

Pemodelan Kualitas Air Sungai Cikakembang akibat Pembuangan Limbah Organik Menggunakan HEC-RAS

Water Quality Modeling of the Cikakembang River Due to Organic Waste Disposal Using HEC-RAS

Yudha Primus Kristianto¹⁾, Doddi Yudianto²⁾, Finna Fitriana³⁾

^{1,2,3)} Universitas Katolik Parahyangan

Jl. Ciumbuleuit No. 94, Bandung, Indonesia

*Corresponding author: doddi_yd@unpar.ac.id

Diterima: 23 Januari 2025; Direvisi: 26 Februari 2025; Disetujui: 18 Desember 2025

Abstract

The Cikakembang River, a tributary of the Citarum River in Majalaya District, has been polluted due to domestic and textile industrial activities. Although the Citarum Harum program, initiated in 2018, has been considered successful in improving water quality in the Citarum River, pollution in the Cikakembang River remains a serious issue. This study aims to analyze the impact of organic waste disposal on the water quality of the Cikakembang River using HEC-RAS. The modeling results obtained are then used as a basis for formulating pollution control strategies. This study focuses on four water quality parameters: BOD, DO, NH₃-N, and TP. In addition to field measurements of various technical data, this study also includes laboratory testing of twelve (12) water samples taken along the Cikakembang River. The data obtained are used to calibrate a mathematical model with statistical bias and relative error analysis as the objective function. Based on water quality testing results, it was found that the concentrations of BOD, DO, NH₃-N, and TP in the Cikakembang River do not meet Class II water quality standards as stipulated in Government Regulation No. 22 of 2021. Furthermore, HEC-RAS simulation results with various pollution control scenarios indicate that the existing conditions cannot fully address the issue. Therefore, stricter monitoring measures are needed for wastewater quality discharged into the water bodies, including enhancing the capacity of wastewater treatment plants and optimizing river rehabilitation programs to sustainably reduce pollution in the Cikakembang River.

Keywords: Dissolved Oxygen (DO), HEC-RAS, organic waste, water quality modeling, Cikakembang River

Abstrak

Sungai Cikakembang, yang merupakan anak Sungai Citarum di Kecamatan Majalaya, mengalami pencemaran akibat aktivitas domestik dan industri tekstil. Meskipun program Citarum Harum yang dimulai pada tahun 2018 dinilai cukup berhasil dalam meningkatkan kualitas air di Sungai Citarum, namun pencemaran di Sungai Cikakembang masih menjadi permasalahan serius. Studi ini bertujuan untuk menganalisis dampak pembuangan limbah organik terhadap kualitas air Sungai Cikakembang menggunakan HEC-RAS. Hasil pemodelan yang diperoleh kemudian digunakan sebagai dasar dalam merumuskan strategi pengendalian pencemaran yang terjadi. Penelitian ini meninjau empat parameter kualitas air yang menjadi fokus studi yaitu BOD, DO, NH₃-N, dan TP. Selain pengukuran sejumlah data teknis lapangan, studi ini juga mencakup kegiatan uji laboratorium atas dua belas (12) sampel air yang diambil sepanjang aliran Sungai Cikakembang. Data yang diperoleh ini digunakan untuk mengkalibrasi model matematika dengan fungsi objektif analisis statistik bias dan relative error. Berdasarkan hasil uji kualitas air, diketahui bahwa konsentrasi BOD, DO, NH₃-N, dan TP Sungai Cikakembang tidak memenuhi baku mutu Kelas II sebagaimana yang ditetapkan dalam PP No. 22 Tahun 2021. Lebih lanjut, hasil simulasi HEC-RAS dengan sejumlah skenario pengendalian pencemaran menunjukkan bahwa kondisi yang terjadi tidak dapat menyelesaikan permasalahan secara tuntas. Oleh karena itu, diperlukan langkah-langkah pengawasan yang lebih ketat terhadap kualitas air limbah yang dibuang ke badan air, termasuk peningkatan kapasitas instalasi pengolahan air limbah dan optimalisasi program rehabilitasi sungai untuk mengurangi tingkat pencemaran yang terjadi di Sungai Cikakembang.

Kata Kunci: Oksigen terlarut (DO), HEC-RAS, limbah organik, pemodelan kualitas air, Sungai Cikakembang

PENDAHULUAN

Fakta menunjukkan bahwa semakin banyak sungai di Indonesia mengalami pencemaran akibat pembuangan limbah dari berbagai aktivitas manusia (Kurniawansyah et al., 2022). Sumber pencemar tersebut meliputi kegiatan mandi, cuci, kakus (MCK), serta aktivitas industri seperti manufaktur dan pertambangan. Di Kalimantan, misalnya, Sungai Barito dan Sungai Martapura telah tercemar berat akibat kombinasi limbah rumah tangga, kegiatan transportasi sungai, dan eksploitasi pertambangan (Khotimah & Nasruddin, 2022). Temuan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2018) juga menunjukkan bahwa kualitas air di banyak sungai utama di Indonesia, termasuk kedua sungai tersebut, berada pada kategori tercemar berat. Kondisi ini diperburuk oleh pola pemanfaatan sungai yang tidak berkelanjutan, terutama di daerah padat penduduk di mana sungai masih menjadi sumber utama untuk pemenuhan kebutuhan sehari-hari. Oleh karena itu, selain dimanfaatkan, keberlanjutan dan kelestarian sungai perlu dijaga melalui pengelolaan yang lebih baik.

Kondisi pencemaran sungai di Indonesia tidak hanya terjadi di Kalimantan, tetapi juga di Pulau Jawa. Salah satu sungai dengan tingkat pencemaran yang tinggi di Jawa adalah Sungai Citarum (Yenny et al., 2020). Pencemaran di sungai ini terutama bersumber dari berbagai aktivitas manusia, khususnya limbah domestik dan industri yang secara signifikan menurunkan kualitas air (Ekasari et al., 2022). Pada tahun 2013, Sungai Citarum bahkan ditetapkan sebagai salah satu tempat paling tercemar di dunia oleh *Blacksmith Institute* (Blacksmith Institute, 2013). Kondisi tersebut merupakan akibat dari pembuangan limbah secara masif yang terjadi di bagian hulu dan terus memperburuk kualitas air hingga ke bagian hilir (Wijaya et al., 2021). Salah satu wilayah yang memainkan peran terhadap pencemaran ini adalah Kecamatan Majalaya, di mana Sungai Cikakembang, anak Sungai Citarum, merupakan jalur utama pembuangan limbah yang memperburuk pencemaran di wilayah tersebut (Kent et al., 2024). Diperkirakan, sekitar 2.800 ton limbah per hari dari Kecamatan Majalaya berkontribusi signifikan terhadap pencemaran Sungai Cikakembang, yang kemudian mengalir dan mencemari Sungai Citarum (Sumantri & Rahmani, 2020).

Sejak program Citarum Harum diterapkan pada tahun 2018, Sungai Citarum tidak lagi menyandang predikat sebagai sungai paling tercemar di dunia (Prayoga et al., 2022). Namun, meskipun kualitas air sungai telah mengalami peningkatan, pencemaran masih berlanjut dengan

klasifikasi sungai yang berstatus tercemar ringan (Prayoga et al., 2022). Di sisi lain, Kecamatan Majalaya, yang dikenal sebagai pusat industri tekstil sejak lama, tetap menjadi sumber utama pencemaran (Handayani, 2019). Kepadatan pabrik dan permukiman di wilayah ini menyebabkan peningkatan jumlah limbah industri dan domestik yang dibuang ke sungai (F. Fitriana et al., 2024). Berbagai regulasi telah diterapkan oleh pemerintah untuk mengendalikan pembuangan limbah ke sungai sebagai upaya pencegahan pencemaran, termasuk PP No. 22 Tahun 2021, yang menjadi acuan baku mutu air sungai (Polisar, 2023).

