



Analisis Kualitas Air di Danau Tondano Menggunakan Evaluasi Temporal, WQI, CCME-WQI, dan PCA

Meilly Onibala¹, Arthur Harris Thambas², Herawati Riogilang³

Universitas Sam Ratulangi, Indonesia^{1,2,3}

Email: meillyonibala96@gmail.com, arthurthambas@unsrat.ac.id,
herawaty_riogilang@unsrat.ac.id

Abstrak

Danau Tondano, sebagai sumber air baku utama di Sulawesi Utara, menghadapi tekanan pencemaran akibat limbah domestik, aktivitas pertanian, dan invasi eceng gondok. Penelitian ini mengevaluasi kualitas air di titik intake PDAM Paleloan menggunakan data ONLIMO (Januari 2024–Februari 2025) dan menganalisis 11 parameter dengan pendekatan WQI, CCME-WQI, regresi tren temporal (OLS, Huber, Theil–Sen), korelasi Spearman, serta PCA. Hasil menunjukkan mutu air berkategori sedang (WQI = 55,59) hingga marginal (CCME-WQI = 59,72), dengan tekanan utama berasal dari COD, BOD, TSS, nitrat, dan amonium. Analisis temporal mengungkap pola musiman signifikan, sementara PCA mengidentifikasi parameter dominan yang menjelaskan >96% variasi. Penelitian ini merekomendasikan pemantauan terintegrasi, pengendalian limbah berbasis komunitas, restorasi ekosistem danau, serta penyederhanaan sistem pemantauan berbasis hasil PCA guna mendukung pengelolaan danau yang adaptif dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Kualitas air, Danau Tondano, WQI, CCME-WQI, PCA, korelasi Spearman, tren temporal

Abstract

Lake Tondano, a primary raw water source in North Sulawesi, is experiencing increasing pollution pressure from domestic wastewater, intensive agriculture, and uncontrolled water hyacinth proliferation. This study assessed water quality at the PDAM intake point in Paleloan using ONLIMO monitoring data (January 2024–February 2025), analyzing 11 parameters through Water Quality Index (WQI), Canadian Council of Ministers of the Environment WQI (CCME-WQI), temporal trend regression (OLS, Huber, Theil–Sen), Spearman correlation, and Principal Component Analysis (PCA). Results indicated moderate (WQI = 55.59) to marginal (CCME-WQI = 59.72) water quality, with key pollutants including COD, BOD, TSS, nitrate, and ammonium. Seasonal trends were evident, and PCA identified dominant parameters explaining over 96% of total variation. The study recommends integrated monitoring, community-based wastewater management, ecosystem restoration, and simplified monitoring systems based on PCA to support adaptive and sustainable lake management.

Keywords: Water quality, Lake Tondano, WQI, CCME-WQI, PCA, Spearman correlation, temporal trend

PENDAHULUAN

Danau Tondano sebagai danau prioritas nasional (Perpres No. 60/2021) berperan penting sebagai sumber air baku, namun mengalami degradasi kualitas akibat limbah domestik, aktivitas pertanian intensif, dan proliferasi eceng gondok (Sittadewi, 2008; Rumengan et al., 2017; Hendratta et al., 2024). Proses eutrofikasi, penurunan DO, dan peningkatan TSS turut menurunkan fungsi ekologis dan ekonominya (Wetzel, 2001; Wantasen et al., 2012; Lumb et al., 2011; Sliva & Williams, 2001). Untuk mengatasi persoalan tersebut, sistem ONLIMO dari KLHK digunakan sebagai sumber data pemantauan otomatis, sementara metode evaluasi mutu nasional berbasis Indeks Pencemar (IP) dan IKA (Permen LHK No. 27/2021) masih menggunakan baku mutu kelas II. Penelitian ini menawarkan pendekatan alternatif yang lebih kontekstual dengan mengadopsi baku mutu kelas I (PP No. 22/2021), serta menganalisis 11 parameter fisik-kimia menggunakan WQI, CCME-WQI, regresi tren (Huber, Theil-Sen, OLS), korelasi Spearman, dan PCA. Kebaruan penelitian terletak pada (1) penyesuaian metode WQI dengan bobot termodifikasi (Abbasi & Abbasi, 2012; Tyagi et al., 2013), (2) penggunaan data ONLIMO untuk analisis multimetode, dan (3) integrasi tren dengan data curah hujan BMKG. Pendekatan ini diharapkan dapat mendukung pengelolaan kualitas air Danau Tondano yang lebih adaptif dan berbasis bukti ilmiah (Hendratta et al., 2024).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif berdasarkan data sekunder dari sistem pemantauan otomatis ONLIMO di titik intake PDAM Paleloan, Danau Tondano, sesuai ketentuan Permen LHK No. 27 Tahun 2021. Data yang dianalisis mencakup 11 parameter kualitas air selama Januari 2024 – Februari 2025.

Tahapan analisis dimulai dari pembersihan data, penanganan nilai kosong (dengan imputasi median), dan identifikasi outlier. Untuk mengevaluasi tren perubahan kualitas air, digunakan tiga pendekatan regresi: OLS, Huber Regression, dan Theil–Sen Estimator, dengan integrasi data iklim dari BMKG untuk interpretasi musiman.

Mutu air dievaluasi dengan metode Water Quality Index (WQI) dan CCME-WQI, yang memberikan perspektif komplementer antara skor rerata dan pelanggaran baku mutu. Korelasi antarparameter dianalisis menggunakan Spearman Rank Correlation untuk mengungkap hubungan antar unsur pencemar. Principal Component Analysis (PCA) digunakan untuk mereduksi kompleksitas data dan mengidentifikasi parameter dominan.

Seluruh data berasal dari pemantauan visual manual sebelum sistem ONLIMO diperbarui dengan RTU pada akhir 2024. Pendekatan ini memungkinkan integrasi dimensi temporal, spasial terbatas, dan multivariat secara sistematis untuk mendukung pengelolaan kualitas air Danau Tondano yang adaptif dan berbasis bukti.

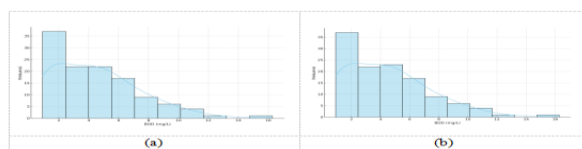
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembersihan Data (Data Cleaning)

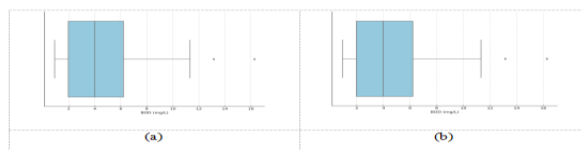
Sebelum digunakan untuk analisis maka data perlu dibersihkan untuk memastikan dataset yang digunakan dalam analisis kualitas air di Danau Tondano memiliki kualitas yang baik. Langkah-langkah yang dilakukan dalam proses pembersihan data ini adalah:

Identifikasi dan Penanganan Nilai Kosong (Missing Value)

Data hasil pembacaan alat ONLIMO masih mengandung beberapa nilai kosong, khususnya pada parameter BOD, Kekeruhan, dan Amonium. Nilai kosong ini disebabkan oleh ketidakjelasan hasil pengamatan pada waktu tertentu, sehingga tidak dapat dicatat secara valid. Untuk memilih metode imputasi yang tepat, dilakukan analisis terhadap distribusi awal data guna memastikan bahwa pengisian nilai kosong tidak mengubah karakteristik distribusi atau menimbulkan bias baru. Berdasarkan hasil analisis tersebut, disimpulkan bahwa metode median merupakan pendekatan yang paling sesuai, karena lebih tahan terhadap data tidak normal, kehadiran outlier, dan fluktuasi acak, sehingga mampu menjaga representasi data secara statistik dan ekologis dengan lebih baik.

