



Potensi Danau Faunil sebagai Sumber Air Bersih di Kota Tual: Analisis Kualitas, Kuantitas, dan Tantangan Keberlanjutan Pengelolaan

(Assessing the Water Quality, Quantity, and Management Sustainability of Faunil Lake as a Source of Clean Water in Tual City, Maluku Province)

Nanang S. Derlauw¹, Agustinus Kastanya¹ & Bokiraiya Latuamury¹

¹Program Studi Manajemen Hutan, Pascasarjana Universitas Pattimura, Jl. Ir. M. Putuhena, Kampus Poka, Kota Ambon, Maluku 97233, Indonesia

Informasi Artikel:

Submission : 02 Juli 2025
Revised : 05 Oktober 2025
Accepted : 08 Oktober 2025
Published : 14 Oktober 2025

*Penulis Korespondensi:

Nanang S. Derlauw
Program Studi Manajemen Hutan,
Pascasarjana Universitas Pattimura, Jl. Ir. M.
Putuhena, Kampus Poka, Kota Ambon,
Maluku 97232, Indonesia
e-mail: nanang.derlauw@gmail.com
Telp: +62 852-5433-0655

Makila 19 (2) 2025: 293-308

DOI: <https://doi.org/10.30598/makila.v19i2.20507>



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Copyright © 2025 Author(s): Nanang S. Derlauw, Agustinus Kastanya & Bokiraiya Latuamury

Journal homepage:
<https://ojs3.unpatti.ac.id/index.php/makila>
Journal e-mail: makilajournal@gmail.com

Research Article · [Open Access](#)

ABSTRACT

This study evaluates the sustainability of Lake Faunil as the principal freshwater source for Tual City, located in a small-island environment characterised by limited groundwater reserves and increasing hydrometeorological vulnerability. Employing a quantitative-descriptive approach, the research analyses ten years of water-quality data – covering BOD, COD, DO, pH, and TDS – alongside seasonal discharge records to examine spatial and temporal dynamics. The results reveal that pH and TDS remain within the Class II water-quality standards established under Government Regulation No. 22/2021, indicating chemical stability and low salinity. In contrast, BOD and COD have consistently exceeded permissible limits since 2018, suggesting chronic organic pollution primarily linked to unmanaged domestic wastewater inflows. Dissolved Oxygen (DO) concentrations during the dry season frequently drop below 4 mg/L, signalling hypoxic stress and early eutrophication processes. Concurrently, discharge data demonstrate a declining trend, with dry-season flows decreasing to as low as 0.036 m³/s, reflecting the system's strong dependence on rainfall and declining catchment capacity. A subsequent SWOT analysis substantiates these findings by identifying inadequate sanitation systems, riparian degradation, and weak institutional coordination as major internal constraints, while external opportunities include regulatory support, climate and public financing schemes, and the potential role of traditional institutions such as the Saniri Negeri in ecological governance. The study recommends adopting an Integrated Water Resources Management (IWRM) framework that integrates nature-based restoration, community-based sanitation and monitoring, and seasonally adaptive water allocation. Collectively, these strategies provide an evidence-based foundation for policy interventions to enhance freshwater security and resilience within climate-exposed island urban ecosystems.

KEYWORDS: Lake Faunil; freshwater resource; water quality; water quantity; sustainability

INTISARI

Penelitian ini bertujuan untuk menilai keberlanjutan fungsi Danau Faunil sebagai sumber air bersih utama di Kota Tual, Provinsi Maluku, dengan mempertimbangkan keterbatasan air tanah serta tekanan ekologis khas wilayah kepulauan. Menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif, penelitian ini menganalisis data parameter kualitas air (BOD, COD, DO, pH, dan TDS) serta debit musiman selama periode 2015–2024 guna mengevaluasi degradasi lingkungan dan dinamika hidrologis danau. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai pH dan TDS masih berada dalam kisaran baku mutu air kelas II sesuai Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, menandakan stabilitas kimiawi perairan. Namun demikian, nilai BOD dan COD secara konsisten melampaui ambang batas sejak tahun 2018, yang mengindikasikan terjadinya pencemaran organik kronis akibat pembuangan limbah domestik tanpa pengolahan. Penurunan kadar DO pada musim kemarau hingga di bawah 4 mg/L mencerminkan kondisi hipoksia yang berpotensi mengganggu keseimbangan ekosistem akuatik. Dari sisi kuantitas, debit air memperlihatkan fluktuasi musiman yang tajam—dengan penurunan signifikan pada musim kemarau—menunjukkan ketergantungan tinggi terhadap curah hujan dan menurunnya kapasitas tangkapan air di daerah hulu. Berdasarkan hasil analisis SWOT, penelitian ini merekomendasikan penerapan strategi pengelolaan adaptif berbasis ekosistem, pembangunan sistem sanitasi terpadu berbasis komunitas, serta penguatan peran kelembagaan lokal seperti *Saniri Negeri* dalam pengawasan sumber daya air. Temuan ini menegaskan pentingnya pendekatan pengelolaan yang partisipatif, berbasis data, dan berorientasi pada ketahanan air, guna menjaga keberlanjutan fungsi ekologis Danau Faunil sebagai infrastruktur alami penyedia air bersih bagi masyarakat pesisir yang rentan terhadap perubahan iklim.

KATA KUNCI: Danau Faunil; sumber air bersih; kualitas air; kuantitas air; keberlanjutan; Kota Tual

PENDAHULUAN

Air bersih merupakan kebutuhan dasar yang tidak tergantikan dan menjadi indikator utama kesejahteraan masyarakat serta keberhasilan pembangunan berkelanjutan (Latuamury, 2025b; Ovink *et al.*, 2023). Ketersediaan dan akses terhadap air bersih tidak hanya menentukan kualitas hidup, tetapi juga menjadi komponen kunci dalam pencapaian berbagai tujuan pembangunan global, termasuk *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya Tujuan 6 tentang *Clean Water and Sanitation* (UN Water & UNESCO, 2022). Agenda global ini, beserta keterkaitannya dengan aksi iklim (SDG 13), menegaskan urgensi peningkatan kualitas dan keandalan pasokan air, terutama di wilayah kepulauan yang rentan terhadap variabilitas hidrometeorologis serta keterbatasan sumber

air tanah dangkal (IPCC, 2022; UN Water & UNESCO, 2022). Pada tingkat nasional, kerangka kebijakan seperti RPJMN 2020–2024 dan regulasi pengelolaan kualitas air melalui PP No. 22 Tahun 2021 menekankan pentingnya penguatan pengelolaan sumber daya air secara integratif, lintas sektor, dan berbasis ekosistem (UNESCO for UN-Water, 2023).

