



Dinamika Hidrologi Sistem Sungai Tawang-Kapuas dan Implikasinya terhadap Kebijakan Konservasi Lanskap Danau Sentarum

Indra Kumara^{1*}

IPB University,
Indonesia

Rinekso Soekmadi²

IPB University,
Indonesia

Lilik B. Prasetyo³

IPB University,
Indonesia

Arzyana Sunkar⁴

IPB University,
Indonesia

Dwi Kusharyono⁵

Dinas Lingkungan Hidup dan
Kehutanan Provinsi
Kalimantan Barat,
Indonesia

***Corresponding author:**

Indra Kumara, IPB University, Indonesia.

✉ kumara.indra@gmail.com

Article Info:

Article history:

Received: March 18, 2026

Revised: June 18, 2026

Accepted: July 02, 2026

Keywords:

Flow Connectivity; Tropical
Wetlands; Water Resource
Management; Precipitation Response;
Seasonal Variability.

Kata Kunci:

Konektivitas Aliran; Lahan Basah
Tropis; Pengelolaan Sumber Daya
Air; Respon Presipitasi; Variabilitas
Musiman.

Abstract

Background: The landscape of the Lake Sentarum watershed plays a strategic role in maintaining hydrological stability in West Kalimantan through its function in regulating the flow of water into the Kapuas River.

Objective: This study aims to analyze the temporal variations in the discharge of the Tawang River the main waterway connecting the Lake Sentarum system to the Kapuas River throughout 2024.

Methods: Instantaneous discharge measurements are taken weekly at two fixed monitoring points using the velocity-area method. Surface flow velocity and depth profiles are measured at ten subsections along each transect; the surface velocity is then converted to an average velocity using a correction factor of 0.85.

Results: The results of the study show that the weekly instantaneous discharge of the Tawang River fluctuates between 163.9 and 793.6 m³/s, with an average of 483.9 m³/s, while the discharge of the Kapuas River ranges from 711.0 to 2,536.4 m³/s with an average of 1,311.1 m³/s. Although the Tawang River's average weekly contribution to the Kapuas River's discharge at 36.3% remains consistent with Klepper's (1994) estimate of 30–50%, this study reveals more dynamic temporal variability, with the contribution fluctuating between 12.7% and 64.1%. In addition, a phenomenon of reverse flow was observed, namely flow from the Kapuas River toward the Tawang River, with inflow rates ranging from 45.7 to 438.0 m³/s.

Conclusions: The more dynamic variation in the Tawang River's contribution to the Kapuas River, compared to previous reports, indicates potential changes in hydrological dynamics across the Lake Sentarum landscape. These findings serve as an important basis for evaluating environmental carrying capacity and developing adaptive conservation strategies to maintain long-term hydrological stability.

Abstrak

Latar belakang: Lanskap Daerah Tangkapan Air Danau Sentarum memiliki peran strategis dalam menjaga stabilitas hidrologi di Kalimantan Barat melalui fungsinya dalam mengatur aliran air yang masuk ke Sungai Kapuas.

Tujuan: Penelitian ini bertujuan menganalisis variasi temporal debit Sungai Tawang sebagai saluran utama yang menghubungkan sistem danau Danau Sentarum dengan Sungai Kapuas sepanjang tahun 2024.

Metode: Pengukuran debit sesaat dilakukan setiap minggu pada dua titik pemantauan tetap menggunakan metode *velocity-area*. Kecepatan aliran permukaan dan profil kedalaman diukur pada sepuluh subseksi setiap transek, kemudian kecepatan permukaan dikonversi menjadi kecepatan

rata-rata menggunakan faktor koreksi 0,85.

Hasil: Hasil penelitian menunjukkan bahwa debit sesaat mingguan Sungai Tawang berfluktuasi antara 163,9 hingga 793,6 m³/detik dengan rata-rata 483,9 m³/detik, sedangkan debit sesaat Sungai Kapuas berkisar antara 711,0 hingga 2.536,4 m³/detik dengan rata-rata 1.311,1 m³/detik. Meskipun kontribusi rata-rata debit mingguan Sungai Tawang terhadap debit Sungai Kapuas sebesar 36,3% masih sejalan dengan estimasi Klepper (1994) yang berkisar antara 30–50%, penelitian ini mengungkap variabilitas temporal yang lebih dinamis, dengan kontribusi yang berfluktuasi antara 12,7–64,1%. Selain itu, ditemukan fenomena aliran dua arah (*reverse flow*), yaitu aliran dari Sungai Kapuas menuju Sungai Tawang, dengan debit masuk berkisar antara 45,7 hingga 438,0 m³/detik.

Kesimpulan: Variasi kontribusi debit Sungai Tawang terhadap Sungai Kapuas yang lebih dinamis dibandingkan laporan sebelumnya mengindikasikan potensi perubahan dinamika hidrologi di lanskap Danau Sentarum. Temuan ini menjadi dasar penting bagi evaluasi daya dukung lingkungan dan penyusunan strategi konservasi adaptif untuk menjaga stabilitas hidrologi jangka panjang.

To cite this article: Kumara, I., Soekmadi, R., Prasetyo, L. B., Sunkar, A., & Kusharyono, D. (2026). Dinamika Hidrologi Sistem Sungai Tawang-Kapuas dan Implikasinya terhadap Kebijakan Konservasi Lanskap Danau Sentarum. *Equivalent: Jurnal Ilmiah Sosial Teknik*, 8(3), 909-926. <https://doi.org/10.59261/jequi.v8i3.299>

PENDAHULUAN

Lanskap Daerah tangkapan air (DTA) Danau Sentarum di Kabupaten Kapuas Hulu, Provinsi Kalimantan Barat, selain berfungsi secara ekologis sebagai habitat bagi berbagai spesies yang dilindungi (Aditama *et al.*, 2024; Yuliani *et al.*, 2023; Yuniarti *et al.*, 2018), juga memainkan peran penting dalam pengaturan air untuk daerah hilir melalui Sungai Kapuas (Kartini & Soeryamasoeka, 2008). Bagian tengah wilayah ini merupakan cekungan danau yang sebagian besar berupa dataran rendah dan dikelilingi hutan rawa gambut, yang berfungsi sebagai reservoir alami, menangkap curah hujan musiman, menyimpan air selama periode melimpah, dan secara bertahap melepaskannya saat curah hujan menurun. Sungai Tawang sebagai saluran utama untuk air dari Danau Sentarum, diketahui menyumbang 30-50% dari total aliran Sungai Kapuas (Klepper, 1994). Oleh karena itu, mempelajari aspek hidrologi daerah ini tidak hanya penting untuk memahami perilaku aliran air tetapi juga memberikan dasar untuk merancang strategi pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan.

Pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan sangat bergantung pada ketersediaan data hidrologi yang akurat, terus menerus, dan representatif secara temporal. Tanpa dukungan data yang memadai, pengelolaan adaptif di tingkat lokal akan menghadapi berbagai hambatan dalam perencanaan dan pelaksanaan. Stewart (2015) menekankan bahwa di tengah meningkatnya tekanan perubahan iklim, kebutuhan akan data hidrologi yang dapat diandalkan semakin mendesak untuk memastikan efektivitas upaya pengelolaan sumber daya air. Studi juga menunjukkan pentingnya penggunaan teknologi, bahkan penggunaan AI, untuk model hidrologi guna meningkatkan efisiensi sumber daya air, meningkatkan keberlanjutan, dan mendukung kapasitas adaptif dalam menghadapi perubahan iklim (Matta *et al.*, 2026). Selain itu, studi juga membuktikan bahwa analisis berbasis data yang memadai diperlukan untuk memahami dinamika air dan mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti (Chen & Tu, 2022; Tiwari *et al.*, 2023). Oleh karena itu, pengumpulan data hidrologi yang akurat di wilayah strategis ini sangat penting untuk mendukung pengelolaan air yang responsif terhadap perubahan lingkungan.

Meski perannya dalam hidrologi sangat penting, studi ilmiah tentang dinamika air di lanskap Danau Sentarum masih sangat terbatas. Penelitian sebelumnya oleh Klepper (1994) menggunakan pendekatan pemodelan untuk memperkirakan kontribusi Sungai Tawang terhadap aliran Sungai Kapuas. Lebih dari tiga dekade kemudian, meskipun pengukuran debit secara parsial pernah dilakukan oleh instansi terkait, yakni dari Balai Wilayah Sungai Kalimantan I, Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) Kapuas dan Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Kapuas Hulu, namun belum ada penelitian yang melakukan pemantauan debit secara kontinu. Kurangnya data empiris ini meninggalkan celah yang signifikan dalam pengetahuan mengenai pola aliran aktual, variasi musiman, dan respons hidrologi daerah terhadap perubahan iklim dan dinamika penggunaan lahan.

Berbeda dengan studi sebelumnya yang mengandalkan pemodelan, studi ini dilakukan dengan mengambil data kedalaman dan kecepatan arus aliran permukaan sungai untuk pendugaan debit sesaat di Sungai Tawang secara kontinu dengan frekuensi mingguan sepanjang satu tahun penuh. Studi ini menghasilkan basis data empiris yang belum tersedia sebelumnya untuk memahami variabilitas temporal debit, pola kontribusi Sungai Tawang terhadap Sungai Kapuas, serta relevansinya bagi kebijakan konservasi lanskap Danau Sentarum. Pendekatan ini penting mengingat studi hidrologi terkini pada lahan basah tropis dan dinamika *flood pulse* menunjukkan bahwa variabilitas temporal debit merupakan indikator kunci perubahan kapasitas ekohidrologis sistem danau-sungai (Junk *et al.*, 1989; Milien *et al.*, 2023).

Studi ini bertujuan untuk memahami dinamika aliran air keluar dari Danau Sentarum. Pemahaman mengenai pola aliran di Sungai Tawang ini penting dalam mendukung perencanaan pengelolaan sumber daya lahan dan air secara adaptif untuk mengatasi perubahan lingkungan. Secara khusus, studi ini bertujuan untuk menganalisis variasi temporal debit sesaat Sungai Tawang selama satu tahun penuh, menilai kontribusinya terhadap debit Sungai Kapuas, serta memberikan dasar untuk keputusan pengelolaan sumber daya lahan dan air yang lebih efektif. Secara teoritis, hasil studi ini memperluas pemahaman tentang dinamika aliran dalam sistem danau-sungai tropis dataran rendah, serta menyediakan data empiris untuk mendukung model hidrologi dan pengembangan strategi pengelolaan lanskap Danau Sentarum yang adaptif terhadap perubahan iklim.