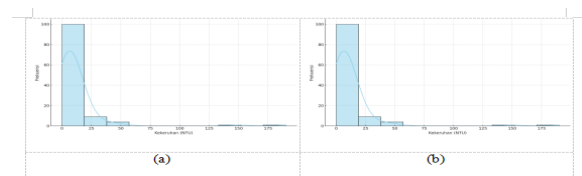


Gambar 23. Histogram BOD Sebelum (a) dan Sesudah (b) Imputasi Nilai Kosong

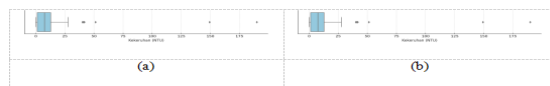


Gambar 24. Boxplot BOD Sebelum (a) dan Sesudah (b) Imputasi Nilai Kosong

Gambar 1. Histogram dan Boxplot BOD sebelum dan Sesuai Imputasi Nilai Kosong

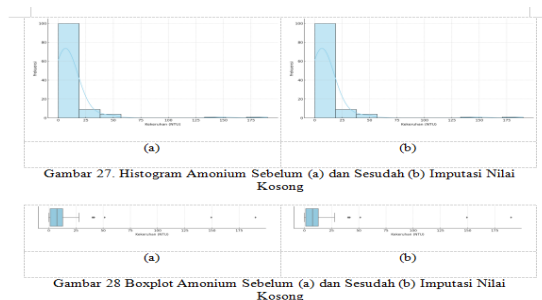


Gambar 25. Histogram Kekeruhan Sebelum (a) dan Sesudah (b) Imputasi Nilai Kosong



Gambar 26. Boxplot Kekeruhan Sebelum (a) dan Sesudah (b) Imputasi Nilai Kosong

Gambar 2. Histogram dan Boxplot Kekeruhan sebelum dan Sesuai Imputasi Nilai Kosong



Gambar 3. Histogram dan Boxplot Amonium sebelum dan Sesuai Imputasi Nilai Kosong

Identifikasi dan Penanganan Outlier

Setelah imputasi nilai kosong, outlier diidentifikasi menggunakan dua metode: IQR untuk distribusi miring dan Z-score untuk distribusi mendekati normal. Hasil analisis menunjukkan bahwa IQR lebih sensitif dan sesuai untuk sebagian besar parameter seperti COD, TSS, Nitrat, TDS, BOD, pH, Konduktivitas, Kekeruhan, dan Amonium yang memiliki distribusi miring ke kanan. Sebagai contoh, Amonium memiliki 35 outlier berdasarkan IQR, namun hanya 2 berdasarkan Z-score. Hal ini mengindikasikan bahwa Z-score kurang efektif pada data yang tidak normal.

Berdasarkan proporsi outlier, digunakan dua metode regresi robust: Huber Regression untuk parameter dengan outlier <10% (COD, BOD, pH, Kekeruhan), dan Theil–Sen Estimator untuk parameter dengan outlier 10–30% (TSS, Nitrat, TDS, Konduktivitas, Amonium). Parameter DO dan Suhu, yang tidak memiliki outlier dan berdistribusi normal, tetap dianalisis dengan OLS.

Hasil regresi menunjukkan bahwa:

1. Huber Regression menghasilkan nilai yang mirip dengan OLS, menandakan outlier tidak terlalu memengaruhi tren.
2. Theil–Sen Regression memberikan perbedaan signifikan terhadap OLS, membuktikan sensitivitasnya terhadap pencilan.
3. Meskipun Amonium memiliki banyak outlier, distribusinya sangat sempit sehingga OLS tetap stabil.

Pendekatan kombinasi ini memastikan bahwa setiap parameter dianalisis dengan metode paling tepat, sehingga tren temporal kualitas air yang dihasilkan lebih akurat, robust, dan tidak bias.

Tabel 1. Perbandingan Persamaan OLS dan Persamaan Robust Regression (Huber Regression dan Theil Sen Regression)

Parameter	OLS	Huber Regression	Theil-sen Estimator
COD (mg/L)	$Y=32.56-0.24.X$	$Y=32.64-0.24.X$	
TSS (mg/L)	$Y=8.22-0.06.X$	$Y=8.24-0.06.X$	
Nitrat NO ₃ (mg/L)	$Y=7.04+0.01.X$	$Y=7.02+0.01.X$	
TDS (mg/L)	$Y=19.36-0.13.X$	$Y=19.05-0.13.X$	
BOD (mg/L)	$Y=24.58-0.20.X$		$Y = 20.07 - (0.23 \cdot X)$
pH	$Y=12.88+0.01.X$		$Y=1.95 - (0.0055 \cdot X)$
Konduktivitas (μS/cm)	$Y=183.29-0.12.X$		$Y=174-0.00.X$
Kekeruhan (NTU)	$Y=210.68-0.14.X$		$Y=200-0.00.X$
Amonium (mg/L)	$Y=0.01+0.00.X$		$Y=0.01-0.00.X$

Sumber : Hasil Analisis

Validasi Dan Evaluasi Hasil Robust Regression

Validasi dan evaluasi hasil robust regression dilakukan untuk menjaga validitas

dan akurasi data dalam analisis temporal kualitas air Danau Tondano. Perbandingan antara Ordinary Least Square (OLS), Huber Regression, dan Theil-Sen Regression menunjukkan bahwa beberapa parameter kualitas air memiliki sensitivitas tinggi terhadap outlier, yang terlihat dari perbedaan signifikan pada nilai intercept dan slope antara OLS dan Theil-Sen. Hasil ini menunjukkan bahwa metode robust regression lebih mampu meminimalkan pengaruh outlier, sehingga pola tren yang dihasilkan lebih stabil dan representatif. Robust regression berperan penting sebagai metode validasi tambahan untuk memastikan bahwa hasil analisis temporal tidak bias akibat data ekstrim.

Untuk parameter dengan distribusi mendekati normal dan jumlah outlier yang sangat rendah, seperti DO dan Suhu, analisis menggunakan OLS tetap valid karena menunjukkan kestabilan tren. Kombinasi penggunaan robust regression dan OLS dipilih untuk menjaga validitas hasil analisis, memastikan setiap parameter dianalisis dengan metode yang paling sesuai. Dari perbandingan tersebut, dapat disimpulkan bahwa OLS cukup stabil dan tidak terpengaruh signifikan oleh outlier, sementara Theil-Sen menunjukkan dampak yang lebih besar dari outlier. Meskipun parameter Amonium memiliki jumlah outlier terbesar, variabilitas data yang rendah menjadikan model OLS tetap stabil.

Analisis Temporal

Setelah data dibersihkan dan dianalisis secara statistik deskriptif, langkah berikutnya adalah Analisis Temporal untuk mengevaluasi bagaimana kualitas air berubah seiring berjalannya waktu. Dalam penelitian ini analisis tren temporal dilakukan berdasarkan rata-rata bulanan setiap parameter. Data harian yang diperoleh dari alat ONLIMO diolah menjadi rata-rata bulanan untuk memperhalus fluktuasi jangka pendek dan mempermudah analisis tren jangka panjang.

