

Kualiti Air di Kawasan Hutan Simpanan Kekal: Kajian Kes di Taman Negeri Rompin, Malaysia

(Water Quality in Permanent Reserve Forest: A Case Study of Rompin State Park, Malaysia)

Zarimah Mohd Hanafiah^{a*}, Anggita Rahmi Hafsari^{b,c}, Febri Doni^d, Zul Ilham^{e,f}, Wan Hanna Melini Wan Mohtar^g, Khairul Nizam Abdul Maulud^g, Roslan Rani^h, Zainuddin Jamaluddin^h, Grippin Akeng^h, Mohd Rahman Mustafa^h, Mohd Firdaus Zulnaim Affendi^h, Norline Zarnuddin^h & Wan Abd Al Qadr Imad Wan-Mohtar^{b*}

^a*Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering,
 Universiti Malaya, Kuala Lumpur 50603, Malaysia*

^b*Functional Omics and Bioprocess Development Laboratory, Institute of Biological Sciences,
 Faculty of Science, Universiti Malaya, Kuala Lumpur 50603, Malaysia*

^c*Department of Biology, Universitas Islam Negeri (UIN) Sunan Gunung Djati Bandung, J
 l. AH Nasution No 105 Bandung 40614*

^d*Department of Biology, Faculty of Mathematics and Natural Sciences,
 Universitas Padjadjaran, Jatinangor, West Java 45363, Indonesia*

^e*Biomass Energy Laboratory, Faculty of Science, Institute of Biological Sciences,
 Universiti Malaya 50603 Kuala Lumpur, Malaysia*

^f*Centre for Science and Environment Studies, Institute of Islamic Understanding Malaysia,
 2 Langgak Tunku Off Jalan Tuanku Abdul Halim, Kuala Lumpur 50480, Malaysia*

^g*Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Built Environment,
 Universiti Kebangsaan Malaysia, UKM Bangi 43600, Malaysia*

^h*Pahang State Forestry, Tun Razak Complex, Indera Mahkota City,
 Kuantan 25990, Pahang, Malaysia*

^{*}*Corresponding authors: zarimahhanafiah@um.edu.my & qadyr@um.edu.my*

*Received 29 October 2025, Received in revised form 16 January 2026
 Accepted 16 February 2026, Available online 30 July 2026*

ABSTRAK

Pemantauan kualiti air di dalam kawasan hutan simpanan kekal (HSK) terutama Hutan Perlindungan Tanah (HPT) adalah penting untuk menjaga integriti ekologi, mengekalkan biodiversiti, dan menyokong aktiviti manusia seperti ekopelancongan dan bekalan air bersih. HPT merupakan kawasan yang diwartakan khusus bertujuan untuk melindungi tanah daripada hakisan dan tanah runtuh. HPT yang terletak dalam kawasan HSK adalah penting dalam mengekalkan fungsi hutan sebagai pelindung cerun dan bekalan air. Kajian ini menilai kualiti air di dua batang sungai yang terletak dalam kawasan HSK yang juga diwartakan sebagai HPT, iaitu Sungai Kincin dan Sungai Kernam di Taman Negeri Rompin (TNR), Pahang, menggunakan parameter iziko-kimia dan Indeks Kualiti Air (IKA) yang ditetapkan oleh Jabatan Alam Sekitar Malaysia (JAS). Sampel air dikumpulkan dari 10 lokasi persampelan dan dianalisis bagi parameter pH, suhu, oksigen terlarut (DO), permintaan oksigen biokimia (BOD), permintaan oksigen kimia (COD),

jumlah pepejal terampai (SS), dan nitrogen ammonia (AN). Purata nilai bagi keseluruhan parameter adalah pH 6.5, Suhu 25.9°C, DO 8.05 mg/L, BOD 6.1 mg/L, COD 7.6 mg/L, SS 9.6 mg/L dan AN 0.0415 mg/L. Seterusnya keputusan IKA menunjukkan bahawa Sungai Kernam dalam kategori Kelas I (IKA = 94.28), manakala Sungai Kincin berada dalam Kelas II (IKA = 89.92), membuktikan status air yang bersih di kawasan tadahan tersebut sesuai dengan kawasan yang diwartakan sebagai HPT. Perbezaan ketara secara statistik ($p < 0.05$) telah diperhatikan bagi beberapa parameter, khususnya BOD, SS, dan kekeruhan, antara kedua-dua sungai menunjukkan varisai akibat faktor cuaca. Penemuan ini menyokong kepentingan pemantauan berterusan dan pengurusan konservasi untuk memelihara kualiti air dan kestabilan ekosistem di kawasan tadahan hutan yang dilindungi seperti di TNR.

Keywords: Kualiti air; Taman Negeri Rompin; indeks kualiti air; hutan simpanan kekal; ekopelancongan

ABSTRACT

Water quality monitoring in the Permanent Reserve Forest (PRF), especially the Soil Protection Forest (SPF), is essential to safeguarding ecological integrity, sustaining biodiversity, and supporting human activities such as ecotourism and clean water supply. SPF is a gazetted area specifically intended to protect land from erosion and landslides. The HPT located within the HSK area is important in maintaining the function of the forest as a slope protector and water supply. This study assessed the water quality of the rivers located in the PRF area and also getted as HPT, namely Kincin and Kernam Rivers in Rompin State Park (TNR), Pahang, using physico-chemical parameters and the Water Quality Index (WQI) method prescribed by the Malaysian Department of Environment (DOE). Water samples were collected from 10 locations and analyzed for pH, temperature, dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total suspended solids (SS), and ammoniacal nitrogen (AN). The average values for all parameters were pH 6.5, Temperature 25.9°C, DO 8.05 mg/L, BOD 6.1 mg/L, COD 7.6 mg/L, SS 9.6 mg/L and AN 0.0415 mg/L. Next, the WQI results indicated that the Kernam River was classified under Class I (WQI 94.28) while the Kincin River fell into Class II (WQI 89.92), both reflecting clean water status in the catchment area. Statistically significant differences ($p < 0.05$) were observed in certain parameters, particularly BOD, SS, and turbidity, between the two rivers. The findings highlight the importance of continuous monitoring and conservation management to preserve water quality in protected forest watersheds like TNR.