Danau Faunil di Kota Tual memiliki posisi strategis sebagai sumber air permukaan utama yang menopang kebutuhan domestik dan aktivitas sosial-ekonomi masyarakat setempat. Namun demikian, kajian empiris jangka panjang yang mengintegrasikan dimensi kualitas air (BOD, COD, DO, pH, TDS) dengan aspek kuantitas (debit musiman) dalam konteks ekologi-sosial wilayah kepulauan masih sangat terbatas. *Research gap* utama terletak pada belum adanya analisis deret waktu yang secara sistematis menautkan kepatuhan terhadap baku mutu air dengan dinamika hidrologi musiman serta implikasinya bagi strategi pengelolaan danau berkelanjutan (United Nations, 2021). Penelitian ini menawarkan *novelty* melalui pemanfaatan data satu dekade (2015–2024) yang dikompilasi dan divalidasi dari berbagai sumber resmi untuk menilai tren spasial-temporal kualitas dan kuantitas air, sekaligus mengaitkannya dengan kebutuhan tata kelola adaptif di ekosistem pulau kecil (RSC, 2008; Yang *et al.*, 2013).

Kota Tual secara lokal menghadapi tantangan struktural yang kompleks, meliputi ketergantungan tinggi terhadap curah hujan dan air tanah dangkal, peningkatan populasi dan urbanisasi yang mendorong perubahan tata guna lahan di daerah tangkapan, degradasi vegetasi riparian, serta pembuangan limbah domestik tanpa pengolahan yang memadai (Sofyan *et al.*, 2023; Wheeler & Gober, 2013). Kondisi ini berpotensi meningkatkan beban pencemar organik dan menurunkan kadar oksigen terlarut, terutama pada musim kemarau, yang pada gilirannya menurunkan debit andal dan kualitas lingkungan perairan (Latuamury, 2025c). Dari sisi kelembagaan, lemahnya koordinasi antarinstansi dalam pengawasan dan penegakan aturan pemanfaatan sempadan danau memperburuk kerentanan fungsi ekologis Danau Faunil sebagai infrastruktur alami penyedia air bersih (Gaglio *et al.*, 2023; Latuamury, 2025b).

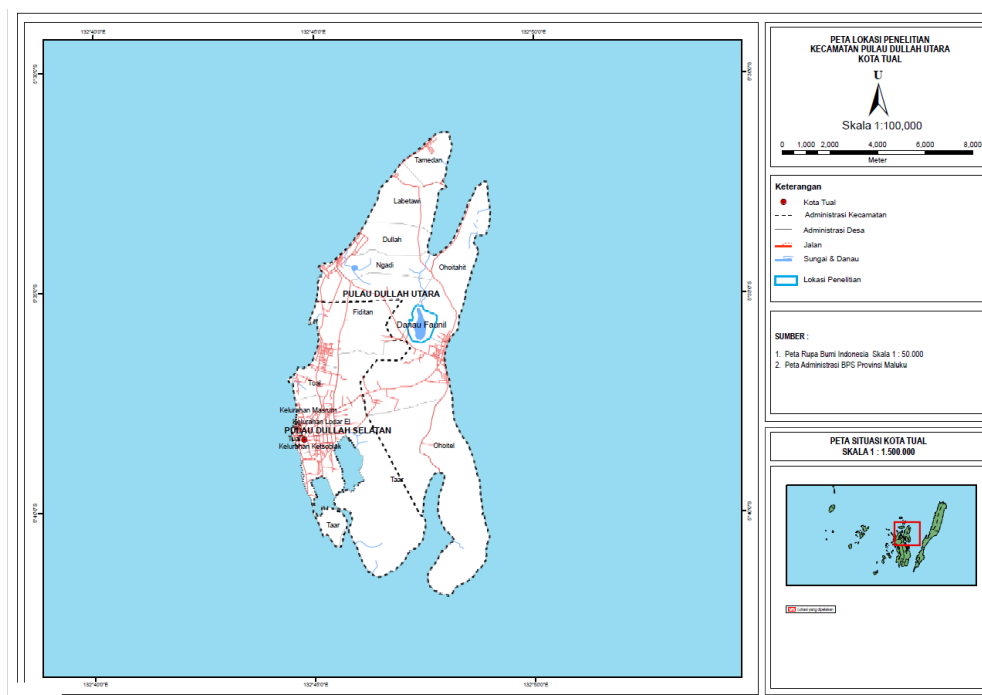
Menanggapi permasalahan tersebut, penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif melalui kompilasi data deret waktu kualitas air dan debit (2015–2024), verifikasi lapangan terbatas, analisis spasial sederhana, serta wawancara terarah dengan pemangku kepentingan (pemerintah daerah, komunitas, dan lembaga adat). Kontribusi ilmiah penelitian ini terletak pada empat aspek utama, yakni: (i) pemetaan tren jangka panjang kualitas dan kuantitas air berbasis data empiris, (ii) penilaian tingkat kepatuhan terhadap baku mutu serta implikasinya terhadap keandalan pasokan air bersih, (iii) identifikasi faktor sosial-ekologis yang memengaruhi fungsi danau, dan (iv) perumusan rekomendasi manajerial menuju pengelolaan berkelanjutan berbasis *Integrated Water Resources Management* (IWRM), *nature-based solutions* (NbS), serta penguatan tata kelola partisipatif—termasuk revitalisasi peran kelembagaan adat (*Saniri Negeri*) (Latuamury *et al.*, 2022). Dengan demikian, tujuan utama penelitian ini adalah menganalisis kualitas dan kuantitas air

Danau Faunil serta menilai faktor ekologis dan sosial yang menentukan keberlanjutan pemanfaatannya sebagai sumber air bersih utama di Kota Tual.

METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Danau Faunil, yang secara administratif terletak di wilayah Kota Tual, Provinsi Maluku. Lokasi ini dipilih secara purposif karena memiliki peran strategis sebagai sumber air permukaan utama bagi masyarakat setempat serta menunjukkan potensi signifikan dalam sistem penyediaan air bersih regional. Selain itu, keterbatasan data longitudinal mengenai kondisi kualitas dan kuantitas air di danau ini menjadi dasar pemilihan lokasi, guna mengisi kesenjangan informasi ilmiah terkait dinamika hidrologi dan tantangan pengelolaannya di wilayah kepulauan. Peta lokasi penelitian disajikan **Gambar 1**.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

Jenis dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif yang mengombinasikan analisis data sekunder sebagai sumber utama dengan validasi lapangan terbatas (*field verification*) untuk memastikan ketepatan empiris dan relevansi kontekstual. Pendekatan kombinitif ini dipilih untuk memperkuat validitas internal dan eksternal hasil penelitian, serta memungkinkan triangulasi antara aspek biofisik, hidrologis, dan sosial-ekologis yang berperan dalam keberlanjutan fungsi Danau Faunil. Data sekunder diperoleh dari berbagai instansi teknis resmi, antara lain: Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang (PUPR) Kota Tual, yang menyediakan data debit masuk dan keluar danau berdasarkan pengamatan volumetrik dan pengukuran menggunakan *current meter*;

serta Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Tual, yang menyuplai data hasil uji laboratorium terhadap parameter kualitas air – pH, DO, BOD, COD, dan TDS – selama periode 2015–2024. Selain itu, Balai Wilayah Sungai Maluku menyediakan data morfometri dan karakteristik daerah tangkapan air, sedangkan BMKG memberikan data pendukung berupa curah hujan dan suhu udara untuk mendukung analisis hidrologis. Seluruh parameter kualitas air telah diuji berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) dan American Public Health Association (APHA), sehingga menjamin kesetaraan metodologis dan validitas laboratorium. Oleh karena itu, data sekunder menjadi dasar utama dalam analisis tren spasial dan temporal yang menggambarkan kondisi kualitas dan kuantitas air Danau Faunil secara longitudinal.