Tabel 2. Persamaan Regresi Tren Temporal Parameter Kualitas Air

Parameter	Persamaan Tren Temporal
COD (mg/L)	$Y=32.64-0.24.X$
TSS (mg/L)	$Y=8.24-0.06.X$
Nitrat NO3 (mg/L)	$Y=7.02+0.01.X$
TDS (mg/L)	$Y=19.05-0.13.X$
BOD (mg/L)	$Y = 20.07 - (0.23 \cdot X)$
pH	$Y=1.95 - (0.0055 \cdot X)$
Konduktivitas ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	$Y=174-0.00.X$
Kekeruhan (NTU)	$Y=200-0.00.X$
Amonium (mg/L)	$Y=0.01-0.00.X$
DO (mg/L)	$Y=0.97+0.03.X$
Suhu($^{\circ}\text{C}$)	$Y=25.731-0.001.X$

Sumber : Hasil Analisis

Dari hasil Analisis Temporal kualitas air Danau Tondano (Januari 2024 - Februari 2025) maka dapat disimpulkan bahwa:

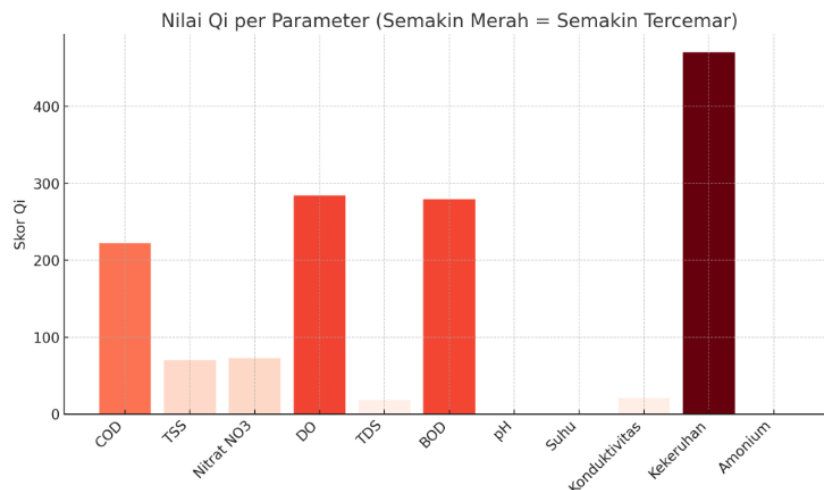
1. Parameter COD (Chemical Oxygen Demand)
 - a. Terjadi penurunan signifikan dari 33,7 mg/L (Jan 2024) ke 4,21 mg/L (Feb 2025).
 - b. Fluktuasi dipengaruhi oleh pembersihan eceng gondok, musim kemarau, dan fenomena first flush di awal musim hujan.
 - c. Robust regression menunjukkan tren penurunan jangka panjang, menandakan potensi perbaikan kualitas air.
2. Parameter TSS (Total Suspended Solids)
 - a. Fluktuasi tajam dengan lonjakan di Maret 2024 (51,65 mg/L) akibat limpasan sedimen saat puncak musim hujan.
 - b. Peningkatan TSS juga terjadi saat pembersihan eceng gondok (Agustus 2024) dan

- first flush (Oktober 2024).
- c. Akhir periode menunjukkan penurunan drastis, TSS 0 mg/L (Feb 2025), dipengaruhi oleh proses pengendapan dan stabilnya curah hujan.
3. Parameter Nitrat (NO_3^-)
 - a. Konsentrasi relatif rendah di awal ($\leq 5,02$ mg/L), melonjak tajam 82,78 mg/L (Sept 2024) akibat first flush dan limpasan pupuk pertanian.
 - b. Setelah itu menurun kembali di puncak musim hujan (0,33 mg/L di Feb 2025).
 - c. Nitrat sangat sensitif terhadap aktivitas pertanian dan pola musim.
 4. Parameter DO (Dissolved Oxygen)
 - a) Fluktuasi signifikan, sempat turun drastis 0,46 mg/L (Mei 2024) akibat dekomposisi biomassa eceng gondok dan limpasan organik.
 - b) Pulih di musim kemarau dan puncak musim hujan (4,36 mg/L di Jan 2025).
 - c) Risiko hipoksia tinggi di awal musim hujan dan saat bahan organik tinggi.
 5. Parameter TDS (Total Dissolved Solids)
 - a) Stabil di kisaran 174 - 232 mg/L.
 - b) Kenaikan di Maret dan September 2024 akibat limpasan dan pembersihan eceng gondok.
 - c) Robust regression menunjukkan tren jangka panjang stabil, belum mengancam ekosistem.
 6. Parameter BOD (Biochemical Oxygen Demand)
 - a) Penurunan bertahap dari 8,81 mg/L (Jan 2024) menjadi 1,05 mg/L (Feb 2025).
 - b) Naik sesaat akibat pembersihan eceng gondok dan first flush.
 - c) Tren jangka panjang membaik, menunjukkan penurunan beban organik.
 7. Parameter pH
 - a) Stabil di rentang 6,98 - 8,28.
 - b) Naik di musim kemarau, turun di musim hujan karena limpasan dan senyawa asam.
 - c) pH masih dalam batas wajar dan aman bagi ekosistem.
 8. Parameter Suhu
 - a) Fluktuasi ringan di kisaran 25°C - 26°C .
 - b) Penurunan saat musim kemarau karena evaporasi dan volume air menurun.
 - c) Robust regression stabil di $25,7^\circ\text{C}$, tidak mengindikasikan perubahan besar.
 9. Parameter Konduktivitas
 - a) Berkisar 176 - 266 $\mu\text{S}/\text{cm}$, naik saat first flush dan turun di puncak musim hujan akibat efek pengenceran.
 - b) Stabil menurut robust regression, tidak mengancam.
 10. Parameter Kekkeruhan
 - a) Naik signifikan di Maret (23,75 NTU) dan Oktober 2024 (27,59 NTU) karena limpasan dan pembersihan eceng gondok.
 - b) Akhirnya turun drastis 0,12 NTU (Feb 2025).
 11. Parameter Amonium (NH_4^+)
 - a) Fluktuasi ringan, mayoritas di 0,01 mg/L.
 - b) Lonjakan 0,02 mg/L (Sept 2024) saat first flush membawa beban nitrogen.
 - c) Tetap dalam kategori rendah dan aman, namun perlu dimonitor.

Secara umum, hasil analisis tren temporal menunjukkan bahwa kualitas air Danau Tondano cenderung membaik secara bertahap, meskipun masih dipengaruhi oleh faktor musiman dan aktivitas manusia di sekitarnya. Temuan ini mendukung pentingnya pengelolaan berbasis musim dan ekosistem, termasuk pengaturan waktu pembersihan eceng gondok dan pengendalian limpasan pertanian. Pemantauan jangka panjang sangat diperlukan untuk memastikan tren perbaikan ini terus berlanjut dan berdampak positif terhadap ekosistem perairan secara menyeluruh.

