga tahun pengamatan. Data distandardisasi menggunakan Z score agar perbedaan skala antarparameter tidak mendominasi proses pengelompokan. Jumlah *cluster* dievaluasi menggunakan metode Elbow dan Silhouette Coefficient. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa metode Elbow mengindikasikan $k = 2$ dan $k = 3$ sebagai alternatif jumlah *cluster* yang dapat dipertimbangkan, sedangkan nilai Silhouette tertinggi diperoleh pada $k = 2$. Dalam penelitian ini, $k = 3$ dipertahankan untuk memperoleh resolusi pengelompokan yang lebih rinci, khususnya dalam mengidentifikasi kelompok intermediate dan menelusuri perubahan keanggotaan *cluster* antarperiode 2022–2024. Hasil *clustering* menunjukkan adanya perbedaan karakteristik fisikokimia antar*cluster* serta perubahan keanggotaan *cluster* pada sejumlah lokasi. Beberapa lokasi menunjukkan karakteristik yang relatif konsisten, sedangkan lokasi lainnya mengalami perubahan keanggotaan antarperiode. Perubahan *cluster* diinterpretasikan sebagai perubahan karakteristik relatif terhadap struktur data, bukan sebagai penetapan langsung status mutu air atau bukti peningkatan pencemaran. Hasil penelitian memberikan informasi awal mengenai distribusi spasial dan perubahan temporal karakteristik kualitas air yang dapat digunakan untuk mendukung pemantauan serta penentuan lokasi prioritas pengelolaan sungai di Provinsi Gorontalo.

***Kata kunci*:** Kualitas Air, K-Means, *Clustering*, Distribusi Spasial, Perubahan Temporal

ABSTRACT

River water quality in Gorontalo Province is characterized by spatial and temporal variability that may be influenced by settlement, agricultural, and industrial activities. A data-driven monitoring approach is therefore required to identify changes in water-quality characteristics across monitoring locations and to support the identification of sites requiring further attention. In this study, water-quality clustering patterns during 2022–2024 were identified based on observations from 20 monitoring stations using the K-Means algorithm. Five physicochemical parameters were included, namely dissolved oxygen (DO), pH, temperature, electrical conductivity (EC/DHL), and total suspended solids (TSS). Changes in cluster membership over the three-year observation period were also evaluated. The data were standardized using Z scores so that differences in measurement scales among parameters would not dominate the clustering process. The number of clusters was evaluated using the Elbow method and the Silhouette Coefficient. Based on the Elbow method, $k = 2$ and $k = 3$ were indicated as plausible alternatives, whereas the highest Silhouette value was obtained at $k = 2$. In this study, $k = 3$ was retained to provide finer clustering resolution, particularly for the identification of an intermediate group and for tracing changes in cluster membership between 2022 and 2024. Differences in physicochemical characteristics among clusters were identified, and changes in cluster membership were observed at several monitoring locations. Some locations were characterized by relatively persistent cluster membership, whereas others were shifted across clusters between observation periods. These shifts were interpreted as relative changes in physicochemical characteristics within the observed dataset and were not treated as direct classifications of regulatory water-quality status or as evidence of increased pollution. The results provide an initial basis for describing spatial distribution and temporal changes in river water-quality characteristics and may be used to support monitoring and the prioritization of management attention in Gorontalo Province.

***Keywords*:** Water Quality, K-Means, Clustering, Spatial Distribution, Temporal Change

Citation: Indrayani, A. F., Badu, R. R., Ano, A. S., dan Ajami, F. M. (2026). Analisis Distribusi Spasial dan Perubahan Temporal Kualitas Air Sungai Menggunakan Metode *K-Means* di Provinsi Gorontalo Tahun 2022–2024. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(6), 1551-1560, doi:10.14710/jil.24.6.1551-1560

1. PENDAHULUAN

Sungai merupakan sumber daya air yang vital bagi kehidupan masyarakat, pertanian, dan industri. Di Provinsi Gorontalo, wilayah sungai strategis seperti WS Limboto-Bolango-Bone ((LBB), WS Randangan, dan Sungai Paguyaman berperan penting dalam penyediaan air bersih bagi masyarakat, namun mengalami tekanan akibat pertumbuhan populasi dan aktivitas manusia. Kegiatan pemukiman, pertanian, serta limbah industri berpotensi menurunkan kualitas air, yang berdampak pada kesehatan dan kelestarian lingkungan (Bassi, 2023; Gallego-villalobos & Castillo-aguilar, 2020; R. Wang *et al*., 2024). Oleh karena itu, pengelolaan wilayah Sungai secara efektif diperlukan untuk menjaga keseimbangan antara kebutuhan manusia dan keberlanjutan ekosistem air (Briciu *et al*., 2020; Harrison *et al*., 2016; R. Wang *et al*., 2024).

Analisis kualitas air Sungai melalui pengelompokan (*Clustering*) dapat menjadi strategi penting dalam pengidentifikasi tingkat pencemaran dan lokasi prioritas pengeloalaan. Salah satu metode umum digunakan adalah *K-Means Clustering*, yang dapat mengelompokkan lokasi berdasarkan kemiripan karakteristik kualitas air (Novianta *et al*., 2023).

Meskipun *K-Means* telah banyak digunakan untuk mengelompokkan lokasi berdasarkan karakteristik kualitas air, sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada klasifikasi pada satu periode pengamatan, perbandingan antar-metode *clustering*, atau pengelompokan berbasis parameter kualitas air tanpa secara eksplisit menelusuri perubahan keanggotaan *cluster* antarperiode. Dalam konteks pemantauan kualitas air, pendekatan tersebut masih terbatas dalam menggambarkan bagaimana karakteristik suatu lokasi berubah dari waktu ke waktu (Christiana *et al*., 2020; Subehi *et al*., 2016). Kontribusi penelitian ini terletak pada integrasi pengelompokan *K-Means*, pemetaan distribusi spasial, dan evaluasi perubahan keanggotaan *cluster* pada lokasi pemantauan yang sama selama periode 2022–2024. Dengan pendekatan ini, penelitian tidak hanya menghasilkan kelompok lokasi dengan karakteristik fisikokimia yang serupa, tetapi juga mengidentifikasi pola persistensi dan transisi *cluster* antarperiode. Informasi tersebut memberikan tambahan perspektif dibandingkan analisis *clustering* satu periode karena dapat digunakan untuk mengenali lokasi yang menunjukkan karakteristik relatif konsisten maupun lokasi yang mengalami perubahan antar tahun sebagai dasar awal penentuan prioritas pemantauan kualitas air (Wu *et al*., 2021).