Data primer dikumpulkan secara terbatas untuk keperluan verifikasi lapangan dan pendalaman kontekstual. Pengambilan sampel dilakukan pada tiga titik representatif – inflow, tengah danau, dan outflow – yang terletak pada koordinat geografis 5°36'–5°38' Lintang Selatan dan 132°44'–132°46' Bujur Timur. Pengukuran dilakukan selama periode Juli–September 2024 dengan menggunakan alat portabel digital (pH meter dan DO meter) untuk parameter pH, DO, dan TDS. Aktivitas lapangan juga mencakup observasi terhadap kondisi vegetasi riparian, tata guna lahan sekitar sempadan, dan aktivitas masyarakat seperti pertanian, permukiman, serta pembuangan limbah domestik. Selain itu, dilakukan wawancara semi-terstruktur dengan warga, tokoh adat (*Saniri Negeri*), dan pejabat teknis untuk menggali persepsi lokal mengenai perubahan kualitas dan ketersediaan air serta praktik pengelolaan yang ada.

Integrasi antara data primer dan sekunder dilakukan melalui pendekatan triangulatif, yang berfungsi untuk mengonfirmasi konsistensi hasil dan memperkaya interpretasi kontekstual. Analisis kuantitatif dilakukan terhadap parameter kualitas dan debit air menggunakan statistik deskriptif dan analisis tren temporal, sedangkan analisis spasial dan tematik dilaksanakan dengan bantuan perangkat lunak Microsoft Excel dan QGIS. Kombinasi metodologis ini memungkinkan penyusunan analisis yang komprehensif, valid, dan aplikatif, di mana data sekunder berperan sebagai fondasi utama interpretasi ilmiah, sementara data primer memperkuat pemahaman sosial-ekologis yang relevan untuk merumuskan rekomendasi pengelolaan Danau Faunil secara adaptif dan berkelanjutan.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini disusun secara sistematis dengan menempatkan analisis data sekunder sebagai sumber utama yang diperkuat oleh validasi lapangan terbatas (*field verification*) guna memastikan kesesuaian empiris dan relevansi kontekstual pada ekosistem Danau Faunil. Tahapan awal mencakup akuisisi dan inventarisasi data deret waktu 2015–2024 yang diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang (PUPR) serta Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Tual, meliputi parameter debit (inflow–outflow), pH, DO, BOD, COD, dan TDS yang dianalisis berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) dan American Public Health Association (APHA).

Data pendukung diperoleh dari BMKG dan Balai Wilayah Sungai Maluku untuk mengonfirmasi pola curah hujan, suhu udara, serta karakteristik morfometri danau. Sebelum tahap analisis, seluruh data melalui proses penyaringan kualitas (quality screening), meliputi pemeriksaan kelengkapan ($\geq 85\%$), deteksi nilai ekstrem, serta pengelompokan musiman berdasarkan klasifikasi klimatologi lokal – musim kemarau (Juli–September) dan musim hujan (November–Mei).

Validasi lapangan dilaksanakan pada pertengahan Agustus 2024 untuk menangkap kondisi hidrologi minimum yang merepresentasikan skenario kritis terhadap ketersediaan air. Pengambilan sampel dilakukan pada tiga titik representatif, yaitu S1 (inflow; $-5.6190, 132.7510$), S2 (tengah danau; $-5.6205, 132.7535$), dan S3 (outflow; $-5.6220, 132.7550$). Pengukuran lapangan dilakukan secara in-situ menggunakan alat portabel yang telah dikalibrasi harian untuk parameter pH, DO, dan TDS. Selain itu, dilakukan observasi terhadap vegetasi riparian, sumber limbah domestik, serta aktivitas masyarakat sekitar sempadan yang berpotensi memengaruhi kualitas air. Wawancara semi-terstruktur dengan warga, tokoh adat (*Saniri Negeri*), dan pejabat teknis dilakukan untuk memperkuat pemahaman sosial-ekologis terkait persepsi masyarakat terhadap perubahan kualitas dan kuantitas air danau.

Tahap akhir penelitian mencakup penelaahan, validasi, dan analisis deskriptif-spasial terhadap data yang telah terverifikasi. Audit metodologis dilakukan untuk memastikan konsistensi penerapan standar SNI/APHA, disertai harmonisasi satuan pengukuran (mg/L ; m^3/s) dan analisis tren musiman maupun tahunan menggunakan perangkat lunak statistik R serta sistem informasi geografis QGIS. Integrasi hasil kuantitatif dan temuan lapangan dilakukan melalui pendekatan triangulatif, yang menggabungkan analisis empiris, observasi ekologis, dan wawasan sosial dari hasil wawancara. Proses sintesis ini menghasilkan gambaran komprehensif mengenai kondisi hidrologi dan ekologis Danau Faunil, sekaligus menjadi dasar bagi penyusunan rekomendasi strategis yang berorientasi pada pengelolaan sumber daya air terpadu (Integrated Water Resources Management/IWRM), penerapan nature-based solutions (NbS), serta penguatan tata kelola lokal yang adaptif terhadap perubahan iklim dan tekanan antropogenik di wilayah pesisir Kota Tual.

Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilaksanakan melalui pendekatan integratif yang menggabungkan teknik kuantitatif dan kualitatif secara sistematis untuk menghasilkan pemahaman komprehensif mengenai dinamika kualitas dan kuantitas air di Danau Faunil. Data kuantitatif berupa deret waktu (2015–2024) yang diperoleh dari Dinas PUPR dan Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Tual diolah menggunakan perangkat lunak R (versi 4.x) dengan dukungan paket *tidyverse*, *janitor*, *trend*, dan *ggplot2*. Proses analisis mencakup *data cleaning*, harmonisasi satuan, serta penerapan statistik deskriptif dan analisis tren menggunakan uji Mann–Kendall dan Sen’s Slope Estimator untuk mengidentifikasi perubahan signifikan secara temporal. Visualisasi dilakukan melalui *time series plots*, *seasonal boxplots*, dan grafik hubungan DO–debit untuk mendeteksi indikasi

hipoksia serta keterkaitannya dengan dinamika hidrologis dan tekanan antropogenik (Haulussy *et al.*, 2024).