Keywords: Water quality; Taman Negeri Rompin; water quality index; permanent reserve forest; ecotourism

PENDAHULUAN

Sungai dalam taman Hutan Simpanan Kekal (HSK) seperti di Taman Negara dan Negeri memainkan peranan penting dalam mengekalkan hidupan akuatik dan ekosistem, berfungsi sebagai tadahan air semula jadi dan berfungsi sebagai sumber mata pencarian masyarakat setempat. Aktiviti ekopelancongan seperti berkhemah, berkayak dan lawatan menaiki bot akan memberi kesan kepada kualiti air sungai. Tambahan pula, walaupun pelancongan boleh membawa faedah ekonomi dan berpotensi meningkatkan kesedaran untuk pemuliharaan, ia juga boleh membawa kepada pencemaran daripada sisa, peningkatan penggunaan air, dan kemusnahan habitat (Pásková et al. 2024). Sungai-sungai dalam lembangan Taman Negeri Rompin (TNR) di Negeri Pahang adalah antara anak sungai utama kepada Sungai Endau, yang mengalir melalui negeri Pahang dan Johor sebelum ke Laut China Selatan. Sungai Endau adalah penting kepada ekonomi tempatan, berfungsi sebagai sumber air untuk pengairan, bekalan air bersih, dan

pelancongan. Memandangkan sungai-sungai di TNR menyumbang kepada sistem Sungai Endau, usaha pemuliharaan dalam TNR adalah penting untuk memastikan kemampunan jangka panjang Sungai Endau.

Kemerosotan kualiti air merupakan kebimbangan terbesar dalam usaha pemuliharaan alam sekitar. Pemantauan kualiti air di kawasan pemuliharaan adalah amat penting untuk memastikan kualiti air, mengesan aktiviti pencerobohan dan untuk membuat keputusan pengurusan untuk menambah baik atau melindungi kawasan yang dimaksudkan. Ini diperlukan oleh potensi pengaruh air yang mengalir ke anak sungai di hutan rizab kerana kualiti air yang mengalir akan mempengaruhi status kawasan tadahan. Parameter fizikokimia asas kualiti air adalah alat penting sebagai status asas air. Parameter ini membantu menentukan sama ada air sesuai untuk pelbagai kegunaan, termasuk minuman, rekreasi, dan menyokong hidupan akuatik (Mahe et al. 2024). Manakala Indeks Kualiti Air (IKA) ialah perwakilan berangka yang memudahkan maklumat kompleks daripada pelbagai

parameter kualiti air menjadi satu nilai untuk menilai dan menyampaikan kualiti keseluruhan air. IKA digunakan secara meluas di seluruh dunia, tetapi negara dan organisasi yang berbeza menggunakan kaedah, parameter dan klasifikasi yang berbeza bergantung pada piawaian persekitaran tempatan, penggunaan air dan ketersediaan data (Chidiac et al. 2023). Negara seperti Amerika Syarikat telah menggunakan Indeks Kualiti Air Yayasan Sanitasi Kebangsaan (NSFIKA) berdasarkan sembilan parameter seperti oksigen terlarut (DO), bakteria koliform, pH, permintaan oksigen biokimia (BOD), suhu dan kekeruhan untuk menilai kualiti air pada skala dari 0 hingga 100, dengan skor yang lebih tinggi menunjukkan kualiti yang lebih baik (Chidiac et al. 2023). Di Canada, Majlis Menteri-menteri Alam Sekitar Canada (CCME) membangunkan IKA fleksibel yang menilai kualiti air berdasarkan bilangan, kekerapan dan amplitud melebihi parameter, menghasilkan klasifikasi daripada “Cemerlang” hingga “Lemah” (Dao et al. 2020). Di Amerika Selatan seperti Brazil, khususnya di Negeri São Paulo, menggunakan versi IKA yang dibangunkan oleh CETESB (Syarikat Alam Sekitar Negeri São Paulo) yang dibina berdasarkan model NSF (National Sanitation Foundation) tetapi termasuk penunjuk kepekatan nutrien dan pepejal yang sesuai dengan keseimbangan alam sekitar tempatan (Valentini et al. 2021).

Manakala di rantau Asia seperti India, Lembaga Kawalan Pencemaran Pusat (CPCB) menggunakan model IKA yang lebih ringkas memfokuskan pada pH, BOD, DO, nitrat, kekonduksian, dan bakteria koliform untuk memantau kesihatan sungai, dengan skor melebihi 100 menunjukkan kualiti yang tidak baik (Kharake & Raut, 2021). Sementara itu, China menggunakan piawaian kualiti air permukaan kebangsaannya (GB3838-2002), mengklasifikasikan air kepada lima kategori berdasarkan kesesuaian untuk kegunaan yang berbeza, walaupun penyelidik dan agensi tempatan kadangkala menyesuaikan formula IKA untuk keperluan serantau (Hu et al. 2022). Di Eropah, Arahkan Rangka Kerja Air (WFD) tidak bergantung pada IKA komposit tetapi menilai badan air berdasarkan status ekologi dan kimia, termasuk penunjuk biologi seperti makroinvertebrata dan fitoplankton (Van Ael et al. 2015). Malaysia menggunakan JAS-IKA yang diseragamkan secara nasional menggunakan enam parameter DO, BOD, COD, nitrogen ammonia, pH, dan jumlah pepejal terampai, untuk mengklasifikasikan air sungai sebagai bersih, sedikit tercemar, atau tercemar (JAS, 2020; Yaakub et al. 2018).

Terdapat banyak stesen pemantauan kualiti air untuk memantau IKA sungai yang bertabur di seluruh Malaysia khususnya di Negeri Pahang seperti Sungai Pahang, Sungai

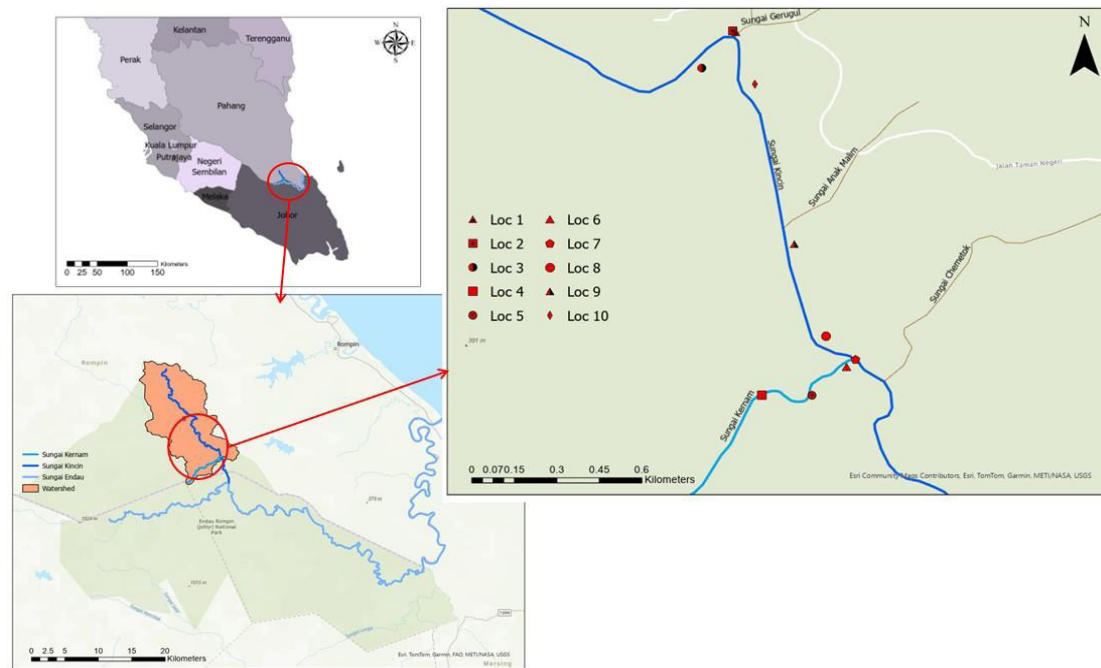
Temerloh, dan Sungai Rompin. Walau bagaimanapun, penerbitan berkenaan kualiti air di anak sungai dalam kawasan HPT dan HSK adalah masih terhad dan hanya beberapa kajian melaporkan status kualiti air dalam literatur seperti Sungai Tahan dan Sungai Sat di Taman Negara Pahang (Nadiah et al. 2022) dan Hutan Simpan Belum, Perak (Hamid et al. 2024). Oleh yang demikian, adalah perlu untuk menerbitkan data terkini mengenai status kualiti air sungai-sungai dalam kawasan tadahan TNR bagi memastikan kelestarian kawasan tersebut, khususnya ekosistem dan kegunaan rekreasi oleh pengunjung Taman Negeri. Objektif kajian ini adalah untuk menilai kualiti air sungai di HSK yang terletak Lembangan TNR, Pahang, berdasarkan Indeks Kualiti Air Jabatan Alam Sekitar (JAS-IKA) dan mengklasifikasikan sungai mengikut Piawaian Kualiti Air Kebangsaan (NWQS). Kajian ini juga membandingkan indeks IKA yang diperoleh dengan beberapa penerbitan kualiti air di kawasan hutan simpan sebagai garis dasar kualiti air di TNR.