Sejumlah penelitian terus dilakukan untuk memantau tingkat pencemaran di Sungai Cikakembang. Meskipun program Citarum Harum berhasil memperbaiki kualitas air di beberapa bagian, pengujian yang dilakukan sejak tahun 2013 menunjukkan peningkatan konsentrasi BOD, COD, dan $\text{NH}_3\text{-N}$ di wilayah hilir Sungai Cikakembang, menandakan bahwa pencemaran tetap berlanjut (Fitriana et al., 2023). Selain menerapkan regulasi untuk membatasi pembuangan limbah, pemerintah setempat juga melakukan berbagai upaya lain untuk mengendalikan pencemaran di Sungai Cikakembang, salah satunya adalah pemasangan akuarium pengendalian limbah. Namun, pemantauan kualitas air melalui akuarium di perbatasan Desa Padamulya sejauh ini belum menunjukkan hasil signifikan dalam memperbaiki kondisi (Fitriana et al., 2023).

Studi sebelumnya menggunakan HEC-RAS untuk memodelkan parameter BOD, DO, dan $\text{NH}_3\text{-N}$ di lima titik Sungai Cikakembang, menunjukkan bahwa kualitas air belum memenuhi standar baku mutu kelas II yang layak untuk berbagai aktivitas manusia (Polisar, 2023). Penelitian ini melanjutkan studi tersebut dengan memodelkan kualitas air menggunakan tiga parameter yang sama, serta menambahkan parameter *Total Phosphorus* (TP) untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif terkait pencemaran akibat limbah domestik. Penambahan TP sebagai parameter baru sangat penting, mengingat fosfor merupakan salah satu nutrisi utama yang berkontribusi terhadap eutrofikasi perairan (Severini et al., 2024). Perairan dengan tingkat eutrofikasi tinggi umumnya memiliki konsentrasi oksigen terlarut yang rendah dan menyebabkan peningkatan produksi biomassa fitoplankton, yang berpotensi membahayakan organisme sungai serta mengurangi kegunaan air bagi manusia, sehingga menurunkan kualitas air sungai (Severini et al., 2024).

Dalam penelitian ini, HEC-RAS dipilih karena kemampuannya dalam memodelkan hidraulik sekaligus kualitas air, khususnya parameter organik

seperti BOD dan DO, secara terintegrasi (Kim et al., 2023). Perangkat lunak ini memiliki tingkat akurasi tinggi dalam mensimulasikan berbagai bentuk penampang sungai dan aliran, sehingga lebih unggul dibandingkan perangkat lain dengan fungsi serupa (Kim et al., 2023). Selain itu, modul kualitas air HEC-RAS dirancang untuk menganalisis dinamika polutan sepanjang sungai dalam rentang waktu tertentu melalui integrasi proses hidrologi, hidraulik, dan reaksi kimia (USACE, 2020).

Dengan keunggulan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan pemodelan kualitas air yang lebih akurat melalui perluasan cakupan pemodelan hingga area hilir dan penambahan parameter baru. Penyesuaian koefisien reaerasi dan deoksigenasi dilakukan untuk mengevaluasi beban limbah, khususnya BOD dan DO, yang berperan penting dalam perencanaan pengendalian pencemaran. Hasil pemodelan kemudian digunakan sebagai dasar dalam merumuskan strategi pengendalian untuk mengurangi dampak pencemaran di Sungai Cikakembang.

METODOLOGI

Daerah Studi & Skematisasi Wilayah

Penelitian ini berfokus pada kajian kualitas air di wilayah Majalaya, khususnya Sungai Cikakembang, sepanjang 5,63 km dari hulu (titik sampling 1) hingga hilir, yaitu pada muara Sungai Cikakembang, tepat sebelum pertemuan dengan Sungai Citarum. Gambar 1 menunjukkan peta lokasi penelitian beserta sembilan (9) titik pengambilan sampel dan sepuluh (10) titik pembuangan limbah di sepanjang aliran Sungai Cikakembang.

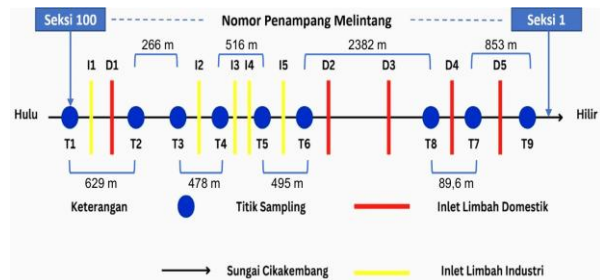
Karakteristik fisik saluran di sepanjang Sungai Cikakembang cukup bervariasi. Pada bagian hulu hingga tengah, kondisi sungai cenderung alami, dengan dasar saluran yang kotor, berumput, dan tidak berbentuk teratur. Sementara itu, pada segmen sungai yang melintasi kawasan industri, dasar saluran umumnya telah diperkuat dengan pasangan batu atau beton sebagai bagian dari upaya perawatan dan pengendalian erosi.

Untuk menganalisis pengaruh pembuangan limbah industri tekstil serta kontribusi limbah domestik terhadap kualitas air, seluruh data dari dua belas (12) titik pengukuran disusun melalui proses skematisasi. Skematisasi ini bertujuan menyederhanakan representasi fisik sungai, sekaligus memetakan hubungan antara titik-titik sampling, titik masuknya limbah industri, dan titik masuknya limbah domestik (Saddang, 2021). Hasil skematisasi tersebut ditampilkan pada Gambar 2,

yang mendeskripsikan secara lebih jelas urutan titik sampling di sepanjang sungai, lokasi lima (5) titik pembuangan limbah domestik, serta lima (5) lokasi pembuangan limbah industri untuk melengkapi informasi yang disajikan sebelumnya pada Gambar 1. Informasi dari skematisasi ini digunakan dalam proses kalibrasi debit, estimasi beban limbah, serta evaluasi pengaruh masing-masing sumber pencemar terhadap perubahan kualitas air di setiap titik pemantauan.



Gambar 1 Peta Lokasi Sampling dan Pembuangan Limbah (Sumber: Google Earth, 2025)



Gambar 2 Skematisasi Sungai Cikakembang

Model HEC-RAS

Proses pemodelan kualitas air dimulai dengan membangun model hidraulik dari penampang sungai, yang hasil kalibrasinya divalidasi menggunakan data pengukuran lapangan. Setelah itu, proses pemodelan kualitas air dilakukan dengan mengestimasi parameter beban limbah, yang melibatkan kalibrasi koefisien reaerasi (k_a), deoksigenasi (k_d) dan dispersi (E_x), yang mempengaruhi fluktuasi keempat parameter di dalam air sungai. Koefisien reaerasi (k_a) dihitung berdasarkan persamaan dari Jha et al. (2004), koefisien deoksigenasi (k_d) mengacu pada metode *Simple Method* (Thomas, 1940), dan koefisien dispersi (E_x) dihitung menggunakan persamaan Iwasa dan Aya (1991). Persamaan ketiga koefisien tersebut disajikan pada Persamaan 1 sampai 3.

$$Ka = 5.791U^{0.5}H^{-0.25} \quad \dots(1)$$

Dimana :

- k_a : koefisien reaerasi (/hari)
- U : kecepatan (m/s)
- H : kedalaman aliran (m)

$$kd = \frac{(2.61B)}{A} \quad \dots(2)$$

Dimana :