Tabel 1. Pengukuran Debit dan Parameter Kualitas Air Berdasarkan Standar SNI dan APHA

Parameter	Lokasi Pengambilan Sampel	Metode Analisis (SNI/APHA)	Satuan	Frekuensi Pengambilan	Instansi Sumber Data
Debit Air Danau	Titik inflow dan outflow	SNI 8066:2015 / Pengukuran Volumetrik & <i>Current Meter</i>	L/detik	Musim hujan & kemarau	Dinas PUPR Kota Tual
pH	Inflow, tengah, outflow danau	SNI 6989.11:2019 / APHA 4500-H ⁺ B	Skala pH	Bulanan	DLH Kota Tual
Dissolved Oxygen (DO)	Inflow, tengah, outflow danau	SNI 6989.14:2019 / APHA 4500-O C	mg/L	Bulanan	DLH Kota Tual
Biological Oxygen Demand (BOD)	Inflow, tengah, outflow danau	SNI 6989.72:2009 / APHA 5210 B	mg/L	Bulanan	DLH Kota Tual
Chemical Oxygen Demand (COD)	Inflow, tengah, outflow danau	SNI 6989.2:2019 / APHA 5220 D	mg/L	Bulanan	DLH Kota Tual
Total Dissolved Solids (TDS)	Inflow, tengah, outflow danau	SNI 6989.27:2017 / APHA 2540 C	mg/L	Bulanan	DLH Kota Tual

Analisis spasial dilakukan menggunakan QGIS (versi 3.28) untuk memetakan tiga titik pengambilan sampel utama (inflow, tengah, dan outflow) serta zona buffer sempadan dengan radius adaptif 50–100 meter. Pemetaan ini bertujuan menilai tingkat keterpaparan aktivitas permukiman, pertanian, dan pembuangan limbah terhadap gradien spasial parameter kualitas air. Data spasial tersebut kemudian di-overlay dengan citra *base map* hidrografi dan tata guna lahan guna memperjelas hubungan antara aktivitas manusia dan degradasi kualitas air.

Sementara itu, data kualitatif hasil wawancara dan observasi dianalisis menggunakan Thematic Analysis berdasarkan kerangka Braun & Clarke (2006) yang meliputi enam tahap: *familiarization, coding, generating themes, reviewing themes, defining themes*, dan *reporting*. Proses *double-coding* diterapkan untuk menjaga reliabilitas dengan koefisien Cohen's Kappa ≥ 0.75 , menunjukkan kesepakatan tinggi antarpeneliti. Integrasi antara hasil kuantitatif dan kualitatif dilakukan melalui joint display table yang menautkan indikator numerik—seperti frekuensi DO < 4 mg/L dan peningkatan BOD/COD pasca-2018—dengan temuan sosial-ekologis terkait praktik pembuangan limbah domestik, kondisi vegetasi riparian, dan efektivitas peran kelembagaan lokal (*Saniri Negeri*) (Latuamury, 2025b).

Pendekatan triangulatif ini menghasilkan dasar ilmiah yang kuat untuk memahami keterkaitan antara tekanan biofisik dan dinamika sosial-ekologis di wilayah tangkapan air. Hasil analisis kemudian digunakan sebagai landasan perumusan strategi pengelolaan adaptif dan berkelanjutan, termasuk rekomendasi penerapan Integrated Water Resources Management (IWRM), nature-based solutions (NbS), serta sistem pemantauan berbasis komunitas guna memperkuat ketahanan air Danau Faunil dalam jangka panjang (Dupuits & Mancilla Garcia, 2022).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis Kualitas Air Danau Faunil

Tabel 1 menyajikan perkembangan parameter kualitas air Danau Faunil selama periode 2015–2024 berdasarkan hasil pemantauan laboratorium terhadap enam parameter utama: BOD, COD, TDS, pH, DO musim hujan, dan DO musim kemarau. Secara umum, beberapa parameter masih menunjukkan kestabilan dalam rentang baku mutu air Kelas II sesuai Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, sementara parameter lainnya memperlihatkan tren penurunan kualitas yang perlu mendapatkan perhatian serius.

Tabel 1. Parameter kualitas air Danau Faunil tahun 2015–2024

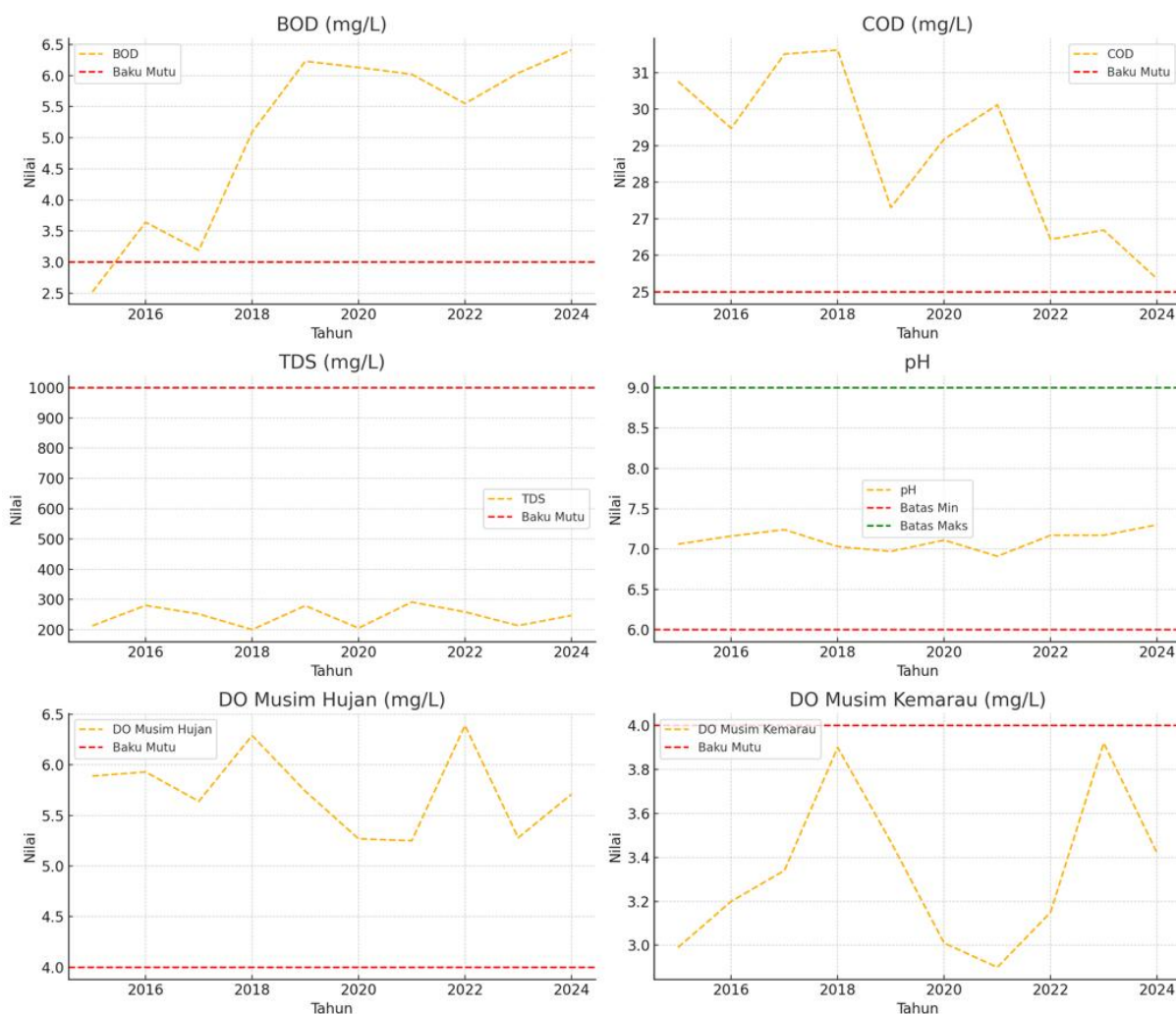
Tahun	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TDS (mg/L)	pH	DO Musim Hujan (mg/L)	DO Musim Kemarau (mg/L)
2015	2.52	30.76	213.13	7.06	5.89	2.99
2016	3.64	29.48	280.33	7.16	5.93	3.2
2017	3.19	31.51	251.75	7.24	5.64	3.34
2018	5.09	31.62	200.32	7.03	6.29	3.9
2019	6.23	27.31	279.31	6.97	5.74	3.47
2020	6.13	29.18	205.33	7.11	5.27	3.01
2021	6.02	30.12	291.39	6.91	5.25	2.9
2022	5.55	26.44	258.69	7.17	6.39	3.15
2023	6.04	26.69	213.56	7.17	5.28	3.92
2024	6.41	25.36	246.89	7.3	5.71	3.42