Tujuan penelitian ini adalah mengelompokkan lokasi pemantauan kualitas air di Provinsi Gorontalo berdasarkan kemiripan lima parameter fisikokimia, yaitu DO, pH, suhu, DHL, dan TSS menggunakan metode *K-Means Clustering* (Lin *et al*., 2025); mengidentifikasi karakteristik masing-masing *cluster*; memetakan distribusi spasial *cluster*; serta mengevaluasi perubahan keanggotaan *cluster* selama periode 2022–2024. Hasil pengelompokan selanjutnya digunakan sebagai dasar awal untuk mengidentifikasi lokasi yang memerlukan perhatian lebih lanjut dalam kegiatan pemantauan dan pengelolaan kualitas air (Harrison *et al*., 2016). Selain itu, hasil pemetaan *cluster* diharapkan dapat menjadi alat bantu bagi pemerintah dan pemangku kepentingan dalam memahami variasi karakteristik kualitas air antar lokasi serta mendukung penyusunan rekomendasi pengelolaan dan konservasi ekosistem sungai di Provinsi Gorontalo.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif untuk pengelompokan lokasi pengamatan sungai berdasarkan kualitas air. Analisis difokuskan pada lima parameter kualitas air, yaitu DO (*Dissolved Oxigen*), pH, Suhu, TSS (*Total Suspended Solids*), dan DHL (Daya Hantar Listrik) pada Periode 2022-2024 pada 20 Lokasi Pengamatan di Provinsi Gorontalo.

Pemilihan lima parameter tersebut tidak hanya didasarkan pada ketersediaan data, tetapi juga pada kemampuannya merepresentasikan perubahan kondisi fisikokimia perairan yang relevan terhadap tekanan lingkungan di wilayah sungai. DO digunakan untuk menggambarkan ketersediaan oksigen terlarut yang dapat menurun ketika proses dekomposisi bahan organik meningkat. pH menggambarkan perubahan kondisi kimia perairan yang dapat dipengaruhi oleh masukan berbagai bahan terlarut. Suhu berhubungan dengan kondisi termal perairan dan turut memengaruhi kelarutan oksigen serta proses biologis. DHL merepresentasikan konsentrasi relatif ion-ion terlarut dalam air sehingga dapat memberikan indikasi perubahan masukan zat terlarut. Sementara itu, TSS menggambarkan keberadaan material tersuspensi yang dapat meningkat akibat erosi, limpasan permukaan, sedimentasi, maupun aktivitas di sekitar badan air. Dengan demikian, kombinasi kelima parameter digunakan untuk menangkap variasi kondisi fisikokimia perairan secara lebih komprehensif pada lokasi pemantauan di Provinsi Gorontalo. Dalam konteks wilayah sungai di Gorontalo yang mencakup kawasan hulu, tengah, hilir, permukiman, pertanian, dan area dengan aktivitas manusia yang berbeda, kelima parameter tersebut dipandang relevan untuk menangkap variasi kondisi perairan antar lokasi. Untuk Variabel yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel Penelitian

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Paremeter	Pengertian	Hubungan dengan Kondidi Perairan	Satuan
DO	Konsistensi oksigen terlarut yang sangat penting bagi kelangsungan hidup organisme di air	Menggambarkan ketersediaan oksigen terlarut; nilai yang rendah dapat berkaitan dengan meningkatnya konsumsi oksigen akibat dekomposisi bahan organik.	Mg/l
pH	Derajar keasaman air, berpengaruh pada aktivitas biologis dan kimia dalam air	Menggambarkan kondisi asam basa perairan dan memengaruhi berbagai proses kimia serta biologis.	-
Suhu	Suhu air lebih rendah dibandingkan dengan suhu lingkungan. Karena itulah air akan terasa dingin saat disentuh.	Memengaruhi aktivitas biologis, reaksi kimia, dan kelarutan oksigen dalam air.	°C
DHL	Kemampuan air dalam menghantarkan arus Listrik setiap sentimeter.	Menggambarkan kemampuan air menghantarkan listrik yang berkaitan dengan kandungan ion atau zat terlarut.	µS/cm
TSS	Partikel – partikel yang tidak dapat disaring dengan kertas berpori 0,45 µm	Menggambarkan jumlah material tersuspensi dan dapat meningkat akibat erosi, limpasan, maupun gangguan pada badan air.	mg/L

2.2. Teknik Analisis Data

Data kualitas air merupakan data sekunder dari Balai Wilayah Sungai (BWS) Provinsi Gorontalo yang mencakup pemantauan pada tahun 2022, 2023, dan 2024. Pemantauan dilakukan dalam rentang Januari – Desember pada masing-masing tahun, namun waktu pengambilan sampel pada setiap lokasi tidak selalu identic antar tahun. Oleh karena itu, perubahan keanggotaan *cluster* tidak diinterpretasikan secara langsung sebagai tren degradasi jangka Panjang, karena kemungkinan pengaruh musim, curah hujan dan kondisi hidrologis tetap perlu dipertimbangkan.
Kriteria Pemilhan lokasi pengamatan:

1. Representativitas geografis, mencakup hulu, tengah, dan hilir sungai strategis Gorontalo (WS Limboto – Bolango – Bone, WS Randangan, dan Sungai Peguyaman).
2. Potensi pencemaran, termasuk wilayah pemukiman, pertanian, dan industri di sekitar sungai.
3. Ketersediaan data lengkap untuk semua parameter selama periode pengamatan.

2.3. Analisis Data

Data penelitian disusun dalam format lokasi–tahun yang terdiri atas 60 observasi, yaitu 20 lokasi pemantauan selama tiga tahun pengamatan (2022–2024). Proses *K-Means* dilakukan terhadap seluruh observasi secara simultan setelah standardisasi Z *score* terhadap lima parameter DO, pH, suhu, DHL, dan TSS. Dengan pendekatan ini, definisi centroid dan keanggotaan *Cluster* 1, *Cluster* 2, dan *Cluster* 3 berlaku secara konsisten untuk seluruh periode pengamatan sehingga perubahan keanggotaan *cluster* antar-tahun dapat dibandingkan secara langsung. Tahapan analisis meliputi

1. Pra-pemrosesan Data
   Data dinormalisasi agar semua parameter berada pada skala yang sama agar variabel dengan skala besar tidak mendominasi hasil *clustering,* dengan rumus *Z score* sebagai berikut;

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

dengan
X : Nilai asli (*raw* data)
μ : *Mean* (rata-rata) dari variabel
σ : Standar deviasi dari variabel

2. Penentuan Jumlah *Cluster* Optimal
   Jumlah *Cluster* (k) ditentukan dengan dua metode:
   Metode elbow
   Metode Elbow menggunakan nilai *Within-Cluster Sum of Squares* (WCSS) untuk setiap jumlah *cluster k,* yang dihitung menggunakan rumus berikut (Scitovski *et al*., 2021):

$$WCSS = \sum_{i=1}^{k} \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|^2 \quad (2)$$

dengan
k : Jumlah *Cluster*
C_i : *Cluster* ke – i,
x : Titik data dalam *cluster*
μ_i : Centroid *cluster*
$\|x - \mu_i\|^2$: Jarak *Euclidean* kuadrat antara data dan centroid