METODOLOGI

LOKASI KAJIAN DAN PENSAMPELAN

Taman Negeri Rompin (TNR) terletak di bahagian selatan Negeri Pahang, kira-kira 35 km dari Bandar Rompin, 180 km dari Kuantan, dan bersempadan dengan Bandar Mersing di Johor. TNR meliputi kawasan seluas 31,979 hektar yang terdiri daripada hutan pamah Dipterokarpa, pembentukan hutan edafik, dan sistem sungai. Kawasan ini berfungsi sebagai kawasan tadahan air bagi beberapa anak sungai dan sungai utama, serta kaya dengan biodiversiti. Ia turut menjadi kawasan hulu kepada sungai utama, iaitu Sungai Endau. Sungai Endau merupakan sumber air penting bagi Negeri Johor, yang menyokong aktiviti pengairan dan pembangunan ekonomi.

Dalam kajian ini, penyelidikan telah dijalankan di dalam kawasan TNR dengan memfokuskan kepada sepuluh lokasi persampelan di sepanjang Sungai Kincin dan Sungai Kernam, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1 dan pensampelan telah dilakukan pada pertengahan Februari 2025. Sampel air diambil dengan menggunakan kaedah pensampelan ambil (*grab*) pada kedalaman kira-kira 30 cm di bawah permukaan air. Sampel air dikumpulkan secara tiga ulangan menggunakan peralatan pensampel ambil dan diawet mengikut kaedah pengawetan yang disyorkan oleh Kaedah analisis air APHA (*American Public Health Association*).



RAJAH 1. Lokasi kajian di Kincin dan Sungai Kernam di hutan simpan Taman Negeri Rompin Pahang.

ANALISISA AIR DAN INDEKS KUALITI AIR

Parameter yang dikaji merangkumi suhu air (T), pH, oksigen terlarut (DO), jumlah pepejal terampai (SS), permintaan oksigen biokimia (BOD), permintaan oksigen kimia (COD), dan nitrogen ammonia (AN). Parameter *in situ* seperti suhu, pH dan DO diukur menggunakan *Probe Multiparameter* YSI 556MPS, manakala parameter selebihnya, SS (kaedah gravimetrik), BOD (ujian 5 hari), COD (kaedah spektrofotometri HACH - Kaedah 8000), dan AN (kaedah spektrofotometri HACH - Kaedah 8155), dianalisis di dalam makmal.

Keputusan analisis sampel digunakan untuk mengira Indeks Kualiti Air berdasarkan Jabatan Alam Sekitar Malaysia (JAS-IKA, JAS 2020) untuk menilai status kualiti air di lokasi pensampelan. IKA menghasilkan nilai indikatif, yang dibandingkan dengan piawaian klasifikasi

JAS untuk menganggar kualiti sungai atau sungai. Data kualiti air yang diperolehi digunakan untuk mengira kedua-dua nilai sub-indeks dan keseluruhan IKA. Formula yang digunakan untuk pengiraan IKA ditunjukkan dalam Persamaan 1, di mana SIDO, SIBOD, SICOD, SIAN, SISS, dan SIpH masing-masing mewakili sub-indeks untuk DO, BOD, COD, AN, SS dan pH.

$$WQI = (0.22 * SIDO) + (0.19 * SIBOD) + (0.16 * SICOD) + 0.15 * SIAN + (0.16 * SISS) + (0.12 * SIpH) \quad (1)$$

Pengelasan IKA berdasarkan parameter seperti dalam ringkasan dalam Jadual 1 dan Jadual 2, yang boleh dikelaskan kepada tiga kategori: air bersih (80-100), air sederhana tercemar (60-79) dan air tercemar (0-59).

JADUAL 1. Klasifikasi Indeks Kualiti Air di Malaysia (JAS, 2020)

Parameter	Unit	Kelas				
		I	II	III	IV	V
pH	-	>7	6-7	5-6	<5	>5
DO	mg/L	>7	5-7	3-5	1-3	<1
BOD	mg/L	<1	1-3	3-6	6-12	>12
COD	mg/L	<10	10-25	25-50	50-100	>100
SS	mg/L	<25	25-50	50-150	150-300	>300
NH ₃ -N	mg/L	<0.1	0.1-0.3	0.3-0.9	0.9-2.7	>2.7
IKA	-	>92.7	76.5-92.7	51.9-76.5	31-51.9	<31

JADUAL 2. Skala Penilaian Umum untuk Indeks Kualiti Air (IKA)

Peratusan IKA (%)	Status kualiti air
80-100	Bersih
60-79	Sederhana tercemar
0-59	Tercemar

ANALISA STATISTIK

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan perisian IBM SPSS Statistics versi 27 dan Microsoft Excel (2021). Analisis statistik digunakan dalam kajian ini ialah Analisis Varians Sehalu (ANOVA) diikuti oleh Ujian Post Hoc Tukey dengan tahap keyakinan pada 95% ($p < 0.05$) bagi menentukan perbezaan yang signifikan antara parameter kualiti air dan lokaliti stesen pensampelan dengan anggapan data bertabur secara normal.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

CIRI-CIRI FIZIKO-KIMIA KUALITI AIR

Kualiti air di kawasan HSK merupakan penunjuk kritikal terhadap kesihatan ekosistem, kerana ia mencerminkan pengaruh gabungan antara proses semula jadi dan aktiviti antropogenik dalam persekitaran yang dilindungi ini. Sumber utama pencemaran sungai di kawasan pemuliharaan lazimnya merangkumi air larian permukaan yang membawa sedimen, nutrien dan sampah daun dari kawasan hutan, serta sisa daripada aktiviti pertanian atau pelancongan yang berlaku berhampiran kawasan tadahan. Pembuangan sisa secara tidak terkawal oleh pengunjung, serta aktiviti pertanian atau pengusahasilan hutan, juga boleh menyumbang kepada pencemaran di bahagian hulu sungai.