Sumber: Olah data sekunder Perumdam Kota Tual, 2015–2024

Analisis deret waktu menunjukkan variasi kinerja antarparameter yang menggambarkan kompleksitas perubahan kualitas air di Danau Faunil. Nilai pH (6,91–7,30) dan TDS (200–291 mg/L) relatif stabil serta berada dalam kisaran baku mutu Kelas II, mencerminkan kondisi geokimia dan daya penyangga alami yang masih berfungsi baik. Sebaliknya, BOD menunjukkan peningkatan signifikan sejak 2018 dan secara konsisten melampaui ambang batas 3 mg/L, mencapai 6,41 mg/L pada tahun 2024. Pola serupa terlihat pada COD, yang sepanjang dekade tetap berada di atas 25 mg/L, meskipun menunjukkan penurunan bertahap setelah 2020. Parameter DO memperlihatkan kontras musiman yang tajam: nilai pada musim hujan umumnya di atas 4 mg/L (maksimum 6,39 mg/L pada 2022), sedangkan pada musim kemarau hampir seluruhnya di bawah 4 mg/L (minimum 2,9 mg/L pada 2021), menandakan kondisi hipoksia musiman yang berulang.

Temuan tersebut mengindikasikan dominasi beban organik kronis sebagai penyebab utama degradasi kualitas air. Kenaikan BOD yang diikuti peningkatan COD mencerminkan masuknya limbah domestik dan senyawa organik sukar terurai yang meningkatkan kebutuhan oksigen terlarut untuk proses dekomposisi (Latuamury, 2025a; Soukotta *et al.*, 2019). Pada musim kemarau, suhu tinggi, rendahnya turbulensi air, dan terbatasnya suplai oksigen memperparah penurunan DO, sehingga berpotensi menyebabkan stres fisiologis bagi biota akuatik. Korelasi negatif yang kuat

antara BOD dan DO memperkuat dugaan bahwa akumulasi bahan organik, diperparah oleh lemahnya sistem sanitasi dan degradasi vegetasi riparian, merupakan mekanisme utama penurunan kualitas ekosistem danau (UNEP, 2019).



Gambar 1. visualisasi tren parameter kualitas air Danau Faunil tahun 2015–2024

Visualisasi tren (**Gambar 1**) menunjukkan pola yang konsisten dengan hasil numerik. Nilai BOD terus meningkat sejak 2018 hingga melampaui ambang batas baku mutu 3 mg/L dan mencapai puncaknya pada 2024. COD juga memperlihatkan nilai tinggi sepanjang periode pengamatan (puncak 31,62 mg/L pada 2018), walaupun mulai menurun menuju 25,36 mg/L pada 2024. Sementara itu, TDS tetap jauh di bawah ambang 1.000 mg/L dan pH stabil pada kisaran netral–sedikit basa (6,91–7,30), menunjukkan sistem penyangga kimia yang masih efektif. Secara umum, data ini menegaskan bahwa tekanan utama terhadap Danau Faunil berasal dari pencemaran organik, bukan dari faktor kimia anorganik atau geogenik.

Parameter DO memperlihatkan keterkaitan langsung dengan tren BOD, khususnya pada periode kemarau (Latuamury *et al.*, 2021; Utami *et al.*, 2018). Penurunan oksigen terlarut yang signifikan menunjukkan bahwa proses dekomposisi organik telah melebihi kapasitas asimilasi alami danau. Kondisi ini berimplikasi terhadap penurunan fungsi ekologis perairan dan potensi

eutrofikasi awal, yang apabila tidak dikendalikan dapat mengganggu stabilitas rantai trofik. Secara manajerial, hasil ini menegaskan urgensi implementasi sistem sanitasi terpadu untuk menekan beban limbah domestik, restorasi vegetasi riparian sebagai penyaring alami, serta pengembangan pemantauan berbasis masyarakat (citizen science) yang memantau parameter BOD, COD, dan DO secara berkala (UNCC, 2017).

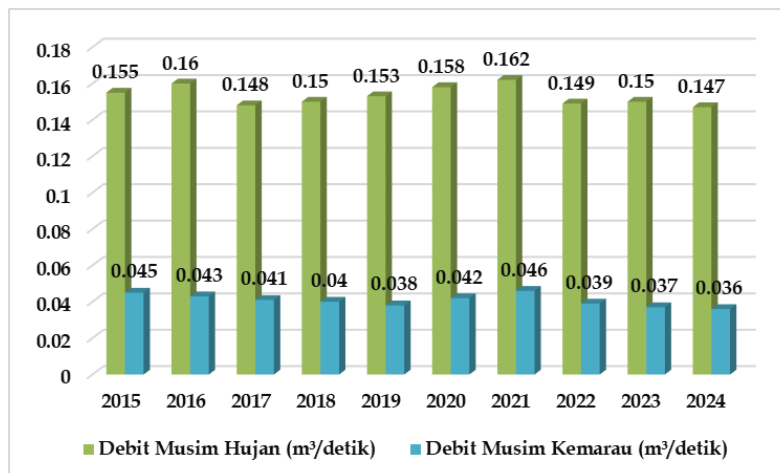
Secara spasial, tekanan terbesar teridentifikasi pada titik-titik pengambilan sampel yang berdekatan dengan kawasan permukiman padat, memperkuat hipotesis bahwa aktivitas domestik merupakan faktor dominan penurunan kualitas air (Xiaofeng *et al.*, 2023). Penurunan COD dalam dua tahun terakhir dapat ditafsirkan sebagai indikasi awal efektivitas intervensi pengelolaan, namun peningkatan BOD dan rendahnya DO di musim kemarau menunjukkan bahwa proses pemulihan belum merata. Oleh karena itu, pengelolaan kualitas air Danau Faunil perlu diarahkan pada kebijakan zonasi sempadan danau, rehabilitasi ekosistem riparian, serta penerapan sistem peringatan dini (*early warning system*) berbasis data lapangan dan partisipasi masyarakat. Pendekatan integratif ini diharapkan mampu mengembalikan fungsi ekologis Danau Faunil sebagai penyedia air bersih yang berkelanjutan bagi Kota Tual.