Silhouette Coefficient
Silhouette Coefficient digunakan mengevaluasi seberapa baik tiap titik data sesuai dengan *cluster*nya untuk setiap data *I:*
Hitung rata-rata jarak ke anggota *cluster* sendiri (a)

$$a(i) = \frac{1}{|C_i| - 1} \sum_{j \in C_i, j \neq i} d(i,j) \quad (3)$$

Hitung rata-rata jarak ke *cluster* tetangga terdekat (b)

$$b(i) = \min_{k \neq C_i} \left(\frac{1}{|C_k|} \sum_{j \in C_k} d(i,j) \right) \quad (4)$$

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Maka, rumus Sihouette untuk data *i* adalah

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (5)$$

dengan
k : Jumlah *Cluster*
C_i : *Cluster* ke – i,
$a(i)$: Jarak rata-rata titik *i* ke semua titik dalam *cluster* yang sama,
$b(i)$: Jarak rata-rata ke titik pada *cluster* terdekat berikutnya.
Nilai $s(i)$ mendekati 1 menunjukkan klater yang baik (Scitovski *et al*., 2021).

Jarak Euclidean
Jarak *Euclidean* digunakan pada algoritma *K-Means* untuk mengukur kedekatan antar data atau antara data dan centroid, yang dihitung dengan rumus:

$$d(x, u_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (x_j - \mu_{ij})^2} \quad (6)$$

dengan
μ_i : Centroid *cluster*
x : Titik data dalam *cluster*
n : Jumlah titik

2.4. Visualisasi dan Analisis Spatial – Temporal

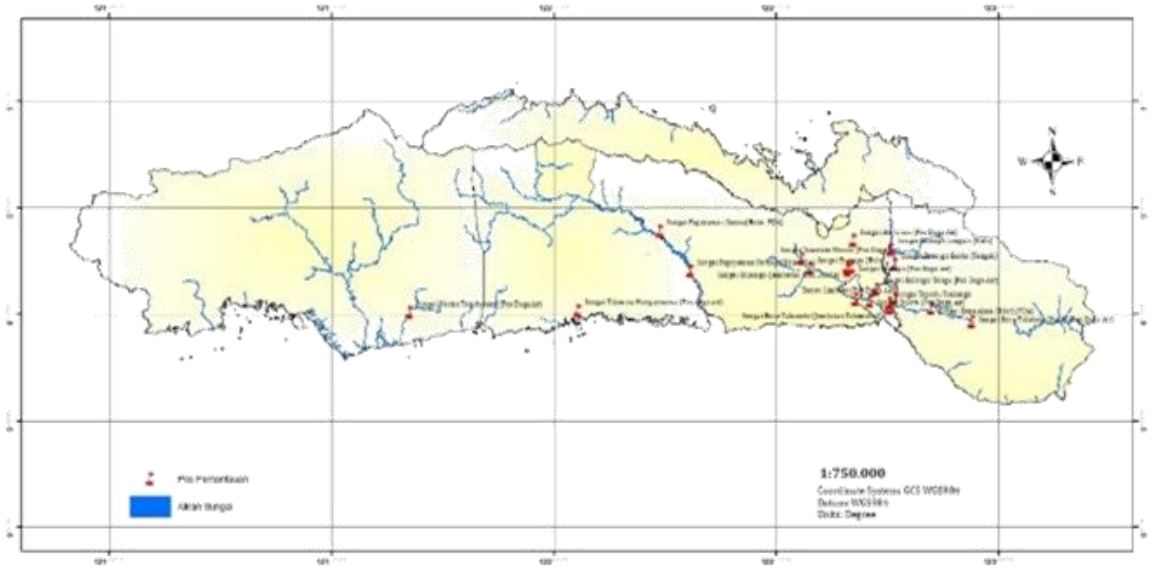
Hasil *clustering* divisualisasikan secara spasial menggunakan ArcGIS 10.6 untuk menggambarkan distribusi lokasi dan keanggotaan *cluster* pada masing-masing tahun pengamatan. Visualisasi ini digunakan untuk membandingkan pola distribusi *cluster* antarwilayah serta perubahan keanggotaan *cluster* selama periode 2022–2024. Analisis dalam penelitian ini tidak mencakup pengujian autokorelasi spasial seperti Moran's I atau *Local Indicators of Spatial Association* (LISA) (Anselin, 2001; Ikotun *et al*., 2023; Scitovski *et al*., 2021). Dengan demikian, analisis spasial pada penelitian ini terbatas pada pemetaan distrubusi *cluster* dan perbandingan perubahan antarperiode.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebaran 20 pos pemantauan kualitas air di Provinsi Gorontalo di sajikan pada Gambar 1. Pos-pos tersebut tersebar pada wilayah hulu, tengah, dan hilir wilayah sungai yaitu, Limboto - Bolango - Bone (LBB), Randangan, dan Paguyaman. Penyebaran lokasi pemantauan memungkinkan visualisasi distribusi *cluster* pada berbagai bagian wilayah sungai serta perbandingan perubahan keanggotaan *cluster* antarperiode.

3.1. Pembentukan *Cluster*

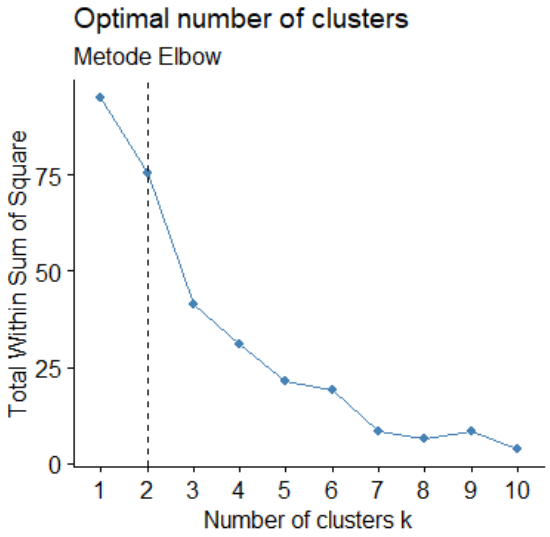
Setelah dilakukan analisis statistika deskriptif data kemudian data distandardisasi menggunakan *Z score* untuk menyeragamkan skala variabel DO, pH, suhu, DHL, dan TSS. Untuk mengurangi sensitivitas *K-Means* terhadap pemilihan centroid awal, proses *clustering* dilakukan menggunakan beberapa inisialisasi awal (*multiple random starts*). Solusi akhir dipilih berdasarkan nilai total *within cluster sum of squares* yang paling kecil. Penentuan jumlah *cluster* dievaluasi menggunakan metode *Elbow* dan *Silhoutte Coefficient.*