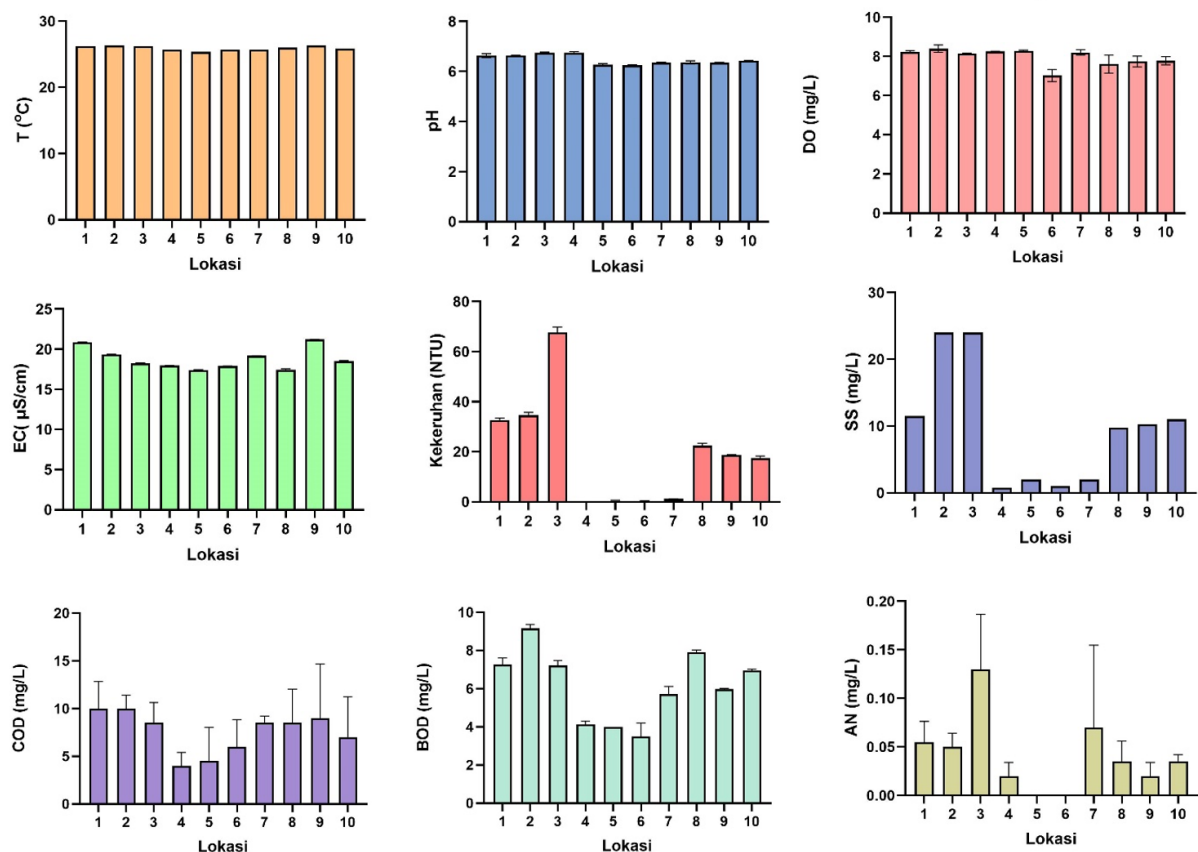
Bagi memperoleh pemahaman yang lebih lanjut tentang kualiti air di kawasan hulu sungai dalam HSK ini, perbincangan berikut memberi tumpuan kepada ciri-ciri fiziko-kimia air sungai, dengan perbandingan terhadap nilai rujukan yang dilaporkan dalam kesusasteraan sedia ada. Rajah 2 memaparkan plot keputusan bagi parameter fiziko-kimia yang diperoleh daripada 10 titik persampelan

merentasi dua batang sungai di Taman Negeri Rompin (TNR). Nilai pH dalam kajian ini berada dalam julat antara 6.21 hingga 6.77, menunjukkan keadaan yang sedikit berasid hingga hampir neutral. Tiada perbezaan signifikan diperhatikan melalui analisis ANOVA, dengan nilai $p = 0.125$ ($p > 0.05$) bagi semua lokasi. Julat ini masih berada dalam lingkungan nilai jangkaan bagi hulu Sungai, di mana pH lazimnya terletak antara 6.5 hingga 7.5, yang sesuai untuk kebanyakan organisma akuatik (Nguyen & Cai 2019).

Namun demikian, pH boleh berubah-ubah bergantung kepada jenis tanah, formasi geologi, jumlah hujan, dan corak aliran permukaan. Di kawasan bertanah berasid atau semasa tempoh hujan lebat, pH berpotensi menurun sedikit akibat peningkatan input asid organik. Walau bagaimanapun, air sungai di kawasan yang terpelihara dan tidak terganggu secara amnya kekal stabil dalam julat pH semula jadi.

Suhu air, yang mempengaruhi kadar tindak balas biokimia, keterlarutan gas, dan metabolisme keseluruhan organisma akuatik, ber julat antara 25.4 hingga 26.3°C semasa pensampelan. Nilai ini adalah tipikal bagi aliran sungai hutan di Malaysia, terutamanya memandangkan pensampelan dilakukan pada hari hujan di kawasan berlorek dan beraltitud tinggi. Kehadiran kanopi hutan yang tebal serta keadaan cuaca yang berawan berkemungkinan menyumbang kepada suhu air yang stabil dan agak rendah.

Pengukuran oksigen terlarut (DO) menunjukkan nilai antara 98% hingga 100% ketepuan, yang menunjukkan persekitaran aliran sungai yang kaya dengan oksigen. Analisis ANOVA tidak menunjukkan perbezaan yang signifikan, dengan nilai $p = 0.341$ ($p > 0.05$). Ketepuan DO yang tinggi ini adalah tipikal bagi kawasan tadahan hutan yang terpelihara, dan lazimnya menyokong ekosistem akuatik yang sihat. Penemuan ini sejajar dengan dapatan Gibbs et al. (2022), yang melaporkan bahawa tahap DO cenderung menurun semasa musim panas disebabkan oleh penguraian bahan organik yang lebih tinggi serta aliran sungai yang berkurangan, yang boleh membawa kepada keadaan hipoksik. Namun demikian, dalam kajian ini, keadaan aliran sungai yang sejuk serta litupan hutan yang baik telah membantu mengekalkan tahap DO yang tinggi.