Perhitungan Water Quality Index (WQI)

Penilaian kualitas air Danau Tondano menggunakan metode Water Quality Index (WQI) menghasilkan nilai indeks sebesar 55,59, yang masuk dalam kategori “sedang” (51–70). Nilai ini dihitung berdasarkan 11 parameter fisik-kimia, dengan kontribusi tertinggi berasal dari DO, BOD, COD, dan kekeruhan, yang menunjukkan tingkat pencemaran organik dan padatan tersuspensi yang cukup signifikan. Dalam penelitian ini, digunakan pendekatan kebaruan berupa penyesuaian bobot relatif (W_i) melalui proses normalisasi dengan konstanta (*scaling factor*) sebesar 0,945179, agar total bobot menjadi tepat 1,00. Penyesuaian ini menjamin konsistensi metodologis sekaligus memungkinkan integrasi parameter tambahan seperti suhu, konduktivitas, dan kekeruhan ke dalam struktur WQI secara proporsional. Meskipun beberapa parameter seperti Nitrat, pH, TDS, dan konduktivitas memiliki outlier, dampaknya terhadap hasil akhir WQI tidak dominan karena bobot relatifnya lebih kecil. Nilai Q_i yang tinggi tidak selalu menunjukkan kualitas baik, melainkan menandakan pencemaran berat ketika melebihi ambang batas mutu. Dengan demikian, kualitas air Danau Tondano tergolong masih dapat dimanfaatkan untuk keperluan terbatas seperti irigasi atau air baku dengan pengolahan, namun tidak disarankan untuk konsumsi langsung. Temuan ini menegaskan perlunya pengelolaan kualitas air secara berkelanjutan dan kontekstual.



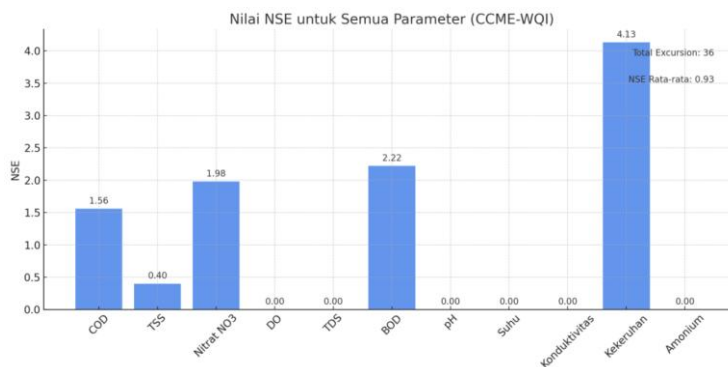
Gambar 4 Visualisasi Nilai Skor Kualitas(Q_i) Parameter Kualitas Air

Perhitungan Kualitas Air dengan Metode Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME-WQI), Sebagai Pembanding

Penilaian kualitas air Danau Tondano menggunakan metode CCME-WQI menghasilkan skor akhir 59,72, yang tergolong dalam kategori Marginal, mencerminkan kualitas air yang mulai tertekan oleh pencemaran, khususnya dari BOD, COD, Nitrat, TSS, dan Kekeruhan. Untuk menjaga kontinuitas data, nilai nol pada parameter TSS dan Amonium disubstitusi dengan pendekatan LOD/2 agar perhitungan tetap valid dan representatif.

Sebanyak 5 dari 11 parameter mengalami pelanggaran terhadap baku mutu ($F1 = 45,45\%$), dan sekitar 27,27% observasi menunjukkan pelanggaran ($F2$), dengan tingkat keparahan pelanggaran tinggi ($F3 = 0,93$), terutama pada Kekeruhan ($NSE = 4,13$), disusul BOD, Nitrat, dan COD. Sementara itu, parameter seperti DO, pH, suhu, TDS, konduktivitas, dan amonium berada dalam batas aman dan tidak berkontribusi negatif terhadap indeks.

Hasil ini menandakan bahwa meskipun sebagian besar parameter masih dalam ambang normal, pencemaran dari beban organik dan sedimentasi cukup serius dan perlu ditangani. Direkomendasikan penguatan IPAL komunal, penerapan buffer zone, sistem monitoring berkelanjutan, restorasi ekosistem riparian, edukasi masyarakat, serta penelitian lanjutan terkait model beban pencemaran untuk mendukung pengelolaan kualitas air Danau Tondano secara terpadu dan berkelanjutan.

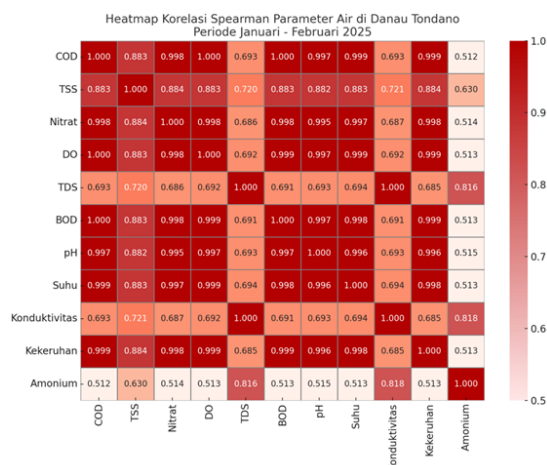


Gambar 5. Nilai NSE Untuk Semua Parameter (CCME-WQI)

Korelasi Antar Parameter

Dalam penelitian ini, analisis korelasi menggunakan metode Spearman dilakukan untuk mengidentifikasi pola hubungan antar parameter kualitas air di Danau Tondano. Spearman dipilih karena sesuai untuk data yang tidak terdistribusi normal dan mengandung banyak outlier. Tujuan analisis ini adalah untuk memastikan konsistensi hubungan antara dua parameter, sehingga dapat memperkuat interpretasi keterkaitan antar faktor pencemar.

Setelah menghitung nilai distribusi-t dan derajat kebebasan ($df = n - 2$), nilai p-value diperoleh menggunakan kalkulator statistik. Dengan 11 parameter, jumlah pasangan korelasi yang dihitung adalah 55, menghasilkan total 110 korelasi yang dianalisis. Berdasarkan klasifikasi Statstutor (2020), hasil korelasi Spearman antarparameter kualitas air Danau Tondano menunjukkan bahwa 31 pasangan memiliki korelasi sangat kuat dan signifikan ($\rho \geq 0,80$), 17 pasangan menunjukkan korelasi kuat ($\rho 0,60-0,79$), dan 7 pasangan berada dalam kategori sedang namun signifikan ($\rho < 0,60$). Seluruh nilai korelasi bersifat simetris ($\rho[X,Y] = \rho[Y,X]$) dan mencerminkan keterkaitan fungsional antarparameter, baik secara kimiawi, fisik, maupun ekologis. Temuan ini mengindikasikan bahwa perubahan satu parameter cenderung diikuti oleh perubahan parameter lainnya, memperkuat pemahaman bahwa dinamika kualitas air Danau Tondano merupakan hasil interaksi sistemik dan saling bergantung dalam lingkungan perairan.