Hasil analisis kuantitas dan ketersediaan Air

Hasil pengukuran debit Danau Faunil selama periode 2015–2024 menunjukkan fluktuasi musiman yang tajam antara musim penghujan dan musim kemarau. Debit pada musim hujan tercatat relatif stabil dalam kisaran 0,147–0,162 m³/detik, sedangkan pada musim kemarau menurun drastis hingga 0,036–0,046 m³/detik, mencerminkan ketergantungan yang tinggi terhadap curah hujan tahunan sebagai input utama sistem hidrologi danau. Tren penurunan debit mulai teridentifikasi sejak 2017 hingga 2019, bertepatan dengan fenomena El Niño berskala lemah di wilayah Indonesia bagian timur yang berdampak pada penurunan presipitasi regional. Meskipun terjadi peningkatan debit pada tahun 2021 akibat anomali iklim basah, data longitudinal mengindikasikan penurunan debit kemarau yang lebih signifikan, dari 0,045 m³/detik pada 2015 menjadi 0,036 m³/detik pada 2024. Penurunan ini menandakan degradasi kapasitas tangkapan air yang kemungkinan besar dipicu oleh perubahan tutupan vegetasi riparian, deforestasi hulu, serta ekspansi aktivitas antropogenik di sekitar daerah tangkapan (**Gambar 2**).

Kesenjangan yang besar antara debit musim penghujan dan kemarau menunjukkan adanya ketidakseimbangan struktural dalam sistem suplai air Danau Faunil. Debit musim penghujan rata-rata hampir empat kali lipat lebih besar dibandingkan debit kemarau, yang menegaskan rendahnya kapasitas penyimpanan alami dan kelemahan sistem infiltrasi di daerah tangkapan. Pola ini berdampak langsung pada penurunan keandalan pasokan air selama periode kering, terutama di wilayah hilir yang sangat bergantung pada danau sebagai sumber utama air bersih (Haulussy *et al.*, 2024; Latuamury *et al.*, 2023). Kondisi ini juga memperkuat risiko kekeringan lokal serta mempercepat proses degradasi lahan akibat penurunan kelembapan tanah dan peningkatan

evapotranspirasi (Latuamury & Talaohu, 2021; Sukri *et al.*, 2023). Oleh karena itu, diperlukan strategi konservasi air yang berorientasi pada peningkatan retensi dan efisiensi hidrologis, seperti pemanenan air hujan (*rainwater harvesting*), pembangunan sumur resapan, dan rehabilitasi vegetasi riparian untuk menahan erosi serta memperbaiki kapasitas infiltrasi alami.



Gambar 2. Data Histori debit Danau Faunil selama 2015-2024

Pendekatan Integrated Water Resources Management (IWRM) menjadi kerangka yang relevan untuk merespons dinamika debit musiman ini, melalui pengaturan distribusi air berbasis musim, penguatan kapasitas kelembagaan lokal, serta pelibatan masyarakat dalam pemantauan dan pengambilan keputusan (Michael *et al.*, 2017; Schuetze & Chelleri, 2013). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa meskipun Danau Faunil masih memiliki potensi sebagai sumber air bersih berkelanjutan, keberlanjutannya sangat bergantung pada integrasi strategi teknis, kelembagaan, dan ekosistem. Rata-rata debit 150 liter/detik pada musim penghujan dinilai masih mencukupi kebutuhan domestik dasar, namun debit 40 liter/detik pada musim kemarau menunjukkan risiko kekurangan air yang nyata dan berimplikasi pada potensi krisis air rumah tangga (Smajgl & Ward, 2015). Untuk mengatasi kondisi tersebut, diperlukan infrastruktur penyimpanan air berskala menengah, sistem monitoring debit real-time, serta pemodelan risiko kekeringan spasial-temporal yang dapat mendukung kebijakan adaptasi iklim di tingkat daerah. Temuan ini sejalan dengan arah kebijakan RPJMD Kota Tual 2020–2025, yang menekankan pentingnya pelestarian daerah tangkapan air, penguatan tata kelola kelembagaan, dan pembangunan sistem adaptif terhadap ketidakpastian iklim guna menjamin ketahanan air perkotaan di wilayah kepulauan.

Analisis SWOT Keberlanjutan Pengelolaan Danau Faunil

Analisis SWOT pada **Tabel 2** menunjukkan keterkaitan yang erat antara hasil biofisik dan tata kelola yang diuraikan pada sub-bab sebelumnya. Peningkatan BOD hingga 6,41 mg/L dan penurunan DO kemarau hingga 2,9 mg/L memperkuat bukti terjadinya tekanan pencemaran organik kronis akibat limbah domestik yang tidak terolah. Bersamaan dengan itu, penurunan debit kemarau hingga 0,036 m³/detik mengindikasikan berkurangnya kapasitas tangkapan air yang

memperlemah ketersediaan sumber air bersih. Kelemahan kelembagaan, khususnya belum optimalnya peran Saniri Negeri, berkontribusi langsung terhadap degradasi kualitas air. Tidak adanya sanksi adat terhadap pembuangan limbah rumah tangga ke badan air memperlihatkan lemahnya implementasi nilai-nilai kearifan lokal dalam praktik pengelolaan lingkungan. Sebaliknya, kekuatan internal seperti kestabilan pH dan TDS, potensi debit musim hujan yang tinggi, serta peluang regulatif dari PP No. 22 Tahun 2021 dan SDG 6 dan 13 memberikan dasar yang kuat untuk membangun model pengelolaan adaptif yang selaras dengan prinsip keberlanjutan.

Tabel 2. Matriks Analisis SWOT Pengelolaan Keberlanjutan Danau Faunil

Strengths (Kekuatan)	Weaknesses (Kelemahan)
- Danau Faunil merupakan sumber air permukaan alami yang masih aktif dimanfaatkan masyarakat.	- Tidak adanya sistem sanitasi terpadu di wilayah permukiman sekitar danau.
- Potensi cadangan air pada musim penghujan cukup tinggi (150 L/detik) untuk kebutuhan domestik.	- Degradasi vegetasi riparian akibat aktivitas pemukiman dan pertanian tidak terkendali.
- Nilai pH dan TDS relatif stabil dalam kisaran baku mutu air kelas II.	- Nilai BOD dan COD melebihi baku mutu sejak 2018, menunjukkan tekanan organik kronis.
- Adanya kesadaran awal masyarakat terhadap pentingnya perlindungan danau.	- Kelembagaan lokal belum optimal dalam pengawasan dan pengelolaan sumber daya air.
Opportunities (Peluang)	Threats (Ancaman)
- Dukungan regulatif melalui PP No. 22 Tahun 2021 dan agenda SDG 6 dan 13.	- Risiko peningkatan sedimentasi akibat deforestasi di daerah tangkapan.
- Peluang pendanaan restorasi dan pembangunan sanitasi dari program nasional (Dana Alokasi Khusus, Climate Fund, dsb).	- Peningkatan populasi dan aktivitas domestik tanpa sistem limbah yang memadai.
- Potensi partisipasi kelembagaan adat (Saniri Negeri) dalam pengawasan ekologis berbasis kearifan lokal.	- Penurunan debit musim kemarau secara konsisten hingga 36 L/detik dalam 10 tahun terakhir.
- Ketersediaan data kualitas dan debit air untuk mendukung sistem pemantauan dan <i>early warning system</i> .	- Ketergantungan penuh pada curah hujan sebagai input utama sistem hidrologi danau.