- k_d : koefisien deoksigenasi (/hari)
- A : nilai defisit oksigen referensi pada grafik (mg/L)
- B : kemiringan kurva defisit oksigen terhadap waktu (mg/L/hari)

$$\frac{Ex}{HU^*} = 2 \left(\frac{w}{H}\right)^{3/2} \quad \dots(3)$$

Dimana :

- E_x : koefisien dispersi (/hari)
- H : kedalaman aliran (m)
- U^* : kecepatan geser (m/s)
- w : lebar saluran (m)

Setelah proses kalibrasi estimasi parameter beban limbah dilakukan, langkah berikutnya adalah mengkalibrasi nilai debit air dan jumlah limbah yang masuk ke sungai. Kalibrasi dilakukan hingga hasil yang diperoleh mendekati data observasi lapangan dan hasil pengujian kualitas air di laboratorium. Data kalibrasi yang akurat kemudian divalidasi dengan data dari waktu pengukuran yang berbeda (Rizal & Wardhani, 2024). Jika hasil validasi menunjukkan kesesuaian, data tersebut digunakan sebagai dasar untuk menyusun strategi pengendalian pencemaran di Sungai Cikakembang.

Dalam melakukan pemodelan kualitas air, HEC-RAS memiliki sejumlah karakteristik hidraulik yang perlu dipahami. Salah satu karakteristik utama adalah penggunaan perhitungan profil muka air berdasarkan aliran tetap yang berubah secara perlahan. Perhitungan tersebut dilakukan menggunakan *Standard Step Method*, yaitu prosedur iteratif untuk menentukan kedalaman air pada setiap penampang sungai berdasarkan persamaan energi dan kondisi batas hulu maupun hilir (USACE, 2016). Metode ini digunakan untuk membangun model hidraulik Sungai Cikakembang dan menghasilkan keluaran yang dapat menggambarkan kondisi aliran dalam keadaan stabil. Dalam pendekatan ini, pemodelan dilakukan secara komputasional dalam satu dimensi, dengan memperhitungkan kehilangan energi akibat kekasaran dasar sungai (koefisien Manning) serta pengaruh geometri sungai seperti penyempitan atau pelebaran alur (Khoiruddin et al., 2020).

Prinsip perhitungan energi dalam aliran bergradien lambat tersebut dijelaskan melalui persamaan energi yang ditampilkan pada Persamaan 4, dan menjadi dasar dalam perhitungan hidraulik sebelum parameter kualitas air dimodelkan lebih lanjut.

Sementara untuk pemodelan kualitas air, HEC-RAS mampu memodelkan berbagai parameter yang diperoleh dari pengukuran lapangan dan hasil pengujian laboratorium. Parameter yang dapat dimodelkan meliputi temperatur, *algae*, DO, BOD, nitrogen organik (OrgN), ammonium nitrogen (NH₄-N), nitrit nitrogen (NO₂-N), nitrat nitrogen (NO₃-N), fosfor organik (OrgP), dan ortofosfat (PO₄) (Zainal & Talib, 2024).

$$Y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} = Y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + h_e \quad \dots(4)$$

Dimana :

- Y_1, Y_2 : tinggi kedalaman *cross-section* 1 dan 2 (m)
- z_1, z_2 : el. dasar saluran *cross-section* 1 dan 2 (m)
- α_1, α_2 : koefisien kecepatan
- g : gravitasi (m/s²)
- h_e : kehilangan energi (m)

Parameter Kualitas Air

Dari berbagai parameter yang dapat digunakan untuk memodelkan kualitas air, penelitian ini difokuskan pada empat parameter utama yang berfungsi sebagai indikator untuk menilai kualitas air Sungai Cikakembang serta tingkat pencemarannya. Parameter yang dianalisis meliputi BOD, DO, NH₃-N, dan TP. Secara rinci, metode pengukuran dan pengujian setiap parameter dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Metode Pengujian Parameter Kualitas Air

Parameter	Satuan	Metode	Keterangan
DO	mg/L	<i>Pro Quatro Multiparameter Meter</i>	Uji Lapangan
BOD	mg/L	<i>Lovibond BD600</i>	Uji Laboratorium
NH ₃ -N	mg/L	<i>Phenate Method</i>	Uji Laboratorium
TP	mg/L	<i>HACH Kit</i>	Uji Laboratorium
Kecepatan Aliran	m/s	<i>Flow meter</i>	Uji Lapangan
Kedalaman Air	cm	Mistar ukur	Uji Lapangan

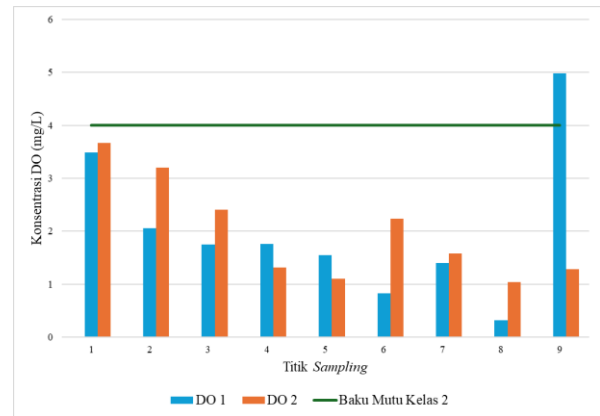
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Kualitas Air

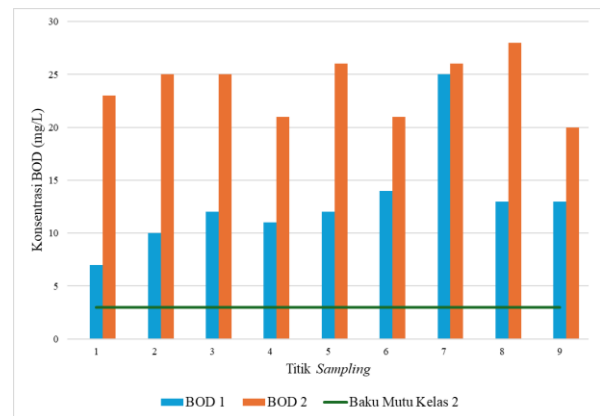
Pengujian kualitas air dalam penelitian ini dilakukan melalui dua kali pengambilan sampel, yaitu pada tanggal 31 Januari 2024 dan 5 Juni 2024. Selain pengambilan sampel air, pengukuran tinggi muka air dan kecepatan aliran juga dilakukan untuk menentukan debit di bagian hulu sungai. Pada pengambilan sampel pertama tanggal 31 Januari 2024, debit di hulu sungai tercatat sebesar $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$, sedangkan pada pengambilan sampel kedua tanggal 5 Juni 2024, nilai debit meningkat menjadi $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$. Hasil pengujian kualitas air kemudian dievaluasi terhadap standar baku mutu air sungai Kelas II sesuai PP No. 22 Tahun 2021. Hasil uji kualitas air Sungai Cikakembang selengkapnya tersaji pada Gambar 3, Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6 dimana indeks 1 dan 2 pada masing-masing parameter kualitas air digunakan untuk menjelaskan sampel yang diambil pada tanggal 31 Januari 2024 dan 5 Juni 2024 secara berurutan.

Berdasarkan hasil pengambilan sampel dan pengujian kualitas air Sungai Cikakembang, parameter yang dianalisis meliputi DO, BOD, $\text{NH}_3\text{-N}$, dan TP. Secara umum, seluruh parameter tersebut menunjukkan pola konsentrasi yang serupa, yaitu berfluktuasi mengikuti jumlah limbah yang masuk serta besarnya debit aliran sungai. Nilai DO cenderung menurun dari hulu ke hilir, seiring dengan semakin memburuknya kualitas air akibat akumulasi beban pencemar, sehingga konsentrasi oksigen terlarut menurun secara signifikan.