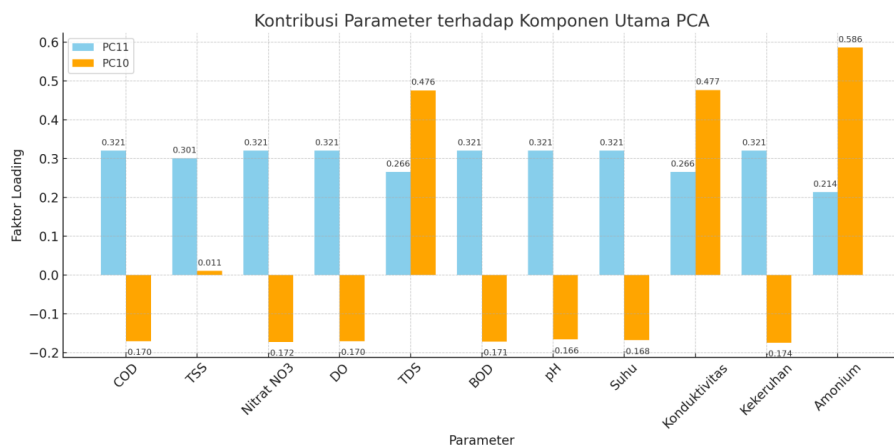
Gambar 6 Heatmap Korelasi Parameter Kualitas Air Danau Periode Januari 2024 s.d Februari 2025

Analisis Principal Component Analysis (PCA)

Analisis PCA dilakukan untuk mereduksi kompleksitas 11 parameter kualitas air Danau Tondano dan mengidentifikasi variabel dominan penyebab variasi mutu air. Berdasarkan data bulanan yang telah distandarisasi, diperoleh dua komponen utama yang signifikan, yaitu PC10 dan PC11, yang secara kumulatif menjelaskan 96,36% total variasi data.

PC10 didominasi oleh Amonium, Konduktivitas, dan TDS, mencerminkan dimensi kontaminasi ionik dan nitrogen yang berkaitan erat dengan limbah domestik dan limpasan pertanian. Sementara PC11 memuat kontribusi seragam dari COD, BOD, DO, Nitrat, pH, Suhu, TSS, dan Kekeruhan, yang menggambarkan stabilitas umum kualitas air akibat faktor biologis dan musiman.

Hasil ini memberikan dasar strategis untuk fokus pemantauan kualitas air. PC10 dapat menjadi indikator prioritas untuk pengendalian pencemaran spesifik, sedangkan PC11 bermanfaat dalam menilai kondisi ekologis secara menyeluruh dan jangka panjang. Temuan ini sejalan dengan studi JICA (2004), Tyagi et al. (2013), dan Rumengan et al. (2017), serta mendukung pengelolaan kualitas air yang efisien dan berbasis data.



Gambar 7 Kontribusi Parameter Terhadap Komponen Utama PCA

KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis kualitas air Danau Tondano di titik intake PDAM Desa Paleloan dengan data ONLIMO periode Januari 2024–Februari 2025 menggunakan pendekatan integratif: WQI, CCME-WQI, korelasi Spearman, regresi robust, dan PCA. Hasil menunjukkan kualitas air berada pada kategori "sedang" (WQI = 55,59) dan "marginal" (CCME-WQI = 59,72), dengan parameter dominan berupa DO, COD, BOD, TSS, kekeruhan, dan nitrat yang mencerminkan tekanan eutrofikasi dan pencemaran organik. Pola musiman signifikan teridentifikasi, termasuk lonjakan parameter saat transisi musim. PCA mengungkap dua komponen utama yang menjelaskan >96% variasi data, mengelompokkan parameter sesuai karakteristik pencemarnya. Rekomendasi meliputi penerapan strategi rekayasa lingkungan adaptif seperti wetland terapung, biofilter, sistem aerasi terdesentralisasi, dan integrasi pemantauan berbasis IoT untuk mitigasi pencemaran, perlindungan infrastruktur, dan penguatan zonasi konservasi danau secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abasi, T. dan S. A. Abbasi. 2012. *Water Quality Indices*. Elsevier. 378 hal.
- Abdi, H. dan L. J. Williams. 2010. *Principal component analysis*. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4): 433–459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
- Abed, S. N. 2017. *Effects of plants and temperature on nitrogen removal in horizontal*

- subsurface flow constructed wetlands treating domestic wastewater*. Disertasi. University of Salford, United Kingdom. 230 hal. <https://usir.salford.ac.uk/id/eprint/43267/>
- Adjovu, G. E., H. Stephen, D. James dan S. Ahmad. 2023. *Measurement of total dissolved solids and total suspended solids in water systems: A review of the issues, conventional, and remote sensing techniques*. *Remote Sensing*, 15(13): 3534. <https://doi.org/10.3390/rs15133534>
- Apriyana, A., Paikun dan B. Jatmika. 2019. *Analisis daya tampung septic tank type komunal di Kelurahan Tegal Gundil Kota Bogor*. *Jurnal J-TESIL*, 1(1): 1–6.
- Arumugam, P., L. Zuma, S. Mercer, L. Govender, J. Pocock, C. J. Brouckaert dan T. Gounden. 2021. *The potential of decentralised wastewater treatment in urban and rural sanitation in South Africa: Lessons learnt from a demonstration-scale DEWATS within the eThekweni Municipality*. *Water SA*, 47(3): 324–333. <https://doi.org/10.17159/wsa/2021.v47.i3.11763>.
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) dan Water Environment Federation (WEF). 1999. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (19th ed.). American Public Health Association. 541 hal.
- Bates, H., M. Pierce dan A. Benter. 2021. *Real-time environmental monitoring for aquaculture using a LoRaWAN-based IoT sensor network*. *Sensors*, 21(23): 7963. <https://doi.org/10.3390/s21237963>
- Bensoltane, M. A., L. Zeghadnia, N. Bordji, M. Gagan dan S. Bouranen. 2021. *Drinking water quality assessment using Principal Component Analysis: Case study of the town of Souk Ahras, Algeria*. *Egyptian Journal of Chemistry*, 64(6): 3069–3075. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2021.53654.3112>
- Brown, R. M., N. I. McClelland, R. A. Deininger dan R. G. Tozer. 1970. *A water quality index—Do we dare?* *Water and Sewage Works*, 117(10): 339–343.
- BMKG. 2024–2025. *Buletin Iklim Bulanan Nasional* (Edisi Januari 2024 s.d. Februari 2025). Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. Diakses pada Juni 2025 dari <https://iklim.bmkg.go.id>
- Chaaya, F., B. Miller, M. Gordos, B. Tamburic dan S. Felder. 2025. *Artificial destratification options for reservoir management*. *Science of the Total Environment*, 967: 178738. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178738>
- Chapman, D. (Ed.). 1996. *Water Quality Assessments – A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring* (2nd ed.). WHO/UNEP/UNESCO. 626 hal.
- Canadian Council of Ministers of the Environment. 2001. *Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0 – Technical Report*. CCME, Winnipeg. 13 hal.
- Dettori, J. R., D. C. Norvell dan J. R. Chapman. 2018. *The sin of missing data: Is all forgiven by way of imputation?* *Global Spine Journal*, 8(8): 892–894. <https://doi.org/10.1177/2192568218811922>
- Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Minahasa. 2021. *Laporan Kinerja Instansi Pemerintah (LKjIP) Tahun 2021*. Pemerintah Kabupaten Minahasa. 67 hal.
- DLHD Sulawesi Utara. 2021. *Laporan Kinerja Instansi Pemerintah (LKIP) Tahun 2021*. Dinas Lingkungan Hidup Daerah Provinsi Sulawesi Utara. 84 hal.
- Egemose, S., A. B. Petersen, M. J. Sønderup dan M. R. Flindt. 2020. *First flush characteristics in separate sewer stormwater and implications for treatment*. *Sustainability*, 12(12): 5063. <https://doi.org/10.3390/su12125063>
- Effendi, H. 2003. *Telaah Kualitas Air: Bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan*. Kanisius, Yogyakarta. 258 hal.
- Fadhila, T. P., N. F. Ahmad, F. M. Ghazani dan W. Fadlullah. 2024. *Proyek desain pengolahan air limbah domestik skala kawasan pada Kecamatan Pameungpeuk Kabupaten Bandung*. *Jurnal Permukiman*, 9(1): 8281–8288.
- Field, A. 2013. *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics* (4th ed.). Sage Publications, London. 915 hal.
- Fischler, M. A. dan R. C. Bolles. 1981. *Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography*. *Communications of the ACM*, 24(6): 381–395. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>
- Fontaneda, L. A., J. Rocés-García, S. J. Coupe, E. Barrios-Crespo, C. Rey-Mahía, F. P. Álvarez-Rabanal dan C. Lashford. 2020. *Descriptive analysis of the performance of a vegetated swale through long-term hydrological monitoring: A case study from Coventry, UK*.