Gambar 1. Peta Sebaran 20 Pos Pemantauan Kualitas Air Provinsi Gorontalo

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

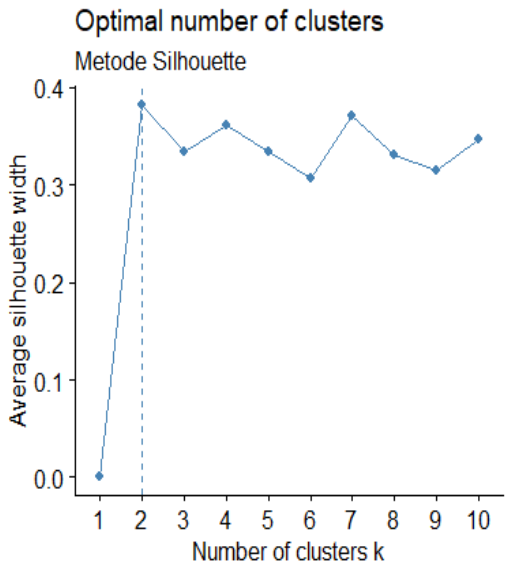
Hasil metode *Elbow* menunjukkan perubahan penurunan WCSS yang paling nyata hingga $k = 2$, dengan penurunan yang masih berlanjut pada $k = 3$. Oleh karena itu, $k = 2$ dan $k = 3$ dipertimbangkan sebagai kandidat jumlah *cluster*. Selanjutnya, kedua alternatif tersebut dievaluasi menggunakan *Silhouette Coefficient* dan dipertimbangkan berdasarkan tujuan analisis perubahan keanggotaan *cluster* antarperiode.



Sumber : Analisis Peneliti (2025)

Gambar 2. Grafik Pembentukan *Cluster* dengan Metode *Elbow*

Untuk memvalidasi hasil metode *Elbow*, dilakukan analisis *Silhouette Score* untuk berbagai jumlah *Cluster*. Meskipun nilai Silhouette tertinggi diperoleh pada $k = 2$, hasil metode Elbow menunjukkan bahwa $k = 2$ dan $k = 3$ masih merupakan alternatif jumlah *cluster* yang dapat dipertimbangkan. Oleh karena itu, pemilihan $k = 3$ dalam penelitian ini tidak dimaksudkan untuk menyatakan bahwa tiga *cluster* merupakan solusi yang secara statistik lebih optimal daripada $k = 2$, melainkan untuk memperoleh resolusi pengelompokan yang lebih informatif sesuai dengan tujuan penelitian. Penggunaan dua *cluster* menghasilkan pemisahan yang lebih umum, sedangkan tiga *cluster* memungkinkan teridentifikasinya kelompok dengan karakteristik intermediate yang penting untuk menelusuri perubahan keanggotaan *cluster* antarperiode. Karena penelitian ini berfokus pada distribusi spasial dan perubahan temporal kualitas air selama 2022–2024, keberadaan kelompok *intermediate* membantu menggambarkan pola transisi antar-lokasi secara lebih rinci. Dengan demikian, $k = 3$ dipertahankan sebagai kompromi antara hasil validasi internal dan interpretabilitas substantif untuk analisis perubahan temporal, sementara hasil *Silhouette* yang mendukung $k = 2$ tetap dilaporkan secara transparan.



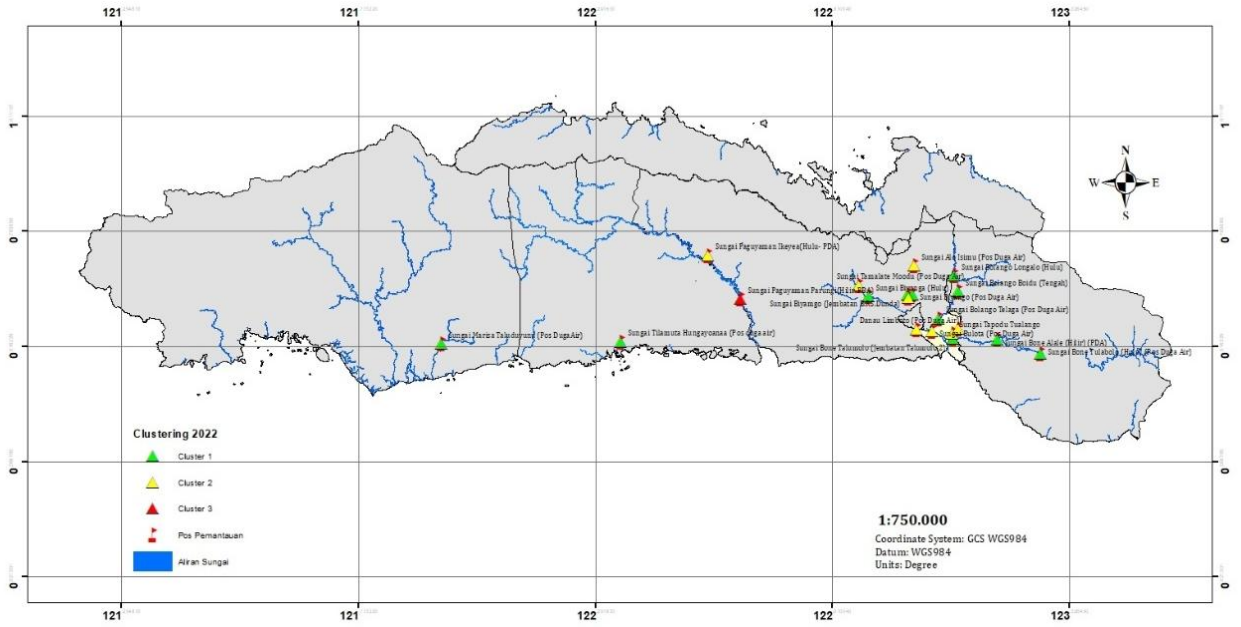
Sumber : Analisis Peneliti (2025)

Gambar 3. Hasil Validasi Pembentukan *Cluster* dengan *Silhouette Score*

Hasil analisis *K-Means* terhadap 20 titik pengamatan di Provinsi Gorontalo selama periode 2022-2024 menunjukkan variasi karakteristik fisikokimia antar lokasi dan antarperiode. Pada tahun 2022, mayoritas lokasi pada *Cluster* 1, yang dicirikan oleh DO relative tinggi (≥ 7,5 mg/L) dan DHL relative rendah (118 – 200 µS/cm), terutama pada sungai-sungai hulu seperti Bone Tualobolo, Bolango Longalo, Bone Alale, dan Biyonga Hulu. Sementara itu, beberapa lokasi seperti Tamalate Moodu (RSAS dan PDA) dan Danau Limboto sudah masuk *Cluster 2* akibat DHL yang relatif lebih tinggi (300 – 330 µS/cm) dan suhu sekitar 29 – 30˚C. Deskripsi *cluster* terseut bersifat relatif terhadap stuktur data penelitian dan tidak merepresentasikan kelas mutu air formal.