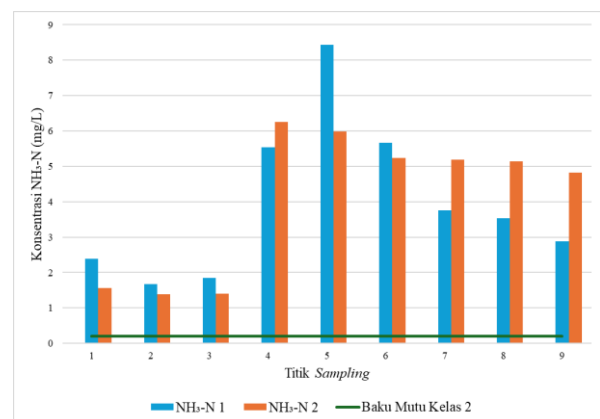
Untuk parameter BOD, peningkatan konsentrasi yang lebih tinggi terlihat terutama pada periode pengambilan sampel kedua. Kondisi ini dipengaruhi oleh musim kemarau, ketika debit sungai lebih rendah sehingga proses pengenceran berkurang dan konsentrasi polutan menjadi lebih tinggi. Pada parameter $\text{NH}_3\text{-N}$ dan TP, variasi nilai terutama ditentukan oleh keberadaan inlet limbah di sepanjang ruas Sungai Cikakembang. Pada $\text{NH}_3\text{-N}$, peningkatan konsentrasi terjadi pada titik *sampling* ke-4 dan ke-5 yang dipicu oleh kontribusi limbah domestik. Sementara itu, untuk TP, lonjakan konsentrasi terlihat pada titik 8 yang dipengaruhi oleh pembuangan limbah domestik, sehingga meningkatkan konsentrasi total fosfor (TP) di lokasi tersebut.



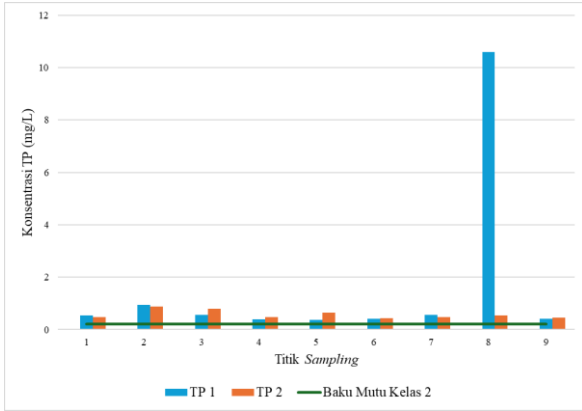
Gambar 3 Hasil Uji DO Sungai Cikakembang



Gambar 4 Hasil Uji BOD Sungai Cikakembang



Gambar 5 Hasil Uji $\text{NH}_3\text{-N}$ Sungai Cikakembang



Gambar 6 Hasil Uji TP Sungai Cikakembang

Pemodelan Hidraulik

Pemodelan hidraulik diawali dengan proses kalibrasi nilai koefisien kekasaran Manning Sungai Cikakembang. Kalibrasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa keluaran model HEC-RAS merepresentasikan kondisi hidraulik aktual secara memadai, terutama elevasi muka air sepanjang ruas sungai (Ansarifard et al., 2024). Pada tahap ini, pemodelan dilakukan dengan asumsi aliran tetap (*steady flow*) menggunakan debit terukur sebesar 0,25 m³/s sebagai kondisi batas di bagian hulu. Sedangkan untuk kondisi batas hilir digunakan kedalaman air sebesar 1,23 m yang merupakan kedalaman air di muara Sungai Cikakembang. Penetapan kondisi batas ini diperlukan agar simulasi hidraulik mampu menangkap perubahan profil muka air secara akurat pada seluruh segmen sungai.

Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa nilai rata-rata koefisien kekasaran Manning sebesar 0,04, dengan bias maksimum antara hasil simulasi dan pengukuran lapangan sebesar 0,41 m. Nilai bias tersebut masih berada dalam rentang yang dapat diterima, sehingga model dinilai mampu merepresentasikan kondisi hidraulik Sungai Cikakembang secara memadai. Ringkasan hasil kalibrasi koefisien kekasaran Manning serta perbandingan elevasi muka air pada setiap titik pengamatan disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2 Hasil Kalibrasi Nilai Koefisien Manning

Titik	Koefisien Manning	Karakteristik Saluran
1	0,08	Tidak terawat & kotor
2	0,08	Tidak terawat & kotor
3	0,02	Pasangan batu (plester)
4	0,07	Pasangan batu (kasar)
5	0,02	Pasangan batu (plester)
6	0,06	Berkelok, landai, vegetasi
7	0,03	Berkelok, landai
8	0,03	Berkelok, landai
9	0,03	Berkelok, landai

Tabel 3 Perbandingan Tinggi Muka Air

Titik	Elevasi Pengamatan (m)	Elevasi Pemodelan (m)	Bias (m)
1	708,43	708,33	0,09
2	698,82	698,54	0,28
3	695,93	695,93	0,00
4	694,71	694,71	0,00
5	692,09	692,09	0,00
6	690,71	690,70	0,00
8	685,33	685,33	0,00
7	684,94	684,94	0,00
9	683,88	683,47	0,41

Setelah proses kalibrasi, nilai koefisien Manning yang diperoleh divalidasi menggunakan data pengukuran dari tanggal 31 Januari 2024 untuk mengevaluasi kesesuaian terhadap tinggi muka air pada kondisi waktu dan debit yang berbeda. Hasil perbandingan antara data kalibrasi dan data validasi ditampilkan dalam Tabel 4 berikut, yang menunjukkan kesamaan yang signifikan antara kedua hasil tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa pemodelan hidraulik yang dilakukan telah cukup akurat dan sesuai dengan kondisi aktual di lapangan.

Tabel 4 Perbandingan Data Kalibrasi dan Validasi Pemodelan Hidraulik

Kalibrasi		Validasi	
Bias (m)	Error (%)	Bias (m)	Error (%)
0,08	13%	0,11	21%

Pemodelan Parameter Kualitas Air

Pemodelan kualitas air dalam penelitian ini mencakup empat parameter utama, yaitu BOD, DO, NH₃-N, dan TP. Estimasi parameter model dilakukan melalui proses kalibrasi terhadap sejumlah koefisien yang mempengaruhi dinamika perubahan kualitas air di dalam sistem sungai (Adhityas et al., 2023). Koefisien reaerasi (ka) dihitung menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh Jha et al. (2004) untuk seluruh penampang sungai, yang menghasilkan nilai rata-rata sebesar 5,77 per hari. Nilai rata-rata tersebut kemudian digunakan sebagai input dalam pemodelan HEC-RAS.

Selanjutnya, koefisien deoksigenasi (kd) dihitung menggunakan Simple Method (Thomas Jr., 1940) berdasarkan estimasi waktu perjalanan aliran pada sembilan titik pengukuran, dengan nilai rata-rata sebesar 0,36 per hari. Adapun koefisien

dispersi longitudinal (E_x) dihitung menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh Iwasa dan Aya (1991), yang juga diterapkan pada 100 penampang melintang sungai. Seluruh hasil perhitungan dari 100 penampang tersebut diinput ke dalam HEC-RAS sebagai parameter model kualitas air. Rincian nilai masing-masing koefisien disajikan pada Tabel 5 hingga Tabel 7.