- Sustainability*, 12(19): 8190. <https://doi.org/10.3390/su12198190>
- Fox, J. 2016. *Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models* (3rd ed.). Sage Publications, London. 849 hal.
- García-Herrero, I., M. Bastiani, G. Ronzoni, R. Bianchi dan M. Giagnorio. 2022. *Cost-benefit of green infrastructures for water management: A sustainability assessment of full-scale constructed wetlands in Northern and Southern Italy*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2305.06284>
- Geetha, S. dan S. Gouthami. 2017. *Internet of things enabled real time water quality monitoring system*. *Smart Water*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/s40713-017-0005-y>
- Gleick, P. H. 1998. *Water in crisis: Paths to sustainable water use*. *Ecological Applications*, 8(3): 571–579. <https://doi.org/10.2307/2641249>
- Guilford, J. P. 1956. *Fundamental Statistics in Psychology and Education* (3rd ed.). McGraw-Hill, New York. 672 hal.
- Gujarati, D. N. dan D. C. Porter. 2009. *Basic Econometrics* (5th ed.). McGraw-Hill Education, New York. 922 hal.
- Hair, J. F., W. C. Black, B. J. Babin dan R. E. Anderson. 2010. *Multivariate Data Analysis* (7th ed.). Pearson, New Jersey. 761 hal.
- Hammoumi, N., A. Benhoussa dan S. El Blidi. 2024. *Application of PCA and cluster analysis to surface water quality assessment: A case study of Oum Er Rbia River (Morocco)*. *Applied Water Science*, 10(5): 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01189-0>
- Hao, A., S. Kobayashi, D. Xia, Q. Mi, N. Yan, M. Su, A. Lin, M. Zhao dan Y. Iseri. 2021. *Controlling eutrophication via surface aerators in irregular-shaped urban ponds*. *Water*, 13(23): 3360. <https://doi.org/10.3390/w13233360>
- Helena, B., R. Pardo, M. Vega, E. Barrado, J. M. Fernández dan L. Fernández. 2000. *Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis*. *Water Research*, 34(3): 807–816. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00225-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00225-0)
- Helsel, D. R. dan R. M. Hirsch. 2002. *Statistical Methods in Water Resources*. U.S. Geological Survey (USGS), Reston. 510 hal.
- Hendratta, L. A., S. Harianto, A. H. P. Rantung dan L. Monica. 2024. *Pemanfaatan lahan basah buatan untuk mengurangi degradasi kualitas air di Danau Tondano*. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, 4(2): 115–128. <https://jtsda.hathi.id/index.php/jtsda/issue/view/9>
- Hendratta, L. A., S. C. Laurentia, D. KOH, I. Mangangka, A. Thambas, F. Sumanti dan L. Monica. 2024. *Tondano Lake management – environmental issues and integrated counter measurements*. *Environment and Ecology Research*, 12(5): 480–491. <https://doi.org/10.13189/eer.2024.120502>
- Heta News. 2016. *Danau Tondano Nasibmu Kini, Masalah Eutrofikasi, Eceng Gondok, Pendangkalan dan Penyempitan*. Diakses dari <https://www.hetanews.com/article/50053/danau-tondano-nasibmu-kini-masalah-eutrofikasi-eceng-gondok-pendangkalan-dan-penyempitan>
- Hidayatullah, M. A. 2021. *Sistem pemantauan kualitas air sungai berbasis IoT dan dashboard visualisasi data*. Skripsi Sarjana. UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta. 76 hal.
- Hotelling, H. 1933. *Analysis of a complex of statistical variables into principal components*. *Journal of Educational Psychology*, 24(6): 417–441. <https://doi.org/10.1037/h0071325>
- Huber, P. J. 1981. *Robust Statistics*. Wiley-Interscience, New York. 308 hal.
- Hubert, M., P. J. Rousseeuw dan K. Vanden Branden. 2005. *ROBPCA: A new approach to robust principal component analysis*. *Technometrics*, 47(1): 64–79.
- Jakobsen, J. C., C. Glud, J. Wetterslev dan P. Winkel. 2017. *When and how should multiple imputation be used for handling missing data in randomised clinical trials – a practical guide with flowcharts*. *BMC Medical Research Methodology*, 17(1): 162. <https://doi.org/10.1186/s12874-017-0442-1>
- Japan International Cooperation Agency (JICA). 2004. *The Study on Lake Tondano Catchment Area Management Plan in the Republic of Indonesia: Final Report*. Nippon Koei Co., Ltd., Jakarta. 210 hal.
- Kavian, A., S. H. Sadeghi dan M. Omidvari. 2018. *Application of vegetative buffer strips under natural rainfall to conserve soil and water*. *Agriculture*, 64(1): 17–27. <https://doi.org/10.5937/agricult64-15785>
- Kim, H. Y. 2013. *Statistical notes for clinical researchers: Assessing normal distribution* (2)

- using skewness and kurtosis. *Korean Journal of Anesthesiology*, 64(3): 205–207. <https://doi.org/10.4097/kjae.2013.64.3.205>
- Kirkjers, M., M. Benavides, C. D. Preez, C. Rabouille, P. Raimbault dan S. Bonnet. 2020. Low-cost autonomous monitoring systems for surface ocean biogeochemistry. *Frontiers in Marine Science*, 7: Article 589993. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.589993>
- Kuok, K. K., D. Y. S. Mah dan T. L. Lau. 2013. Effectiveness of bioretention system and vegetated swale for stormwater management. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 21(1): 177–186.
- Kuria, D. N. dan G. R. Basson. 2018. Investigation into fine non-cohesive sediment removal by swirl/vortex settling basin at small river abstraction works. *Journal of Hydraulic Engineering*, Stellenbosch University. 18 hal.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. 2023. Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan. *Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2023 Nomor 55*. Jakarta: Kementerian Kesehatan RI. Diakses dari <https://peraturan.go.id/id/permenkes-no-2-tahun-2023>
- Kementerian Lingkungan Hidup. 2011. Gerakan Penyelamatan Danau (GERMADAN) Rawapening. KLH RI, Jakarta. 52 hal.
- Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. 2003. Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 115 Tahun 2003 tentang Pedoman Penentuan Status Mutu Air. Diakses dari <https://peraturan.bpk.go.id/>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2020. KLHK bangun sistem informasi pengendalian pencemaran dan kerusakan lingkungan (Nomor: SP.069/HUMAS/PP/HMS.3/2/2020). Diakses 18 Mei 2025 dari <http://pkgppkl.menlhk.go.id/v0/klhk-bangun-sistem-informasi-pengendalian-pencemaran-dan-kerusakan-lingkungan/>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2021. Panduan Teknis Pengelolaan Limbah Domestik. Direktorat Pengelolaan Limbah, Direktorat Jenderal Pengelolaan Sampah, Limbah, dan B3. Jakarta: KLHK.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2021. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2021 tentang Indeks Kualitas Lingkungan Hidup. *Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2021 Nomor 1426*. Diakses dari <https://peraturan.go.id>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2022. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2022 tentang Petunjuk Operasional Penggunaan Dana Alokasi Khusus Fisik Penugasan Bidang Lingkungan Hidup dan Bidang Kehutanan Tahun Anggaran 2022. *Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2022 Nomor 97*.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2015. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 28/PRT/M/2015 tentang Penetapan Garis Sempadan Sungai dan Sempadan Danau. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2020. Profil IPAL Komunal Program SANIMAS di Sekitar Danau Rawapening. Direktorat Jenderal Cipta Karya, Jakarta. 56 hal.
- Konservasi Danau Tondano. n.d. 3 Permasalahan – Konservasi Danau Tondano. Diakses dari <https://konservasidanautondano.wordpress.com/pedoman/3-permasalahan-2/>
- Li, Q., F. Wang, Y. Yu, Z. Huang, M. Li dan Y. Guan. 2022. *Comprehensive performance evaluation of LID practices for the Sponge City construction: A case study in Guangxi, China*. Tsinghua University. Laporan internal.
- Liu, L., Y. Yang, Y. Zhang dan Y. Shi. 2021. *Spatiotemporal evaluation and modeling of water quality using multivariate statistical techniques and machine learning methods: A case study in Eastern China*. *Science of the Total Environment*, 806(2): 150572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150572>
- Lumb, A., D. Halliwell dan T. Sharma. 2006. *Application of CCME Water Quality Index to monitor water quality: A case of the Mackenzie River Basin, Canada*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 113(1–3): 411–429. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9092-6>
- Lumb, A., T. C. Sharma dan J. F. Bibeault. 2011. *A review of genesis and evolution of water* 1608