Sumber: analisis data primer, 2025

Untuk menentukan strategi yang paling prioritas, dilakukan evaluasi berbasis Analytic Hierarchy Process (AHP) menggunakan tiga kriteria utama: urgensi, dampak ekologis, dan feasibility sosial-institusional (Abdrabo *et al.*, 2023; Tansar *et al.*, 2023). Hasil pemeringkatan menunjukkan bahwa strategi WO1 – Pembangunan sistem sanitasi terpadu berbasis komunitas dan penguatan kelembagaan adat menempati posisi pertama dengan bobot prioritas 0,35, karena dinilai paling efektif dalam menurunkan beban BOD dan mencegah pencemaran organik langsung. Prioritas kedua adalah ST1 – Rehabilitasi vegetasi riparian berbasis Nature-based Solutions (NbS) dengan bobot 0,27, berpotensi memperbaiki kualitas dan kuantitas air secara simultan. Strategi ketiga yaitu SO1 – Optimalisasi dukungan regulatif dan pendanaan restorasi (DAK, Climate Fund) dengan bobot 0,23, penting untuk menopang aspek pendanaan jangka panjang dan keberlanjutan kebijakan. Sementara itu, WT1 – Edukasi masyarakat dan penguatan sistem pengawasan berbasis komunitas memperoleh bobot 0,15 dan berperan sebagai strategi pendukung keberlanjutan sosial yang memperkuat legitimasi kelembagaan lokal.



Gambar 3. Strategi kuadran SWOT (SO-ST-WO-WT) Pengelolaan Keberlanjutan Danau Faunil

Gambar 3 memperlihatkan diagram kuadran SWOT klasik yang memposisikan Danau Faunil pada **Kuadran I (SO)**, menandakan kekuatan internal yang cukup besar untuk memanfaatkan peluang eksternal secara strategis dalam memperkuat kondisi ekologis dan kelembagaan. Namun, hasil overlay kuantitatif AHP menunjukkan bahwa dalam jangka pendek, fokus kebijakan perlu diarahkan pada **strategi WO dan ST** yang bersifat remedial, mengingat ancaman penurunan debit dan peningkatan beban limbah domestik telah berdampak langsung pada penurunan indeks kualitas air. Oleh karena itu, arah pengelolaan keberlanjutan Danau Faunil perlu disusun secara bertahap: **(1)** memperkuat tata kelola kelembagaan dan sistem sanitasi terpadu; **(2)** merehabilitasi ekosistem riparian melalui pendekatan NbS untuk memulihkan kapasitas filtrasi alami; dan **(3)** mengintegrasikan kebijakan adaptasi iklim ke dalam sistem pemantauan spasial dan partisipatif berbasis data. Pendekatan ini diharapkan mampu menstabilkan kondisi hidrologi, memperbaiki kualitas air, serta meningkatkan ketahanan sosial-ekologis masyarakat pesisir Kota Tual secara ilmiah dan berkelanjutan (Oktari *et al.*, 2023).

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menegaskan bahwa keberlanjutan fungsi Danau Faunil sebagai sumber air bersih utama di Kota Tual ditentukan oleh keterkaitan erat antara aspek kualitas, kuantitas, dan faktor sosial-ekologis di wilayah tangkapan air. Secara kualitas, parameter pH dan TDS masih memenuhi baku mutu kelas II sesuai PP No. 22 Tahun 2021, menandakan stabilitas geokimia perairan, namun peningkatan BOD (hingga 6,41 mg/L) dan COD (rata-rata >25 mg/L) sejak tahun 2018 mengindikasikan tingginya beban pencemar organik akibat pembuangan limbah domestik tanpa pengolahan. Kondisi ini menurunkan kadar DO di bawah 4 mg/L pada musim kemarau, menimbulkan hipoksia yang mengancam keberlanjutan biota akuatik. Dari sisi kuantitas, debit air

memperlihatkan fluktuasi ekstrem—mencapai 0,162 m³/detik pada musim penghujan dan turun menjadi 0,036 m³/detik pada musim kemarau—yang mencerminkan ketergantungan tinggi terhadap curah hujan serta degradasi vegetasi riparian yang menurunkan kapasitas tangkapan air (Rahayu *et al.*, 2020; Rahmawati & Surilayani, 2017).

Hasil penelitian juga mengungkap kelemahan kelembagaan dan sosial, termasuk tidak adanya sistem sanitasi terpadu dan lemahnya peran Saniri Negeri dalam pengawasan lingkungan, yang mengakibatkan kesenjangan antara nilai-nilai kearifan lokal dan praktik pengelolaan sumber daya air (Rahim *et al.*, 2019). Oleh karena itu, pengelolaan Danau Faunil perlu diarahkan pada strategi implementatif yang komprehensif dan adaptif, meliputi pembangunan sistem sanitasi terpadu berbasis komunitas, rehabilitasi vegetasi riparian melalui pendekatan Nature-based Solutions (NbS), serta pemanenan air hujan (rainwater harvesting) untuk memperkuat cadangan air domestik pada musim kering (Moosavi *et al.*, 2021). Pendekatan ini harus diintegrasikan dalam kerangka Integrated Water Resources Management (IWRM) yang menyeimbangkan dimensi teknis, ekologis, dan sosial, dengan dukungan kebijakan nasional (PP No. 22 Tahun 2021) dan agenda global seperti SDG 6 (Clean Water and Sanitation) dan SDG 13 (Climate Action) (Diehl *et al.*, 2019; Sajeev *et al.*, 2023). Sinergi antara pemerintah daerah, kelembagaan adat, dan masyarakat lokal menjadi kunci dalam mewujudkan model pengelolaan air pulau kecil yang partisipatif, berbasis data, dan tangguh terhadap perubahan iklim di kawasan pesisir Indonesia Timur.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdrabo, K. I., Kantoush, S. A., Esmail, A., Saber, M., Sumi, T., Almamari, M., Elboshy, B., & Ghoniem, S. (2023). An integrated indicator-based approach for constructing an urban flood vulnerability index as an urban decision-making tool using the PCA and AHP techniques: A case study of Alexandria, Egypt. *Urban Climate*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101426>
- Diehl, J. A., Oviatt, K., Chandra, A. J., & Kaur, H. (2019). Household food consumption patterns and food security among low-income migrant urban farmers in Delhi, Jakarta, and Quito. *Sustainability (Switzerland)*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/su11051378>
- Dupuits, E., & Mancilla Garcia, M. (2022). Knowledge politics around water, development and ecosystem services in Ecuador: creative encounters and resistances. *Alternautas*. <https://doi.org/10.31273/an.v9i2.1149>
- Gaglio, M., Lanzoni, M., Goggi, F., Fano, E. A., & Castaldelli, G. (2023). Integrating payment for ecosystem services in protected areas governance: The case of the Po Delta Park. *Ecosystem Services*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101516>
- Haulussy, R., Latuamury, B., & Iskar, I. (2024). Analisis Pemangku Kepentingan (Stakeholder) Terhadap Pengelolaan Sumberdaya Air Das Wae Batu Merah Kota Ambon. *Makila*, 18(1), 52–67. <https://doi.org/10.30598/makila.v18i1.10561>
- IPCC. (2022). Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change - Working Group III. *Cambridge University Press*.
- Latuamury, B. (2025a). *Air dan Akar Mangrove, Infrastruktur Alami Untuk Masa Depan Ketahanan Pesisir*. WIDINA.