Tabel 5 Perhitungan Koefisien Reaerasi (k_a)

Seksi	El. Dasar Sungai (m)	El. Muka Air (m)	H (m)	U (m/s)	K_a
S-100	709,65	709,80	0,15	0,44	6,17
S-99	708,62	708,90	0,160	0,35	5,41
S-98	708,13	708,30	0,17	0,48	6,24
S-97	706,41	706,45	0,14	0,83	8,62
S-96	705,04	705,31	0,27	0,21	3,68

Tabel 6 Perhitungan Koefisien Deoksigenasi (k_d)

Titik	1	2	3	4	5
K_d (/hari)	0,30	0,37	0,39	0,33	0,32
Titik	6	7	8	9	Rata-rata
K_d (/hari)	0,34	0,40	0,42	0,36	0,36

Tabel 7 Perhitungan Koefisien Dispersi (E_x)

Seksi	Kedalaman Aliran (m)	Kecepatan Aliran (m/s)	Lebar (m)	E_x
S-100	0,15	0,44	3,69	16,10
S-99	0,16	0,35	3,95	13,73
S-98	0,17	0,48	2,91	11,55
S-97	0,14	0,83	2,57	18,27
S-96	0,27	0,21	3,49	5,26

Setelah kalibrasi koefisien yang memengaruhi pemodelan kualitas air selesai, langkah berikutnya adalah memperkirakan beban limbah yang masuk ke sungai dengan melakukan kalibrasi nilai debit dan jumlah limbah untuk keempat parameter pemodelan. Kalibrasi ini bertujuan untuk mendapatkan hasil yang paling mendekati data lapangan dan hasil pengujian laboratorium (Ansarifard et al., 2024). Estimasi debit limbah dilakukan melalui pemetaan dan skematisasi kondisi aktual di lapangan, mencakup identifikasi area industri dan pemukiman yang berpotensi membuang limbah ke Sungai Cikakembang, yang selanjutnya dihitung nilai debitnya. Untuk nilai konsentrasi limbah, kalibrasi dilakukan dengan metode *trial and error* hingga diperoleh hasil yang sesuai dengan pengujian laboratorium. Asumsi yang digunakan dalam pemodelan ini adalah pembuangan limbah industri terjadi antara pukul

08.00–17.00, sedangkan pembuangan limbah domestik berlangsung sejak pukul 06.00–08.00 dan dari 17.00–19.00. Asumsi ini diambil berdasarkan hasil observasi langsung dan wawancara dengan petugas keamanan setempat dan warga sekitar. Sementara itu, untuk limbah domestik, diasumsikan terjadi pada waktu ketika warga beraktivitas, yakni sebelum berangkat ke kantor atau sekolah serta setelah kembali dari kantor atau sekolah.

Data acuan yang digunakan dalam proses kalibrasi model kualitas air adalah data hasil pengambilan sampel pada tanggal 5 Juni 2024, yang mencakup pengukuran debit sungai serta konsentrasi parameter pencemar di seluruh titik pemantauan. Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh nilai debit dan konsentrasi limbah untuk masing-masing inlet industri dan domestik sebagaimana disajikan pada Tabel 8 dan Tabel 9, yang menjadi dasar evaluasi kesesuaian antara model dan kondisi aktual di lapangan. Sedangkan hasil kalibrasi model untuk parameter BOD, DO, NH_3-N , dan TP secara lengkap ditampilkan pada Gambar 7 hingga Gambar 10.

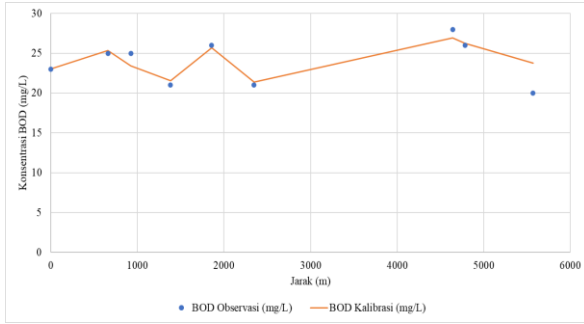
Tabel 8 Debit Limbah Cair

Jenis / Penampang ke-	Ind 1 / S-94	Dom 1 / S-91	Ind 2 / S-82	Ind 3 / S-79	Ind 4 / S-77
Debit (m^3/s)	0,015	0,094	0,020	0,192	0,155
Jenis / Penampang ke-	Ind 5 / S-67	Dom 2 / S-60	Dom 3 / S-33	Dom 4 / S-16	Dom 5 / S-2
Debit (m^3/s)	0,053	0,040	0,030	0,035	0,049

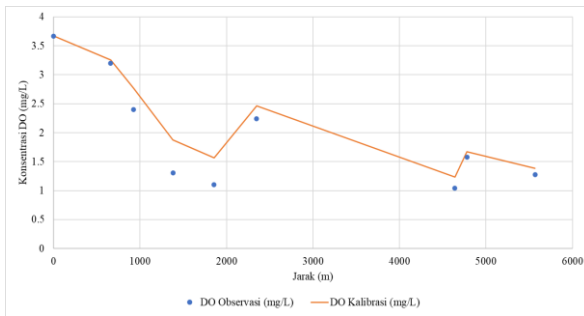
*Ind: industri Dom: domestik

Tabel 9 Konsentrasi Limbah Cair

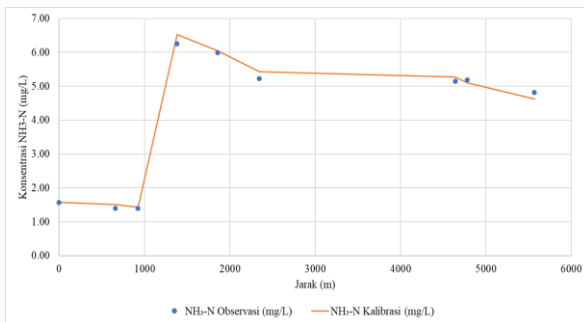
Jenis Limbah / Penampang ke-	Konsentrasi (mg/L)			
	DO	BOD	NH_3-N	TP
Industri 1 / S-94	3,00	25,00	1,60	1,00
Domestik 1 / S-91	3,00	30,00	1,60	2,00
Industri 2 / S-82	1,00	25,00	72,50	0,10
Industri 3 / S-79	1,00	37,00	5,70	0,70
Industri 4 / S-77	1,00	32,00	5,70	1,00
Industri 5 / S-67	3,68	18,00	5,00	0,20
Domestik 2 / S-60	1,20	23,00	3,00	0,50
Domestik 3 / S-33	1,00	23,00	6,50	0,50
Domestik 4 / S-16	2,40	32,00	6,00	0,70
Domestik 5 / S-2	1,80	23,00	15,00	0,80



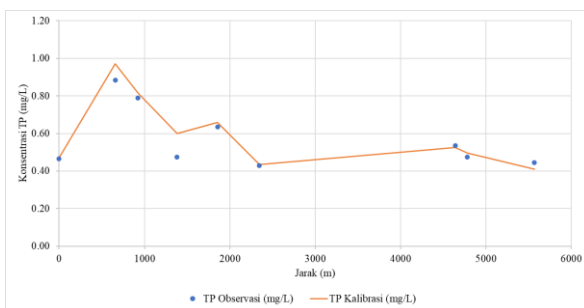
Gambar 7 Hasil Kalibrasi Parameter BOD



Gambar 8 Hasil Kalibrasi Parameter DO



Gambar 9 Hasil Kalibrasi Parameter NH₃-N



Gambar 10 Hasil Kalibrasi Parameter TP

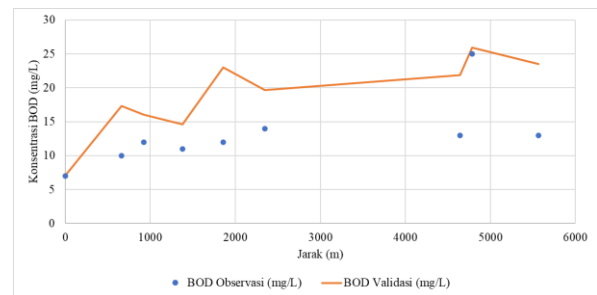
Dari keempat parameter yang dikalibrasi, hasil pemodelan menggunakan HEC-RAS menunjukkan tingkat kesesuaian yang baik dengan data lapangan maupun hasil pengujian laboratorium. Parameter BOD, NH₃-N, dan TP memperlihatkan pola fluktuasi

yang dipengaruhi oleh variasi debit serta konsentrasi limbah industri dan domestik yang masuk ke Sungai Cikakembang.