- quality index (WQI) and some future directions. *Water Quality, Exposure and Health*, 3(1): 11–24. <https://doi.org/10.1007/s12403-011-0040-0>
- Lumunon, L. M., H. Riogilang dan C. J. Supit. 2021. *Evaluasi Kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah Komunal Kiliar di Kota Tondano*. Laporan Tugas Akhir. Universitas Sam Ratulangi, Manado. 48 hal.
- Luo, L., J. Lan, Y. Wang, H. Li, Z. Wu, C. McBride ... dan G. Wu. 2022. *A novel early warning system (EWS) for water quality, integrating a high-frequency monitoring database with efficient data quality control technology at a large and deep lake (Lake Qiandao), China*. *Water*, 14: 602. <https://doi.org/10.3390/w14040602>
- Marendra, F., D. Saputri, A. Prasetya dan A. T. Yuliansyah. 2024. *Environmental review pengelolaan IPAL terpadu pada wilayah penyangga urban: Studi kasus Kabupaten Sleman*. *HEXAGON: Jurnal Teknik dan Sains*, 5(2): 83–90.
- Masto, R. E., P. K. Chhonkar, D. Singh dan A. K. Patra. 2013. *Biochar from water hyacinth (Eichhornia crassipes) and its use for soil biological quality improvement*. *Catena*, 111: 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.06.002>
- Merino-Ibarra, M., J. A. Ramírez-Zierold, P. M. Valdespino-Castillo, F. S. Castillo-Sandoval, A. P. Guzmán-Arias, M. Barjau-Aguilar, E. Monroy-Ríos, L. M. López-Gómez, A. Sacristán-Ramírez, J. G. Quintanilla-Terminel, R. González-De Zayas, J. Jimenez-Contreras, M. E. Valeriano-Riveros, G. Vilaclara-Fatjó dan S. Sánchez-Carrillo. 2021. *Vertical boundary mixing events during stratification govern heat and nutrient dynamics in a windy tropical reservoir lake with important water-level fluctuations: A long-term (2001–2021) study*. *Water*, 13(21): 3011. <https://doi.org/10.3390/w13213011>
- Mukaka, M. M. 2012. *A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research*. *Malawi Medical Journal*, 24(3): 69–71. <https://doi.org/10.4314/mmj.v24i3>
- Moleaer. 2021. WRF Tech Scan Presentation: *Nanobubble Technology Applications in Water Treatment*. *Presentasi internal*. Diakses dari materi perusahaan Moleaer pada 1 Juni 2021.
- Nada, I. M., I. W. Redana, I. G. B. S. Dharma dan A. A. G. A. Yana. 2019. *Community-based erosion control model in Batur Lake zone*. *MATEC Web of Conferences*, 276: 04008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927604008>
- Nagai, T., T. Hibiya dan F. Syamsudin. 2021. *Direct estimates of turbulent mixing in the Indonesian Archipelago and its role in the transformation of the Indonesian Throughflow waters*. *Geophysical Research Letters*, 48(15): e2020GL091684. <https://doi.org/10.1029/2020GL091684>
- North Carolina Department of Environmental Quality. 2020. *Stormwater Design Manual (Vol. 1). Division of Energy, Mineral and Land Resources*. <https://deq.nc.gov/sw-bmp-manual>
- Pearson, K. 1901. *On lines and planes of closest fit to systems of points in space*. *Philosophical Magazine*, 2(11): 559–572. <https://doi.org/10.1080/14786440109462720>
- Polyakov, V. O., M. H. Nichols, M. P. McClaran dan M. A. Nearing. 2014. *Effect of check dams on runoff, sediment yield, and retention on small semiarid watersheds*. *Journal of Soil and Water Conservation*, 69(5): 361–367. <https://doi.org/10.2489/jswc.69.5.361>
- Pemerintah Kabupaten Minahasa. 2023. *Peraturan Bupati Minahasa Nomor 15 Tahun 2023 tentang Rencana Detail Tata Ruang Kawasan Sekitar Danau Tondano*. Tondano: Pemerintah Kabupaten Minahasa.
- Pemerintah Republik Indonesia. 2021. *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2021 Nomor 32. <https://peraturan.bpk.go.id/Details/163680/pp-no-22-tahun-2021>
- Pemerintah Republik Indonesia. 2021. *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 60 Tahun 2021 tentang Penyelamatan Danau Prioritas Nasional*. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2021 Nomor 143. Diakses dari <https://peraturan.go.id/id/perpres-no-60-tahun-2021>
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air (PUSAIR). 2020. *Studi Interaksi Air Permukaan dan Air Tanah DAS Cisadane*. Kementerian PUPR, Indonesia.
- Qin, H., H. Zhang dan Y. Zhang. 2021. *A novel ecological floating-bed combining plant biofilm and aeration for eutrophic water restoration: Performance and microbial community*. *Science of The Total Environment*, 752: 141874.
- Ratnaningsih, D., R. P. Lestari dan E. Nazir. 2021. *Penanganan parameter yang hilang dalam*

