

Mikro-habitat ikan pelangi endemik *Melanotaenia arfakensis* dan implikasinya bagi konservasi insitu di Kebar, Papua Barat Daya

Microhabitat of the endemic rainbowfish melanotaenia arfakensis and its implications for insitu conservation in Kebar, Southwest Papua

Mariance Yemima Kaliele¹, Roni Bawole^{2*}, Emmanuel Manangkalangi², Selvi Tebaiy², Abdul Hamid A. Toha², Christover Alfarani Bawole¹, Paulus Boli², Mudjirahayu²

¹Mahasiswa Doktor Ilmu Lingkungan Program Pascasarjana Unipa, Manokwari.

²Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Unipa, Jl. Gunung Salju. Manokwari, Papua Barat

Email: r.bawole@unipa.ac.id

Disubmit: 18 Juli 2025, direvisi: 29 Juli 2025, diterima: 30 Juli 2025

Doi : 10.30862/cassowary.cs.v8.3.485

ABSTRACT: This study examines the microhabitat characteristics of the endemic rainbowfish *Melanotaenia arfakensis* in two major rivers of Tamberau, Southwest Papua—Api River and Asiti River—focusing on the spatial dynamics of environmental parameters from upstream to downstream. Results indicate that water temperature, dissolved oxygen (DO), depth, current velocity, and river width show significant spatial trends and directly influence the survival of *M. arfakensis*. The upstream zones, characterized by lower temperatures (23–26°C), high DO levels (>7 mg/L), moderate current, and stable depth, are identified as optimal habitats and conservation priorities. In contrast, the midstream and downstream zones exhibit gradual habitat degradation, including temperature increases up to 29.1°C and decreased DO levels, approaching the physiological tolerance limits of the species. This decline in microhabitat quality correlates with riparian vegetation loss and anthropogenic pressures. Therefore, an effective in situ conservation strategy must be spatially explicit, adaptive, and participatory—emphasizing thermal refugia protection in the upstream zones, ecological restoration in the midstream, and integrated watershed management with community involvement in the downstream areas. Longitudinal connectivity and the integrity of the entire riverine ecosystem are essential for ensuring the long-term viability of this endemic species.

Keywords: *Melanotaenia arfakensis*, microhabitat, insitu conservation, river connectivity, water quality, river segments, Southwest Papua

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara mega-biodiversitas yang paling penting di dunia, dengan tingkat endemisme yang tinggi, khususnya di wilayah Pulau Papua. Ekoregion ini merupakan rumah bagi berbagai spesies ikan air tawar yang belum sepenuhnya terpetakan dan dipelajari (Kottelat and Whitten, 1996).

Salah satu spesies ikan yang memiliki nilai ekologis dan konservasi tinggi adalah *Melanotaenia arfakensis*, atau ikan pelangi arfak, yang merupakan spesies endemik yang hanya ditemukan di sistem perairan pegunungan Arfak di Papua Barat (Allen and Hadiaty, 2013). Spesies ini termasuk dalam kelompok *stenothermal* yang memiliki toleransi

lingkungan sempit dan sangat sensitif terhadap perubahan habitat, khususnya terhadap parameter fisik-kimia air seperti suhu, kadar oksigen terlarut (DO), pH, kecepatan arus, serta morfometri sungai (Allan dan Castillo, 2007; Unmack et al., 2013).

Di tengah krisis keanekaragaman hayati global dan meningkatnya fragmentasi habitat, informasi mengenai kebutuhan ekologis mikrohabitat spesies endemik menjadi sangat penting. Studi yang mendalam mengenai kondisi mikrohabitat bukan hanya membantu mengungkap aspek ekologi dasar spesies tersebut, tetapi juga berfungsi sebagai fondasi untuk strategi konservasi *in situ* yang adaptif dan kontekstual (Davies dan Jackson, 2006). Mikrohabitat yang mendukung, seperti aliran sungai yang stabil, suhu optimal, dan tingkat DO yang tinggi, menjadi kunci untuk mempertahankan populasi alami *M. arfakensis* di tengah tekanan perubahan iklim dan aktivitas manusia.

Beberapa penelitian sebelumnya di Papua menunjukkan pentingnya studi berbasis mikrohabitat dalam mendukung konservasi spesies endemik. Manangkalangi et al. (2014) menyoroti peran kualitas air dan kondisi substrat dalam mempertahankan populasi ikan lokal, sementara Lefaan et al. (2019) menemukan bahwa degradasi riparian dan sedimentasi dari aktivitas manusia telah berdampak langsung pada distribusi ikan pelangi di wilayah Kepala Burung. Kadarusman et al. (2012a); Kadarusman (2012b); Nugraha et al. (2015a, 2015b) juga mengungkap adanya keragaman tinggi diantara spesies *Melanotaenia* Papua yang hanya dapat dikenali secara tepat melalui pendekatan ekologis dan genetik yang mendalam. Keterlibatan masyarakat adat dalam menjaga sumber daya perairan melalui pengetahuan lokal yang terintegrasi dengan data ilmiah menjadi sangat penting dalam pengelolaan ikan air tawar. Semua temuan ini memperkuat urgensi untuk melakukan studi mikrohabitat spesifik dan mendalam sebagai dasar konservasi yang kontekstual dan inklusif di Papua.

Namun demikian, kajian ekologis terhadap *M. arfakensis* masih sangat terbatas, khususnya dalam hal karakterisasi mikrohabitat pada tingkat spasial (hulu, tengah, hilir) di habitat

aslinya. Banyak penelitian sebelumnya cenderung berfokus pada aspek taksonomi, morfologi, atau distribusi luas dari ikan pelangi secara umum (Allen, 1991; Winemiller dan Jepsen, 1998), tanpa menyentuh bagaimana variasi kondisi fisik dan kimia air memengaruhi distribusi lokal dan keberlangsungan hidup *M. arfakensis*. Riset ini hadir sebagai upaya untuk mengisi kesenjangan pengetahuan tersebut, dengan melakukan pengukuran rinci terhadap parameter lingkungan mikrohabitat di dua sungai utama di Kabupaten Tambrau, yaitu Sungai Api dan Sungai Asiti.

Pendekatan spasial dan ekologis mikrohabitat secara simultan di dua sistem sungai yang berbeda namun saling melengkapi, menggunakan parameter yang diukur secara kuantitatif dan dikaitkan langsung dengan standar baku mutu air kelas II (PP No. 22 Tahun 2021). Penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk mengidentifikasi habitat yang sesuai bagi kelangsungan hidup *M. arfakensis*, tetapi juga mengevaluasi kualitas lingkungan dari segi keanekaragaman mikrohabitat, dimensi yang sering diabaikan dalam konservasi air tawar (Abell et al., 2008; Arthington et al., 2010). Dengan memahami keberadaan dan kondisi *M. arfakensis* dapat bertahan hidup secara optimal, maka intervensi konservasi seperti perlindungan zona riparian, rehabilitasi habitat, atau penetapan kawasan konservasi dapat dirancang secara lebih tepat dan berbasis data lokal.