- Latuamury, B. (2025b). *Mangrove, Pengetahuan, Dan Kekuasaan: Produksi Bersama Keamanan Air Melalui Penelitian Aksi Partisipatif Di Pulau Kecil*. Widina Media Utama.
- Latuamury, B. (2025c). *Mangrove Sebagai Sistem Biofiltrasi Alami: Inovasi Ekohidrologi dan Tata Kelola Air di Pesisir Pulau Kecil*. WIDINA.
- Latuamury, B., Imlabla, W. N., Sahusilawane, J. F., & Marasabessy, H. (2023). One-Way ANOVA Test of Five Digital Filter Recursive Graphic Methods in Baseflow Separation on Wae Tomu Watershed Ambon City. *AIP Conference Proceedings*, 2588(January). <https://doi.org/10.1063/5.0111720>
- Latuamury, B., Imlabla, W., Sahusilawane, J., & Marasabessy, H. (2022). Comparing Master Recession Curve Shapes Between Linear and Exponential Reservoir Models. *Journal of Geographical Studies*, 6(2). <https://doi.org/10.21523/gcj5.22060202>
- Latuamury, B., Marasabessy, H., Talaohu, M., & Imlabla, W. (2021). Small island watershed morphometric and hydrological characteristics in Ambon Region, Maluku Province. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 800(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/800/1/012047>
- Latuamury, B., & Talaohu, M. (2021). Correlating Spatial Pattern of Canopy Greenness Derived from the NDVI with Hydrological Characteristics of Small Island Watersheds. *Journal of Geographical Studies*, 5(1). <https://doi.org/10.21523/gcj5.21050101>
- Michael, H. A., Post, V. E. A., Wilson, A. M., & Werner, A. D. (2017). Science, society, and the coastal groundwater squeeze. In *Water Resources Research* (Vol. 53, Issue 4). <https://doi.org/10.1002/2017WR020851>
- Moosavi, S., Browne, G. R., & Bush, J. (2021). Perceptions of nature-based solutions for Urban Water challenges: Insights from Australian researchers and practitioners. *Urban Forestry and Urban Greening*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126937>
- Oktari, R. S., Latuamury, B., Idroes, R., Sofyan, H., & Munadi, K. (2023). Knowledge management strategy for managing disaster and the COVID-19 pandemic in Indonesia: SWOT analysis based on the analytic network process. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 85. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103503>
- Ovink, H., Rahimzoda, S., Cullman, J., & Imperiale, A. J. (2023). The UN 2023 Water Conference and pathways towards sustainability transformation for a water-secure world. *Nature Water*, 1(3). <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00052-1>
- Rahayu, D. E., Setiawan, Y., & Permana, A. (2020). Evaluasi status mutu air Danau Rawa Pening menggunakan indeks kualitas air. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(1), 56–67.
- Rahim, S. A., Latief, H., & Lubis, R. F. (2019). Pengaruh aktivitas antropogenik terhadap kualitas air Danau Limboto. *Jurnal Sumberdaya Air*, 15(1), 23–30.
- Rahmawati, A., & Surilayani, D. (2017). Water Quality Management of Lontar Village Coastal Waters, Banten. *Jurnal Perikanan Dan Kelautan*, 7(1). <https://doi.org/10.33512/jpk.v7i1.1951>
- RSC. (2008). Special issue of Forced Migration Review on Climate Change and Displacement. *Forced Migration Review - Refugee Studies Centre - Oxford Department of International Development*, 31.
- Sajeev, S., Muthukumar, P., & Selvam, S. (2023). Submarine groundwater discharge: An Asian overview. *Chemosphere*, 325. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138261>
- Schuetze, T., & Chelleri, L. (2013). Integrating decentralized rainwater management in urban planning and design: Flood resilient and sustainable water management using the example of coastal cities in The Netherlands and Taiwan. *Water (Switzerland)*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/w5020593>
- Smajgl, A., & Ward, J. (2015). Evaluating participatory research: Framework, methods and implementation results. *Journal of Environmental Management*, 157.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.04.014>

- Sofyan A.P, A. B., S. Tabbu, M. A., Adawiyah, M., & Ramadhani, A. P. (2023). Kajian Pemenuhan Kebutuhan Air Bersih Masyarakat Pesisir Kecamatan Abeli dan Nambo Kota Kendari. *LaGeografia*, 21(2). <https://doi.org/10.35580/lageografia.v21i2.43120>
- Soukotta, E., Oszaer, R., & Latuamury, B. (2019). The Microbiology Quality Analysis of the Waters of Riuapa River and Its Impact on the Environment. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(07), 11–22. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.807.003>
- Sukri, A. S., Saripuddin, M., Karama, R., Nasrul, Talanipa, R., Kadir, A., & Aswad, N. H. (2023). Utilization Management to Ensure Clean Water Sources in Coastal Areas. *Journal of Human, Earth, and Future*, 4(1). <https://doi.org/10.28991/HEF-2023-04-01-03>
- Tansar, H., Duan, H. F., & Mark, O. (2023). A multi-objective decision-making framework for implementing green-grey infrastructures to enhance urban drainage system resilience. *Journal of Hydrology*, 620. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129381>
- UN Water, & UNESCO. (2022). UN World Water Development Report 2022. *UN Water*, March.
- UNCC. (2017). Climate Action Pathway: Climate Resilience. In *Encyclopedia of GIS*.
- UNEP. (2019). United Nations Environment Assembly of the United Nations Environment Programme Fourth session “Sustainable nitrogen management.” *United Nations Environment Programme*, Março.
- UNESCO for UN-Water. (2023). Imminent risk of a global water crisis (UNESCO/UN-Water). *Cambridge Prisms: Water*, 1.
- United Nations. (2021). The United Nations World Water Development Report. Valuing Water. UNESCO. In *New Scientist* (Vol. 191, Issue 2562).
- Utami, R., Rismawati, W., & Sapanli, K. (2018). Pemanfaatan Mangrove untuk Mengurangi Logam Berat di Perairan. *Prosiding Seminar Nasional Hari Air Dunia 2018*.
- Wheater, H., & Gober, P. (2013). Water security in the Canadian Prairies: Science and management challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(2002). <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0409>
- Xiaofeng, G., Haiping, H., & Zhouhua, G. (2023). Comprehensive Coastal Waters Management in Xiamen and Its Effects. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 38. <https://doi.org/10.3233/ATDE230343>
- Yang, S., Liu, J., Lin, P., & Jiang, C. (2013). Coastal Reservoir Strategy and Its Applications. In *Water Resources Planning, Development and Management*. <https://doi.org/10.5772/52315>