- aplikasi penilaian kualitas air IKA-INA*. Jurnal Standardisasi, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Rembet, S., R. Hendrata dan D. Legrans. 2024. *Analisis kualitas air Sungai Panasen dan implikasinya terhadap Danau Tondano*. Laporan penelitian. Universitas Negeri Manado. 42 hal.
- Rezazadeh Nikou, N. S., A. McNabola dan A. Ziaei. 2025. *Enhancing ecological design principles in vortex settling basins for sustainable water management*. *Water*, 17(4): 496. <https://doi.org/10.3390/w17040496>
- Rousseeuw, P. J. dan A. M. Leroy. 1987. *Robust Regression and Outlier Detection*. John Wiley & Sons, New York. 329 hal.
- Rumengan, I., Haeruddin dan P. W. Purnomo. 2017. *Analisis beban pencemar dan kapasitas asimilasi di muara Sungai Tondano Teluk Manado*. Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, 7(3): 204–210. <https://doi.org/10.29244/jpsl.7.3.204-210>
- Schafer, J. L. dan J. W. Graham. 2002. *Missing data: Our view of the state of the art*. *Psychological Methods*, 7(2): 147–177. <https://doi.org/10.1037/1082-989X.7.2.147>
- Sedgwick, P. 2014. *Spearman's rank correlation coefficient*. *BMJ*, 349: g7327. <https://doi.org/10.1136/bmj.g7327>
- Sen, P. K. 1968. *Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau*. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324): 1379–1389.
- Shaftel, R. S., King, R. S., & Back, J. A. 2012. *Alder cover drives nitrogen uptake by stream biofilms across forested mountaintop gradients*. *Ecological Applications*, 22(7), 1929–1942.
- Shevlyakov, G. L. dan P. O. Smirnov. 2011. *Robust estimation of the correlation coefficient: An attempt of survey*. *Austrian Journal of Statistics*, 40(1&2): 147–156.
- Sittadewi, E. H. 2008. *Fungsi strategis Danau Tondano, perubahan ekosistem dan masalah yang terjadi*. Jurnal Teknik Lingkungan, 9(1): 59–66.
- Sliva, L. dan D. D. Williams. 2001. *Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality*. *Water Research*, 35(14): 3462–3472. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00062-8)
- Statstutor. 2020. *Spearman's correlation*. Diakses dari <https://www.statstutor.ac.uk/resources/uploaded/spearmans.pdf>
- Susanthi, N. W., A. Purbayanto dan B. Yulianto. 2018. *Analisis efisiensi instalasi pengolahan air limbah domestik komunal di Situ Gede Kota Bogor*. Jurnal Ilmu dan Teknologi Lingkungan, 10(2): 121–130. <https://doi.org/10.26555/jiteki.v10i2.12345>
- Sugiyono. 2019. *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Alfabeta, Bandung. 334 hal.
- Syofyan, Z. 2022. *Kolam retensi sebagai upaya pengendalian banjir pada daerah aliran sungai Batang Pangian*. Rang Teknik Journal, 5(1): 124–127. <http://dx.doi.org/10.31869/rtj.v5i1.2856>
- SNV Netherlands Development Organisation (SNV). 2021. *Decentralised Wastewater Treatment Systems (DEWATS) in Practice: Lessons Learned from Indonesia*. SNV. 40 hal.
- Stenstrom, M. K. dan M. Kayhanian. 2005. *First Flush Phenomenon Characterization (Report No. CTSW-RT-05-73-02.6)*. California Department of Transportation, Division of Environmental Analysis, University of California. 87 hal.
- Tamanampo, J. F. W. S., G. J. F. Kaligis dan L. J. L. Lumingas. 2017. *Penilaian kumulatif kualitas fisika kimia air Danau Tondano, Sulawesi Utara*. Jurnal Ilmiah Platax, 5(2): 135–144.
- Tatangindatu, F., O. Kalesaran dan R. Rompas. 2013. *Studi parameter fisika kimia air pada areal budidaya ikan di Danau Tondano, Desa Paleloan, Kabupaten Minahasa*. Jurnal Budidaya Perairan, 1(2): 8–19.
- Theil, H. 1950. *A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis*. *Nederl. Akad. Wetensch., Proc.*, 53: 386–392.
- Truong, P. N. V. dan R. Loch. 2004. *Vetiver system for erosion and sediment control*. Dalam *Proceedings of the 13th International Soil Conservation Organisation Conference*, Brisbane.
- Tyagi, S., B. Sharma, P. Singh dan R. Dobhal. 2013. *Water quality assessment in terms of water quality index*. *American Journal of Water Resources*, 1(3): 34–38. <https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3>.

- Urbasa, P. A., S. L. Undap dan R. J. Rompas. 2015. Dampak kualitas air pada budi daya ikan dengan jaring tancap di Desa Toulimembet Danau Tondano. *Jurnal Budidaya Perairan*, 3(1): 59–67. <https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/bdp/article/view/6932/6438>.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2009. *Green infrastructure in urban areas: Principles and case studies*. U.S. EPA.
- Vasanthavigar, M., K. Srinivasamoorthy, K. Vijayaragavan, R. R. Ganthi, N. Stalin dan N. Chandrasekar. 2010. *Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 171(1): 595–609. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1302-1>.
- Vigiak, O., B. Grizzetti, A. Udias-Moinelo, M. Zanni, C. Dorati, F. Bouraoui dan A. Pistocchi. 2019. *Predicting biochemical oxygen demand in European freshwater bodies*. *Science of The Total Environment*, 666: 1089–1105. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.205>.
- Vitale, A. J., G. M. E. Perillo, S. A. Genchi, A. H. Arias dan M. C. Piccolo. 2018. *Low-cost monitoring buoys network tracking biogeochemical changes in lakes and marine environments – a regional case study*. *Pure and Applied Chemistry*, 90(10): 1631–1646. <https://doi.org/10.1515/pac-2018-0508>.
- Wada, T. 2020. *Outliers in official statistics*. *Statistical Journal of the IAOS*, 36(4): 1169–1176. <https://doi.org/10.3233/SJI-200738>.
- Walingkas, I. S., R. R. I. Legrans dan I. R. Mangangka. 2023. *Penanganan air limbah di permukiman tepi Danau Tondano dengan teknologi constructed wetland*. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 5(2): 189–195. <https://doi.org/10.35970/jppl.v5i2.2010>.
- Wanielista, M. P., N.-B. Chang, M. Chopra, Z. Xuan, K. Islam dan Z. Marimon. 2012. *Floating wetland systems for nutrient removal in stormwater ponds. Final Report for Florida Department of Transportation, Project BDK78 985-01*. University of Central Florida.
- Wantasen, S., S. Sudarmadji, E. Sugiharto dan S. Suprayogi. 2012. *Dampak transformasi nitrogen terhadap lingkungan biotik di Danau Tondano Provinsi Sulawesi Utara*. *Jurnal Manusia dan Lingkungan*, 19(2): 143–149. <https://journal.ugm.ac.id/JML/article/view/18530>.
- Westfall, P. H. 2014. *Kurtosis as peakedness, 1905–2014. R.I.P.* *The American Statistician*, 68(3): 191–195. <https://doi.org/10.1080/00031305.2014.917055>.
- Wold, S., K. Esbensen dan P. Geladi. 1987. *Principal component analysis*. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2(1–3): 37–52. [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(87\)80084-9](https://doi.org/10.1016/0169-7439(87)80084-9).
- Wulandari, D. A., D. A. Purnama, R. Surbakti dan R. Ardi. 2019. *The effect of small dams in Rawa Pening catchment area on sedimentation rate of Rawa Pening Lake*. *MATEC Web of Conferences*, 270: 04018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927004018>.
- Water Environment Federation. 2018. *The Stormwater Practitioner's Guide to Low Impact Development*. *Water Environment Federation Publications*.
- Wetzel, R. G. 2001. *Limnology: Lake and River Ecosystems (3rd ed.)*. Academic Press. <https://books.google.co.id/books?id=no2hk5uPUcMC>.
- World Bank. 2013. *Urban Sanitation Review: Indonesia Country Study*. Washington DC: World Bank.
- World Health Organization. 2017. *Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum*. Geneva: WHO. Diakses dari <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>.



© 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)