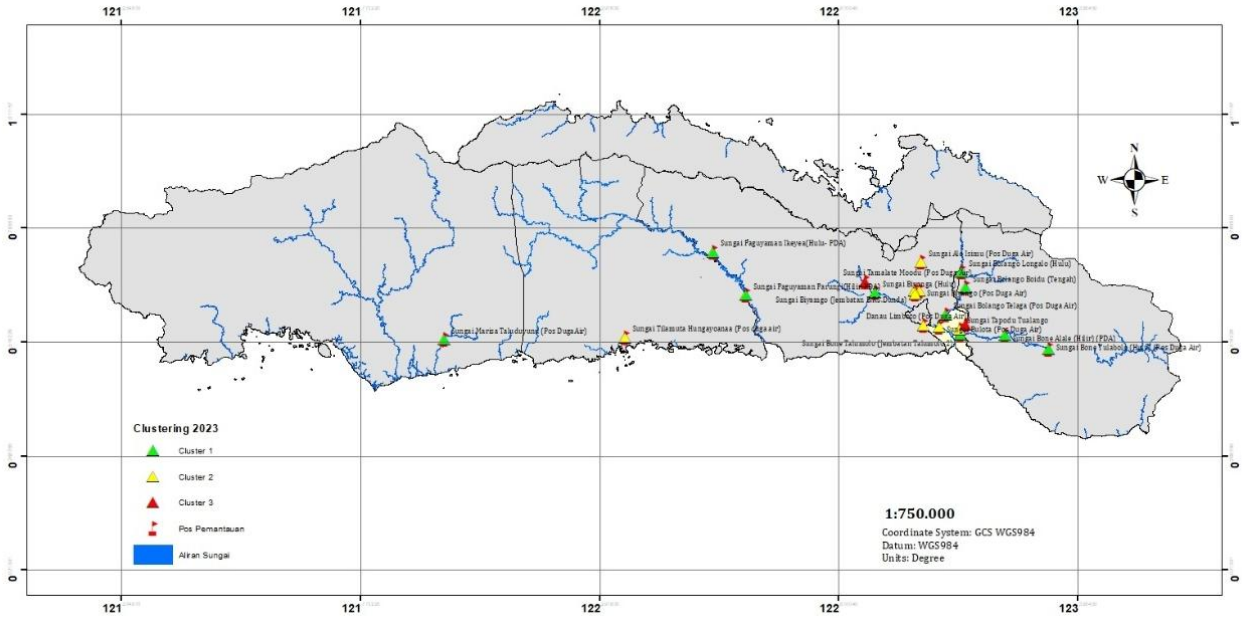
Pada tahun 2023, terjadi perubahan keanggotaan cluter pada sejumlah lokasi. Lima lokasi mengalami penurunan dari *Cluster* 1 ke *Cluster* 2, termasuk Sungai Biyango (RS Dunda) dan Paguyaman Ikeyea, yang disertai perubahan nilai DO hingga sekitar 6,7 mg/L dan suhu hingga sekitar 33˚C. Tamalate Moodu (RSAS & PDA) berada pada *Cluster* 3 dengan nilai DO sekitar 4,31 – 5,78 mg/L dan DHL sekitar 360 – 389 µS/cm. Perubahan keanggotaan *cluster* ini menunjukkan perubahan karakteristik fisikokimia relatif antarperiode dan tidak digunakan sebagai bukti langsung peningkatan sumber pencemar tertentu.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP



Sumber : Analisis Peneliti (2025)

Gambar 4. *K-Means* Kualitas Air Provinsi Gorontalo Tahun 2022



Sumber : Analisis Peneliti (2025)

Gambar 5. *K-Means* Kualitas Air Provinsi Gorontalo Tahun 2023

Pada tahun 2024, Tamalate Moodu (RSAS dan PDA) mengalami perubahan keanggotaan *cluster* dibandingkan tahun sebelumnya. Perubahan tersebut disertai variasi nilai DO antar lokasi, yaitu 7,49 mg/L pada salah satu titik dan 3,87 mg/L pada titik lainnya. Oleh karena itu, perubahan *cluster* tidak langsung diinterpretasikan sebagai peningkatan kualitas air, tetapi sebagai perubahan karakteristik fisikokimia relatif terhadap struktur *cluster*. Beberapa lokasi hulu seperti Bone Talumolo, Bone Alale, dan Bolango Boidu berada pada *Cluster* 3 pada tahun 2024, dengan DO sekitar 6,86–7,00 mg/L dan TSS sekitar 232–262 mg/L. Paguyaman Parungi dan Tilamuta Hungayoanaa menunjukkan perubahan keanggotaan *cluster* antarperiode, sedangkan Danau Limboto tetap berada pada *Cluster* 2 selama tiga tahun. Pola tersebut digunakan untuk menggambarkan persistensi dan perubahan karakteristik relatif, bukan untuk menetapkan secara langsung kondisi membaik atau memburuk.

Hasil analisis *K-Means* terhadap 20 lokasi pemantauan kualitas air sungai di Provinsi Gorontalo selama periode 2022 – 2024 menunjukkan bahwa parameter DO, pH, Suhu, DHL dan TSS, membantuk