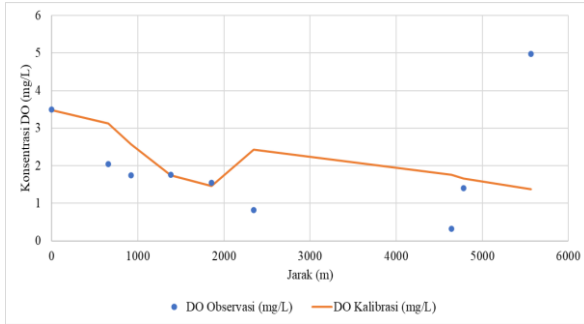
Untuk parameter BOD, nilai konsentrasi menunjukkan fluktuasi hingga titik sampling ke-6, kemudian meningkat tajam dan mencapai nilai maksimum pada titik sampling ke-8. Peningkatan ini terutama dipicu oleh masuknya beban limbah domestik pada segmen tersebut.

Pada parameter NH₃-N, peningkatan signifikan terjadi antara titik sampling ke-3 dan ke-4, yang diduga kuat berkaitan dengan kontribusi inlet limbah industri ke-2. Sementara itu, pada parameter TP, konsentrasi menunjukkan kecenderungan menurun dari hulu ke hilir. Meski demikian, terjadi peningkatan pada titik sampling ke-2 akibat masuknya inlet limbah domestik ke-1. Walaupun sebagian besar inlet limbah domestik berada di bagian hilir, debit limbah yang relatif kecil menyebabkan peningkatan konsentrasi TP di hulu terutama berasal dari kombinasi beban limbah domestik dan industri.

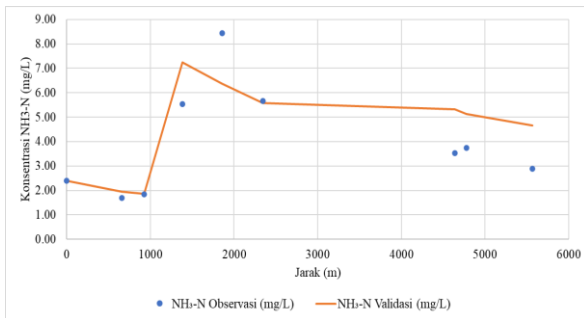
Model yang telah dikalibrasi menggunakan data tanggal 5 Juni 2024 kemudian divalidasi menggunakan data seri kedua yang diambil pada tanggal 31 Januari 2024. Dari dua seri data tersebut, data tanggal 5 Juni 2024 menghasilkan performa kalibrasi yang paling baik. Pada data 31 Januari 2024, hasil simulasi menunjukkan ketidaktepatan khususnya untuk parameter BOD. Meskipun demikian, seri data tersebut tetap digunakan sebagai data validasi karena pola fluktuasi BOD, DO, dan NH₃-N masih memperlihatkan kecenderungan tren yang sejalan dengan hasil kalibrasi, meskipun terdapat indikasi pencilan data. Hasil validasi model berdasarkan data tanggal 31 Januari 2024 ditampilkan pada Gambar 11 hingga Gambar 14. Sedangkan perbandingan bias dan RMSE dalam satuan konsentrasi (mg/L) antara data observasi dengan hasil kalibrasi dan validasi disajikan secara lengkap pada Tabel 10.



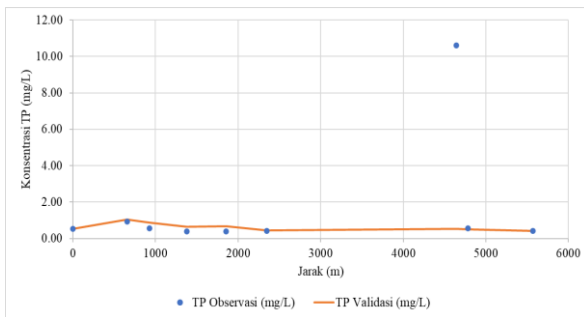
Gambar 11 Hasil Validasi Parameter BOD



Gambar 12 Hasil Validasi Parameter DO



Gambar 13 Hasil Validasi Parameter NH₃-N



Gambar 14 Hasil Validasi Parameter TP

Strategi Pengendalian Pencemaran

Pengendalian pencemaran di Sungai Cikakembang dilakukan melalui penerapan beberapa strategi yang dirancang untuk meningkatkan kualitas air yang telah mengalami degradasi. Seluruh strategi disusun dengan mempertahankan asumsi debit limbah yang sama seperti pada tahap kalibrasi pemodelan, sehingga perbedaan kualitas air yang muncul dapat sepenuhnya dikaitkan dengan langkah pengendalian yang diterapkan. Dengan pendekatan ini, setiap perubahan parameter kualitas air dapat dianggap berasal langsung dari tindakan pengendalian yang diterapkan. Ringkasan strategi pengendalian yang digunakan dalam studi ini ditampilkan pada Tabel 11, sedangkan hasil pemodelan dari keempat strategi divisualisasikan pada Gambar 15 hingga Gambar 18.

Tabel 10 Nilai Bias dan RMSE Hasil Kalibrasi dan Validasi Model

Titik Sampling	DO		BOD	
	Bias (mg/L)	RMSE (mg/L)	Bias (mg/L)	RMSE (mg/L)
Kalibrasi	0,23	0,30	0,90	0,01
Validasi	0,99	1,47	5,78	6,88
Titik Sampling	NH ₃ -N		TP	
	Bias (mg/L)	RMSE (mg/L)	Bias (mg/L)	RMSE (mg/L)
Kalibrasi	0,12	0,15	0,04	0,05
Validasi	1,01	1,31	1,24	3,36

Tabel 11 Strategi Pengendalian Pencemaran

Pembeda	Strategi 1	Strategi 2	Strategi 3	Strategi 4
Kondisi Hulu	Eksisting	Sesuai baku mutu air sungai kelas II	Sesuai baku mutu air sungai kelas II	Sesuai baku mutu air sungai kelas II
Parameter Limbah	Sesuai baku mutu limbah industri dan domestik	Eksisting	Sesuai baku mutu limbah industri dan domestik	Sesuai baku mutu limbah domestik

Parameter BOD pada Gambar 16 menunjukkan bahwa strategi pertama hanya memberikan perbaikan marginal, dengan nilai BOD di hilir tetap tinggi akibat kondisi hulu yang belum membaik. Strategi kedua menurunkan BOD di hulu setelah konsentrasi awal disesuaikan dengan baku mutu kelas II, tetapi tidak berpengaruh di hilir karena kualitas limbah tetap sama. Perbaikan signifikan terlihat pada strategi ketiga, di mana penyesuaian kualitas air hulu dan limbah industri-domestik menghasilkan penurunan BOD yang lebih merata, meskipun beberapa titik hilir masih sedikit melampaui baku mutu. Strategi keempat memberikan penurunan BOD terbesar karena pengurangan limbah domestik turut dilakukan, yang sangat berpengaruh terhadap segmen hilir.

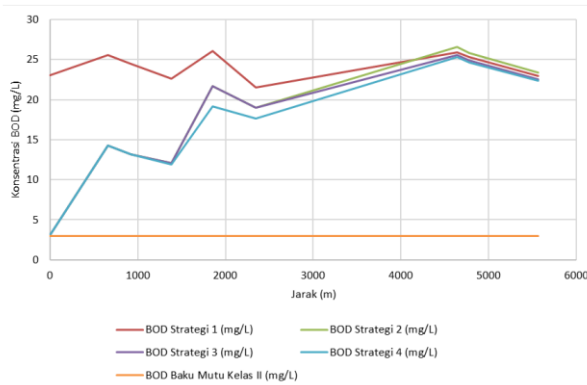
Pola parameter DO pada Gambar 17 mengikuti tren kebalikan BOD. Strategi pertama memberi peningkatan kecil, sedangkan strategi kedua meningkatkan DO di hulu tetapi tidak di hilir. Strategi ketiga menghasilkan peningkatan DO yang lebih merata, dan strategi keempat memberikan peningkatan paling konsisten sepanjang sungai menegaskan bahwa pengendalian beban organik

domestik di hilir memperbaiki kemampuan reaerasi sungai.

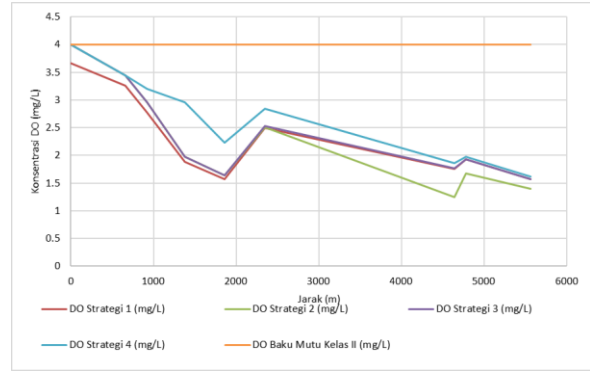
Parameter NH_3-N pada Gambar 18 menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap limbah industri. Strategi pertama dan kedua masih menunjukkan lonjakan nilai di dekat inlet limbah industri. Strategi ketiga memberikan penurunan NH_3-N paling signifikan karena melibatkan perbaikan kualitas limbah industri. Pada strategi keempat, garis grafik tampak berhimpit dengan strategi pertama dan kedua karena penyesuaian hanya dilakukan pada limbah domestik, sementara sumber utama NH_3-N tetap berasal dari industri. Hal ini menegaskan bahwa pengendalian NH_3-N memerlukan reduksi langsung pada kualitas limbah industri.

Parameter TP pada Gambar 19 lebih dipengaruhi oleh limbah domestik. Strategi pertama tidak menghasilkan penurunan berarti, sementara strategi kedua hanya memperbaiki hulu. Strategi ketiga memberikan penurunan TP yang lebih merata, dan strategi keempat menjadi yang paling efektif karena pengurangan limbah domestik secara langsung menekan sumber fosfor. Meskipun belum seluruhnya memenuhi baku mutu, strategi keempat menunjukkan tren perbaikan paling konsisten.

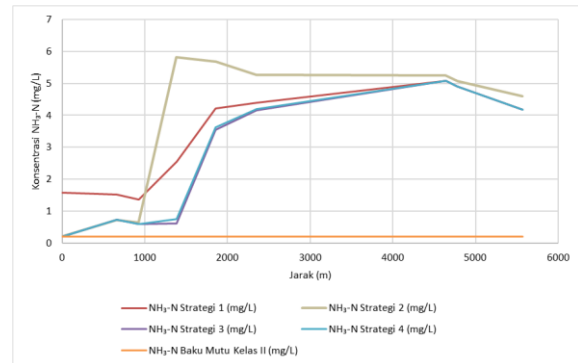
Secara umum, keempat strategi memperlihatkan bahwa pencemaran Sungai Cikakembang cukup berat dan tidak dapat ditangani melalui satu intervensi saja. Strategi keempat menunjukkan kinerja terbaik melalui kombinasi perbaikan kualitas air hulu dan pengurangan limbah domestik. Namun, kontrol terhadap limbah industri tetap menjadi prioritas utama untuk menurunkan NH_3-N . Karena itu, diperlukan pendekatan pengendalian terintegrasi yang meliputi peningkatan kualitas air hulu, pengurangan beban limbah industri dan domestik, peningkatan kapasitas IPAL, serta pengawasan baku mutu yang konsisten.



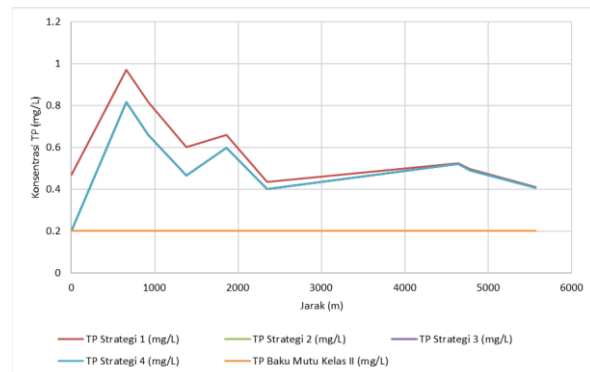
Gambar 15 Hasil Simulasi Pengendalian BOD



Gambar 16 Hasil Simulasi Pengendalian DO



Gambar 17 Hasil Simulasi Pengendalian NH_3-N



Gambar 18 Hasil Simulasi Pengendalian TP

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas air Sungai Cikakembang telah mengalami degradasi yang signifikan akibat akumulasi beban limbah domestik dan industri. Seluruh parameter yang dikaji, yaitu BOD, DO, NH_3-N , dan TP, pada kondisi eksisting tidak memenuhi baku mutu air sungai Kelas II sesuai PP No. 22 Tahun 2021. Pemodelan kualitas air menggunakan HEC-RAS mengonfirmasi bahwa distribusi dan dinamika pencemar di sepanjang sungai sangat dipengaruhi oleh kondisi kualitas air hulu, lokasi inlet limbah, dan variasi debit aliran sungai.

Evaluasi terhadap empat strategi pengendalian pencemaran menunjukkan bahwa tidak ada satu strategi pun yang mampu sepenuhnya memenuhi baku mutu untuk semua parameter di seluruh segmen sungai. Meskipun demikian, strategi keempat yang mengombinasikan perbaikan kualitas air di hulu dengan pengurangan beban limbah domestik menjadi strategi paling efektif dalam menurunkan konsentrasi BOD, meningkatkan DO, dan mengurangi TP secara merata sepanjang sungai. Temuan ini menegaskan bahwa limbah domestik berperan besar terhadap pencemaran Sungai Cikakembang terutama di bagian hilir.

Sementara itu, hasil pemodelan pada parameter NH₃-N menunjukkan bahwa reduksi signifikan hanya dapat dicapai melalui peningkatan kualitas limbah industri. Strategi ketiga, yang mencakup penyesuaian kualitas limbah industri, menghasilkan penurunan NH₃-N paling besar, sedangkan strategi keempat tidak mampu menurunkan parameter ini secara optimal karena beban pencemar industri tetap dominan. Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian limbah industri harus menjadi prioritas untuk mengurangi pencemaran amonia secara efektif.

Dengan demikian, pengendalian pencemaran di Sungai Cikakembang memerlukan pendekatan terintegrasi yang mencakup: (1) perbaikan kualitas air hulu untuk menstabilkan kondisi dasar sungai, (2) peningkatan pengelolaan limbah domestik untuk menekan beban organik dan fosfor, (3) pengendalian ketat terhadap limbah industri untuk menurunkan konsentrasi amonia, serta (4) peningkatan kapasitas dan efektivitas instalasi pengolahan air limbah baik domestik maupun industri. Penerapan regulasi baku mutu secara konsisten dan pengawasan berkelanjutan menjadi faktor kunci untuk memastikan kualitas air Sungai Cikakembang tidak semakin memburuk dan dapat dipulihkan secara bertahap.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Laboratorium Teknik Sumber Daya Air Universitas Katolik Parahyangan atas dukungan pendanaan dan fasilitas yang diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

Adhityas, R., Sukmono, A., & Sasmiti, B. (2023). Analisis Kualitas Perairan Waduk Cacaban Dengan Menggunakan Data Citra Landsat 8 & 9 Multitemporal. *Jurnal Geodesi Undip*, 2(2), 103–113.

- Ansarifard, S., Eyvazi, M., & Ghorbanifard, M. (2024). Simulation of floods under the influence of effective factors in hydraulic and hydrological models using HEC-RAS and MIKE 21. *Discover Water*, 4, Article 155. <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00155-0>
- Blacksmith Institute. (2013). The world's worst 2013: The top ten toxic threats—Cleanup, progress, and ongoing challenges. <http://www.worstpolluted.org/docs/TopTenThreats2013.pdf>
- Ekasari, A. M., Burhanudin, H., & Fardani, I. (2022). Analisis Kualitas Sub DAS Citarum Hulu. *Media Komunikasi Geografi*, 23(1), 44–57. <https://doi.org/10.23887/mkg.v23i1.40612>
- Fitriana, F. F., Yudianto, D., Sanjaya, S., Roy, A. F. V., & Seo, Y. C. (2023). The Assessment of Citarum River Water Quality in Majalaya District, Bandung Regency. *Rekayasa Sipil*, 17(1), 37–46. <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2023.017.01.6>
- Fitriana, F., Yudianto, D., Kent, S., Polisar, A., & Sanjaya, S. (2024). QUAL2Kw Simulation for Pollution Control Strategies: A Case Study of the Cikakembang River, West Java, Indonesia. *Water, Air, and Soil Pollution*, 235(11). <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07526-2>
- Handayani, S. A. (2019). Majalaya as the center for textile industry in spatial historical perspectives. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 243(1), 0–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/243/1/012167>
- Iwasa, Y., & Aya, S. (1991). Predicting longitudinal dispersion coefficient in open-channel flows. In *Proceedings of the International Symposium on Environmental Hydraulics* (pp. 505–510).
- Jha, R., Ojha, C. S. P., & Bhatia, K. K. S. (2004). A supplementary approach for estimating reaeration rate coefficients. *Hydrological Processes*, 18(1), 65–79. <https://doi.org/10.1002/hyp.1312>
- Wijaya, J., Yudianto, D. & Fitriana, F. (2021). The Use of Drop-Structures to Increase the Dissolved Oxygen Level along the Cibarani Channel. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 8(January), 55–66. <https://doi.org/10.22146/jcef.3603>
- Kent, S., Yudianto, D., Gao, C., Fitriana, F., & Wang, Q. (2024). Water Quality Modelling with Industrial and Domestic Point Source Pollution : a Study Case of Cikakembang River, Majalaya District. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 10(May), 151–162. <https://doi.org/10.22146/jcef.11807>

- Khoiruddin, M. F., Dermawan, V., & Wicaksono, P. H. (2020). Permodelan hidrolis sistem kanal Larona akibat perbaikan dasar saluran menggunakan aplikasi HEC-RAS. *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Pengairan*, 3(2). Diakses dari <http://pengairan.studentjournal.ub.ac.id/index.php/jmtp/article/view/620>
- Khotimah, S. K., & Nasruddin. (2022). Pencemaran Sungai Martapura Akibat Perilaku Masyarakat Membuang Sampah Di Sungai, Limbah Industri Dan Pertambangan (Human Behavior Environmental Analysis). *Jurnal Penelitian Multidisiplin*, 1(2), 37–41. <https://doi.org/10.58705/jpm.v1i2.47>
- Kim, J., Jonoski, A., Solomatine, D. P., & Goethals, P. L. M. (2023). Water Quality Modelling for Nitrate Nitrogen Control Using HEC-RAS: Case Study of Nakdong River in South Korea. *Water (Switzerland)*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/w15020247>
- Kurniawansyah, E., Fauzan, A., & Mustari, M. (2022). Dampak Sosial dan Lingkungan Terhadap Pencemaran Limbah Pabrik. *CIVICUS : Pendidikan-Penelitian-Pengabdian Pendidikan Pancasila Dan Kewarganegaraan*, 10(1), 14. <https://doi.org/10.31764/civicus.v10i1.9658>
- Polisar, A. (2023). *Study of The Impacts of Domestic and Textile Industry Wastewater Discharge in Cikakembang River, Majalaya, Bandung Regency*. <https://repository.unpar.ac.id/handle/123456789/16491>
- Prayoga, A., Khaerul Umam, & Sakrim Miharja. (2022). Studi Collaborative Governance Program Citarum Harum Dalam Perbaikan Kualitas Air Sungai Citarum. *Moderat : Jurnal Ilmiah Ilmu Pemerintahan*, 8(3), 469–485. <https://doi.org/10.25157/moderat.v8i3.2759>
- Saddang, S. (2021). Permodelan hidrolis kenaikan muka air sungai pada daerah muara Sungai Saddang. In *Prosiding 5th Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat* 2021 (pp. 34–40). Politeknik Negeri Ujung Pandang. ISBN 978-623-98762-1-0.
- Schnoor, J. L. (1996). *Environmental Modeling: Fate and Transport of Pollutants in Water, Air, and Soil*. Wiley
- Severini, E., Magri, M., Soana, E., & Bartoli, M. (2024). Unraveling the nexus: exploring river-groundwater interaction as the primary driver of eutrophication in river ecosystems. *Journal of Hydrology*, 645(PA), 132185. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132185>
- Sumantri, A., & Rahmani, R. Z. (2020). Analisis Pencemaran Kromium (VI) berdasarkan Kadar Chemical Oxygen Demand (COD) pada Hulu Sungai Citarum di Kecamatan Majalaya Kabupaten Bandung Provinsi Jawa Barat 2018. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 19(2), 144–151. <https://doi.org/10.14710/jkli.19.2.144-151>
- Thomas, H. A. Jr. (1940). The analysis of the oxygen sag curve. *Sewage Works Journal*, 12(3), 444–454.
- US Army Corps of Engineers (USACE). (2016). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual (Version 5.0)*. Davis, CA: Hydrologic Engineering Center.
- US Army Corps of Engineers. (2020). *HEC-RAS river analysis system: Water quality modeling – Technical reference manual*. Davis, CA: Hydrologic Engineering Center.
- Yenny, M. O. P., Hartono, A., Anwar, S., & Kang, Y. (2020). Assessment of heavy metals pollution in sediment of Citarum River, Indonesia. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 10(4), 584–593. <https://doi.org/10.29244/jpsl.10.4.584-593>
- Zainal, N. N., & Talib, S. H. A. (2024). Review paper on applications of the HEC-RAS model for flooding, agriculture, and water quality simulation. *Water Practice and Technology*, 19(7), 2883–2900. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.173>