Kontribusi penelitian sebagai upaya pengembangan strategi konservasi *in situ* yang tidak hanya berbasis spesies tetapi juga berbasis ekosistem mikro. Studi ini dapat menjadi model pendekatan konservasi yang terukur untuk spesies air tawar lain di luar Papua, yang menghadapi tekanan serupa akibat perubahan penggunaan lahan, pembangunan infrastruktur, atau perubahan iklim. Sebagaimana diungkap oleh Dudgeon et al. (2006), pendekatan konservasi air tawar sering kali tertinggal dibandingkan konservasi ekosistem darat dan laut, padahal perairan darat memiliki tingkat ancaman yang lebih tinggi terhadap spesies endemik. Oleh karena itu, data rinci mikrohabitat seperti ini dapat memperkuat integrasi antara konservasi berbasis kawasan dan pendekatan berbasis ekosistem dinamis, serta memperkuat posisi *M. arfakensis* sebagai

spesies payung (*umbrella species*) dalam pengelolaan ekosistem sungai. Dengan menyediakan data empiris yang menunjukkan hubungan langsung antara kesehatan ekosistem sungai dan kelangsungan hidup ikan endemik, riset ini berpotensi mendorong pengembangan skema konservasi partisipatif, seperti *citizen science*, restorasi komunitas, dan insentif berbasis jasa lingkungan (Pretty dan Smith, 2004). Hal ini sangat relevan untuk mendukung implementasi kebijakan lingkungan dan pembangunan berkelanjutan di Pulau Papua, yang dalam banyak hal masih menghadapi dilema antara eksploitasi sumber daya dan pelestarian ekologis.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menambah khasanah ilmiah dalam bidang ekologi perairan tropis dan biologi konservasi, tetapi juga membangun dasar ilmiah yang kuat untuk perencanaan konservasi insitu jangka panjang yang efektif dan kontekstual. Hasilnya diharapkan dapat mendorong inisiasi kawasan konservasi berbasis sungai, perlindungan zona sempadan, serta perumusan kebijakan daerah berbasis biodiversitas endemik, yang pada akhirnya mendukung pelestarian kekayaan hayati Pulau Papua yang unik dan rapuh.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini dilaksanakan di wilayah Pegunungan Arfak, Kabupaten Tamboruh, Provinsi Papua Barat Daya, yang secara ekologis merupakan salah satu kawasan paling penting dalam konteks keanekaragaman hayati endemik di Indonesia. Fokus penelitian diarahkan pada dua sistem aliran sungai, yaitu Sungai Api dan Sungai Asiti, yang dikenal sebagai habitat alami bagi ikan pelangi endemik *M. Arfakensis* (Gambar 1). Kedua sungai tersebut mengalir di zona transisi antara hutan pegunungan bagian bawah dan hutan hujan tropis, yang secara ekologis memiliki struktur ekosistem riparian yang masih cukup baik, meskipun terdapat indikasi tekanan dari aktivitas manusia di beberapa segmen alirannya.

Sungai Api terletak di wilayah yang lebih rendah dan berbatasan langsung dengan beberapa permukiman tradisional, sementara

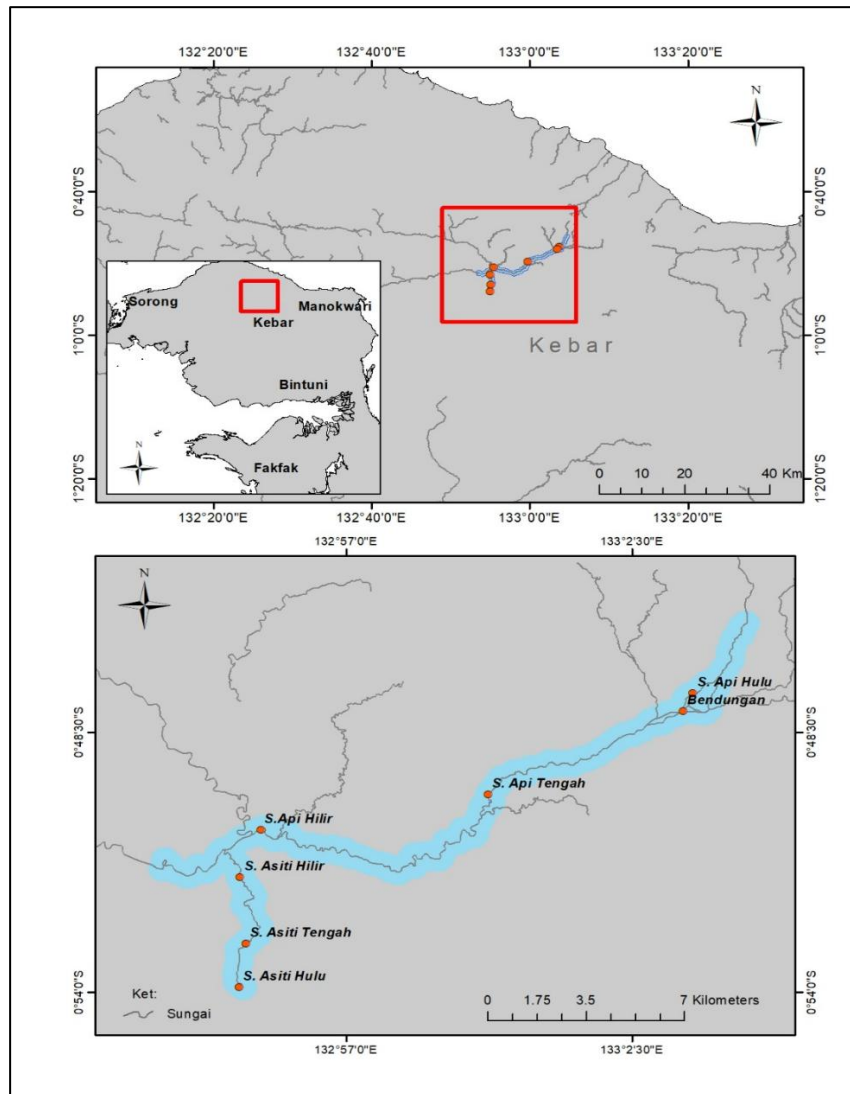
Sungai Asiti mengalir melalui kawasan dengan gangguan antropogenik yang relatif lebih rendah. Pemilihan lokasi ini mempertimbangkan aspek keterwakilan kondisi lingkungan dan potensi tekanan ekologis yang berbeda antar lokasi, sehingga memungkinkan analisis spasial yang lebih mendalam terkait karakteristik mikrohabitat.

Penelitian dilaksanakan selama musim kemarau, antara bulan Juli hingga November 2024. Pemilihan waktu ini bertujuan untuk memperoleh gambaran parameter fisik-kimia yang lebih stabil, karena tidak terganggu oleh fluktuasi debit air yang biasanya terjadi pada musim hujan. Selain itu, musim kemarau juga mempermudah akses lapangan dan pengamatan langsung terhadap distribusi ikan dan kondisi habitat mikro.

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif dengan rancangan stratifikasi spasial berdasarkan zonasi aliran sungai, yakni hulu, tengah, dan hilir. Setiap zona mewakili gradasi kondisi ekologis yang berbeda, baik dari segi morfometri sungai, struktur vegetasi riparian, maupun potensi gangguan eksternal. Hulu cenderung memiliki tutupan vegetasi yang rapat, substrat berbatu, dan suhu air yang lebih sejuk, sedangkan zona tengah biasanya mulai mengalami pelebaran aliran dan peningkatan sedimentasi. Segmen hilir sering kali menghadapi tekanan akibat aktivitas manusia seperti perladangan, pembukaan lahan, dan pembuangan limbah domestik.

Pada masing-masing zona ditetapkan tiga titik pengamatan yang dipilih secara sistematis berdasarkan keberagaman struktur habitat dan kemudahan akses. Setiap titik pengamatan memiliki panjang transek sungai ± 100 meter. Dengan demikian, terdapat sembilan titik pengamatan di masing-masing sungai dan total 18 titik di kedua lokasi. Pada setiap titik dilakukan pengambilan data lingkungan dan identifikasi spesies ikan pelangi secara langsung. Pendekatan spasial ini memungkinkan analisis mikrohabitat dan pemetaan kondisi optimal yang mendukung keberadaan *M. arfakensis*.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Pengamatan dilakukan pada waktu pagi hingga siang hari, antara pukul 08.00 hingga 14.00 Waktu Indonesia Timur (WIT), untuk menjaga konsistensi suhu dan pencahayaan yang memengaruhi parameter air serta aktivitas ikan. Metode ini dirancang agar mampu mendeskripsikan hubungan antara variasi parameter lingkungan dengan potensi keberadaan spesies secara holistik, tanpa mengabaikan dimensi ekologis spasial yang menjadi ciri khas sistem sungai tropis.

Parameter yang Diamati

Penelitian ini mengamati dua kelompok besar parameter, yaitu parameter fisik-kimia air dan parameter morfometrik sungai, yang masing-masing dipilih berdasarkan pengaruhnya yang signifikan terhadap kelangsungan hidup dan distribusi ikan air

tawar, terutama spesies endemik seperti *M. arfakensis*.

Parameter suhu diukur menggunakan termometer digital akurat dengan resolusi $0,1^{\circ}\text{C}$ yang direndam langsung pada kedalaman 10–15 cm untuk menggambarkan suhu aktual kolom air yang dihuni oleh ikan. Pengukuran dilakukan tiga kali di setiap titik transek, dan nilai rata-ratanya digunakan sebagai data representatif. Nilai pH diukur menggunakan pH meter portabel yang dikalibrasi setiap hari sebelum pengukuran lapangan, untuk memastikan akurasi. pH perairan merupakan indikator penting untuk proses fisiologis ikan seperti metabolisme dan respirasi, serta berperan dalam menentukan ketersediaan nutrisi.

Kadar oksigen terlarut (DO) diukur menggunakan alat DO meter digital. Parameter ini sangat penting karena berhubungan

langsung dengan tingkat respirasi dan daya dukung lingkungan terhadap spesies ikan stenotermal seperti *M. arfakensis*. Kecepatan arus diukur dengan metode pelampung (*float method*), yaitu dengan melacak waktu yang dibutuhkan oleh benda terapung alami (daun atau ranting ringan) untuk menempuh jarak 10 meter, kemudian dihitung kecepatannya dalam satuan meter per detik. Metode ini dipilih karena praktis dan cukup akurat di sungai kecil hingga sedang yang memiliki aliran permukaan terbuka.

Selain parameter fisik-kimia, penelitian ini juga mencatat aspek morfometrik sungai, seperti kedalaman dan lebar badan air. Kedalaman diukur setiap lima meter sepanjang transek menggunakan tongkat ukur, dan lebar sungai diukur secara tegak lurus terhadap aliran menggunakan pita ukur sepanjang 50 meter. Data morfometrik ini penting untuk menggambarkan heterogenitas habitat dan ketersediaan zona teduh atau zona dengan substrat kompleks, yang umumnya disukai oleh ikan pelangi untuk berlindung dan berkembang biak.

Pengamatan terhadap keberadaan ikan pelangi dilakukan melalui metode observasi langsung dan penangkapan non-destruktif menggunakan *hand net*. Ikan yang tertangkap segera diidentifikasi berdasarkan ciri morfologi eksternal, terutama kombinasi warna dan bentuk tubuh sesuai deskripsi spesies *M. arfakensis* dari Allen (1991). Setiap individu yang tertangkap dicatat, didokumentasikan, dan segera dikembalikan ke habitatnya untuk meminimalkan *stress* dan gangguan ikan. Seluruh metode observasi dilakukan tanpa bahan kimia dan tanpa mengganggu substrat dasar sungai, sejalan dengan prinsip konservasi insitu.

Analisis Data

Seluruh data hasil pengukuran dianalisis secara deskriptif menggunakan statistik sederhana seperti rata-rata, standar deviasi, dan kisaran nilai. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi pola variasi antar zona sungai dan menggambarkan kecenderungan lingkungan mikro yang menjadi preferensi habitat bagi *M. arfakensis*. Analisis ini membantu dalam menilai apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara kondisi di

zona hulu, tengah, dan hilir, serta untuk mengevaluasi kesesuaian habitat berdasarkan nilai ambang ideal untuk spesies ini.

Penilaian kesesuaian mikrohabitat dilakukan dengan membandingkan nilai parameter yang diperoleh dengan standar baku mutu air kelas II menurut Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021. Standar ini ditetapkan untuk perairan yang digunakan bagi kehidupan ikan air tawar, kegiatan rekreasi, dan keperluan pertanian, sehingga cukup relevan untuk konteks konservasi habitat alami. Selain itu, referensi dari penelitian terdahulu (Boyd, 1998; Jain et al., 2022; Malik, 2016) digunakan untuk menentukan ambang parameter yang dianggap optimal bagi *Melanotaenia* spp., seperti suhu antara 24–28°C, DO di atas 6 mg/L, dan arus sedang hingga kuat (>0,8 m/s). Dengan demikian, analisis ini tidak hanya mendeskripsikan kondisi lingkungan secara umum, tetapi juga memungkinkan evaluasi kritis terhadap potensi keberadaan habitat optimal bagi *M. arfakensis*, yang sangat diperlukan dalam konteks pengembangan strategi konservasi in situ berbasis ekosistem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Mikrohabitat (Tren Spasial dan Variabilitas Parameter Air)

Pengukuran di Sungai Api dan Sungai Asiti menunjukkan tren spasial yang konsisten dari zona hulu ke hilir. Kenaikan suhu dan lebar sungai, serta penurunan kadar oksigen terlarut (DO), kedalaman, dan kecepatan arus (Tabel 1)). Di hulu, suhu rata-rata berkisar 23–24 °C, DO tinggi (>8 mg/L), kedalaman mencapai 75 cm, dan aliran cukup deras (0,45 m/s). Kondisi ini ideal bagi *M. arfakensis*, mengingat toleransi suhu dan kebutuhan oksigennya (Boyd, 1998). Di tengah aliran, terdapat peningkatan suhu (25 °C), sedikit penurunan DO dan kedalaman, serta melambatnya aliran; kondisi ini masih cukup mendukung tetapi menunjukkan awal perubahan habitat optimal. Di hilir, suhu dapat mencapai 26 °C, DO menurun drastis (5–6 mg/L), kedalaman hanya sekitar 35 cm, dan aliran sangat lambat; kondisi ini menimbulkan tekanan terhadap kelangsungan hidup *M. arfakensis* karena mendekati ambang toleransi fisiologisnya (Winemiller dan Jepsen, 1998).

Variabilitas parameter ini mengindikasikan bahwa habitat ikan pelangi tidak homogen, dan sangat tergantung pada heterogenitas mikrohabitat. Kondisi optimal ditemukan di segmen hulu, sedangkan zona tengah dan hilir mengalami degradasi mikrohabitat yang

gradual. Hal ini sejalan dengan meta-analisis di Asia Tenggara bahwa spesies stenotermal sensitif terhadap perubahan suhu dan oksigen yang relatif kecil ($<3\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $<2\text{ mg/L}$) (Campos et al., 2021; Tongnunui dan Beamish, 2017).

Tabel 1. Tren Spasial dan Variabilitas Parameter Kualitas Air Sungai Api dan Sungai Asiti, Kebar, Papua Barat Daya.

Sungai API						
Kualitas Air	Segmen Sungai (rata-rata & Stdev)					
	Hulu		Tengah		Hilir	
Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	26,30	1,51	28,97	1,52	29,13	1,47
pH	7,07	0,03	7,22	0,01	7,14	0,05
DO (mg/l)	6,80	0,10	6,47	0,25	6,57	0,49
Kecepatan Arus (m/s)	1,12	0,46	1,06	0,21	1,47	0,56
Kedalaman (cm)	51,50	16,04	33,83	23,63	34,33	24,91
Lebar Sungai (M)	11,73	3,59	22,10	4,43	17,07	8,16
Sungai Asiti						
Kualitas Air	Segmen Sungai (rata-rata & Stdev)					
	Hulu		Tengah		Hilir	
Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	23,57	0,29	23,63	0,15	24,20	0,60
pH	7,72	0,39	7,09	0,10	7,14	0,02
DO (mg/l)	7,67	0,40	7,57	0,21	7,70	0,20
Kecepatan Arus (m/s)	1,13	0,34	0,78	0,22	0,98	0,25
Kedalaman (cm)	47,33	27,61	53,67	27,15	39,67	17,56
Lebar Sungai (M)	11,47	4,69	17,00	0,00	20,67	5,77

Parameter Kualitas Air pada Tingkat Mikrohabitat

Parameter mikrohabitat di tingkat spasial dan vertikal terbukti sangat penting dalam mempertahankan kelimpahan dan keberlangsungan hidup *M. arfakensis*. Suhu, DO, arus, dan kedalaman tidak hanya berfungsi sebagai elemen fisik, tetapi sebagai arsitek ekologis dari keberadaan mikrohabitat fungsional. Segmen hulu di dua sungai (Api dan Asiti) menunjukkan kesesuaian ekologis tinggi, menjadikannya prioritas konservasi. Sebaliknya, zona tengah dan hilir memerlukan intervensi ekologis, terutama melalui rehabilitasi riparian dan pengendalian tekanan antropogenik. Dengan demikian, karakteristik mikrohabitat bukan hanya indikator kualitas lingkungan, tetapi juga penentu langsung keberhasilan konservasi in situ. Strategi pelestarian *M. arfakensis* harus bersifat site-

specific dan memperhatikan dinamika ekologis lokal di masing-masing zona sungai.

Hasil pengukuran pada dua sungai utama habitat *M. arfakensis*, yaitu Sungai Api dan Sungai Asiti, memperlihatkan bahwa variabilitas spasial mikrohabitat yang ditandai oleh perubahan suhu, oksigen terlarut (DO), kecepatan arus, kedalaman, dan lebar sungai memiliki pengaruh yang sangat signifikan secara ekologis terhadap kelangsungan hidup spesies ini. Spesies *M. arfakensis*, sebagai ikan pelangi endemik Papua yang *stenotermal* dan *rheofilik* (arus sungai yang tetap stabil dan jernih), menunjukkan ketergantungan tinggi terhadap kestabilan parameter mikrohabitat (Allen, 1991; Kadarusman et al., 2012b; Manangkalangi et al., 2014).

Suhu Air Sebagai Faktor Penentu Homeostasis dan Aktivitas Metabolik Ikan

Di zona hulu, suhu rata-rata 23–26°C merupakan rentang yang sangat mendukung untuk *M. arfakensis*, sesuai dengan batas optimal suhu tropis ikan pelangi (<28°C) seperti dijelaskan oleh (Sandoval-Castillo et al., 2019). Suhu air yang rendah memungkinkan homeostasis internal ikan tetap stabil, mendukung aktivitas makan, reproduksi, dan pertumbuhan juvenil. Sebaliknya, pada zona tengah hingga hilir, suhu yang meningkat hingga 29.13°C di Sungai Api menunjukkan potensi tekanan termal. Kenaikan suhu bahkan sebesar 2–3°C dapat meningkatkan laju metabolisme hingga 30% (Clark et al., 2013), yang pada kondisi lingkungan tidak optimal akan menyebabkan ikan mengalami tekanan fisiologis, gangguan pencernaan, dan kerentanan terhadap penyakit.

Kandungan Oksigen Terlarut Sebagai Indikator Kesehatan Ekosistem Ikan

Oksigen terlarut (DO) merupakan salah satu faktor paling vital bagi kelangsungan hidup ikan, terutama bagi spesies dengan respirasi aktif seperti ikan pelangi (Boyd dan Tucker, 2014). Data menunjukkan bahwa di Sungai Asiti, nilai DO sangat stabil dan tinggi (rata-rata >7.5 mg/L), sedangkan di Sungai Api, terutama bagian tengah dan hilir, mengalami penurunan hingga 6.47 mg/L. Studi oleh Sollid dan Nilsson, (2006) menunjukkan bahwa kadar DO <6 mg/L berasosiasi dengan penurunan efisiensi konsumsi oksigen, yang berdampak pada pertumbuhan dan keberhasilan reproduksi spesies stenotermal air tawar. Kualitas aerasi di hulu yang lebih tinggi berkaitan erat dengan keberadaan *riffle* dan vegetasi riparian yang masih utuh, memungkinkan proses turbulensi dan re-oksigenasi lebih baik. Di bagian hilir yang lebih terbuka, kehilangan kanopi menyebabkan air lebih hangat dan kandungan DO menurun akibat penurunan difusi oksigen dari atmosfer.

Kedalaman dan Kecepatan Arus sebagai Pembentuk Mikrohabitat Fungsional Ikan

Kedalaman dan kecepatan arus sungai tidak hanya membentuk struktur fisik habitat, tetapi juga memengaruhi distribusi spasial ikan dan proses-proses ekologis seperti pemijahan,

perlindungan juvenil, dan penghindaran predator (Flecker dan Matthews, 1999). Di zona hulu, kedalaman >50 cm dan kecepatan arus >1.0 m/s ditemukan sangat sesuai bagi *M. arfakensis*, yang lebih menyukai arus sedang dengan substrat berkerikil (Allen et al., 2000).

Sungai Api bagian hilir menunjukkan kedalaman rata-rata <35 cm dan arus >1.4 m/s, kondisi yang dianggap tidak ideal karena fluktuasi aliran dapat menyebabkan ketidakstabilan substrat dan peningkatan energi yang mengganggu zona tenang untuk pemijahan. Sebaliknya, di Sungai Asiti, kecepatan arus yang berkisar antara 0.78–1.13 m/s relatif stabil dan mendukung terbentuknya mosaik habitat — *pool* (dalam, alirannya lambat), *riffle* (dangkal dengan aliran cepat, dan *run* (aliran moderat) yang sangat penting untuk mendukung siklus hidup ikan pelangi.

Lebar Sungai sebagai Penentu Variasi Mikrohabitat dan Konektivitas Ekosistem

Lebar sungai berimplikasi terhadap intensitas cahaya, fluktuasi suhu, dan konektivitas lintas habitat (Poff dan Zimmerman, 2010). Di Sungai Asiti, lebar yang meningkat dari 11.47 m (hulu) menjadi 20.67 m (hilir) disertai kestabilan kualitas air, menunjukkan bahwa aliran sungai tetap mendukung meski terdapat ekspansi horizontal. Sebaliknya, Sungai Api menunjukkan pelebaran yang tidak sebanding dengan kedalaman, menyebabkan air menjadi lebih dangkal dan rentan terhadap fluktuasi suhu serta sedimentasi. Habitat seperti ini cenderung homogen dan tidak menyediakan cukup tempat berlindung atau tempat pemijahan. Lebar sungai yang ekstrem tanpa diimbangi kedalaman dan penutup riparian dapat menjadi indikator fragmentasi habitat mikro. Studi konektivitas antar mikrohabitat terbukti penting untuk mempertahankan keanekaragaman genetik populasi lokal ikan sungai kecil (Gido et al., 2016; Stoffers et al., 2022; Xiong et al., 2023)

Kedalaman dan Arus: kedalaman yang relatif dalam dan arus yang moderat memungkinkan distribusi micro-niche bagi juvenile dan tempat berlindung terhadap predator. Kecepatan arus >0.3 m/s memicu stimulasi fisik untuk tonus otot ikan, mendukung pertumbuhan dan reproduksi awal

(Campos et al., 2018). Lebar Sungai lebih sempit menawarkan area perlindungan dan oksigen terlarut yang lebih tinggi akibat *riffle* dan turbulensi air; sedangkan di area hilir yang lebar, oksigen cenderung terbagi dan habitat menjadi lebih homogen.

Implikasi Riset bagi Strategi Konservasi Insitu Ikan

Konservasi insitu Arfak *M. arfakensis* membutuhkan pendekatan berbasis ekologi mikrohabitat yang adaptif dan terintegrasi secara spasial, dari hulu ke hilir. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa dinamika parameter lingkungan seperti suhu, kadar oksigen terlarut (DO), kecepatan arus, serta morfometri sungai memiliki pengaruh signifikan terhadap keberadaan spesies endemik ini. Dengan demikian, strategi konservasi insitu perlu difokuskan pada perlindungan dan pemulihan mikrohabitat kunci yang mendukung siklus hidup ikan pelangi secara optimal.

Proteksi Hulu sebagai Segmen Refugia Termal dan Reproduksi

Segmen hulu dari Sungai Api dan Sungai Asiti menunjukkan suhu yang lebih rendah (23,5–26,3°C), kadar DO tinggi (>7 mg/L), serta kedalaman dan arus yang lebih stabil. Kondisi ini sangat penting karena menyediakan refugia termal dan zona pemijahan yang optimal bagi *M. arfakensis*, yang bersifat stenotermal dan rheofilik (Allen et al., 2000). Studi serupa oleh (Pusey dan Arthington, 2003) menunjukkan bahwa sungai dengan kanopi riparian yang utuh memiliki kontribusi besar terhadap kestabilan suhu air dan peningkatan keberhasilan pemijahan ikan pelangi endemik. Oleh karena itu, langkah konservasi insitu di zona hulu harus menitikberatkan pada perlindungan integritas vegetasi riparian melalui pelarangan pembukaan lahan, penegakan hukum kawasan konservasi, serta pengembangan skema perlindungan berbasis masyarakat. Selain menjaga kualitas mikrohabitat, strategi ini akan mencegah fragmentasi populasi dan mendukung konektivitas ekosistem antar-subpopulasi yang terisolasi.

Rehabilitasi Ekologis di Segmen Tengah Untuk Mengembalikan Fungsi Penyangga

Segmen tengah dari kedua sungai menunjukkan indikasi awal degradasi habitat, termasuk peningkatan suhu, penurunan kedalaman, serta penyempitan DO akibat penurunan kualitas penutup riparian. Di wilayah ini, konservasi tidak cukup hanya dengan pelarangan aktivitas, melainkan perlu dilakukan intervensi ekologis aktif dalam bentuk restorasi vegetasi riparian dan rehabilitasi morfologi sungai. Restorasi riparian terbukti dapat menurunkan suhu permukaan air sebesar 2–3°C dan meningkatkan kadar DO hingga 1 mg/L, seperti ditunjukkan beberapa peneliti di sistem aliran air (Bowler et al., 2012; Fuller et al., 2022; Null et al., 2017). Penanaman spesies pohon lokal dengan kanopi rapat dan akar dalam akan membantu menstabilkan tebing, mengurangi sedimentasi, dan memulihkan mikrohabitat pemijahan yang sensitif. Lebih jauh, intervensi pada zona tengah juga harus mencakup pembentukan *buffer zone* dengan radius perlindungan minimal 30 meter di kedua sisi sungai (KLHK, 2021). *Buffer zone* akan berfungsi sebagai zona penyangga yang menyerap limpasan nutrisi dan mencegah masuknya polutan dari kegiatan pertanian dan pemukiman.

Konservasi di wilayah ini harus terintegrasi dalam skema pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) secara menyeluruh. Penataan ruang yang berbasis ekosistem, termasuk perlindungan sempadan sungai, pengendalian limbah domestik, serta pengelolaan *drainase* berkelanjutan (misalnya, *constructed wetlands*) menjadi langkah krusial. Pengalaman dari program rehabilitasi DAS di Malaysia (Omar et al., 2023) menunjukkan bahwa pendekatan lanskap yang melibatkan pemetaan spasial, integrasi tata guna lahan, dan restorasi biofisik mampu meningkatkan kualitas sungai serta keberadaan spesies endemik lokal. Strategi konservasi hilir juga harus memasukkan dimensi sosial dan kebijakan. Misalnya, pelibatan masyarakat melalui sistem insentif konservasi, penguatan kelembagaan lokal, serta penerapan regulasi zonasi berbasis konservasi dan produksi (Lee et al., 2024). Komponen ini akan memperkuat ketahanan jangka panjang habitat ikan dan memastikan keberlanjutan sistem sosial-ekologis di sekitarnya.

Strategi Konektivitas Segmen Sungai

Segmen sungai adalah pembagian aliran sungai menjadi bagian hulu, tengah, dan hilir berdasarkan perbedaan spasial dan ekologis. Setiap segmen memiliki peran khusus dalam siklus hidup *M. arfakensis*—hulu untuk pemijahan, tengah untuk pertumbuhan, dan hilir untuk pemencaran. Konektivitas antar segmen ini penting agar proses ekologis tidak terputus. Gangguan pada salah satu segmen dapat merusak keseimbangan ekosistem secara keseluruhan, sehingga strategi konservasi harus mempertimbangkan keterhubungan seluruh segmen sungai.

Konservasi insitu Arfak *M. arfakensis* yang endemik Papua membutuhkan pendekatan yang menyeluruh dan berbasis ekosistem sungai utuh, mulai dari segmen hulu, tengah, hingga hilir. Studi ini menunjukkan bahwa meskipun ketiga zona sungai (baik Sungai Api maupun Sungai Asiti) memiliki karakteristik kualitas air yang masih sesuai dengan baku mutu Kelas II (PP No. 22 Tahun 2021), masing-masing zona menyimpan dinamika mikrohabitat yang unik dan saling berhubungan secara ekologis. Oleh karena itu, konektivitas antar zona sungai menjadi elemen kunci dalam memastikan keberlangsungan siklus hidup *M. arfakensis* di habitat alaminya.

Konektivitas ekologis antar zona sungai bukan hanya penting untuk kelangsungan hidup harian *M. arfakensis*, tetapi juga untuk memastikan fungsi ekosistem sungai secara keseluruhan tetap utuh dan berkelanjutan. Gangguan terhadap konektivitas, baik secara fisik (fragmentasi habitat), kimia (pencemaran), maupun sosial (fragmentasi pengelolaan), akan berdampak sistemik terhadap seluruh populasi ikan pelangi Arfak dan ekosistem perairan pegunungan Papua secara umum. Oleh karena itu, strategi konservasi insitu berbasis konektivitas harus menjadi prinsip utama dalam setiap kebijakan, restorasi, dan pengelolaan DAS yang menyangkut sungai-sungai endemik di Pulau Papua.

Dalam konteks Sungai Api, segmen hulu yang relatif sejuk dan dalam berfungsi sebagai tempat pemijahan. Segmen tengah yang memiliki kedalaman dan kecepatan arus moderat menjadi area pertumbuhan juvenil,

sementara zona hilir yang lebih luas dan terbuka berfungsi sebagai wilayah pemencaran dan ekspansi. Studi serupa oleh Hermoso et al. (2018) menunjukkan bahwa ikan dari genus *Melanotaenia* menunjukkan ketergantungan tinggi terhadap jalur air yang terkoneksi secara bebas untuk menyelesaikan siklus hidupnya. Dengan demikian, memastikan konektivitas hidrologis tanpa gangguan fisik maupun kimia dari hulu ke hilir adalah prasyarat mutlak bagi efektivitas konservasi insitu.

Selain jalur air, konektivitas habitat mencakup integrasi penutup lahan riparian, struktur substrat dasar sungai, dan zona bayangan vegetatif yang menghubungkan wilayah sungai sebagai satu kesatuan ekosistem. Vegetasi riparian yang utuh di sepanjang hulu hingga hilir mendukung kestabilan suhu, menyediakan perlindungan dari predator, serta menambah sumber pakan berupa serangga dan detritus. Jika konektivitas vegetasi terganggu, misalnya hanya tersisa di zona hulu, maka fungsi ekologis sungai secara keseluruhan akan terputus (Gregory et al., 1991). Strategi konservasi insitu berbasis konektivitas harus mempertahankan kelangsungan habitat sepanjang sungai, bukan hanya *patch* habitat baik yang tersebar. Pendekatan ini dikenal sebagai *Whole-River Conservation*, dan telah diterapkan pada spesies endemik sungai di Amazon dan Australia dengan hasil signifikan dalam mengurangi laju kepunahan lokal (Castello dan Macedo, 2016).

Konservasi Spasial Berbasis DAS Dan Integrasi Hulu-Tengah-Hilir

Penting untuk menekankan bahwa konservasi insitu tidak dapat dilakukan hanya pada satu zona sungai, melainkan harus dalam kerangka pengelolaan daerah aliran sungai (DAS) secara terintegrasi. Dalam kasus *M. arfakensis*, keberadaan habitat yang baik di hulu akan sia-sia jika zona tengah mengalami sedimentasi berat atau pencemaran di hilir meracuni dengan aliran balik. Model pengelolaan DAS berbasis ekosistem yang dikembangkan oleh Grizzetti et al. (2016) menekankan pentingnya pendekatan lintas sektor dan lintas wilayah untuk melindungi spesies endemik di perairan tropis. Dengan mengadopsi prinsip ini, pengelolaan Sungai

Api dan Sungai Asiti harus melibatkan para pemangku kepentingan dari komunitas adat, pemerintah daerah, sektor kehutanan, pertanian, serta lembaga konservasi.

Isolasi habitat akibat degradasi zona sungai tertentu dapat mengakibatkan fragmentasi populasi dan menurunkan keanekaragaman genetik. Dalam jangka panjang, hal ini akan mengurangi kemampuan adaptasi spesies terhadap tekanan lingkungan seperti perubahan iklim, penyakit, atau invasi spesies asing (Olden et al., 2012). Studi genetik terhadap *Melanotaenia* di Papua (Kadarusman et al., 2010) menunjukkan bahwa populasi yang terkoneksi secara spasial cenderung memiliki heterozigositas lebih tinggi dan mortalitas juvenil lebih rendah. Untuk mencegah fragmentasi genetik, konservasi insitu perlu memastikan adanya koridor air yang fungsional sepanjang tahun. Hal ini termasuk mempertahankan debit minimal aliran air, menghindari penyedotan air berlebihan untuk irigasi, serta menerapkan sistem pemantauan longitudinal terhadap populasi ikan.

Hilir merupakan zona paling rentan karena merupakan tempat akumulasi dampak dari seluruh aktivitas di bagian atas DAS. Sungai Api menunjukkan gejala peningkatan suhu (hingga 29,1°C), penurunan DO, serta morfometri yang semakin dangkal dan melebar menjadi indikator kuat tekanan antropogenik seperti konversi lahan, erosi, dan pengendapan sedimentasi.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyoroti pentingnya pemahaman spasial terhadap karakteristik mikrohabitat dalam mendukung konservasi insitu spesies ikan endemik air tawar, khususnya *M. arfakensis*. Heterogenitas lingkungan di sepanjang segmen sungai bukan hanya mencerminkan dinamika ekologis alami, tetapi juga menegaskan perlunya pendekatan konservasi berbasis lanskap yang terintegrasi, di mana konektivitas antara hulu, tengah, dan hilir dijaga secara fungsional dan ekologis.

Pendekatan berbasis mikrohabitat memberikan peluang baru dalam menilai kerentanan ekologis spesies endemik secara lebih presisi, sekaligus membuka ruang untuk perencanaan konservasi yang adaptif dan berbasis data. Riset ini menambah pemahaman

ilmiah terhadap bagaimana spesies lokal berinteraksi dengan lingkungan spesifiknya, yang selama ini kurang dieksplorasi di kawasan Wallacea dan Papua.

DAFTAR PUSTAKA

- Abell, R., Thieme, M.L., Revenga, C., Bryer, M., Kottelat, M., Bogutskaya, N., Coad, B., Mandrak, N., Balderas, S.C., Bussing, W., Stiassny, M.L.J., Skelton, P., Allen, G.R., Unmack, P., Naseka, A., Ng, R., Sindorf, N., Robertson, J., Armijo, E., Higgins, J. V., Heibel, T.J., Wikramanayake, E., Olson, D., López, H.L., Reis, R.E., Lundberg, J.G., Sabaj Pérez, M.H., Petry, P., 2008. Freshwater ecoregions of the world: A new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation. *Bioscience*. <https://doi.org/10.1641/B580507>
- Allan, J.D., Castillo, M.M., 2007. Stream ecology: Structure and function of running waters: Second edition, Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters: Second Edition. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5583-6>
- Allen, G.R., 1991. Field guide to the freshwater fishes of New Guinea.
- Allen, G.R., Hadiaty, R.K., 2013. *Melanotaenia sneideri*, a new species of rainbowfish (Melanotaeniidae), from West Papua Province, Indonesia. *aqua: International Journal of Ichthyology* 19, 137–147.
- Allen, G.R., Hortle, K.G., Renyaan, S.J., 2000. Freshwater fishes of the Timika region, New Guinea. Freeport Indonesia.
- Arthington, A.H., Naiman, R.J., McClain, M.E., Nilsson, C., 2010. Preserving the biodiversity and ecological services of rivers: New challenges and research opportunities. *Freshw Biol* 55. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02340.x>

- Bowler, D.E., Mant, R., Orr, H., Hannah, D.M., Pullin, A.S., 2012. What are the effects of wooded riparian zones on stream temperature? *Environ Evid* 1, 1–9.
- Boyd, C.E., 1998. Water Quality for Pond Aquaculture. International Center Experimental Station.
- Campos, D.F. de, Val, A.L., Almeida-Val, V.M.F., 2018. The influence of lifestyle and swimming behavior on metabolic rate and thermal tolerance of twelve Amazon forest stream fish species. *J Therm Biol* 72, 148–154.
- Campos, D.F., Amanajás, R.D., Almeida-Val, V.M.F., Val, A.L., 2021. Climate vulnerability of South American freshwater fish: Thermal tolerance and acclimation. *J Exp Zool A Ecol Integr Physiol*. <https://doi.org/10.1002/jez.2452>
- Castello, L., Macedo, M.N., 2016. Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. *Glob Chang Biol* 22. <https://doi.org/10.1111/gcb.13173>
- Clark, T.D., Sandblom, E., Jutfelt, F., 2013. Aerobic scope measurements of fishes in an era of climate change: Respirometry, relevance and recommendations. *Journal of Experimental Biology*. <https://doi.org/10.1242/jeb.084251>
- Davies, S.P., Jackson, S.K., 2006. The biological condition gradient: A descriptive model for interpreting change in aquatic ecosystems. *Ecological Applications*. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[1251:TBCGAD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[1251:TBCGAD]2.0.CO;2)
- Dudgeon, D., Arthington, A.H., Gessner, M.O., Kawabata, Z.I., Knowler, D.J., Lévêque, C., Naiman, R.J., Prieur-Richard, A.H., Soto, D., Stiassny, M.L.J., Sullivan, C.A., 2006. Freshwater biodiversity: Importance, threats, status and conservation challenges. *Biol Rev Camb Philos Soc*. <https://doi.org/10.1017/S1464793105006950>
- Flecker, A.S., Matthews, W.J., 1999. Patterns in Freshwater Fish Ecology. *Copeia* 1999. <https://doi.org/10.2307/1447409>
- Fuller, M.R., Leinenbach, P., Detenbeck, N.E., Labiosa, R., Isaak, D.J., 2022. Riparian vegetation shade restoration and loss effects on recent and future stream temperatures. *Restor Ecol* 30, e13626.
- Gido, K.B., Whitney, J.E., Perkin, J.S., Turner, T.F., 2016. 10. Fragmentation, connectivity and fish species persistence in freshwater ecosystems 2. *ecosystems* 2, 3.
- Gregory, S. V., Swanson, F.J., McKee, W.A., Cummins, K.W., 1991. An Ecosystem Perspective of Riparian Zones. *Bioscience* 41. <https://doi.org/10.2307/1311607>
- Grizzetti, B., Lanzanova, D., Liqueste, C., Reynaud, A., Cardoso, A.C., 2016. Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environ Sci Policy* 61, 194–203.
- Hermoso, V., Filipe, A.F., Segurado, P., Beja, P., 2018. Freshwater conservation in a fragmented world: Dealing with barriers in a systematic planning framework. *Aquat Conserv* 28. <https://doi.org/10.1002/aqc.2826>
- Jain, N., Yevatkar, R., Raxamwar, T.S., 2022. Comparative study of physico-chemical parameters and water quality index of river. *Mater Today Proc* 60. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.508>
- Kadariusman, Hadiaty, R.K., Segura, G., Setiawibawa, G., Caruso, D., Pouyaud, L., 2012a. Four new species of rainbowfishes (melanotaeniidae) from arguni bay, West Papua, Indonesia. *Cybium* 36, 369–382.
- Kadariusman, Hubert, N., Hadiaty, R.K., Sudarto, Paradis, E., Pouyaud, L., 2012b.

- Cryptic diversity in indo-australian rainbowfishes revealed by DNA barcoding: Implications for conservation in a biodiversity hotspot candidate. *PLoS One* 7. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040627>
- Kadariusman, Sudarto, Paradis, E., Pouyaud, L., 2010. Description of *Melanotaeniafasinensis*, a new species of rainbowfish (Melanotaeniidae) from west Papua, Indonesia with comments on the rediscovery of *M. ajamaruensis* and the endangered status of *M. parva*. *Cybium* 34.
- KLHK (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan), 2021. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Jakarta: KLHK.
- Kottelat, M., Whitten, A.J., 1996. Freshwater Fishes of Western Indonesia and Sulawesi: Additions and Corrections, Freshwater Fishes of Western Indonesia and Sulawesi.
- Lee, S.H., Goëau, H., Joly, A., Ong, S., Loh, Y.P., Affouard, A., Lombardo, J.-C., Claude, J., Bonnet, P., 2024. Citizen scientists contribution to monitor Asian biodiversity: A case study on flora of Peninsula Malaysia. *On the Edge of the Sixth Mass Extinction* 139.
- Lefaan, P.T., Peday, H.F.Z., Leatemia, S.P.O., Sembel, L., Manangkalangi, E., n.d. Struktur vegetasi riparia dan implikasinya terhadap kondisi habitat ikan pelangi arfak, *Melanotaenia arfakensis* di Sungai Nimbai, Manokwari Papua Barat.
- Malik, D., 2016. Seasonal Studies of Physico-Chemical Parameters and Water Quality Assesment of River Dhamola Using Water Quality Index. *Journal of Advance Research in Applied Science* (ISSN: 2208-2352) 3. <https://doi.org/10.53555/nnas.v3i1.670>
- Manangkalangi, E., Leatemia, S.P.O., Lefaan, P.T., Peday, H.F.Z., Sembel, L., 2014. Kondisi habitat ikan pelangi arfak, *Melanotaenia arfakensis* Allen, 1990 di Sungai Nimbai, Prafi Manokwari [Habitat condition of arfak rainbowfish, *Melanotaenia arfakensis* Allen, 1990 at Nimbai Streams, Prafi Manokwari]. *J Iktiologi Indones* 14, 21–36.
- Nugraha, M.F.I., Kadariusman, Hubert, N., Avarre, J.C., Hadiaty, R.K., Slembrouck, J., Carman, O., Sudarto, Ogistira, R., Pouyaud, L., 2015a. Eight new species of Rainbowfishes (Melanotaeniidae) from the Birds Head Region, West Papua, Indonesia. *Cybium* 39, 99–130.
- Nugraha, M.F.I., Kadariusman, Hubert, N., Avarre, J.C., Hadiaty, R.K., Slembrouck, J., Carman, O., Sudarto, Ogistira, R., Pouyaud, L., 2015b. Eight new species of Rainbowfishes (Melanotaeniidae) from the Birds Head Region, West Papua, Indonesia. *Cybium* 39.
- Null, S.E., Mouzon, N.R., Elmore, L.R., 2017. Dissolved oxygen, stream temperature, and fish habitat response to environmental water purchases. *J Environ Manage* 197, 559–570.
- Olden, J.D., Kennard, M.J., Pusey, B.J., 2012. A framework for hydrologic classification with a review of methodologies and applications in ecohydrology. *Ecohydrology*. <https://doi.org/10.1002/eco.251>
- Omar, S., Wong, C.L., Shaari, J., 2023. Integrated River Basin Management (IRBM) in Malaysia. *Journal of Water Resources Management* 1.
- Poff, N.L., Zimmerman, J.K.H., 2010. Ecological responses to altered flow regimes: A literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshw Biol.*

- <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02272.x>
- Pretty, J., Smith, D., 2004. Social capital in biodiversity conservation and management. *Conservation Biology*. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00126.x>
- Pusey, B.J., Arthington, A.H., 2003. Importance of the riparian zone to the conservation and management of freshwater fish: A review. *Mar Freshw Res*. <https://doi.org/10.1071/MF02041>
- Sandoval-Castillo, J., Gates, K., Brauer, C.J., Smith, S., Bernatchez, L., Beheregaray, L.B., 2019. Adaptation of plasticity to predicted climates in Australian rainbowfishes (*Melanotaenia*) across climatically defined bioregions. *BioRxiv* 859769.
- Sollid, J., Nilsson, G.E., 2006. Plasticity of respiratory structures - Adaptive remodeling of fish gills induced by ambient oxygen and temperature. *Respir Physiol Neurobiol* 154. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2006.02.006>
- Stoffers, T., Buijse, A.D., Geerling, G.W., Jans, L.H., Schoor, M.M., Poos, J.J., Verreth, J.A.J., Nagelkerke, L.A.J., 2022. Freshwater fish biodiversity restoration in floodplain rivers requires connectivity and habitat heterogeneity at multiple spatial scales. *Science of the Total Environment* 838, 156509.
- Tongnunui, S., Beamish, F.W.H., 2017. Critical thermal maximum, temperature acclimation and climate effects on thai freshwater fishes. *EnvironmentAsia* 10. <https://doi.org/10.14456/ea.2017.13>
- Unmack, P.J., Allen, G.R., Johnson, J.B., 2013. Phylogeny and biogeography of rainbowfishes (*Melanotaeniidae*) from Australia and New Guinea. *Mol Phylogenet Evol* 67. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2012.12.019>
- Winemiller, K.O., Jepsen, D.B., 1998. Effects of seasonality and fish movement on tropical river food webs. *J Fish Biol* 53. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1998.tb01032.x>
- Xiong, F., Infante, D.M., Olden, J.D., Gao, W., Wang, L., Chen, Y., 2023. River-lake connectivity, wetland, and human stress factors shape fish diversity (alpha and beta) patterns in the middle and lower Yangtze River, China. *Landsc Ecol* 38, 3809–3824.