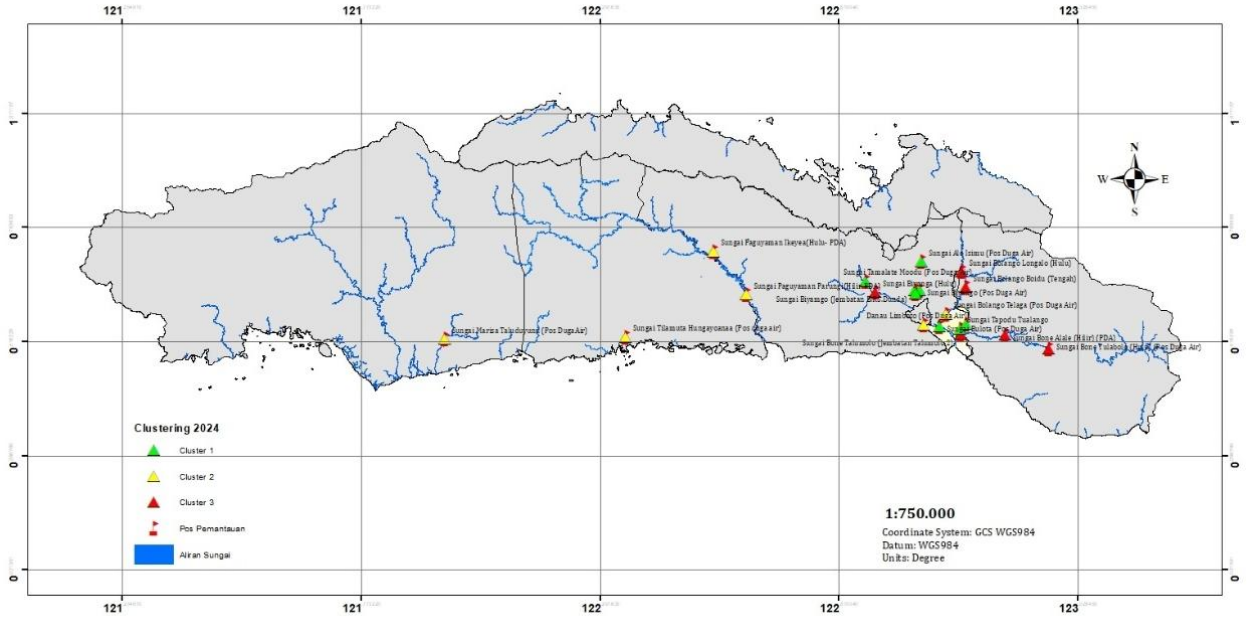
© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

pola pengelompokan yang dapat dibandingkan antarperiode. Distribusi *cluster* menunjukkan variasi spasial antar lokasi, sedangkan perubahan keanggotaan *cluster* digunakan untuk menggambarkan perubahan karakteristik fisikokimia relatif dari satu periode ke periode berikutnya.

Danau Limboto berada pada kategori stabil karena keanggotaan *cluster*nya tetap pada *Cluster* 2 selama tiga tahun. Stabilitas ini tidak serta-merta menunjukkan kondisi yang lebih baik, tetapi hanya menunjukkan konsistensi keanggotaan *cluster*. Literatur sebelumnya melaporkan bahwa Danau Limboto menghadapi persoalan sedimentasi dan perubahan kualitas perairan (Subehi *et al*., 2016). Oleh karena itu, interpretasi kondisi Danau Limboto tetap perlu mempertimbangkan nilai parameter aktual dan informasi lingkungan pendukung, bukan hanya kestabilan *cluster* (Lee *et al*., 2020; Subehi *et al*., 2016). Oleh karena itu, konsistensi cluter pada lokasi ini cenderung menggambarkan kondisi ekosistem yang stagnan dan belum mengalami perbailan kualitas air yang berarti (Ren *et al*., 2021).

Kategori stabilitas pada Tabel 2 menggambarkan frekuensi perubahan keanggotaan *cluster* dan tidak secara langsung menunjukkan tingkat prioritas pengelolaan. Lokasi yang tetap berada pada *cluster* yang sama selama tiga tahun dapat memiliki karakteristik kualitas air yang relatif konsisten, tetapi kondisi tersebut tidak selalu menunjukkan kualitas yang lebih baik. Sebaliknya, persistensi pada *cluster* dengan karakteristik fisikokimia relatif kurang menguntungkan dapat menunjukkan kebutuhan pemantauan yang lebih tinggi. Oleh karena itu, penentuan lokasi prioritas perlu mempertimbangkan secara bersama-sama karakteristik *cluster*, konsistensi keanggotaan *cluster* antar-tahun, serta nilai aktual parameter kualitas air.

Sebagian besar titik pengamatan (13 lokasi) masuk ke dalam kategori moderat, yaitu mengalami satu kali perubahan *cluster* dalam tiga tahun. Contohnya adalah sungai Bone Talumolo, Bone Tualobolo, Bone Alale, Bolango Longalo, Biyonga Hulu, hingga Tilamuta dan Marisa. Lokasi-lokasi yang termasuk kelas moderat umumnya berada di wilayah hulu Tengah atau transisi DAS, sehingga tekanan antropogenik biasanya tidak sekuat di kawasan hilir (Ji *et al*., 2021). Perubahan keanggotaan *cluster* antar-tahun perlu diinterpretasikan secara hati-hati karena dapat dipengaruhi oleh faktor temporal-hidrologis, seperti musim, curah hujan, dan debit sungai pada saat pengambilan sampel. Oleh karena itu, perubahan *cluster* dalam penelitian ini diperlakukan sebagai perubahan karakteristik fisikokimia antarperiode pengamatan dan bukan sebagai bukti tunggal adanya tren degradasi jangka panjang (Nuringtyas *et al*., 2023). Pola ini umum ditemukan pada sungai-sungai dalam pengelolaan DAS tropis, di mana faktor hidrometeorologi menjadi penentu utama fluktuasi kualitas air (Abadi *et al*., 2025; Tung & Yaseen, 2020).



Sumber: Analisis Peneliti (2025)

Gambar 6. *K-Means* Kualitas Air Provinsi Gorontalo Tahun 2024

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Tabel 2. Stabilitas Perubahan *Cluster* Kualitas Air Sungai Tahun 2022–2024

Lokasi	2022	2023	2024	Jumlah Perubahan	Kategori Stabilitas
Sungai Bone Talumolo	1	1	3	1	Moderat
Sungai Bone Tualobolo	1	1	3	1	Moderat
Sungai Bone Alale	1	1	3	1	Moderat
Sungai Bolango Longalo	1	1	3	1	Moderat
Sungai Bolango Boidu	1	1	3	1	Moderat
Sungai Bolango Telaga	1	1	2	1	Moderat
Sungai Tapodu Tualango	2	2	1	1	Moderat
Sungai Tamalate Moodu (RSAS)	2	3	1	2	Tidak Stabil
Sungai Tamalate Moodu (PDA)	2	3	1	2	Tidak Stabil
Sungai Biyonga Hulu	1	1	3	1	Moderat
Sungai Biyango (PDA)	1	2	1	2	Tidak Stabil
Sungai Biyango (RS Dunda)	1	2	1	2	Tidak Stabil
Sungai Alo Isimu	2	2	1	1	Moderat
Sungai Alophou Limehu	2	2	1	1	Moderat
Sungai Bulota	2	2	1	1	Moderat
Danau Limboto	2	2	2	0	Stabil
Sungai Paguyaman Ikeyea	2	1	2	2	Tidak Stabil
Sungai Paguyaman Parungi	3	1	2	2	Tidak Stabil
Sungai Tilamuta Hungayoanaa	1	2	2	1	Moderat
Sungai Marisa Taluduyunu	1	1	2	1	Moderat

Sumber : Analisis Peneliti (2025)

Kategori stabilitas pada Tabel 2 menggambarkan frekuensi perubahan keanggotaan *cluster* dan tidak secara langsung menunjukkan tingkat prioritas pengelolaan. Lokasi yang tetap berada pada *cluster* yang sama selama tiga tahun dapat memiliki karakteristik kualitas air yang relatif konsisten, tetapi kondisi tersebut tidak selalu menunjukkan kualitas yang lebih baik. Sebaliknya, persistensi pada *cluster* dengan karakteristik fisikokimia relatif kurang menguntungkan dapat menunjukkan kebutuhan pemantauan yang lebih tinggi. Oleh karena itu, penentuan lokasi prioritas perlu mempertimbangkan secara bersama-sama karakteristik *cluster*, konsistensi keanggotaan *cluster* antar-tahun, serta nilai aktual parameter kualitas air.