RAJAH 2. Kualiti air Sungai Kincin (lokasi 1,2,3,7,8,9 dan 10) dan Sungai Kernam (lokasi 4,5 dan 6)

Kekonduksian elektrik (EC) merupakan parameter yang menunjukkan kandungan ionik dalam air, dengan julat antara 17.36 hingga 21.22 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nilai ini adalah konsisten dengan julat jangkaan bagi aliran sungai hutan di Malaysia, yang biasanya berada dalam lingkungan 20 hingga 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sekali gus mencerminkan tahap ion terlarut yang rendah dan pengaruh antropogenik yang minimum. EC juga diketahui berkorelasi dengan parameter kualiti air lain seperti suhu, jumlah pepejal terapan, dan permintaan oksigen kimia (COD) (Oyem et al. 2014). Di kawasan tadahan HSK yang mempunyai tanah liat dan kadar air larian yang tinggi, nilai EC boleh meningkat disebabkan oleh pengangkutan zarah ionik ke dalam sistem sungai. Analisis ANOVA mengikut lokasi menunjukkan perbezaan yang signifikan, dengan nilai $p < 0.001$ ($p < 0.05$) bagi kebanyakan titik persampelan, kecuali antara Titik 8 dan 5 serta Titik 7 dan 2, yang tidak menunjukkan perbezaan signifikan.

Kepekatan permintaan oksigen kimia (COD) dalam kajian ini berada dalam julat 2 hingga 13 mg/L, yang menunjukkan tahap pencemaran organik dan bukan organik yang rendah, sekali gus mengesahkan keadaan air yang relatif tidak tercemar. COD ialah satu ukuran yang boleh dipercayai bagi jumlah oksigen yang diperlukan untuk

menguraikan semua bahan teroksida dalam air, termasuk bahan organik dan bukan organik. Analisis ANOVA berdasarkan lokasi tidak menunjukkan perbezaan yang signifikan, dengan nilai $p = 0.462$ ($p > 0.05$).

Sementara itu, permintaan oksigen biokimia (BOD), yang mewakili jumlah oksigen yang digunakan oleh mikroorganisma semasa penguraian bahan organik, ber julat antara 3 hingga 9 mg/L. Dalam beberapa kes, nilai BOD dilaporkan sama atau sedikit lebih tinggi daripada COD, yang merupakan keadaan tidak lazim. Percanggahan ini adalah disebabkan oleh kemasukan bahan organik segar yang mudah terbiodegradasi seperti daun atau sedimen yang terbawa ke dalam sungai akibat kejadian hujan semasa pensampelan dijalankan. Sebatian organik terbitan hutan seperti ini lebih mudah dimetabolisma dengan cekap oleh mikrob dan selalunya tahan terhadap pengoksidaan dikromat, yang membawa kepada nilai COD yang lebih rendah. Pemerhatian lapangan menunjukkan hujan konsisten berlaku selama seminggu sebelum pensampelan, yang berkemungkinan telah meningkatkan pemuatan bahan organik dan seterusnya merangsang aktiviti mikrob dalam air yang menyebabkan peningkatan nilai BOD. Analisis ANOVA terhadap BOD menunjukkan terdapat perbezaan yang signifikan ($p < 0.05$) di beberapa lokasi, terutamanya

antara Sungai Kernam dan Sungai Kincin. Dapatan ini juga disokong dengan justifikasi oleh Lv et al. (2024), kandungan COD adalah termasuk karbon organik refraktori (RDOC) yang mana tidak mewakili permintaan oksigen mikrob, manakala BOD menunjukkan kebolehbidegradan. Oleh itu, perbezaan boleh berlaku terutamanya diperairan semula jadi, terutamanya di mana RDOC adalah ketara.

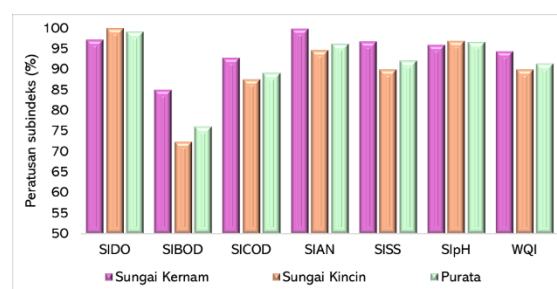
Nitrogen ammonia (AN) merupakan parameter utama yang berkaitan dengan eutrofikasi dan kesihatan ekologi, dan didapati kekal secara konsisten di bawah 0.2 mg/L untuk semua titik pensampelan. AN dalam air terhasil terutamanya melalui penguraian bahan organik oleh bakteria heterotrofik, dan lazimnya diasimilasikan dengan cepat oleh tumbuhan dalam zon trofogenik. Dalam perairan yang kaya dengan oksigen, paras AN biasanya rendah. Namun demikian, dalam persekitaran yang kekurangan oksigen seperti di kawasan air bertakung atau lapisan air yang lebih dalam pengurangan proses nitrifikasi boleh menyebabkan pembebasan AN daripada sedimen ke dalam air. Nilai AN yang rendah secara konsisten dalam kajian ini menyokong pencirian sungai sebagai sistem yang beroksigen baik dan stabil dari segi ekologi. Analisis statistik menunjukkan tiada perbezaan yang signifikan antara lokasi, dengan nilai $p=0.051$ ($p>0.05$).

Jumlah pepejal terampai (SS), yang merangkumi zarah organik dan bukan organik yang kekal dalam ampai, didapati berjalut antara 0.75 hingga 24 mg/L. Nilai kekeruhan, pula, berbeza antara 0.05 hingga 69.2 NTU. Analisis ANOVA menunjukkan perbezaan yang signifikan bagi kedua-dua parameter ini, dengan nilai $p<0.001$ ($p<0.05$), khususnya di antara lokasi-lokasi di sepanjang Sungai Kincin dan Sungai Kernam. Kedua-dua parameter ini merupakan petunjuk penting bagi tahap kejelasan air dan beban zarah terampai dalam sistem sungai. Secara keseluruhannya, keputusan menunjukkan bahawa kedua-dua sungai yang dikaji mempunyai tahap SS dan kekeruhan yang rendah, sejajar dengan kadar hakisan tanah atau input sedimen yang minimum, meskipun terdapat kejadian hujan sebelum pensampelan.

KLASIFIKASI INDEKS KUALITI AIR

Indeks kualiti air memberikan gambaran keseluruhan tentang keadaan sungai dan status kesihatan. IKA ialah sistem penarafan yang mengukur kebolehterimaan air untuk penggunaan dengan menggabungkan kesan pelbagai kriteria kualiti air. Berdasarkan carta bar dalam Rajah 3, kedua-dua Sungai Kernam dan Kincin menunjukkan nilai sub-indeks yang tinggi secara amnya merentas parameter IKA, menunjukkan kualiti air yang baik. Sungai Kernam secara konsisten merekodkan nilai sub-indeks yang lebih tinggi sedikit dalam kebanyakan

parameter, terutamanya dalam SIBOD, SICOD, dan SISS, mencadangkan keadaan air biokimia dan kimia yang lebih baik berbanding dengan Sungai Kincin. Perbezaan yang paling ketara adalah dalam sub-indeks SIBOD, di mana Sungai Kincin mendapat markah yang jauh lebih rendah, menunjukkan tahap pencemaran organik atau permintaan oksigen yang lebih tinggi. Kedua-dua sungai menunjukkan nilai yang tinggi untuk SIDO, SIAN, dan SIpH, menunjukkan tahap ketepuan oksigen terlarut yang baik, nitrogen ammonia yang rendah dan keadaan pH yang stabil. IKA keseluruhan untuk kedua-dua sungai termasuk dalam Kelas I hingga II, menandakan kualiti air yang baik sesuai untuk rekreasi. Sungai Kernam sedikit mengatasi Sungai Kincin dalam keseluruhan IKA, membayangkan bahawa ia berada dalam keadaan ekologi yang lebih baik sedikit kerana ia merupakan anak sungai kepada Sungai Kincin.



RAJAH 3. Purata subindeks dan indeks kualiti air (IKA) keseluruhan Sungai Kernam dan Sungai Kincin

Indeks kualiti air sungai ialah 89.92 dan 94.28, masing-masing bagi Sungai Kincin dan Sungai Kernam, dikategorikan sebagai Kelas II dan Kelas I (Jadual 3). Subindeks masing-masing bagi setiap parameter ialah DO dalam Kelas III, BOD dalam Kelas IV, COD dalam Kelas V, AN dalam Kelas III, TSS dalam Kelas I dan pH dalam Kelas III. Sementara itu, kualiti air bekas tasik perlombongan turut dianalisis berdasarkan kesesuaiannya untuk aktiviti rekreasi, seperti yang disyorkan oleh JAS (2020). Keputusan IKA menunjukkan bahawa kedua-dua sungai mempamerkan keadaan kualiti air yang sangat baik. Air Kelas I, seperti yang diperhatikan di Sungai Kernam (IKA 94.28), sesuai untuk pemuliharaan dan menyokong spesies akuatik yang sensitif, hanya memerlukan rawatan minimum untuk bekalan air awam. Kelas II, seperti yang diperhatikan di Sungai Kincin (IKA 89.92), masih mewakili kualiti air yang baik, sesuai untuk kegunaan rekreasi dan rawatan air konvensional untuk kegunaan manusia. Klasifikasi ini mencerminkan sifat tadahan hutan pemuliharaan yang agak tidak terganggu dan kesan antropogenik yang minimum.

JADUAL 3. Purata Indeks Kualiti Air, klasifikasi dan status

	SIDO	SIBOD	SICOD	SIAN	SISS	SIpH	IKA	Status
Sungai Kincin	100.00	72.31	87.42	94.58	89.94	96.84	89.92	Bersih
Kelas	I	II	I	I	I	II	II	
Sungai Kernam	97.13	84.89	92.67	99.80	96.74	95.88	94.28	Bersih
Kelas	I	III	I	I	I	II	I	

PERBANDINGAN PARAMETER KUALITI AIR BERDASARKAN KAWASAN PEMULIHARAAN

Perbandingan ciri-ciri kualiti air dilakukan berdasarkan data kawasan rizab di Malaysia yang dilaporkan sebelum ini iaitu Hutan Simpan Belum, Perak (Hamid et al. 2024), Taman Negara Tahan, Pahang (Nadiah et al. 2022), Sungai Sedim, Hutan Simpan Gunung Inas, Kedah (Hashim et al. 2021), dan Santuari Hidupan Liar Sibutiri, Sarawak et al. al., 2011). Perbandingan ini menunjukkan variasi berbeza dalam ciri fizikokimia, kemungkinan dipengaruhi oleh faktor persekitaran dan hidrologi tempatan. Paras oksigen terlarut (DO) adalah tertinggi di Sungai Sedim, Hutan Simpan Gunung Inas, Kedah (107.72%), diikuti oleh kerja semasa (98.64%) dan Taman Negara Tahan, Pahang (96.82%), menunjukkan perairan beroksigen baik berkemungkinan disebabkan oleh halaju aliran tinggi atau aktiviti fotosintesis. Sebaliknya, Hutan Simpan Belum, Perak (41.94%) dan Santuari Hidupan Liar Hutan Bakau Sibuti, Sarawak (42.36%) merekodkan kepekatan DO yang rendah, yang mungkin menunjukkan aliran air yang lebih perlahan, input bahan organik yang lebih tinggi, atau had oksigen semula jadi yang tipikal sistem bakau.

Permintaan oksigen biokimia (BOD) adalah tertinggi di Hutan Simpan Belum (15.93 mg/L), menunjukkan kandungan organik yang sedikit tinggi, manakala yang terendah diperhatikan di Sungai Sedim (0.93 mg/L), menunjukkan bahan organik terbiodegradasi yang minimum. Kerja semasa, TNR (7.14 mg/L) dan Sibuti (5.88 mg/L) merekodkan tahap BOD sederhana, manakala Taman Negara menunjukkan tahap terendah dalam kalangan taman hutan (4.89 mg/L). Menariknya, permintaan oksigen kimia (COD) tertinggi di Sungai Sedim (29.20 mg/L), menunjukkan kemungkinan wujudnya bahan pencemar organik tidak terbiodegradasi, diikuti oleh Taman

Negara (14.00 mg/L), Sibuti (15.80 mg/L), dan Hutan Simpan Belum (13.00 mg/L). TNR mempunyai nilai COD terendah (8.79 mg/L), menunjukkan kualiti air kimia yang lebih baik berbanding tapak lain.

Kepekatan nitrogen ammonia (AN) secara amnya rendah di semua tapak, dengan nilai tertinggi direkodkan di Sibuti (0.18 mg/L), diikuti oleh Hutan Simpan Belum (0.11 mg/L) dan TNR (0.06 mg/L), mencadangkan beberapa tahap sisa nitrogen yang mungkin daripada penguraian semula jadi atau input luaran. Taman Negara (0.04 mg/L) dan Sungai Sedim (0.03 mg/L) mempunyai kepekatan AN terendah. Data pepejal terampai (SS) menunjukkan Rompin (13.21 mg/L) dan Taman Negara (13.00 mg/L) mempunyai bahan zarah yang lebih tinggi dalam ruang air, yang boleh dikaitkan dengan penggantungan semula sedimen atau larian permukaan. Tahap SS yang lebih rendah dilaporkan di Hutan Simpan Belum (7.165 mg/L) dan Sungai Sedim (4.50 mg/L), manakala data SS untuk Sibuti tidak tersedia. Nilai pH di semua tapak berjalut daripada sedikit berasid kepada neutral, dengan Rompin pada 6.51, Sibuti pada 6.53, Taman Negara pada 6.78, Hutan Simpan Belum pada 6.86, dan Sungai Sedim pada 7.07, kesemuanya dalam had yang boleh diterima untuk ekosistem air tawar.

Penemuan ini menunjukkan variasi kepelbagaian dalam kualiti air di seluruh sistem sungai berhutan Malaysia, dengan beberapa lokasi seperti Sungai Sedim menunjukkan pengoksigenan yang sangat baik dan BOD yang rendah, namun menunjukkan COD yang tinggi, manakala yang lain seperti Hutan simpan Belum menunjukkan tanda-tanda tekanan organik. Perbezaan ini mungkin dipengaruhi oleh aktiviti guna tanah, jenis hutan, keadaan hidrologi, dan tahap gangguan manusia atau status perlindungan hutan simpan.

JADUAL 4. Perbandingan beberapa parameter fizikal-kimia (purata) kualiti air sungai yang terletak dalam kawasan perlindungan di Malaysia.

Lokasi kajian	DO (%)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	AN (mg/L)	SS (mg/L)	pH	Rujukan
Taman Negeri Rompin, Pahang	98.64	7.14	8.79	0.06	13.21	6.51	Kajian ini
Hutan Simpan Belum, Perak	41.94	15.93	13.00	0.11	7.17	6.86	(Hamid et al. 2024)
Taman Negara Tahan, Pahang	96.82	4.89	14.00	0.04	13.00	6.78	(Nadiah et al. 2022)

bersambung...

...sambungan

Sungai Sedim, Hutan Simpan Gunung Inas, Kedah	107.72	0.93	29.20	0.03	4.50	7.07	(Hashim et al. 2021)
Santuari Hidupan Liar Sibuti, Miri Sarawak	42.36	5.88	15.80	0.18	5.00	6.53	Gandaseca et al. (2011)

CABARAN, PERSPEKTIF SEMASA, DAN PENYELIDIKAN MASA DEPAN ASPEK KUALITI AIR DI KAWASAN KONSERVATIF

Kawasan hutan merupakan penapisan air secara semula jadi usaha untuk mengekalkan kualiti hutan simpan dan melindungi kawasan tersebut daripada aktiviti antropogenik merupakan cabaran terbesar dalam era permodenan. Era permodenan telah banyak mengeksploitasi sumber asli, terutamanya pembukaan kawasan tanah dan hutan, untuk penempatan manusia dan pengekstrakan sumber seperti galian dan kayu. Cabaran ini menekankan keperluan untuk pengurusan sumber hutan sebagai kawasan tadahan air bersepadu, penglibatan komuniti, dan pemantauan yang konsisten untuk mengekalkan kualiti air dan integriti ekologi di kawasan HSK seperti TNR.

Aktiviti pembukaan kawasan hutan untuk tujuan pertanian dan pengusahasilan boleh menyebabkan peningkatan aliran sedimen, nutrien, dan bahan pencemar ke dalam sungai berhampiran, sekali gus menurunkan kualiti air. Antara cabaran utama dalam mengekalkan kesihatan HSK adalah aktiviti rekreasi, yang sering menyebabkan pencemaran tidak terkawal, pembuangan sampah, serta kerosakan habitat yang dilindungi (Mohd Azahari 2023).

Aktiviti pelancongan turut memberi impak negatif kepada HSK, terutamanya apabila disertai dengan sikap tidak bertanggungjawab dan amalan pengurusan sampah yang lemah. Pembuangan sampah secara sembarangan, pelupusan sisa makananyang tidak terurus, dan gangguan terhadap tumbuh-tumbuhan boleh menyumbang kepada peningkatan beban nutrien dan pencemaran mikrob. Semasa musim hujan, aliran air permukaan dan hakisan terutamanya di kawasan tropika boleh membawa sedimen, bahan organik, dan bahan pencemar lain ke dalam sistem sungai, khususnya dari kawasan yang terdedah atau telah terganggu. Perspektif semasa dalam penilaian kualiti air di HSK seperti TNR, menekankan keperluan pemantauan bersepadu yang mengambil kira kedua-dua dinamik ekosistem semula jadi dan kesan aktiviti manusia setempat. Selain daripada penilaian melalui parameter fiziko-kimia, penggunaan parameter biologi seperti kepelbagaian makroinvertebrata atau kehadiran alga dapat memberikan gambaran yang lebih menyeluruh tentang status kesihatan ekologi sungai di kawasan tadahan berhutan.

Memandangkan kawasan di TNR masih berada dalam keadaan relatif murni namun kawasan tanah kerajaan di sekitarnya menunjukkan beberapa tanda gangguan. Usaha pada masa hadapan wajar memberi tumpuan kepada pemantauan kualiti air secara berterusan dalam jangka panjang bagi mewujudkan corak garis dasar dan mengesan tanda awal kemerosotan kualiti air. Di samping itu, penggunaan teknologi penderiaan jauh dan Sistem Maklumat Geografi (GIS), khususnya dalam pemetaan perubahan guna tanah dan ciri-ciri tadahan air, dapat meningkatkan pemahaman terhadap sumber pencemaran serta corak larian permukaan (Muhammad Sukri et al. 2025).

Sebagai langkah untuk mengekalkan kualiti air sungai di kawasan hutan simpan, perancangan masa hadapan perlu merangkumi pendekatan seperti pemuliharaan berasaskan komuniti, pembinaan kapasiti dalam kalangan kakitangan taman untuk menjalankan penilaian lapangan, serta pendekatan berasaskan alam semula jadi, termasuk pemeliharaan zon penampan riparian dan pengurusan impak daripada kehadiran pelawat. Selain itu, pembangunan sistem amaran awal yang menggunakan kecerdasan buatan dapat membolehkan respons yang lebih pantas terhadap insiden pencemaran, sekali gus menyokong usaha pengurusan mampan di kawasan perlindungan ini.

KESIMPULAN

Sumber air di Hutan Simpanan Kekal merupakan salah satu sumber semula jadi penting bagi bekalan air domestik, di samping berperanan sebagai landskap semula jadi yang menarik untuk tujuan rekreasi dan riadah. Kajian ini mengesahkan bahawa kualiti air di Taman Negeri Rompin (TNR) kekal berada dalam keadaan bersih dan stabil dari segi ekologi, dengan nilai Indeks Kualiti Air (IKA) menunjukkan status Kelas I dan II di sepanjang Sungai Kernam dan Sungai Kincin. Kajian ini dijalankan secara sekali pensampelan, namun mencukupi untuk membuktikan status semasa sungai bagi kawasan tadahan di TNR. Setrusnya, pemantauan secara temporal dicadangkan untuk memastikan kesihatan sumber air di HSK kekal terpelihara dalam jangka masa panjang.

Kebanyakan parameter fiziko-kimia yang dikaji berada dalam had yang boleh diterima, sekali gus mencerminkan

keadaan hutan pemuliharaan yang relatif tidak terganggu. Namun demikian, perbezaan setempat dalam parameter seperti permintaan oksigen biokimia dan jumlah pepejal terampai mencadangkan kewujudan input episodik daripada air larian semula jadi atau aktiviti antropogenik berskala kecil, khususnya semasa musim hujan. Perlindungan berterusan, pemantauan yang disasarkan, serta pengurusan proaktif terutamanya dalam menghadapi tekanan daripada aktiviti pelancongan dan kebolehubahan iklim adalah penting untuk mengekalkan kesihatan ekologi dan memastikan penggunaan sistem sungai yang lestari di kawasan perlindungan.

PENGHARGAAN

Penyelidikan ini mendapat bantuan kewangan dari Jabatan Perhutanan Pahang- Kajian Kualiti Air Di Lembangan Taman Negeri Rompin, Pahang GA003-2025 (Universiti Malaya: Wan-Mohtar, WAAQI).

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N., El Rayess, Y., & El Azzi, D. 2023. A comprehensive review of water quality indices (IKAs): History, models, attempts and peTNRectives. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 22(2): 349–395. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7>
- Dao, V., Urban, W., & Hazra, S. B. 2020. Introducing the modification of Canadian Water Quality Index. *Groundwater for Sustainable Development* 11: 100457. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100457>
- Gandaseca, S., Rosli, N., Ngayop, J., & Arianto, C. I. 2011. Status of water quality based on the physico-chemical assessment on river water at Wildlife Sanctuary Sibuti Mangrove Forest, Miri Sarawak. *American Journal of Environmental Sciences* 7(3).
- Gibbs, M. S., Wallace, T., & Mosley, L. M. 2022. Constraining organic matter composition and dynamics as a dominant driver of hypoxic blackwater risk during river Murray floodplain inundation. *Hydrological Processes* 36(3). <https://doi.org/10.1002/hyp.14529>
- Hamid, A. N., Kamal, A. N., & Adis, A. A. 2024. Water quality assessment at Royal Belum State Park, Perak, Malaysia. *Larhyss Journal* (57). <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/index>
- Hashim, M., Ali, M. S. M., Nayan, N., Mahat, H., Saleh, Y., Norkhaidi, S. B., See, K. L., & Said, Z. M. 2021. The impact of ecotourism on the water quality in Sedim River, Kedah, Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 683(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/683/1/012023>
- Hu, L., Chen, L., Li, Q., Zou, K., Li, J., & Ye, H. 2022. Water quality analysis using the CCME-IKA method with time series analysis in a water supply reservoir. *Water Supply* 22(7): 6281–6295. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.245>
- Kharake, A. C., & Raut, V. S. 2021. An assessment of water quality index of Godavari river water in Nashik city, Maharashtra. *Applied Water Science* 11(6). <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01432-2>
- Lv, Z., Ran, X., Liu, J., Feng, Y., Zhong, X., Jio, N. 2024. Effectiveness of chemical oxygen demand as an indicator of organic pollution in aquatic environments. *Ocean-Land-Atmos. Res.* 3 (0050). <https://doi.org/10.34133/olar.0050>
- Mahe, A., Salihu, N., & Muhammad Sani, M. 2024. *PeTNRective Chapter: Physicochemical Parameters and Water Quality*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1006354>
- Mohd Azhari, 2023. Pemelihara Hutan SISFEC gelas cabaran besar banteras aktiviti pencerobohan https://web.upm.edu.my/berita/pemelihara_hutan_sisfec_gelas_cabaran_besar_banteras_aktiviti_pencerobohan-74284 [14 July 2025]
- Muhammad Sukri, N.S., Abdul Maulud, K.N., Syed Abdul Rahman, S.A.F., Wan Mohd Jaafar, W.S., et al. 2025. Enhancing urban flood vulnerability mapping with multi-criteria decision analysis. *Jurnal Kejuruteraan* 37(7). [https://doi.org/10.17576/jkukm-2025-37\(7\)-40](https://doi.org/10.17576/jkukm-2025-37(7)-40)
- Nadiah, N., Firdaus Hum, M., Buyong, F., & Chay, T. C. 2022. Comparative water quality analysis between Tahan River and Sat River in Taman Negara Pahang, Malaysia. *Malaysian Journal of Chemistry* 24(2).
- Nguyen, C. T. T., & Cai, Y. 2019. Physicochemical characteristics of streams in Bukit Timah Nature Reserve, Singapore. *Gardens' Bulletin Singapore* 71(1): 491–556. [https://doi.org/10.26492/gbs71\(suppl.1\).2019-20](https://doi.org/10.26492/gbs71(suppl.1).2019-20)
- Oyem, H. H., Oyem, I. M., & Ezeweali, D. 2014. Temperature, pH, electrical conductivity, total dissolved solids and chemical oxygen demand of groundwater in Boji-BojiAgbor/Owa area and immediate suburbs. *Research Journal of Environmental Sciences* 8(8): 444–450. <https://doi.org/10.3923/rjes.2014.444.450>
- Pásková, M., Štekerová, K., Zanker, M., Lasisi, T. T., & Zelenka, J. 2024. Water pollution generated by

- tourism: Review of system dynamics models. *Heliyon* 10(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23824>
- Standard-Kualiti-Air-Sungai-Kebangsaan-Dan-Indeks. Environmental Quality Report 2020; DOE-IKA, Department of Environment Malaysia: Putrajaya, Malaysia, 2020.
- Valentini, M., dos Santos, G. B., & Muller Vieira, B. 2021. Multiple linear regression analysis (MLR) applied for modeling a new IKA equation for monitoring the water quality of Mirim Lagoon, in the state of Rio Grande do Sul—Brazil. *SN Applied Sciences* 3(1). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04005-1>
- Van Ael, E., De Cooman, W., Blust, R., & Bervoets, L. 2015. Use of a macroinvertebrate based biotic index to estimate critical metal concentrations for good ecological water quality. *Chemosphere* 119: 138–144. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.001>
- Yaakub, N., Raoff, M. N. A., Haris, M. N., Halim, A. A. A., & Kamarudin, M. K. A. 2018. Water quality index assesment around industrial area in Kuantan, Pahang. *Journal of Fundamental and Applied Sciences* 9(2S): 731. <https://doi.org/10.4314/jfas.v9i2s.45>