METODE

Minimnya ketersediaan data debit kontinu di wilayah ini, dan keterbatasan stasiun pengamat arus sungai atau pengukuran lapangan otomatis lainnya, penelitian ini dilakukan, menggunakan alat kedalaman *depth sounder* dan kecepatan arus aliran permukaan *current meter* untuk pendugaan debit metode *velocity-area* baik di sungai Tawang maupun di Sungai Kapuas secara temporal.

Wilayah studi

Wilayah studi penelitian ini berlokasi di DTA Danau Sentarum, Kabupaten Kapuas Hulu, Kalimantan Barat. Secara administratif, titik pengamatan berada di Desa Madang Permai, Kecamatan Suhaid. Titik pengukuran kecepatan aliran dan kedalaman sungai ditetapkan pada dua lokasi strategis untuk menganalisis kontribusi aliran Sungai Tawang terhadap Sungai Kapuas. Titik pengamatan pertama ditempatkan di jalur muara Sungai Tawang sebelum titik pertemuan muara dengan aliran utama Sungai Kapuas pada koordinat 0°39'6,28" N dan 111°59'42,53" E. Sementara itu, titik pengamatan kedua ditempatkan di badan Sungai Kapuas pada koordinat 0°36'59,16" N dan 111°58'15,56" E, yang terletak di bagian hilir setelah pertemuan dengan muara Sungai Tawang. Dengan demikian, titik pengamatan kedua ini merekam total akumulasi debit aliran yang merupakan gabungan dari kontribusi Sungai Tawang dan aliran utama Sungai Kapuas yang datang dari arah hulu.

Survei Lapangan dan Pengukuran

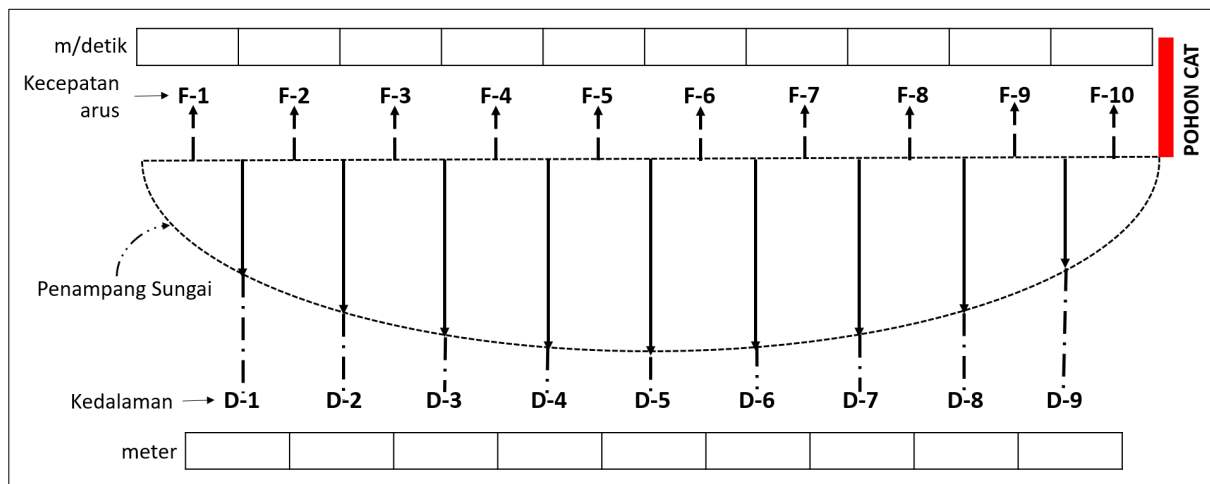
Survei lapangan dilakukan untuk menangkap variabilitas temporal aliran sungai dalam satu siklus hidrologi tahunan. Pengukuran kecepatan arus aliran permukaan dan kedalaman sungai untuk pendugaan debit sesaat dilakukan secara mingguan, guna mengetahui perubahan musiman, periode debit puncak, serta kondisi aliran rendah dengan baik selama satu tahun.

Persiapan Lokasi

Lokasi titik pengukuran ditentukan berdasarkan tiga kriteria utama: (1) alur sungai yang relatif lurus untuk meminimalkan turbulensi aliran, (2) kemudahan aksesibilitas untuk mendukung pemantauan mingguan, serta (3) dimensi lebar yang memadai demi keamanan serta konsistensi operasional di lapangan. Setelah lokasi ditetapkan dan koordinat dicatat, setiap penampang pengamatan dipersiapkan secara cermat untuk menjamin akurasi data. Sebuah titik referensi permanen ditetapkan di tepi sungai guna memastikan seluruh rangkaian pengukuran dilakukan pada lokasi penampang yang sama. Lebar sungai diukur menggunakan teleskop

pengukur jarak, yang kemudian dibagi menjadi sepuluh segmen dengan lebar proporsional (S1–S10).

Pembagian penampang melintang menjadi sepuluh segmen ini didasarkan pada pertimbangan operasional lapangan di jalur pelayaran masyarakat setempat untuk menjaga efisiensi waktu pemantauan mingguan. Selain itu, berdasarkan informasi awal dari masyarakat nelayan setempat dan orientasi lapangan, morfologi penampang kedua sungai memiliki tipologi saluran yang relatif stabil, landai, berbentuk cawan seragam. Merujuk pada Rantz *et al.* (1982), reduksi jumlah segmen di bawah standar diperbolehkan apabila penampang melintang saluran cenderung homogen dan memiliki distribusi aliran yang teratur. Pendekatan segmentasi ini bertujuan untuk merekam variabilitas spasial kedalaman dan kecepatan aliran secara detail di seluruh penampang sungai (Gambar 1).



Gambar 1. Segmentasi penampang sungai untuk pengukuran kedalaman dan kecepatan aliran permukaan

Pengukuran Kedalaman dan Kecepatan

Pengukuran dilakukan setiap minggu selama periode tahun 2024 untuk memantau variasi debit musimannya. Selain *depth sounder* dan *current meter*, peralatan lapangan lain yang digunakan adalah tali tambang, teropong jarak, meteran lapangan, cat, tali/pita penanda, peralatan tulis menulis, *speedboat*. Di Sungai Tawang, pengamatan berlangsung dari bulan Januari hingga bulan Desember, sedangkan di Sungai Kapuas, pengukuran baru dimulai pada minggu ketiga bulan Februari karena kendala operasional lapangan. Pada saat pengukuran, sebuah tali tambang dibentangkan di sepanjang penampang sungai sebagai garis acuan pengambilan sampel. Titik-titik pengamatan pada tali tersebut ditandai dengan tali/pita warna berbeda untuk membedakan parameter pengukuran: misalnya warna merah untuk titik kecepatan aliran (F1–F10) dan warna kuning untuk titik kedalaman sungai (D1–D9), sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1. Prosedur pengambilan data di lapangan dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- Penandaan lokasi: Memberikan tanda permanen menggunakan cat pada tiang atau pohon di tepi sungai sebagai titik acuan tetap.
- Penetapan penampang: Merentangkan tali secara melintang di atas sungai untuk menetapkan garis potong (*cross-section*) pengukuran.
- Pembagian segmen: Menandai titik-titik pengukuran pada tali di setiap interval segmen yang telah ditentukan.
- Pemantauan tinggi muka air (TMA): Menandai TMA pada tiang referensi untuk menghitung fluktuasi elevasi air dibandingkan dengan pengukuran sebelumnya.
- Pengukuran kedalaman: Mengukur kedalaman air di setiap titik D menggunakan *depth sounder* dengan pengecekan melalui perhitungan selisih perubahan tinggi muka air pada tiang atau pohon acuan.
- Pengukuran kecepatan aliran sungai: Mengukur kecepatan arus aliran sungai di setiap titik F

pada kedalaman 1,0 meter dari permukaan air menggunakan *current meter*. Penempatan alat secara konstan pada kedalaman 1,0 meter dipilih mengikuti prosedur *Subsurface-Velocity Method* (Rantz *et al.*, 1982) guna menghindari turbulensi angin permukaan. Langkah ini sekaligus menjadi mitigasi teknis terhadap keterbatasan dimensi fisik stang/kabel *current meter* portabel pada badan air sungai. Untuk memperoleh nilai kecepatan rata-rata vertikal, nilai kecepatan *subsurface* tersebut dikonversikan menggunakan koefisien koreksi mengikuti standar universal sebesar 0,85 (Rantz *et al.*, 1982; World Meteorological Organization [WMO], 2020).

- g) Verifikasi konsistensi: Melakukan pengukuran ulang lebar sungai sebelum pengambilan data; jika terdapat perubahan lebar yang signifikan, pembagian segmen akan diatur ulang untuk menjaga ketepatan pengukuran.

Pendugaan Debit

Pendugaan debit sungai (Q) dihitung menggunakan metode *velocity-area*, yang merupakan salah satu metode standar untuk pengukuran debit di saluran terbuka (WMO, 2020). Metode ini dipilih karena dipandang kesesuaiannya dengan karakteristik sungai-sungai tropis besar yang memiliki penampang tidak beraturan dan aksesibilitas terbatas, sebagaimana yang terdapat pada Sungai Tawang dan Kapuas. Metode ini menduga debit sesaat melalui kecepatan arus aliran dan luas penampang sungai dari n segmen sungai. Pendekatan ini dipandang meningkatkan akurasi pengukuran dengan menangkap variasi dalam kondisi aliran di seluruh lebar saluran. Semua data debit dikompilasi dan dianalisis untuk mengevaluasi fluktuasi temporal dan dinamika musiman sepanjang periode studi. Debit ditentukan sebagai jumlah aliran di seluruh segmen, dinyatakan sebagai:

$$Q = \sum_{i=1}^n V_i \times A_i$$

Di mana:

Q = total debit sungai (m^3/detik)

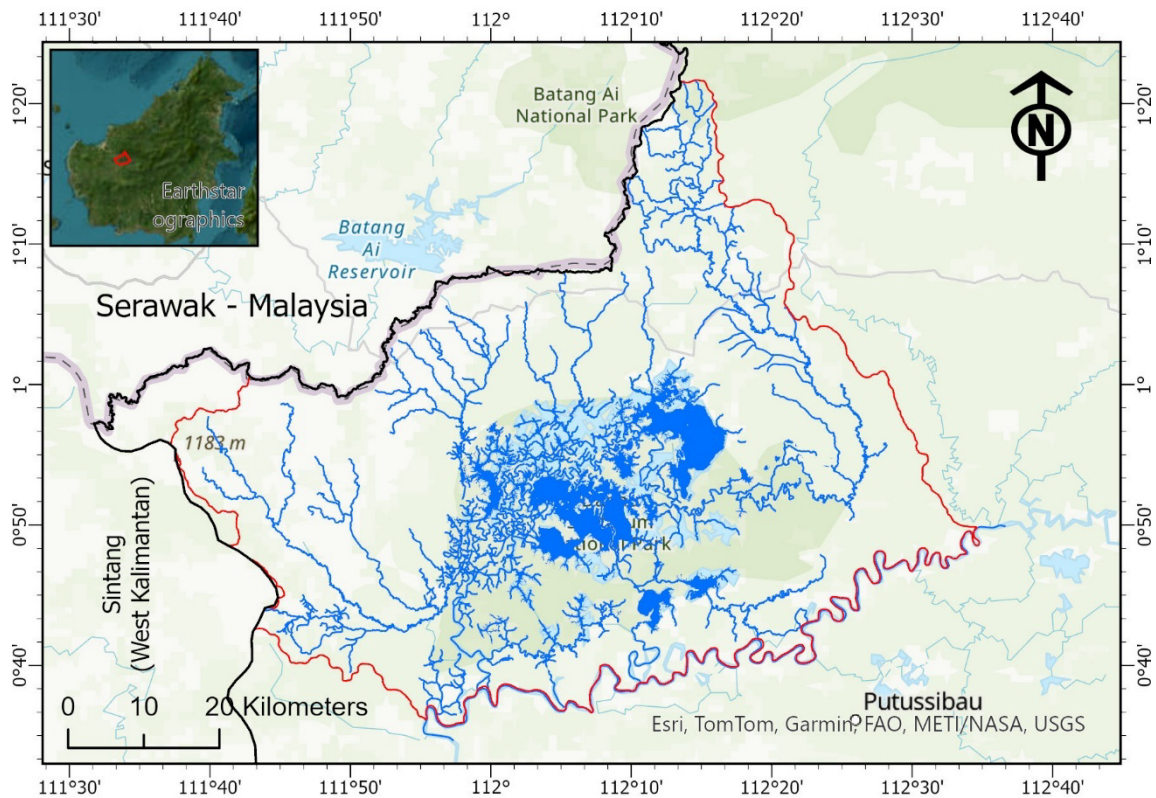
V_i = kecepatan air pada segmen i (meter/detik)

A_i = luas penampang segmen i (m^2)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi umum Daerah Tangkapan Air Danau Sentarum

DTA Danau Sentarum (luas + 451.429 hektar) di Kabupaten Kapuas Hulu merupakan salah satu sub DAS di bagian hulu DAS Kapuas Provinsi Kalimantan Barat sesuai Peraturan Daerah Provinsi Kalimantan Barat Nomor 2 Tahun 2018 tentang Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Terpadu Provinsi Kalimantan Barat (Gambar 2). Lanskap ini membentuk mosaik unik yang terdiri atas gugusan danau paparan banjir, hutan rawa air tawar, dan sistem jaringan sungai yang saling terhubung satu sama lain. Secara hidrologis, kawasan ini berfungsi sebagai reservoir alami, yang akan menyimpan air hujan dan limpasan pada musim penghujan, kemudian melepaskannya secara bertahap selama musim kemarau, menstabilkan debit tahunan Sungai Kapuas. Interaksi dinamis antara sistem danau, sungai, dan hutan rawa gambut menjadikan Danau Sentarum sebagai salah satu kompleks ekohidrologis paling penting di Kalimantan Barat. Keunikan dan kekhasan lahan basah wilayah ini secara internasional telah ditetapkan sebagai Situs RAMSAR sejak tahun 1994, dan kawasan taman nasionalnya ditetapkan menjadi zona inti dari Cagar Biosfer Kapuas Hulu yang diakui UNESCO sejak 2018.



Gambar 2. Letak Daerah Tangkapan Air Danau Sentarum

Berdasarkan fungsi kawasan hutannya, menurut Surat Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor SK. 6630/MENLHK- PKTL/KUH/PLA.2/10/2021, sebagian besar wilayah ini merupakan kawasan hutan, yakni sebesar 55.5%, yang terdiri dari Taman Nasional Danau Sentarum (TNDS), Hutan Lindung (HL), Hutan Produksi (HP) dan Hutan Produksi Terbatas (HPT). Sedangkan sisanya berupa Areal Penggunaan Lain (APL) sekitar 44.5%, sebagaimana Tabel 1. Persentase kawasan lindung (Taman Nasional dan Hutan Lindung) di DTA Danau Sentarum ini masih sejalan dengan hasil kesepakatan COP *biodiversity* ke 15 di Montreal tahun 2022, yang harus menyediakan 30 persen wilayah untuk konservasi.

Tabel 1. Fungsi Kawasan Lanskap Danau Sentarum

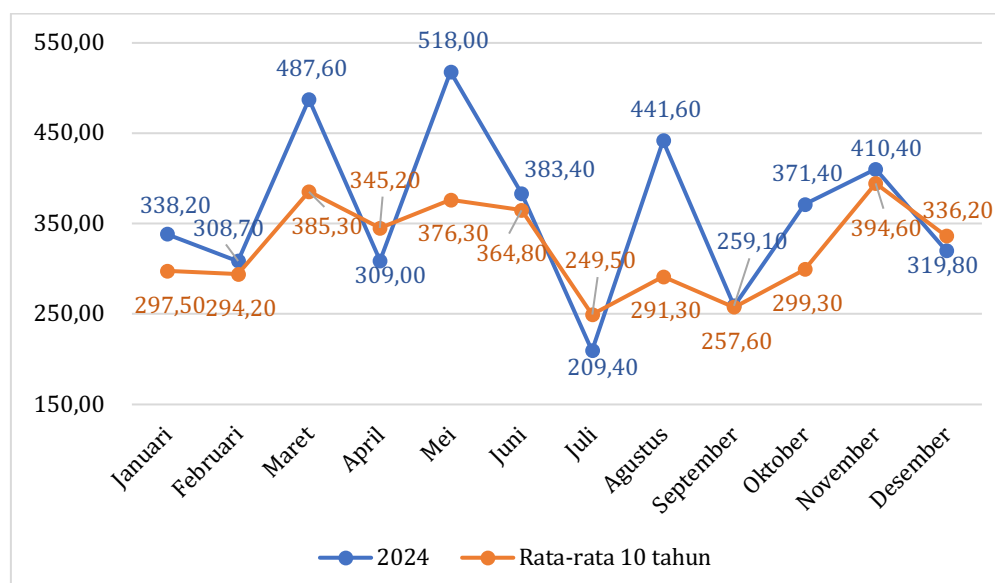
No.	Fungsi Kawasan	Luas (Ha)	Persentase
1	Taman Nasional (TN)	130.540	28,9
2	Hutan Lindung (HL)	67.561	15,0
3	Hutan Produksi Terbatas (HPT)	8.966	2,0
4	Hutan Produksi (HP)	43.394	9,6
5	Areal Penggunaan Lain (APL)	200.968	44,5
Total		451.429	100,0

Berdasarkan data Balai Pemantapan Kawasan Hutan Wilayah III Pontianak, kondisi tutupan vegetasi di DTA Danau Sentarum tahun 2024 didominasi oleh vegetasi hutan, baik hutan lahan kering primer dan sekunder serta hutan rawa sekunder, dengan total luas mencapai 43,5%. Sementara itu, tutupan lahan terendah yang memiliki persentase di bawah 1 (satu) persen, di antaranya adalah persawahan, lahan terbuka, pertanian lahan kering, permukiman, dan sektor pertambangan. Rincian mengenai distribusi tutupan hutan dan penggunaan lahan di lanskap ini secara komprehensif dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Tutupan hutan dan lahan di lanskap Danau Sentarum

No.	Tutupan Hutan dan Lahan	Luas (Ha)	Persentase
1	Hutan lahan kering primer	11.761	2,61
2	Hutan lahan kering sekunder	44.428	9,84
3	Hutan rawa sekunder	140.146	31,05
4	Semak belukar	4.916	1,09
5	Semak belukar rawa	44.251	9,80
6	Pertanian lahan kering	136	0,03
7	Pertanian lahan kering campur semak	75.023	16,62
8	Perkebunan	40.105	8,88
9	Permukiman	318	0,07
10	Pertambangan	87	0,02
11	Lahan terbuka	4.379	0,97
12	Rawa	60.658	13,44
13	Sawah	200	0,04
14	Tubuh air	25.021	5,54
	Luas DTA	451.429	100,00

Berdasarkan data curah hujan *Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS) selama sepuluh tahun terakhir (2015-2024) yang dikoreksi menggunakan faktor koreksi wilayah Kalimantan Barat mengacu pada studi koreksi bias oleh Jadmiko *et al.* (2017) curah hujan dalam 10 tahun terakhir tercatat berkisar antara 111,50 - 553,50 mm, dengan rerata setiap bulan bervariasi antara 249,50 - 394,60 mm dan rerata bulanan selama 10 tahun sebesar 324,32 mm (Gambar 3). Berdasarkan curah hujan bulanan selama periode tersebut dan klasifikasi iklim Schmidt-Fergusson, seluruh bulan di DTA Danau Sentarum adalah bulan basah (>100mm per bulan). Hal ini menunjukkan bahwa iklim di wilayah DTA Danau Sentarum termasuk dalam iklim tipe A atau wilayah ini termasuk wilayah yang sangat basah bervegetasi hutan tropis. Dalam 1 dekade, curah hujan tahunan di wilayah ini berkisar antara 3.177,6 - 4.356,6 mm, dengan rata-rata curah hujan tahunan sebesar 3.891,8 mm. Berdasarkan curah hujan rata-rata bulanan dalam satu dekade, pola curah hujan di wilayah ini menunjukkan bentuk seperti pelana kuda, yang merupakan karakteristik khas iklim ekuatorial dengan dua puncak musim hujan dalam setahun. Curah hujan di atas rata-rata terjadi di bulan Maret - Juni dan November - Desember, sedangkan curah hujan yang lebih rendah dari rata-rata terjadi pada bulan Januari - Februari dan Juli - Oktober (Gambar 3).

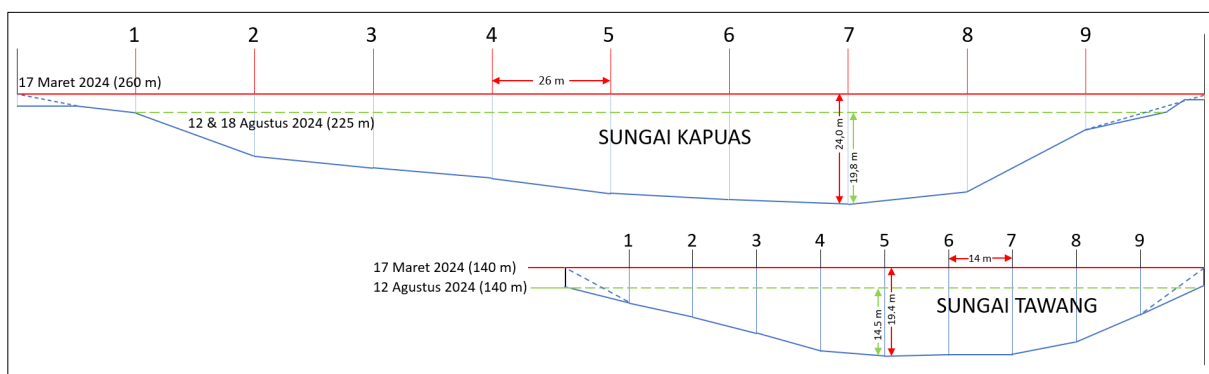


Gambar 3. Perbandingan Curah Hujan Tahun 2024 dengan Curah Hujan Satu Dekade di DTA Danau Sentarum

Grafik pada Gambar 3 juga menunjukkan bahwa curah hujan bulanan pada tahun 2024 umumnya lebih tinggi dibandingkan rata-rata historis 10 tahunnya. Kenaikan paling mencolok terjadi pada bulan Maret, Mei, Agustus, dan Oktober 2024, masing-masing sebesar 26,5%, 37,7%, 51,6%, dan 24,1%. Secara keseluruhan, rata-rata peningkatan curah hujan tahun 2024 (9 bulan) dibandingkan dengan rerata bulanan 10 tahun terakhir mencapai 18,7%. Peningkatan curah hujan yang cukup signifikan ini mengindikasikan bahwa pengelolaan lanskap Danau Sentarum dihadapkan pula pada tantangan nyata akibat dinamika perubahan iklim. Dengan demikian, apabila proporsi tutupan lahan non-hutan yang masih tersisa di wilayah ini tidak dikelola secara bijak, curah hujan yang semakin meningkat ini akan berpotensi meningkatkan limpasan permukaan, sekaligus mengurangi kapasitas retensi air yang dibutuhkan pada musim kemarau. Hal ini didukung oleh temuan Souza dan Hooke (2021) yang menunjukkan bahwa dinamika biomassa vegetasi sangat penting dalam mengontrol konektivitas hidrologi; pengurangan biomassa atau perubahan musim dapat meningkatkan potensi konektivitas dan limpasan (*runoff*). Kondisi ini mengkhawatirkan karena pada skenario cuaca ekstrem, curah hujan tinggi yang terjadi saat kapasitas retensi vegetasi rendah dapat memicu lonjakan aliran air yang tidak terkendali. Oleh karena itu, pemahaman terhadap perubahan pola curah hujan dan tata guna lahan menjadi sangat penting dalam menjaga keseimbangan antara fungsi ekologis dan pemenuhan kebutuhan sosial ekonomi masyarakat di lanskap ini.

Karakteristik Hidromorfologi Sungai Tawang dan Sungai Kapuas

Hasil pengukuran lapangan sepanjang tahun 2024 menunjukkan bahwa morfologi penampang melintang antara Sungai Tawang dan Sungai Kapuas mempunyai perbedaan yang signifikan (Gambar 4). Sungai Tawang memiliki lebar aliran sungai rata-rata 140 meter yang relatif tetap di sepanjang periode pengamatan. Sedangkan aliran Sungai Kapuas lebih lebar yakni mencapai 260 meter, dengan penurunan lebar yang signifikan selama musim kemarau menjadi 225 meter. Lebar Sungai Kapuas mulai menurun sejak pertengahan Juli dan mencapai lebar terendah pada pertengahan Agustus, kemudian kembali naik pada awal September hingga sekitar 249 meter pada pertengahan Oktober dan selanjutnya naik kembali dengan lebar mencapai 260 meter. Dengan demikian, lebar Sungai Tawang setara dengan sekitar 54 persen dari lebar Sungai Kapuas pada musim kemarau dan mencapai 62 persen dari lebar Sungai Kapuas pada musim hujan.



Gambar 4. Perbandingan penampang melintang Sungai Kapuas dan Sungai Tawang (tingkat air tertinggi - garis merah, tingkat air terendah - garis hijau putus-putus)

Gambar 4 juga menunjukkan variasi profil vertikal kedalaman hasil pengukuran pada sepuluh titik penampang yang cukup jelas antara Sungai Tawang dan Sungai Kapuas sepanjang tahun 2024. Hasil penggambaran penampang melintang menggunakan pengukuran kedalaman selaras dengan informasi awal bahwa kedua sungai mempunyai tipologi landai berbentuk cawan seragam. Selanjutnya, pada Sungai Tawang, kedalaman maksimum tercatat pada musim hujan yakni 19,4 meter pada tanggal 17 Maret, sedangkan kedalaman minimum terjadi di periode kemarau pada tanggal 12 Agustus yakni 14,5 meter, dengan selisih penurunan kedalaman sebesar 4,9 meter. Sementara itu, di periode tanggal yang sama, Sungai Kapuas memiliki kedalaman

maksimum sebesar 24,0 meter saat musim hujan dan kedalaman minimum sebesar 19,4 meter saat musim kemarau, dengan selisih vertikal sekitar 4,6 meter. Secara keseluruhan, amplitudo vertikal rata-rata kedalaman di kedua sungai mempunyai kemiripan, dan menunjukkan pola fluktuasi musiman yang searah, di mana kedalaman tertinggi terjadi pada periode hujan awal tahun (triwulan I), kemudian menurun secara bertahap hingga mencapai titik terendah pada puncak musim kemarau (triwulan II-III), dan selanjutnya meningkat kembali pada musim hujan di akhir tahun (triwulan IV). Dinamika genangan ini mirip dengan kondisi situs RAMSAR danau paparan banjir tropis Pantanal di Brazil, di mana genangan banjir mulai terjadi di periode bulan Desember-Januari dan mencapai puncaknya pada bulan Februari-Maret ([Milien et al., 2023](#)).

Luas penampang basah hasil perhitungan menggunakan metode trapesium menunjukkan perbedaan yang jelas antara Sungai Tawang dan Sungai Kapuas. Pada Sungai Tawang, penampang sungai terluas tercatat sebesar 1.904,0 meter persegi pada bulan Maret, sedangkan luas penampang terkecil sebesar 1.286,6 meter persegi tercatat pada bulan Agustus. Sementara itu, Sungai Kapuas memiliki luas penampang lebih besar, terluas sebesar 3.902,6 meter persegi dan terkecil sebesar 2.938,7 meter persegi. Perbandingan luas penampang antar-sungai menunjukkan luas penampang Sungai Tawang pada kondisi tinggi muka air terendah setara dengan sekitar 43,8 persen dari penampang Sungai Kapuas dan meningkat pada kondisi pasang tertinggi menjadi sekitar 48,8 persen. Secara keseluruhan, hasil pengukuran penampang melintang menunjukkan bahwa Sungai Tawang dan Sungai Kapuas memiliki perbedaan dimensi fisik yang cukup kontras, namun keduanya menunjukkan pola perubahan ketinggian muka air musiman yang searah. Perubahan musiman pada lebar, kedalaman, dan luas penampang di kedua sungai mencerminkan adanya pengaruh fluktuasi aliran air dari DTA Danau Sentarum dalam mengatur keseimbangan aliran antara sistem danau dan saluran utama keluar Sungai Tawang.

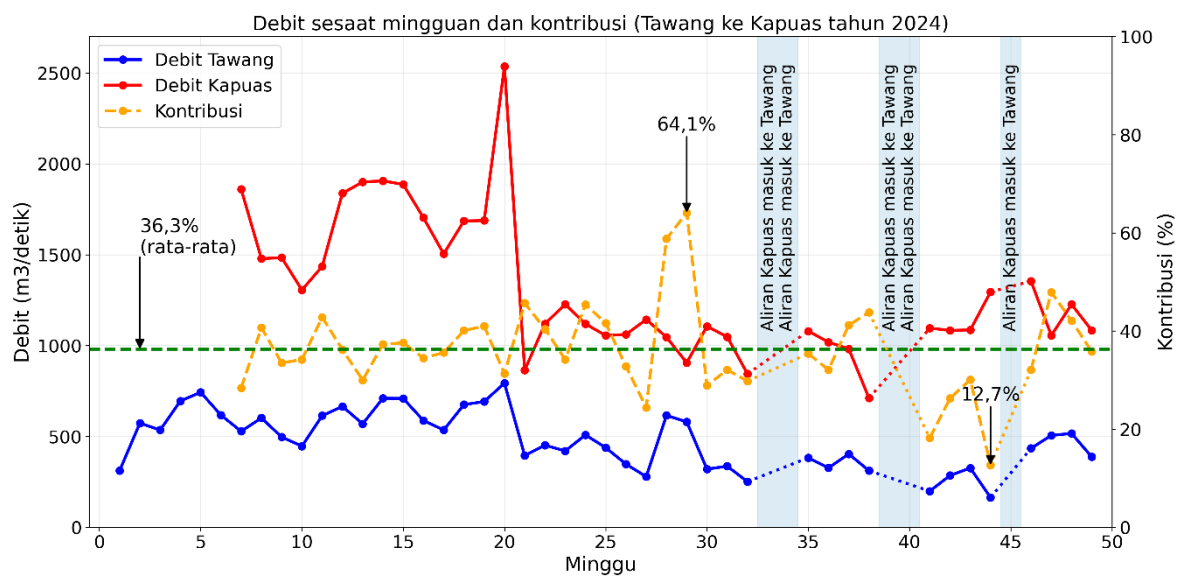
Dinamika Temporal Debit Sungai Tawang dan Sungai Kapuas

Berdasarkan hasil perhitungan debit sesaat mingguan selama tahun 2024, aliran keluar dari Sungai Tawang menunjukkan fluktuasi maupun besaran kontribusinya secara temporal yang beriringan dengan aliran Sungai Kapuas. Perhitungan debit aliran keluar menunjukkan bahwa debit sesaat Sungai Tawang (Januari-Desember) tercatat di kisaran antara 163,9 - 793,6 m³/detik dengan rata-rata sebesar 483,9 m³/detik. Sedangkan debit sesaat Sungai Kapuas selama periode pengamatan (Februari-Desember) berkisar antara 711,0 - 2.536,4 m³/detik, dengan rata-rata sebesar 1.311,1 m³/detik. Berdasarkan pengamatan di periode minggu yang sama antara aliran Sungai Tawang dan aliran Sungai Kapuas menunjukkan bahwa perbandingan debit Sungai Tawang dengan Sungai Kapuas berkisar antara 12,7 - 64,1%, dengan rata-rata sebesar 36,3%.

Pengamatan mingguan mengungkap bahwa kontribusi terendah terjadi pada akhir November 2024 (minggu ke-44) saat memasuki musim penghujan. Sebaliknya, kontribusi tertinggi tercatat pada akhir Juli 2024 (minggu ke-29), di mana periode tersebut merupakan puncak kemarau di Kalimantan Barat ([Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, 2024](#)). Secara temporal, kenaikan atau penurunan debit di Sungai Kapuas umumnya terjadi beriringan dengan debit di Sungai Tawang. Hal ini mengindikasikan adanya keterkaitan hidrologis langsung antara keduanya pada saat proses pengaliran keluar dari sistem Danau Sentarum berlangsung (Gambar 5). Fluktuasi kontribusi ini juga menegaskan fungsi strategis DTA Danau Sentarum dalam menjaga stabilitas debit Sungai Kapuas, baik pada musim hujan maupun musim kemarau.

Hasil pengamatan debit sesaat selama tahun 2024 menunjukkan bahwa rata-rata kontribusi Sungai Tawang ke Sungai Kapuas adalah sebesar 36,3%. Meskipun angka tersebut masih berada dalam rentang 30-50% sesuai dengan temuan Klepper ([1994](#)), namun fluktuasi temuan riset ini menunjukkan hasil yang berbeda, di mana kontribusi aliran Sungai Tawang ke Sungai Kapuas semakin lebar (12,7 - 64,1%). Fluktuasi antar minggu yang terjadi ini mencerminkan adanya variasi pelepasan air yang dikendalikan oleh dinamika simpanan air di DTA Danau Sentarum dan bersifat musiman. Melebarnya rentang nilai kontribusi tersebut dapat mengindikasikan adanya perubahan pada pola aliran permukaan dan kapasitas resapan air di lanskap ini, meskipun interpretasi ini perlu diverifikasi lebih lanjut melalui analisis perubahan tutupan lahan, pengukuran infiltrasi, dan pemodelan hidrologi multi-tahun. Perubahan tutupan vegetasi hutan yang berkurang dibandingkan kondisi 30 tahun lalu dapat menjadi salah satu

faktor yang berkontribusi terhadap perubahan dinamika ini. Fenomena ini sejalan dengan hasil kajian Giglou *et al.* (2024) yang membuktikan bahwa perubahan tutupan lahan akibat aktivitas manusia seperti deforestasi dan pertanian, diperburuk dengan perubahan iklim, memiliki korelasi positif yang signifikan terhadap peningkatan limpasan permukaan. Meskipun demikian, perubahan aliran di Sungai Tawang tersebut tidak hanya diduga karena tutupan vegetasi, namun juga berasal dari interaksinya dengan faktor lain seperti curah hujan, kapasitas tampungan danau, serta kondisi aliran utama Sungai Kapuas. Untuk mengonfirmasi kecenderungan ini, diperlukan analisis temporal lebih lanjut mencakup koefisien variasi, korelasi debit, dan analisis tren musiman.



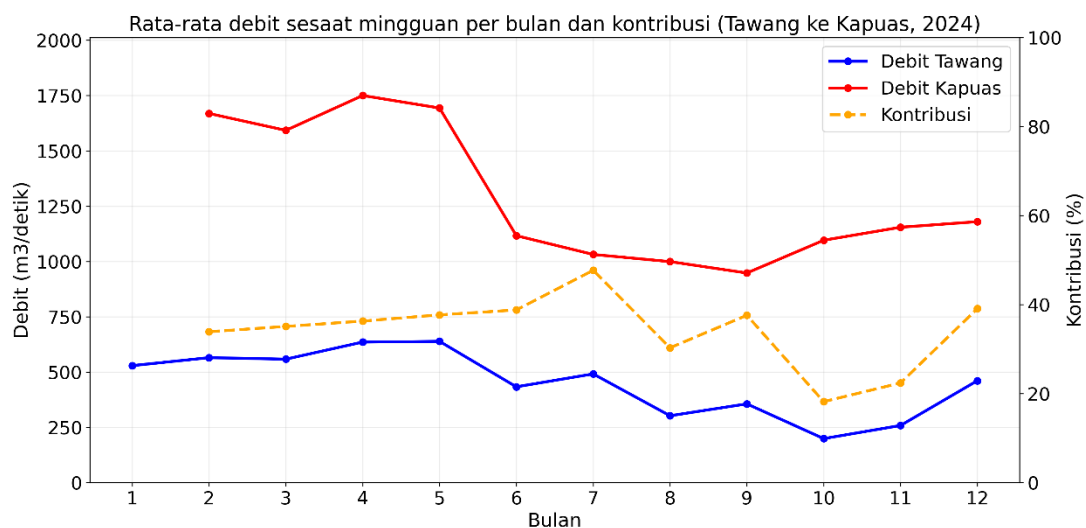
Gambar 5. Debit kontribusi Sungai Tawang (QT) ke Sungai Kapuas (QK) tahun 2024

Berdasarkan hasil perhitungan rata-rata debit sesaat mingguan yang terangkum dalam Tabel 3 dan Gambar 6, terlihat bahwa pergerakan kenaikan dan penurunan debit Sungai Tawang dan Sungai Kapuas berlangsung beriringan. Debit Sungai Tawang menunjukkan tren peningkatan selama periode Januari hingga Mei, kemudian mengalami penurunan pada Juni hingga Oktober, dan mulai merangkak naik kembali pada November hingga Desember. Pola fluktuasi ini selaras dengan kondisi di Sungai Kapuas yang menunjukkan pergerakan serupa pada periode waktu yang hampir bersamaan. Pola pergerakan ini menunjukkan adanya keterikatan hidrologis yang kuat antara sistem Danau Sentarum (melalui Sungai Tawang) dengan aliran utama Sungai Kapuas. Fenomena serupa juga tercatat pada lahan basah dan danau paparan banjir Pantanal, Brazil, dimana debit tertinggi terjadi di antara bulan Februari-Mei dan rendah di bulan Juli-Oktober (Milien *et al.*, 2023).

Di sisi lain, Tabel 3 dan grafik kontribusi pada Gambar 6 menunjukkan persentase kontribusi debit Sungai Tawang terhadap Sungai Kapuas yang terus meningkat sejak awal tahun hingga mencapai puncaknya pada bulan Juli, kemudian menurun hingga Oktober, dan kembali naik pada periode November-Desember. Fenomena menarik terlihat pada periode Juni-Juli, di mana persentase kontribusi terus meningkat meskipun pada saat yang bersamaan debit Sungai Tawang secara absolut mulai menurun. Hal ini mengindikasikan bahwa kapasitas simpanan air pada lanskap DTA Danau Sentarum masih cukup untuk terus menyuplai aliran ke Sungai Kapuas di masa transisi menuju musim kering. Kondisi tersebut menegaskan peran Danau Sentarum sebagai reservoir alami yang melepaskan cadangan air simpanannya melalui Sungai Tawang guna menyokong aliran Sungai Kapuas saat Kapuas mulai menyusut.

Tabel 3. Rata-rata debit sesaat mingguan setiap bulan

No.	Bulan	Debit		Persentase
		Tawang	Kapuas	
1	Januari	529,1	n/a	n/a
2	Februari	565,2	1.669,0	33,9
3	Maret	558,4	1.592,6	35,1
4	April	635,7	1.750,1	36,3
5	Mei	638,9	1.693,6	37,7
6	Juni	433,4	1.116,6	38,8
7	Juli	491,7	1.031,7	47,7
8	Agustus	302,6	999,3	30,3
9	September	356,3	947,8	37,6
10	Oktober	199,3	1.095,9	18,2
11	November	258,6	1.154,7	22,4
12	Desember	461,1	1.179,9	39,1



Gambar 6. Perbandingan rata-rata debit sesaat mingguan setiap bulan di Sungai Tawang dan Sungai Kapuas

Data rata-rata debit sesaat mingguan setiap bulan menunjukkan bahwa debit Sungai Tawang berkontribusi ke Sungai Kapuas setiap bulan secara signifikan dan konsisten berperan menjaga kontinuitas aliran utama sepanjang tahun. Puncak kontribusi pada bulan Juli mengindikasikan bahwa puncak kontribusi terjadi pada puncak kemarau, sedangkan penurunan kontribusi yang terendah terjadi pada bulan Oktober, yang menandai berakhirnya fase maksimum dan minimnya pelepasan air dari Danau Sentarum. Selanjutnya peningkatan kontribusi mulai terjadi kembali pada bulan November–Desember, yang mengindikasikan adanya respons tunda (*lagged hydrological response*) sistem Danau Sentarum terhadap presipitasi awal musim hujan pada bulan Oktober. Secara keseluruhan, pola ini mengonfirmasi peran Danau Sentarum sebagai *hydrological bufer* yang menyimpan cadangan air pada bulan basah dan memperpanjang fase pelepasan air untuk menjaga suplai dasar ke Sungai Kapuas pada musim kering, dan menstabilkan dinamika debit ke hilir pada skala tahunan.

Fenomena aliran balik (*bidirectional flow*) Sungai Kapuas ke Sungai Tawang

Selama periode pengamatan, terdapat fenomena aliran balik (*inflow*) dari Sungai Kapuas masuk ke Sungai Tawang yang terjadi di akhir Agustus dan awal September (minggu ke 33 dan 34), pertengahan Oktober (minggu ke 39 dan 40), dan awal Desember (minggu ke 45). Tabel 5 merepresentasikan debit aliran masuk dari Sungai Kapuas ke Sungai Tawang, dimana debit Kapuas yang terjadi adalah debit “sisir” yang mengalir ke bagian hilir. Terjadinya suplai air masif

pada akhir Agustus dan awal September 2024, mengindikasikan bahwa volume air Danau Sentarum sedang berada pada titik minimum setelah periode aliran keluar memuncak pada bulan Juli. Pada periode ini, aliran air dari Sungai Kapuas akan mengisi Danau Sentarum sampai menaikkan elevasi air pada titik jenuh tertentu dan kemudian akan mengalirkan kembali aliran ke Sungai Kapuas yang terlihat di periode pertengahan September. Proses *bidirectional flow* ini terjadi kembali pada periode pertengahan Oktober (minggu ke 39 dan 40) dengan tekanan debit air yang lebih rendah dibandingkan periode akhir Agustus dan awal September. Hal ini mengindikasikan bahwa elevasi air di Danau Sentarum yang mulai naik, menyebabkan tekanan balik dari danau mulai memberikan perlawanan terhadap aliran masuk. Kondisi paling kontras terlihat pada minggu ke-45 (awal Desember 2024). Meskipun debit “sisir” Kapuas di bagian hilir di bawah rata-ratanya yakni sebesar 1.161,8 m³/detik, namun masih terjadi aliran masuk ke Tawang sebesar 45,7 m³/detik. Hal ini mengindikasikan bahwa volume tampungan Danau Sentarum di periode tersebut telah mencapai kondisi jenuh, sehingga hampir seluruh debit Sungai Kapuas langsung diteruskan ke arah hilir karena gradien tekanan dari danau sudah cukup kuat untuk menahan aliran masuk lebih lanjut.

Tabel 5. Aliran sesaat mingguan sungai Tawang dan sungai Kapuas (aliran masuk)

Minggu ke-	Tanggal	Debit (m ³ /detik)		Keterangan
		Tawang	Kapuas	
33	25 Agustus 2024	438.0	720.7	
34	1 September 2024	209.3	1.001,9	
39	6 Oktober 2024	282.0	843,7	
40	13 Oktober 2024	198.5	989,1	
45	1 Desember 2024	45.7	1.161,8	

Pembahasan

Implikasi Terhadap Pengelolaan Lanskap Danau Sentarum Berkelanjutan

Temuan mengenai melebarinya rentang variabilitas kontribusi debit (12,7%–64,1%) dan identifikasi kuantitatif aliran balik (*bidirectional flow*) memberikan perspektif mengenai dinamika hidrologi di lanskap Danau Sentarum. Fenomena rata-rata stabil namun variabilitas temporal meningkat yang teramati dalam tiga dekade terakhir merupakan sinyal kuat adanya perubahan fundamental pada fungsi ekosistem pengaturan air. Ketidakstabilan ini tidak hanya berdampak pada sirkulasi massa air antara sungai induk dan danau, tetapi juga membawa konsekuensi luas terhadap keseimbangan lingkungan dan aktivitas manusia yang bergantung padanya. Oleh karena itu, diperlukan pemahaman mendalam mengenai implikasi temuan ini terhadap strategi konservasi lanskap yang berkelanjutan, yang mencakup integrasi aspek ekologi, ekonomi, sosial, kelembagaan dan penataan ruang sebagai satu kesatuan manajemen DTA Danau Sentarum.

Secara ekologis, meningkatnya variabilitas debit dapat mengindikasikan perubahan pada kapasitas retensi dan fungsi penyangga hidrologis lanskap Danau Sentarum sebagai satu kesatuan sub DAS, meskipun konfirmasi terhadap hal ini masih memerlukan data tambahan seperti data tutupan lahan multi-temporal, kapasitas tampungan, analisis respons curah hujan-limpasan, dan analisis tren multi-tahun. Di sisi lain, peningkatan curah hujan yang lebih tinggi dari rata-rata bulanan 10 tahun menunjukkan bahwa perubahan iklim berdampak pada wilayah ini. Studi menunjukkan bahwa perubahan iklim menyebabkan berbagai gangguan pada sistem DAS, baik untuk sementara maupun permanen, seperti penurunan pasokan air, peningkatan bencana alam, peningkatan masalah kualitas air, hilangnya keanekaragaman hayati, dan peningkatan aliran banjir (Randhir, 2014). Dalam konteks *floodplain system*, hutan dataran banjir memiliki peran signifikan dalam meredam puncak banjir dan menstabilkan rezim aliran. Dengan demikian, melebarinya rentang kontribusi debit Sungai Tawang merupakan sinyal yang perlu dicermati terkait kemungkinan perubahan fungsi ekosistem sebagai *hydrological regulator* regional, yang perlu dikonfirmasi dengan analisis lebih lanjut. Ketidakstabilan ini memerlukan strategi manajemen air tanah dan permukaan yang terintegrasi guna menekan laju degradasi lahan di wilayah hulu (Naufal et al., 2025). Implikasinya, kebijakan konservasi tidak boleh terbatas pada

perlindungan badan air danau, tetapi harus memperluas fokus melalui penguatan infrastruktur alami (*natural infrastructure*) melalui rehabilitasi vegetasi hutan, konservasi lahan basah, penguatan solusi berbasis alam (*Nature-based Solutions/NbS*), serta integrasi tata ruang lintas wilayah administrasi, serta pemantauan ambang batas kemampuan pulih ekosistem agar pemanfaatan sumber daya tidak melampaui daya dukung lingkungan (Hasan, 2023; Kharisma *et al.*, 2022; Mustofa, 2024).

Dari aspek ekonomi, ketidakstabilan debit yang diperburuk oleh ketidakpastian cuaca dan iklim akan memperbesar risiko terhadap produktivitas ekonomi lokal. Ketidakstabilan limpasan aliran air telah berdampak buruk pada keseimbangan ekologis yang diperlukan untuk mempertahankan populasi ikan dan berimbas pada berkurangnya stok ikan, serta mengancam mata pencaharian nelayan yang bergantung pada sumber daya ini (Hidayat *et al.*, 2022). Upaya adaptasi ekonomi tanpa memperhatikan fungsi lingkungan justru akan menimbulkan kerusakan lingkungan yang lebih besar (Naufal & Mappiasse, 2023). Maka dari itu, dalam kerangka keberlanjutan DAS, pengambilan keputusan pengelolaan tidak dapat lagi berbasis pada tujuan ekonomi semata, melainkan harus mempertimbangkan berbagai aspek dan risiko. Hal ini menuntut adanya analisis skenario manajemen yang mampu memaksimalkan sinergi dan meminimalkan *trade-off* di antara berbagai jasa ekosistem pada skala yang berbeda seperti menyeimbangkan target hasil hutan bagi masyarakat lokal dengan mitigasi iklim global maupun kebutuhan jasa hidrologi (Kim *et al.*, 2018; Yusuf, 2026). Pendekatan multi-kriteria yang mengintegrasikan indikator ekologi, ekonomi, sosial, budaya, dan kebijakan sebagaimana diusulkan Talampas *et al.* (2025) menjadi relevan untuk menilai *trade-off* berbagai aspek selain ekonomi dalam menjaga stabilitas dan kesehatan hidrologi DAS jangka panjang.

Secara sosial, meningkatnya ketidakaturan rezim air di lanskap ini berpotensi mengganggu pola adaptasi tradisional masyarakat yang selama ini berbasis pada siklus pasang-surut musiman. Tanpa kapasitas adaptif yang memadai, ketidakpastian ini mengancam sistem kearifan lokal masyarakat dalam mengelola sumber daya, yang pada akhirnya dapat memicu kerentanan ekonomi dan konflik antarwarga akibat rusaknya ritme alam yang menjadi panduan hidup lintas generasi. Kondisi ini memerlukan pemahaman holistik terhadap daerah tangkapan air sebagai sistem sosial-ekologis guna membedah interaksi dinamis antara masyarakat dan lingkungan, sekaligus memperbaiki dampak negatif dari degradasi lingkungan yang terjadi. Keberhasilan transisi ini sangat bergantung pada pembentukan kerangka kelembagaan yang fleksibel dan kolaboratif untuk mengatasi kompleksitas perubahan kebijakan serta membangun kepercayaan di antara pemangku kepentingan dalam menghadapi dinamika kekuasaan (Akamani, 2023; Morgan *et al.*, 2023). Oleh karena itu, strategi konservasi lanskap perlu memasukkan penguatan kapasitas adaptif masyarakat melalui integrasi pengetahuan tradisional ke dalam tindakan sosioteknis berbasis sains pada manajemen hulu DAS (Akamani, 2023; Nugroho *et al.*, 2018), mekanisme pembelajaran sosial, dan integrasi pengetahuan lokal dalam perencanaan adaptif DAS (Akamani, 2023), serta pengarusutamaan narasi resiliensi kelompok perempuan dalam menghadapi ketidakadilan ekologi akibat perubahan iklim (Hendrastiti *et al.*, 2023).

Implikasi terhadap penataan ruang menjadi krusial karena perubahan respons hidrologi mencerminkan interaksi kuat antara perubahan penggunaan lahan dan dinamika debit. Integrasi perencanaan tata ruang dengan prediksi risiko banjir dan analisis lanskap dinamis telah direkomendasikan sebagai strategi penguatan ketahanan DAS (Fitriyati *et al.*, 2024). Dalam kerangka DTA Danau Sentarum, zonasi perlindungan hidrologis lahan basahnya perlu diperluas tidak hanya pada kawasan taman nasional, tetapi juga pada wilayah lainnya yang berkontribusi signifikan terhadap limpasan permukaan dan sedimentasi. Hal ini sejalan dengan studi Lowman *et al.* (2018) di *Upper Zambezi River Basin*, yang mengungkapkan bahwa resiliensi fungsi ekosistem lahan basah terhadap variabilitas curah hujan sangat dipengaruhi oleh keberadaan vegetasi serta kemampuan lahan tersebut dalam mempertahankan genangan air. Kondisi ini dipertegas dengan temuan bahwa efektivitas pengelolaan DAS sangat bergantung pada perencanaan tata ruang berbasis ekosistem yang mampu memetakan dinamika spasial-temporal lahan guna menjaga keberlanjutan fungsi layanan ekosistem wilayah (Nahib *et al.*, 2026). Pendekatan spasial-terintegrasi yang menghubungkan pengendalian konversi lahan, restorasi rawa banjir, dan perlindungan koridor sungai akan memperkuat fungsi “buffer

landscape" yang selama ini menjaga stabilitas hubungan Sungai Tawang–Kapuas. Penguatan fungsi penyangga ini memerlukan simulasi skenario perencanaan spasial yang adaptif guna menekan laju kehilangan hutan, sebagaimana pemodelan skenario terbukti krusial dalam mengendalikan konversi lahan dan menjaga keberlanjutan DAS (Wiwoho *et al.*, 2024).

Pada dimensi kelembagaan, perubahan kontribusi debit Sungai Tawang ke Sungai Kapuas dan fenomena *reverse flow* mempertegas kebutuhan akan tata kelola multi-level yang responsif terhadap dinamika pengelolaan lintas batas administratif. Dinamika ini menuntut sinkronisasi kebijakan yang adaptif; sebab dalam konteks Sub-DAS Danau Sentarum, efektivitas manajemen berisiko lumpuh akibat fragmentasi mandat dan tumpang tindih kewenangan antara otoritas daerah serta pengelola kawasan konservasi (Rahayu *et al.*, 2024; Zulkarnaen, 2023). Guna mengatasinya, diperlukan titik temu kepentingan bersama (*common interests*) guna menyinergikan mandat yang berbeda tersebut ke dalam satu skema pengelolaan yang disepakati bersama (Miladan & Permana, 2020; Sentanu *et al.*, 2025), dan kerangka kerja institusional yang fleksibel untuk memfasilitasi interaksi vertikal dan horizontal antar-aktor, yang didukung oleh pengembangan sistem informasi hidrologi terintegrasi agar perubahan kebijakan tidak lagi terhambat oleh batasan yurisdiksi yang kaku (Akamani, 2023). Upaya sinkronisasi ini harus dibarengi dengan komitmen kepemimpinan pemerintah daerah dalam menyusun regulasi regional yang spesifik guna mengisi kekosongan aturan di tingkat kabupaten (Absori *et al.*, 2025; Walukow *et al.*, 2023). Melalui sinkronisasi akuntabilitas kolektif, serta sinergi kepentingan antara otoritas pusat dan daerah tersebut, model tata kelola ini memungkinkan adanya pembagian peran yang jelas dalam merespons dinamika perubahan hidrologi, sekaligus memastikan bahwa setiap keputusan manajerial didasarkan pada kepentingan keberlanjutan lanskap secara utuh.

Secara keseluruhan, temuan empiris mengenai melebarnya amplitudo kontribusi debit dan kuantifikasi aliran balik bukan sekadar pembaruan data hidrometri, melainkan landasan strategis untuk mentransformasikan pengelolaan lanskap Danau Sentarum dari pendekatan konservasi statis menuju tata kelola adaptif berbasis dinamika sistem. Integrasi dimensi ekologi, ekonomi, sosial, kelembagaan, dan tata ruang dalam satu kerangka manajemen lanskap Danau Sentarum yang holistik menjadi hal penting untuk menjaga stabilitas hidrologi jangka panjang sekaligus menjamin keberlanjutan fungsi sosial-ekonomi masyarakat yang bergantung pada sistem Sungai Tawang–Kapuas.

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa debit sesaat di muara Sungai Tawang sebagai aliran keluar DTA Danau Sentarum selama periode pengamatan adalah sebesar 163,9–793,6 m³/detik dengan rata-rata aliran keluar sebesar 483,9 m³/detik. Sedangkan debit sesaat Sungai Kapuas sebesar 711,0–2.536,4 m³/detik, dengan rata-rata sebesar 1.311,1 m³/detik. Kontribusi aliran Sungai Tawang ke Sungai Kapuas di periode pengamatan yang sama berkisar antara 12,7% hingga 64,1%, dengan rata-rata kontribusi sebesar 36,3%. Meskipun rata-rata kontribusi masih konsisten dengan estimasi Klepper tahun 1994 pada rentang 30–50%, namun perubahan lebar jarak antara nilai terendah dan tertinggi ini menunjukkan adanya variabilitas temporal yang lebih besar dan sistem hidrologi yang lebih fluktuatif dibandingkan tiga dekade lalu. Kajian ini juga berhasil mengidentifikasi dan mengkuantifikasi pola debit aliran balik (*bidirectional* atau *reverse flow*) yang terjadi antara Sungai Kapuas dan Sungai Tawang. Aliran masuk dari Kapuas tercatat berkisar antara 45,7 hingga 438 m³/detik, yang memvalidasi secara kuantitatif bahwa Danau Sentarum masih berfungsi sebagai penyangga air bagi Sungai Kapuas. Di sisi lain perubahan lebar rentang kontribusi ini memberikan indikasi bahwa kapasitas pengaturan air di wilayah tersebut telah mengalami perubahan yang diduga berkaitan dengan dinamika biofisik di Daerah Tangkapan Air (DTA) Danau Sentarum, meskipun diperlukan analisis lebih lanjut untuk mengonfirmasi mekanismenya. Perlu dicatat bahwa interpretasi ini didasarkan pada data satu tahun pengamatan saja; konfirmasi mengenai tren jangka panjang memerlukan pemantauan debit dan analisis perubahan tutupan lahan yang bersifat multi-tahun.

Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini merekomendasikan beberapa agenda penelitian dan kebijakan yang operasional: (1) pemantauan debit multi-tahun yang berkelanjutan

untuk mendeteksi tren hidrologi jangka panjang; (2) analisis perubahan tutupan hutan dan lahan multi-temporal menggunakan data penginderaan jauh untuk mengkuantifikasi dampak deforestasi terhadap dinamika aliran; (3) pemodelan hidrologi terintegrasi yang menggabungkan data debit, curah hujan, dan tutupan lahan guna memvalidasi dan memprediksi perubahan sistem hidrologi; (4) evaluasi daya dukung dan daya tampung lingkungan lanskap Danau Sentarum yang berbasis data empiris terkini; (5) integrasi indikator hidrologi ke dalam perencanaan tata ruang berbasis daya dukung; serta (6) pengembangan kebijakan konservasi adaptif yang responsif terhadap perubahan dinamika hidrologi. Dengan demikian, kebijakan pembangunan di wilayah ini tidak lagi hanya mengacu pada data historis, namun mampu secara nyata mengantisipasi risiko fluktuasi air yang ekstrem di masa depan. Keterbatasan studi ini mencakup cakupan data satu tahun pengamatan ditahun 2024, penggunaan data debit sesaat, dan pengukuran yang dimulai pada pertengahan Februari untuk Sungai Kapuas, serta tidak dilakukannya analisis perubahan tutupan lahan dan pemodelan hidrologi. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menggabungkan pemantauan kondisi hidrologi jangka panjang dengan analisis spasial dan temporal tutupan lahan serta pemodelan hidrologi berbasis data.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada para pembimbing akademik, Pemerintah Kabupaten Kapuas Hulu, Dinas Perumahan Rakyat dan Kawasan Permukiman, Pertanahan, dan Lingkungan Hidup, Balai Besar Taman Nasional Danau Betung Kerihun dan Sentarum, serta Badan Pengelola Daerah Aliran Sungai Kapuas, atas dukungan, bimbingan, dan bantuan kelembagaan yang berharga selama penelitian ini. Para penulis juga berterima kasih kepada seluruh kolega, peninjau, dan semua informan kunci atas umpan balik dan wawasan yang konstruktif. Kami berharap penelitian ini akan berkontribusi pada kemajuan pengelolaan daerah aliran sungai berkelanjutan di Indonesia.

PERNYATAAN KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, I.K., R.S., L.B.P., dan A.Z.; analisis formal, I.K., dan D.K.; investigasi, I.K., dan D.K.; pembimbingan, R.S., L.B.P., dan A.Z.; penulisan penyusunan draf asli, I.K.; Penulisan peninjauan dan penyuntingan, I.K., R.S., L.B.P., dan A.Z. Semua penulis telah berkontribusi dalam penyelesaian manuskrip ini. Mereka telah membaca dan menyetujui versi manuskrip yang diterbitkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Absori, A., Hernanda, T., Rizka, R., Bangsawan, M. I., & Budiono, A. (2025). Strengthening upstream forest conservation policies to achieve sustainable development goals. *Journal of Human Rights, Culture and Legal System*, 5(3), 780–805. <https://doi.org/10.53955/jhcls.v5i3.767>
- Aditama, I. G. B. W., Prayogo, H., & Destiana. (2024). Keanekaragaman primata diurnal di Bukit Semujan Resort Semangit Taman Nasional Danau Sentarum. *Jurnal Bios Logos*, 14(1), 55–64. <https://doi.org/10.35799/jbl.v14i1.51586>
- Akamani, K. (2023). The roles of adaptive water governance in enhancing the transition towards ecosystem-based adaptation. *Water*, 15(13), 2341. <https://doi.org/10.3390/w15132341>
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2024). *Kapan musim kemarau 2024? Ini penjelasan lengkap BMKG*. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. www.bmkg.go.id
- Chen, X., & Tu, Y. (2022). Data-driven analysis of regional water resources allocation decision-making. *Journal of Physics: Conference Series*, 2333(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2333/1/012008>
- Fitriyati, N., Arifin, H. S., Kaswanto, R. L., & Marimin. (2024). Enhancing land use planning through integrating landscape analysis and flood inundation prediction: Bekasi City's in 2030. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1), 2360623. <https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2360623>
- Giglou, A. N., Nazari, R., Karimi, M., Museru, M. L., Opare, K. N., & Nikoo, M. R. (2024). Future eco-hydrological dynamics: Urbanization and climate change effects in a changing landscape: A case study of Birmingham's river basin. *Journal of Cleaner Production*, 447, 141320.

- <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141320>
- Hasan, M. (2023). An approach for prioritizing natural infrastructure practices to mitigate flood and nitrate risks in the Mississippi-Atchafalaya river basin. *Land*, 12(2), 276. <https://doi.org/10.3390/land12020276>
- Hendrastiti, T. K., Kusujarti, S., & Sasongko, R. N. (2023). The narratives of local women's resilience in disaster and climate change: The voices of Indonesian women in the watershed areas. *The Indonesian Journal of Socio-Legal Studies*, 3(1), Article 4. <https://doi.org/10.54828/ijsls.2023v3n1.4>
- Hidayat, A., Rajiani, I., & Arisanty, D. (2022). Sustainability of floodplain wetland fisheries of rural Indonesia: Does culture enhance livelihood resilience? *Sustainability*, 14(21), 14461. <https://doi.org/10.3390/su142114461>
- Jadmiko, S. D., Murdiyarso, D., & Faqih, A. (2017). Koreksi bias luaran model iklim regional untuk analisis kekeringan. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 41(1), 25–35. <https://doi.org/10.21082/jti.v41n1.2017.25-35>
- Junk, W. J., Bayley, P. B., & Sparks, R. E. (1989). The flood pulse concept in river-floodplain systems. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences*, 106, 110–127.
- Kartini, & Soeryamasoeka, B. S. (2008, Agustus 21–23). *Kajian terhadap daya guna kawasan konservasi SDA Danau Sentarum sebagai sumber air baku* [Makalah konferensi]. PIT HATHI XXIV, Palembang, Indonesia
- Kharisma, R., Purnomo, H., & Kuncahyo, B. (2022). Ecological footprint and biocapacity analysis of upper Cisadane Watershed. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 12(2), 197–209. <https://doi.org/10.29244/jpsl.12.2.197-209>
- Kim, Y. S., Latifah, S., Afifi, M., Mulligan, M., Burke, S., Fisher, L., Siwicka, E., Remoundou, K., Christie, M., Masek Lopez, S., & Jenness, J. (2018). Managing forests for global and local ecosystem services: A case study of carbon, water and livelihoods from eastern Indonesia. *Ecosystem Services*, 31(Part A), 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.03.018>
- Klepper, O. (1994). *A hydrological model of the upper Kapuas River and the Kapuas lake* (Consultancy report). Asian Wetland Bureau/PHPA
- Lowman, L. E., Wei, T. M., & Barros, A. P. (2018). Rainfall variability, wetland persistence, and water-carbon cycle coupling in the Upper Zambezi river basin in Southern Africa. *Remote Sensing*, 10(5), 692. <https://doi.org/10.3390/rs10050692>
- Matta, G., Pant, G., Kumar, P., Pal, R., Gjyli, L., El Morabet, R., & Kumar, A. (2026). Bridging the gap: Geospatial technology, artificial intelligence, and hydrological models for integrated water resource management. In *Hydrological Insights: Synergizing Groundwater Models, Remote Sensing, and AI for Water Sustainability* (pp. 149–172). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-36394-8.00008-X>
- Miladan, N., & Permana, A. S. (2020). Using the ZOPA model to synergize the different interests of local and central authorities in an adaptive city plan towards flood resilience in Surakarta City, Indonesia. *Spatium*, (44), 53–62. <https://doi.org/10.2298/SPAT2044053M>
- Milien, E. J., Nunes, G. M., Pierre, G., Hamilton, S. K., & Da Cunha, C. N. (2023). Hydrological dynamics of the Pantanal, a large tropical floodplain in Brazil, revealed by analysis of Sentinel-2 satellite imagery. *Water*, 15(12), 2180. <https://doi.org/10.3390/w15122180>
- Morgan, M., Webster, A. J., Piccarello, M., Jones, K. W., Chermak, J. M., & McCarthy, L. F. (2023). Adaptive governance strategies to address wildfire and watershed resilience in New Mexico's upper Rio Grande watershed. *Frontiers in Climate*, 5, 1062320. <https://doi.org/10.3389/fclim.2023.1062320>
- Mustofa, I. (2024). Nature-based Solutions (NbS) for sustainable riverine systems: Case study Bengawan Solo Watershed, Indonesia. Dalam S. Lestari *et al.* (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Radioscience, Equatorial Atmospheric Science and Environment and Humanosphere Science* (pp. 741–755). https://doi.org/10.1007/978-981-97-0740-9_74
- Nahib, W. Y., Widiatmaka, W., Tarigan, S. D., Ambarwulan, W., Ramadhani, F., Pranoto, B., Nugroho, N. P., Turmudi, T., Cahya, D. L., Darmawan, M., Suprajaka, S., Suryanta, J. I., & Winarno, B. (2026). Spatio-temporal dynamics of land use and land cover change and ecosystem service value assessment in Citarum Watershed, Indonesia: A multi-scenario and multi-scale

- approach. *Resources*, 15(2), Article 24. <https://doi.org/10.3390/resources15020024>
- Naufal, M., Adji, T. N., & Haryono, E. (2025). Groundwater management strategy to reduce the impact of land degradation in tropical karst areas. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 12(4), 7965–7977. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2025.124.7965>
- Naufal, N., & Mappiasse, M. F. (2023). Adaptation from maladaptation: A case study of community-based initiatives of the Saddang Watershed. *Forest and Society*, 7(1), 167–183. <https://doi.org/10.24259/fs.v7i1.19453>
- Nugroho, H. Y. S. H., van der Veen, A., Skidmore, A. K., & Hussin, Y. A. (2018). Expansion of traditional land-use and deforestation: A case study of an adat forest in the Kandilo Subwatershed, East Kalimantan, Indonesia. *Journal of Forestry Research*, 29(2), 495–513. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0449-9>
- Rahayu, H. P., Zulfa, K. I., Nurhasanah, D., Haigh, R., Amaratunga, D., & Wahdiny, I. I. (2024). Unveiling transboundary challenges in river flood risk management: Learning from the Ciliwung River basin. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24(6), 2045–2064. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-2045-2024>
- Randhir, T. O. (2014). Resilience of watershed systems to climate change. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 5(6), 1–2. <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000E109>
- Rantz, S. E., et al. (1982). *Measurement and computation of streamflow: Volume 1. Measurement of stage and discharge* (Water-Supply Paper 2175). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/wsp2175>
- Sentanu, I. G. E. P. S., Adi, M. W. P., & Lestari, Y. (2025). Multi-stakeholder collaboration in improving city resilience: A case study of Malang City's adaptation to flood risk. *E3S Web of Conferences*, 677, Artikel 03010. DOI: 10.1051/e3sconf/202567703010
- Souza, J., & Hooke, J. (2021). Influence of seasonal vegetation dynamics on hydrological connectivity in tropical drylands. *Hydrological Processes*, 35(11), e14427. <https://doi.org/10.1002/hyp.14427>
- Stewart, B. (2015). Measuring what we manage – the importance of hydrological data to water resources management. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 366, 80–85. <https://doi.org/10.5194/piahs-366-80-2015>
- Talampas, S. I., Shrestha, S., Mohanasundaram, S., & Loc, H. H. (2025). Development of a watershed health assessment framework integrating ecological, social, cultural, economic and policy attributes. *International Journal of River Basin Management*, 23(1), 55–69. <https://doi.org/10.1080/15715124.2023.2242830>
- Tiwari, A. D., Pokhrel, Y., Kramer, D. B., Akhter, T., Tang, Q., Liu, J., Qi, J., Loc, H. H., & Lakshmi, V. (2023). A synthesis of hydroclimatic, ecological, and socioeconomic data for transdisciplinary research in the Mekong. *Scientific Data*, 10(1), 266. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02193-0>
- Walukow, A. F., Triwiyono, T., Lumbu, A., Gultom, M., & Sukarta, I. N. (2023). Policy priority model for management of Lake Sentani waters degradation after flash floods using the A'WOTMIC method. *Journal of Ecological Engineering*, 24(6), 239–248. <https://doi.org/10.12911/22998993/162953>
- Wiwoho, B. S., Luthfi, M., Murti, S. H., & Sulaswono, B. (2024). Assessing future land-uses under planning scenarios: A case study of the Brantas River Basin, Indonesia. *Environmental Challenges*, 15, 100873. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100873>
- World Meteorological Organization. (2020). *Guide to hydrological practices, Volume I: Hydrology—From measurement to hydrological information* (WMO-No. 168). Geneva
- Yuliani, E. L., Bakara, D. O., Ilyas, M., Russon, A. E., Salim, A., Sammy, J., Sunderland-Groves, J. L., & Sunderland, T. C. H. (2023). Bornean orangutan *Pongo pygmaeus pygmaeus* population estimate within and around Danau Sentarum National Park, Kapuas Hulu, West Kalimantan. *Conservation Science and Practice*, 5(4), e12916. <https://doi.org/10.1111/csp2.12916>
- Yuniarti, E., Soekmadi, R., Arifin, H. S., & Noorachmat, B. P. (2018). Analisis potensi ekowisata Heart of Borneo di Taman Nasional Betung Kerihun dan Danau Sentarum Kabupaten Kapuas Hulu. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 8(1), 44–54. <https://doi.org/10.29244/jpsl.8.1.44-54>

- Yusuf, F. I. (2026). Bridging local perceptions and co-creation for sustainable payment environmental services design: A framework for innovative forest financing. *Jurnal Bisnis Kehutanan Dan Lingkungan*, 3(2), 108–130. <https://doi.org/10.61511/jbkl.v3i2.2026.2569>
- Zulkarnaen, Z. (2023). Colaborative governance: Model kolaborasi antar stakeholder dalam pengelolaan sungai/parit sebagai batas alam Kota Pontianak dan Kabupaten Kubu Raya. *JIIP: Jurnal Ilmiah Ilmu Pemerintahan*, 8(1), 59–75. <https://doi.org/10.14710/jiip.v8i1.15322>