Sebagian besar titik pengamatan (13 lokasi) masuk ke dalam kategori moderat, yaitu mengalami satu kali perubahan *cluster* dalam tiga tahun. Contohnya adalah sungai Bone Talumolo, Bone Tualobolo, Bone Alale, Bolango Longalo, Biyonga Hulu, hingga Tilamuta dan Marisa. Lokasi-lokasi yang termasuk kelas moderat umumnya berada di wilayah hulu Tengah atau transisi DAS, sehingga tekanan antropogenik biasanya tidak sekuat di kawasan hilir (Ji *et al*., 2021). Perubahan keanggotaan *cluster* antar-tahun perlu diinterpretasikan secara hati-hati karena dapat dipengaruhi oleh faktor temporal-hidrologis, seperti musim, curah hujan, dan debit sungai pada saat pengambilan sampel. Oleh karena itu, perubahan *cluster* dalam penelitian ini diperlakukan sebagai perubahan karakteristik fisikokimia antarperiode pengamatan dan bukan sebagai bukti tunggal adanya tren degradasi jangka panjang (Nuringtyas *et al*., 2023). Pola ini umum ditemukan pada sungai-sungai dalam pengelolaan DAS tropis, di mana faktor hidrometeorologi menjadi penentu utama fluktuasi kualitas air (Abadi *et al*., 2025; Tung & Yaseen, 2020).

Sebagai contoh, Danau Limboto tidak mengalami perubahan keanggotaan *cluster* selama 2022–2024. Namun, kestabilan tersebut tidak dapat diinterpretasikan sebagai kondisi yang lebih baik dibandingkan lokasi lain. Persistensi pada *cluster* yang sama menunjukkan bahwa perhatian pengelolaan tidak hanya perlu diarahkan pada lokasi dengan frekuensi perpindahan *cluster* tinggi, tetapi juga pada lokasi yang secara konsisten menunjukkan karakteristik fisikokimia yang memerlukan pemantauan lebih lanjut. Beberapa lokasi seperti Bolango Longalo dan Bone Tualobolo mengalami perubahan keanggotaan *cluster* antara awal dan akhir periode pengamatan. Perubahan tersebut menunjukkan adanya perubahan karakteristik fisikokimia perairan antarperiode. Perubahan ini dapat berkaitan dengan berbagai faktor, termasuk kondisi hidrologis, musim, maupun aktivitas manusia di sekitar daerah aliran sungai. Namun, karena sumber dan beban pencemar tidak diukur secara langsung dalam penelitian ini, perubahan *cluster* tidak dapat digunakan sebagai bukti langsung peningkatan tekanan antropogenik (Wu *et al*., 2021).

Enam lokasi mengalami perubahan keanggotaan *cluster* sebanyak dua kali selama periode pengamatan, yaitu Tamalate Moodu (RSAS dan PDA), Biyango (PDA dan RS Dunda), serta Paguyaman (Ikeyea dan Parungi). Frekuensi perubahan tersebut menunjukkan variasi karakteristik fisikokimia yang lebih tinggi antarperiode. Variasi ini dapat dipengaruhi oleh kombinasi faktor hidrologis, musiman, dan aktivitas manusia di sekitar sungai; namun faktor-faktor tersebut tidak diukur secara langsung sehingga tidak dapat dinyatakan sebagai penyebab perubahan *cluster*. Perubahan *cluster* yang lebih dari satu kali menunjukkan bahwa kondisi kualitas air dengan rentan terhadap tekanan jangka pendek. Secara ekologis, Sungai dengan Tingkat

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

ketidakstabilan tinggi cenderung berada pada kondisi stress ekologis kronis (Pratama & Constantine, 2023).

3.2. Implikasi Ekologis dan Pengelolaan DAS

Temuan ini memperlihatkan bahwa , area hulu cenderung stabil, namun beberapa mulai tergredasi sehingga membutuhkan tindakan pencengahan jangka Panjang. Area Tengah-hilir menunjukkan kerentanan tinggi, teruntama yang berdekatan dengan aktivitas manusia. Pendekatan *Clustering* terbukti efektif untuk mengidentifikasi dinamika spasial-temporal kualitas air, sejalan dengan studi sebelumnya (R. Wang *et al*., 2024; X. Wang *et al*., 2023). Secara keseluruhan, ketidakstabilan kualitas air pada beberapa titik menegaskan perlunya:

1. Identifikasi lebih lanjut terhadap potensi sumber pencemaran pada masing-masing lokasi, seperti aktivitas permukiman, pertanian, maupun kegiatan lainnya di sekitar sungai.
2. Strategi pengelolaan DAS berbasis spasial-temporal, dengan prioritas pada lokasi yang menunjukkan karakteristik fisikokimia relatif kurang menguntungkan secara persisten maupun lokasi yang mengalami perubahan keanggotaan *cluster* berulang
3. Pemantauan kualitas air berkelanjutan berbasis data yang didukung oleh sistem informasi geografis dan metode analisis data yang sesuai.

Secara keseluruhan, pola *cluster* menunjukkan adanya lokasi dengan karakteristik yang relatif persisten dan lokasi yang mengalami perubahan antarperiode. Variasi DO, DHL, TSS, suhu, dan pH membantu menjelaskan perbedaan karakteristik antar*cluster*, namun perubahan tersebut tidak dapat secara langsung dikaitkan dengan peningkatan beban antropogenik tanpa pengukuran sumber dan beban pencemar secara langsung. Temuan ini mendukung perlunya pemantauan berkelanjutan pada lokasi dengan karakteristik fisikokimia yang memerlukan perhatian lebih lanjut.

Salah satu keterbatasan penelitian ini adalah tidak tersedianya informasi temporal dan hidrologis yang rinci untuk setiap pengambilan sampel, seperti tanggal pengambilan, curah hujan, dan debit sungai. Oleh karena itu, pengaruh musim dan kondisi hidrologis terhadap perubahan keanggotaan *cluster* belum dapat dipisahkan secara kuantitatif dari faktor lainnya.

4. KESIMPULAN

Hasil K-Means menunjukkan bahwa 20 lokasi pemantauan kualitas air di Provinsi Gorontalo membentuk tiga *cluster* dengan karakteristik fisikokimia yang berbeda berdasarkan DO, pH, suhu, DHL, dan TSS. Distribusi *cluster* menunjukkan variasi spasial antar lokasi serta perubahan keanggotaan *cluster* selama periode 2022–2024. Beberapa lokasi menunjukkan perubahan *cluster* antar-tahun, sedangkan lokasi lain mempertahankan karakteristik yang relatif konsisten. Lokasi yang secara berulang berada pada *cluster* dengan karakteristik fisikokimia relatif kurang menguntungkan atau mengalami perubahan keanggotaan berulang perlu mendapat perhatian lebih lanjut dalam kegiatan pemantauan. Perubahan *cluster* dalam penelitian ini diinterpretasikan sebagai perubahan karakteristik relatif antarperiode dan tidak secara langsung menunjukkan peningkatan atau penurunan status mutu air maupun penyebab pencemaran tertentu

DAFTAR PUSTAKA

Abadi, A. M., Fauzan, M., Caturiyati, C., Mahardika, B. W., Yazid, M. F., & Septianto, Y. (2025). Determining River Water Quality in the Special Region of Yogyakarta Using K-Means and Fuzzy C-Means *Clustering*. *TEM Journal*, *14*(2), 1695–1706. https://doi.org/10.18421/TEM142

Anselin, L. (2001). Spatial effects in econometric practice in environmental and resource economics. *American Journal of Agricultural Economics*, *83*(3), 705–710. https://doi.org/10.1111/0002-9092.00194

Bassi, N. (2023). Use of water accounts based indicators for water management in India. *River Published*, *July*, 307–325. https://doi.org/10.1002/rvr2.53

Briciu, A. E., Graur, A., & Oprea, D. I. (2020). Water Quality Index of Suceava River in Suceava City Metropolitan Area. *MDPI Journal*, *12*. https://doi.org/10.3390/w12082111

Christiana, R., Anggraini, I. M., & Syahwanti, H. (2020). *Analisis Kualitas Air dan Status Mutu Serta Beban Pencemaran Sungai Mahap di Kabupaten Sekadau Kalimantan Barat*. *V*(2), 941–950.

Gallego-villalobos, J., & Castillo-aguilar, M. A. (2020). *Water Quality of El Santuario Stream (Tausa-Cundinamarca) from Aquatic Macro Invertebrates and Physicochemical Parameters*. *13*(March), 1116–1123. https://doi.org/10.17485/ijst/2020/v13i10/146318

Harrison, I. A. N. J., Green, P. A., Farrell, T. A., & Juffe-bignoli, D. (2016). *Protected areas and freshwater provisioning : a global assessment of freshwater provision , threats and management strategies to support human water security*. *26*(February), 103–120. https://doi.org/10.1002/aqc.2652

Ikotun, A. M., Ezugwu, A. E., Abualigah, L., & Abuhaija, B. (2023). K-means *clustering* algorithms : A comprehensive review , variants analysis , and advances in the era of big data. *Information Sciences*, *622*, 178–210. https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.11.139

Ji, L., Li, Y., Zhang, G., & Bi, Y. (2021). Anthropogenic Disturbances Have Contributed to Degradation of River Water Quality in Arid Areas. *MDPI Journal*, *13*(3305). https://doi.org/10.3390/w13223305

Lee, S., Kim, J., Hwang, J., Lee, E., Lee, K., Oh, J., Park, J., & Heo, T. (2020). *Clustering* of Time Series Water Quality Data Using Dynamic Time Warping : A Case Study from the Bukhan River Water Quality Monitoring Network. *MDPI Journal*, *12*(2411).

Novianta, M. A., Syafrudin, S., & Warsito, B. (2023). K-Means *Clustering* for Grouping Rivers in DIY based on Water Quality Parameters. *JUITA: Jurnal Informatika*, *11*(1), 155–163.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Nuringtyas, S. B., Harini, R., & Widayani, P. (2023). Study of water degradation due to community activities in The Lake Batur ecosystem , Bangli District , Bali. *ICST UGM 2023*. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346803008

Pratama, M. A., & Constantine, D. M. (2023). A Spatiotemporal Analysis of Organic Pollutants Contamination in Ciliwung River, Indonesia. *CSID Journal of Infrastructure Development Volume*, *6*(2), 198–210. https://doi.org/10.7454/jid.v6.i2.1119

Ren, J. Y., Liu, H. M., Ding, S. Y., & Cao, Z. H. (2021). Spatio-Temporal Variation Characteristics of Water Quality and Its Response to Climate : A Case Study in Yihe River Basin. *Journal of Environmental Informatics Letters*, *6*(1), 10–22. https://doi.org/10.3808/jeil.202100070.nerable

Scitovski, R., Martínez-álvarez, F., Sabo, K., & Ungar, S. (2021). *Cluster Analysis and Applications*. Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74552-3

Steffelbauer, D. ., Blokker, M., Buchberger, S. G., Knobbe, A., & Abraham, E. (2021). Dynamic Time Warping *Clustering* to Discover Socioeconomic Characteristics in Smart Water Meter Data. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *6*(147). https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001360

Subehi, L., Wibowo, H., & Jung, K. (2016). *Characteristics of Rainfall-Discharge and Water Quality at Limboto Lake , Gorontalo , Indonesia*. *48*(3), 288–300. https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2016.48.3.4

Tung, T. M., & Yaseen, Z. M. (2020). Review papers A survey on river water quality modelling using artificial intelligence models : 2000 – 2020. *Journal of Hydrology*, *585*(February), 124670. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124670

Wang, R., Liu, L., Tao, Z., Wan, B., Wang, Y., Tang, X., Li, Y., & Li, X. (2024). Effect of urbanization and urban forests on water quality improvement in the Yangtze River Delta : A case study in Hangzhou , China. *Journal of Environmental Management*, *351*(January), 119980. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119980

Wang, X., Li, Y., Qiao, Q., Tavares, A., & Liang, Y. (2023). Water Quality Prediction Based on Machine Learning and Comprehensive Weighting Methods. *MDPI Journal*, 1–20. https://doi.org/10.3390/e25081186

Wu, J., Zeng, S., Yang, L., Ren, Y., & Xia, J. (2021). Spatiotemporal Characteristics of the Water Quality and Its Multiscale Relationship with Land Use in the Yangtze River Basin. *MDPI Journal*. https://doi.org/10.3390/rs13163309

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP