



PEMODELAN SPASIAL-TEMPORAL CBOD DAN DO SUNGAI LAWA MENGUNAKAN WATER QUALITY ANALYSIS SIMULATION PROGRAM (WASP)

Edhi Sarwono^{1,2*}, Marlon I Aipassa¹, Ndan Imang¹, Yohanes Budi Sulistioadi¹, Komsanah Sukarti³,
Henny Pagoray¹, dan Sri Wahyuningsih⁴

¹Program Pascasarjana Ilmu Lingkungan, Universitas Mulawarman

²Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman

³Program Studi Akuakultur, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Mulawarman

⁴Program Studi Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman

* Korespondensi penulis: e.sarwono@unmul.ac.id

ABSTRAK

Sungai Lawa merupakan badan air penerima dari aktivitas pertambangan batubara dan perkebunan kelapa sawit di sekitar sungai. Penelitian ini bertujuan memodelkan penyebaran *Carbonaceous Biochemical Oxygen Demand* (CBOD) dan *dissolved oxygen* (DO) di Sungai Lawa menggunakan *Water Quality Analysis Simulation Program* (WASP8 US EPA), menganalisis perubahan konsentrasi berdasarkan jarak hulu ke hilir, serta mengevaluasi perubahan temporal enam waktu simulasi. Ruas Sungai Lawa sepanjang 69,38 km dimodelkan menjadi 18 segmen utama dengan masukan lateral dari anak sungai dan saluran buangan. Simulasi dilakukan pada 22-23 Desember 2025 dengan keluaran pada enam waktu. Data BOD hasil pengukuran lapangan digunakan sebagai dasar *input* dan pembandingan parameter organik, sedangkan keluaran model dianalisis sebagai CBOD sesuai variabel keadaan dalam WASP. Validasi model menggunakan MAE, RMSE, MAPE dan R². Hasil simulasi menunjukkan CBOD berubah secara longitudinal sebagai respons masukan beban organik dan proses degradasi, sedangkan DO menunjukkan variasi yang dipengaruhi beban organik, reaerasi, dan kondisi hidraulik. Validasi terbaik CBOD terjadi pada 22 Desember 2025 pukul 00.00 WITA dengan MAE 0,26 mg/L, RMSE 0,30 mg/L, dan MAPE 9,86%; sedangkan validasi terbaik DO pada waktu yang sama, MAE 0,32 mg/L, RMSE 0,37 mg/L, dan MAPE 13,86%. Model WASP dapat digunakan untuk menggambarkan kecenderungan spasial-temporal CBOD dan DO Sungai Lawa sebagai dasar evaluasi kualitas air.

Kata Kunci: CBOD, DO, Kualitas Air, Sungai Lawa, WASP

1. Pendahuluan

Sungai merupakan bagian penting dalam sistem hidrologi karena berfungsi sebagai media *transport* air, habitat biota akuatik, sumber air masyarakat, serta badan air penerima masukan dari aktivitas alamiah dan antropogenik. Tekanan terhadap kualitas air sungai meningkat seiring pertumbuhan penduduk, perubahan penggunaan lahan, kegiatan industri, pertanian, perkebunan, serta aktivitas domestik. Aktivitas pembukaan lahan, pertanian, kegiatan industri, dan kegiatan domestik dapat melepaskan bahan organik, sedimen, nutrisi, logam berat, dan patogen ke badan air melalui limpasan atau aliran buangan [1].

Sungai Lawa merupakan sungai ordo 3 yang berada di Kabupaten Kutai Barat, Provinsi Kalimantan Timur, Indonesia dan menjadi bagian dari wilayah perbatasan antara Provinsi Kalimantan Tengah dan Kalimantan Timur. Ruas sungai yang dikaji melintasi Kecamatan Muara Lawa dan Kecamatan Bentian Besar. Daerah aliran sungai ini menerima pengaruh dari aktivitas pertambangan batubara, industri perkebunan kelapa sawit, serta permukiman masyarakat yang berada di sekitar badan air. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan beban pencemar organik yang masuk ke sungai dan memengaruhi ketersediaan oksigen terlarut.

Parameter *Carbonaceous Biochemical Oxygen Demand* (CBOD) dan *dissolved oxygen* (DO) merupakan indikator utama untuk mengevaluasi pengaruh beban organik terhadap kondisi kualitas air sungai. Dalam model WASP, CBOD merepresentasikan kebutuhan oksigen untuk oksidasi bahan organik karbon, sedangkan DO menunjukkan ketersediaan oksigen yang mendukung proses biologis di perairan. Berbeda dengan BOD



hasil uji laboratorium, CBOD merupakan variabel keadaan dalam model yang difokuskan pada fraksi kebutuhan oksigen karbon organik. Penelitian pada Sungai Cileungsi menunjukkan bahwa parameter organik dan DO dapat digunakan untuk mengevaluasi tekanan beban organik serta menyusun strategi pengendalian beban pencemar menggunakan model kualitas air [1].

Pemodelan kualitas air diperlukan untuk memahami perubahan kualitas air secara spasial dan temporal, terutama pada sungai yang menerima masukan dari berbagai sumber pencemar. Model kualitas air membantu menyederhanakan proses alami yang kompleks dan dapat digunakan untuk memprediksi kondisi kualitas air serta mendukung pengambilan keputusan pengelolaan sungai [1]. WASP banyak digunakan untuk analisis kualitas air karena memiliki pendekatan kompartemen yang fleksibel dan mampu mensimulasikan konservasi massa secara spasial dan temporal pada berbagai badan air [1], [2].

Studi terdahulu menunjukkan bahwa WASP dapat diterapkan untuk simulasi kualitas air dan skenario pengelolaan. Varsa dkk. menggunakan WASP untuk mensimulasikan indikator eutrofikasi seperti DO, nitrat, fosfat, dan klorofil-a pada reservoir, serta mengembangkan skenario pengurangan beban nutrisi [2]. Zelazny dkk. menerapkan WASP untuk menilai dampak pencemaran antropogenik terhadap kualitas air Sungai Dunajec dan menunjukkan bahwa model ini berpotensi mendukung penilaian risiko dan perencanaan pengelolaan kualitas air [3]. Obin dkk. juga menerapkan WASP untuk simulasi kualitas air dan kapasitas lingkungan perairan Sungai Lushui [4].

Pada konteks wilayah yang dipengaruhi aktivitas pertambangan, Castillo dkk. menunjukkan bahwa pendekatan berbasis WASP dapat digunakan untuk memodelkan *transport* kontaminan pada DAS yang dipengaruhi proses drainase batuan asam, meskipun akurasi model sangat dipengaruhi oleh ketersediaan data hidrologi dan kualitas air setempat [5]. Temuan ini relevan dengan Sungai Lawa yang menerima tekanan dari aktivitas pertambangan dan perubahan penggunaan lahan di daerah hulunya. Dengan demikian, pemodelan CBOD dan DO di Sungai Lawa diperlukan untuk memahami pola penyebaran kualitas air dan menentukan waktu simulasi dengan performa validasi terbaik.

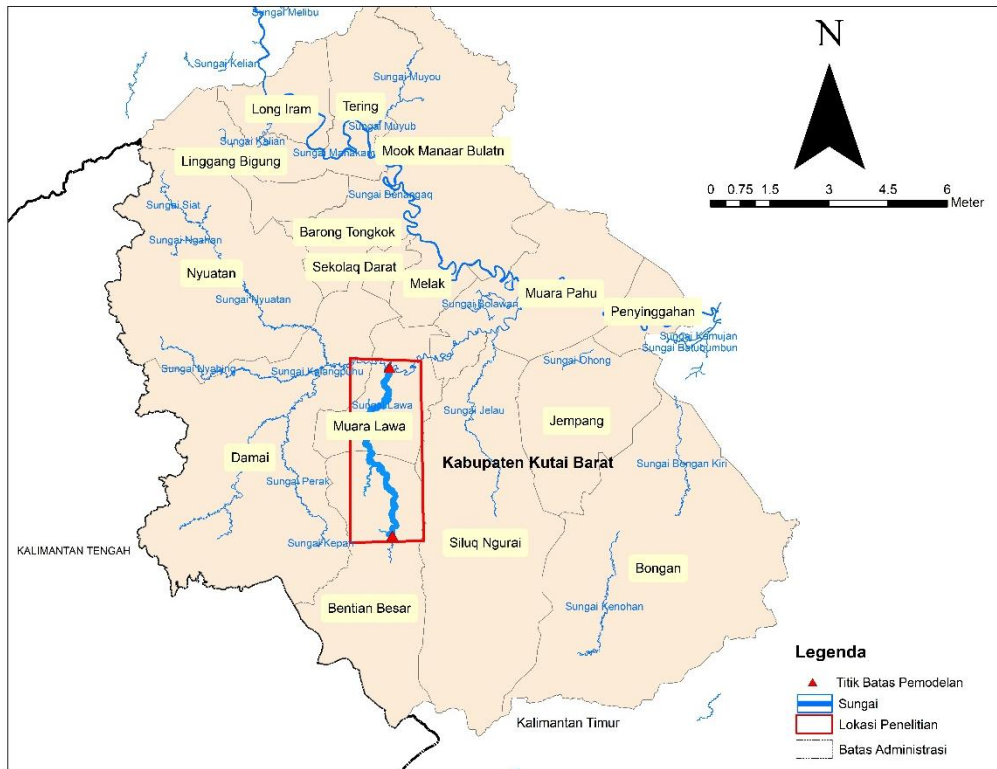
Penelitian ini bertujuan untuk: (1) membangun model kualitas air Sungai Lawa berdasarkan parameter CBOD dan DO menggunakan WASP; (2) menganalisis perubahan spasial konsentrasi CBOD dan DO sepanjang aliran sungai dari hulu ke hilir; dan (3) mengevaluasi perubahan temporal konsentrasi CBOD dan DO pada enam waktu simulasi serta membandingkan hasil simulasi dengan data observasi untuk menentukan waktu simulasi dengan performa validasi terbaik.

2. Metode Penelitian

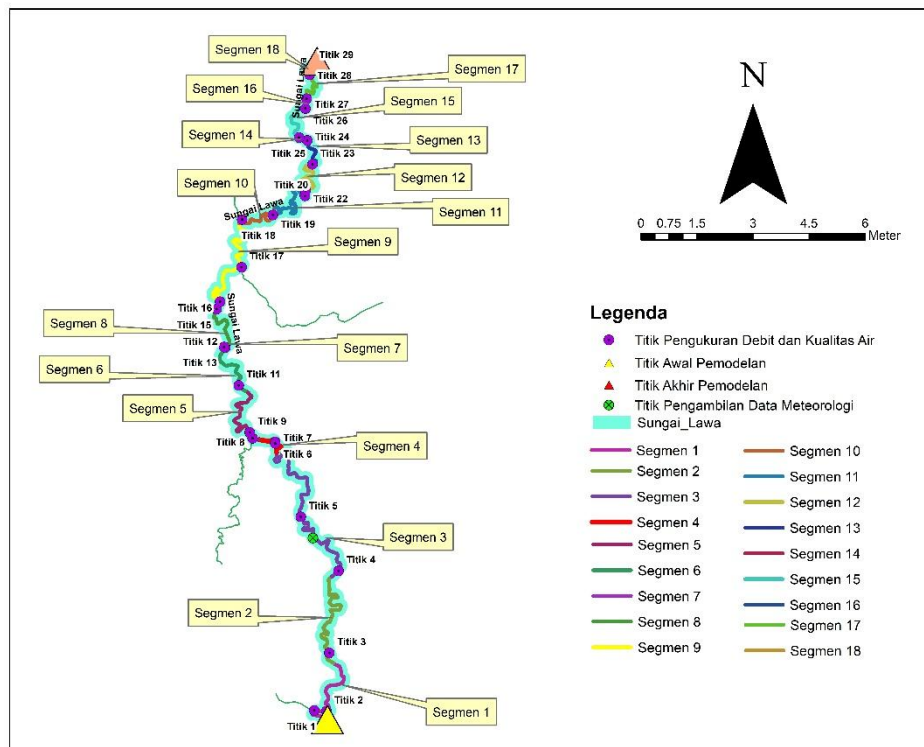
Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada Sungai Lawa yang berada di Kabupaten Kutai Barat, Provinsi Kalimantan Timur, Indonesia. Secara administratif, lokasi penelitian mencakup wilayah Kecamatan Muara Lawa dan Kecamatan Bentian Besar. Sungai Lawa merupakan salah satu badan air penerima yang dipengaruhi oleh berbagai sumber masukan, seperti anak sungai, saluran drainase, aktivitas domestik masyarakat, kegiatan perkebunan kelapa sawit, serta aktivitas pertambangan batubara di bagian hulu dan sekitar daerah aliran sungai. Kondisi tersebut menjadikan Sungai Lawa penting untuk dikaji karena perubahan kualitas airnya dapat dipengaruhi oleh masukan alami maupun aktivitas antropogenik.

Ruas sungai yang dimodelkan membentang dari titik awal pemodelan di bagian hulu hingga titik akhir pemodelan di bagian hilir. Sungai Lawa yang dimodelkan dibagi menjadi 18 segmen dengan panjang yang berbeda-beda disesuaikan dengan titik pengambilan data lapangan dan masukan saluran lateral serta lokasi pemukiman yang berada di sekitar bantaran sungai. Segmen 1 berada di hulu sungai dan segmen 18 berada di hilir sungai yang dimodelkan. Sepanjang ruas tersebut terdapat titik pengukuran debit, titik pengambilan sampel kualitas air, titik awal dan akhir pemodelan, serta titik pengambilan data meteorologi. Peta lokasi penelitian, titik pengukuran, dan segmentasi model Sungai Lawa disajikan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian Sungai Lawa



Gambar 2. Lokasi Titik Pengambilan Data dan Segmentasi Model Sungai Lawa.



Tabel 1. Panjang Sungai dan Penggunaan Lahan Segmen Sungai Lawa

Nama Segmen	Panjang Segmen (km)	Klasifikasi Penggunaan Lahan
Segmen 1	5,57	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, Permukiman, Lahan Terbuka, Pertambangan, Void, Tanaman Campuran, Perkebunan, sungai.
Segmen 2	7,87	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, Permukiman, Lahan Terbuka, Pertambangan, Void, Tanaman Campuran, Perkebunan.
Segmen 3	12,3	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, Permukiman, Lahan Terbuka, Pertambangan, Void, Tanaman Campuran, Perkebunan.
Segmen 4	1,87	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, Permukiman, Lahan Terbuka, Perkebunan.
Segmen 5	5,42	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, Permukiman, Lahan Terbuka, Perkebunan.
Segmen 6	3,55	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, Lahan Terbuka, Pertambangan, Void, Tanaman Campuran, Perkebunan.
Segmen 7	0,06	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, Pertambangan, Void, Perkebunan.
Segmen 8	3,39	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, Pemukiman, Lahan Terbuka, Pertambangan, Void, Perkebunan.
Segmen 9	7,91	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, Pemukiman, Lahan Terbuka, Pertambangan, Void, Perkebunan.
Segmen 10	3,29	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, Lahan Terbuka, Pertambangan, Perkebunan.
Segmen 11	4,88	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, Pemukiman, Lahan Terbuka, Hutan Lahan Basah, Pertambangan, Void, Tanaman Campuran.
Segmen 12	4,25	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, pemukiman, Hutan Lahan Basah, Lahan Terbuka, Pertambangan, Tanaman Campuran.
Segmen 13	1,82	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, Pemukiman, Hutan Lahan Basah, Lahan Terbuka, Pertambangan, Tanaman Campuran.
Segmen 14	0,47	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, Pemukiman, Hutan Lahan Basah.
Segmen 15	2,47	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, Pemukiman, Hutan Lahan Basah, Tanaman Campuran.
Segmen 16	0,73	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, Pemukiman, Hutan Lahan Basah.
Segmen 17	2,32	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, Pemukiman, Lahan Terbuka, Hutan Lahan Basah.
Segmen 18	1,21	Semak dan Belukar, Hutan Lahan Kering, sungai, Pemukiman.

Data dan Parameter Model

Data yang digunakan dalam pemodelan kualitas air Sungai Lawa terdiri atas data geometri sungai, data hidraulik, data kualitas air, data meteorologi, serta parameter kinetik model. Data BOD hasil pengukuran lapangan, DO, geometri, debit, dan karakteristik hidraulik yang digunakan merupakan data hasil pengukuran tanggal 22-23 Desember 2025. Pada saat pengambilan data lapangan, Sungai Lawa berada dalam kondisi penuh atau hampir banjir. Kondisi ini merepresentasikan keadaan aliran tinggi, sehingga proses *transport* dan pengenceran pencemar dapat dianalisis pada kondisi hidrologis yang dinamis.

Parameter *dissolved oxygen* (DO) diukur secara langsung di lapangan (*in situ*) pada setiap titik pengambilan sampel menggunakan alat DO meter yang telah dikalibrasi. Pengukuran dilakukan segera setelah pengambilan sampel untuk memperoleh kondisi oksigen terlarut yang merepresentasikan keadaan sebenarnya di badan air serta meminimalkan perubahan konsentrasi akibat proses penyimpanan dan transportasi sampel. Sementara itu, parameter *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) dianalisis di laboratorium menggunakan Metode Pengenceran (*Dilution Method*) yang mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) 6989.72:2009. Metode ini digunakan untuk menentukan jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme dalam



menguraikan bahan organik selama masa inkubasi lima hari. Hasil analisis BOD selanjutnya digunakan sebagai data masukan, kalibrasi, dan validasi dalam pemodelan kualitas air menggunakan perangkat lunak WASP.

Parameter bahan organik yang dimodelkan dalam WASP dinyatakan sebagai *Carbonaceous Biochemical Oxygen Demand* (CBOD). Dalam penelitian ini, data BOD (*Biochemical Oxygen Demand*) hasil pengukuran lapangan digunakan sebagai dasar penyusunan kondisi awal dan masukan model, sedangkan keluaran model dianalisis sebagai CBOD. Oleh karena itu, istilah yang digunakan dalam pembahasan hasil simulasi adalah CBOD, bukan BOD, untuk menghindari penyamaan langsung antara BOD hasil uji laboratorium dan CBOD sebagai variabel keadaan sebagai *output* dalam model WASP.

Dalam model, alur utama Sungai Lawa direpresentasikan sepanjang 69,38 km. Model juga mempertimbangkan masukan lateral dari beberapa anak sungai dan saluran buangan, meliputi Sungai Mega, Sungai Nayap, saluran limbah CPO, Sungai Tunau, outlet settling pond, Sungai Bengkiai, Sungai Titip, dan Sungai Siwo. Analisis kualitas air pada penelitian ini difokuskan pada parameter CBOD dan DO untuk menggambarkan dinamika bahan organik karbon serta oksigen terlarut di sepanjang Sungai Lawa.

Tabel 2. Ringkasan Data Geometri dan Hidraulik Ruas Utama Sungai Lawa

Parameter	Nilai
Jumlah segmen utama	18 segmen
Panjang total ruas model	69,38 km
Panjang segmen	0,06-12,3 km
Lebar rata-rata sungai	11,53-40,00 m
Kedalaman rata-rata	2,62-5,59 m
Kemiringan dasar sungai	0-0,00425
Kekasaran <i>Manning</i>	0,05
Kecepatan rata-rata aliran	0,17-0,65 m/detik
Kondisi hidrologis pengambilan data	Sungai penuh/hampir banjir

Tabel 3. Ringkasan Data Kualitas Air dan Hidraulik yang Digunakan dalam Model

Kelompok Data	Debit (m ³ /detik)	BOD Lapangan/Input (mg/L)	DO (mg/L)	Suhu (°C)
Alur utama Sungai Lawa	35,98-117,80	2,18-3,16	1,86-2,68	26-27
Anak sungai dan saluran buangan	0,02-13,69	2,18-2,77	1,37-2,01	26-27
Seluruh <i>input</i> model	0,02-117,80	2,18-3,16	1,37-2,68	26-27

Data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa debit alur utama Sungai Lawa relatif besar pada periode pengambilan data, yaitu 35,98-117,80 m³/detik. Kondisi ini sesuai dengan hasil pengambilan data dan observasi di lapangan bahwa air sungai berada dalam kondisi penuh atau mendekati banjir. Konsentrasi BOD lapangan yang digunakan sebagai *input*/pembanding parameter organik berada pada kisaran 2,18-3,16 mg/L pada alur utama, sedangkan DO berada pada kisaran 1,86-2,68 mg/L. Nilai DO yang relatif rendah menunjukkan pada beberapa segmen terdapat tekanan terhadap ketersediaan oksigen terlarut di Sungai Lawa. Kondisi ini dapat dipengaruhi oleh peningkatan beban organik, masukan lateral dari anak sungai atau saluran buangan, serta karakteristik hidraulik sungai yang mengontrol proses pengenceran, *transport*, dan reaerasi. Nilai parameter tersebut adalah nilai-nilai yang semuanya akan digunakan sebagai inputan dalam pemodelan menggunakan WASP. Kondisi tersebut mencerminkan kondisi aktual kualitas air Sungai Lawa dari hulu sampai hilir yang telah ditetapkan dalam panjang sungai yang dimodelkan.

Tabel 4. Masukan Lateral yang Digunakan Dalam Model WASP

Sumber Masukan Lateral	Debit (m ³ /detik)	BOD Lapangan/Input (mg/L)	DO (mg/L)	Keterangan
Sungai Mega	0,02	2,65	2,01	Anak Sungai Lawa
Sungai Nayap	5,29	2,77	1,96	Anak Sungai Lawa
Saluran limbah CPO	2,14	2,45	1,37	Drainase limbah CPO
Sungai Tunau	2,36	2,41	1,46	Anak Sungai Lawa



Sumber Masukan Lateral	Debit (m ³ /detik)	BOD Lapangan/Input (mg/L)	DO (mg/L)	Keterangan
Outlet settling pond	1,51	2,18	1,46	Drainase outlet settling pond
Sungai Bengkiai	2,95	2,22	1,64	Anak Sungai Lawa
Sungai Titip	13,69	2,18	1,46	Anak Sungai Lawa
Sungai Siwo	0,85	2,27	1,62	Anak Sungai Lawa

Masukan lateral pada Tabel 4 merepresentasikan kontribusi anak sungai dan saluran buangan terhadap kualitas air Sungai Lawa. Beberapa masukan lateral memiliki DO relatif rendah, terutama saluran limbah CPO, Sungai Tunau, outlet settling pond, Sungai Titip, dan Sungai Siwo. Kondisi tersebut berpotensi memengaruhi konsentrasi DO pada segmen penerima, terutama apabila debit masukan cukup besar atau berada pada ruas dengan kapasitas pengenceran terbatas.

Tabel 5. Parameter Kontrol Numerik yang Diaktifkan Dalam Model WASP

Parameter Model	Nilai	Parameter Model	Nilai
Maximum temperature swing during DT	0,05 °C	Maximum dissolved oxygen swing during DT	0,2 mg/L

Dalam proses simulasi, parameter kontrol numerik pada Tabel 5 digunakan untuk menjaga kestabilan penyelesaian model. Parameter yang diaktifkan meliputi maximum temperature swing during DT sebesar 0,05 °C dan maximum dissolved oxygen swing during DT sebesar 0,2 mg/L. Kedua parameter tersebut berfungsi membatasi perubahan maksimum suhu dan oksigen terlarut dalam setiap interval waktu komputasi, sehingga hasil simulasi tetap stabil selama proses perhitungan. Data meteorologi pendukung yang digunakan selama periode simulasi meliputi radiasi matahari, suhu udara, kecepatan angin, dan dew point. Data tersebut diperoleh dari NASA POWER Data Access Viewer melalui laman <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> [6] untuk periode 22–23 Desember 2025 pada lokasi penelitian Sungai Lawa. Berdasarkan data tersebut, suhu udara selama periode simulasi berkisar antara 23,31–28,58 °C, kecepatan angin berkisar antara 0,08–1,15 m/detik, dan dew point berkisar antara 23,34–26,32 °C. Data meteorologi ini digunakan sebagai data pendukung dalam pemodelan WASP, terutama untuk merepresentasikan kondisi atmosfer yang dapat memengaruhi suhu air dan proses pertukaran oksigen di badan air.

Konfigurasi Model WASP

Pemodelan dilakukan menggunakan Water Quality Analysis Simulation Program Versi 8 (WASP8 – US EPA) yaitu perangkat lunak simulator kualitas air dinamis yang dikembangkan dan didistribusikan oleh US EPA (United States Environmental Protection Agency). Model WASP bekerja berdasarkan prinsip keseimbangan massa yang memperhitungkan masukan dan keluaran material, transport adveksi dan dispersi, serta proses transformasi fisik, kimia, dan biologi [2], [3]. Dalam penelitian ini, modul model WASP digunakan untuk mensimulasikan perubahan konsentrasi CBOD dan DO sebagai parameter utama kualitas air Sungai Lawa. CBOD digunakan untuk merepresentasikan beban bahan organik karbon, sedangkan DO digunakan untuk menggambarkan ketersediaan oksigen terlarut di badan air. Sungai Lawa dimodelkan sebagai sistem satu dimensi dengan tipe segmen surface water dan metode transport kinematic wave, sehingga proses perpindahan massa pencemar dianalisis mengikuti arah aliran dari hulu ke hilir. Ruas utama sungai direpresentasikan sepanjang sekitar 69,38 km dan dibagi menjadi 18 segmen utama berdasarkan karakteristik alur serta titik masukan. Selain alur utama, model juga memasukkan beberapa masukan lateral dari anak sungai dan saluran buangan. Masukan tersebut dipertimbangkan karena berpotensi mempengaruhi distribusi CBOD dan DO melalui penambahan debit, beban organik, serta perubahan kondisi hidraulik di sepanjang Sungai Lawa.

Waktu Simulasi

Simulasi model dilakukan selama dua hari, yaitu mulai 22 Desember 2025 pukul 00.00 WITA hingga 23 Desember 2025 pukul 23.00 WITA. Hasil simulasi kemudian dianalisis berdasarkan enam waktu keluaran,



masing-masing pada 22 Desember pukul 00.00, 10.00, dan 20.00 WITA, serta 23 Desember pukul 06.00, 16.00, dan 23.00 WITA pada Tabel 6, untuk menggambarkan perubahan temporal parameter kualitas air selama periode pemodelan Sungai Lawa.

Tabel 6. Waktu Keluaran Simulasi WASP.

Nomor Output Simulasi	Waktu simulasi
1	22/12/2025 00.00
2	22/12/2025 10.00
3	22/12/2025 20.00
4	23/12/2025 06.00
5	23/12/2025 16.00
6	23/12/2025 23.00

Validasi Model

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi WASP terhadap data observasi lapangan pada titik pengukuran yang bersesuaian. Evaluasi performa model menggunakan *mean absolute error* (MAE), *root mean square error* (RMSE), *mean absolute percentage error* (MAPE), dan koefisien determinasi (R^2). Indikator galat digunakan untuk menentukan waktu simulasi yang paling mendekati data observasi.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_i - O_i| \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2} \quad (2)$$

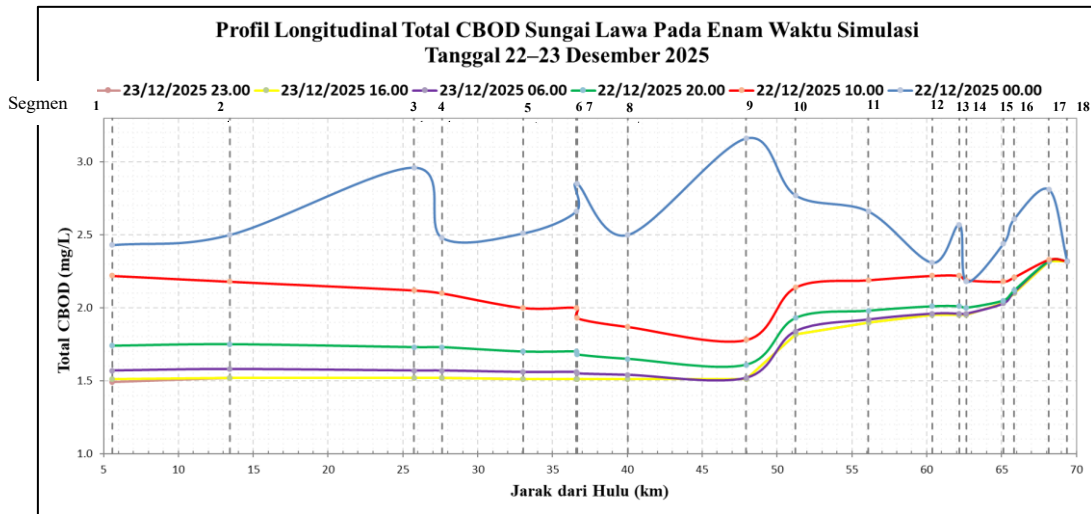
$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{M_i - O_i}{O_i} \right| \times 100\% \quad (3)$$

dengan M_i adalah nilai hasil model, O_i adalah nilai observasi, dan n adalah jumlah data pembanding.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Simulasi CBOD

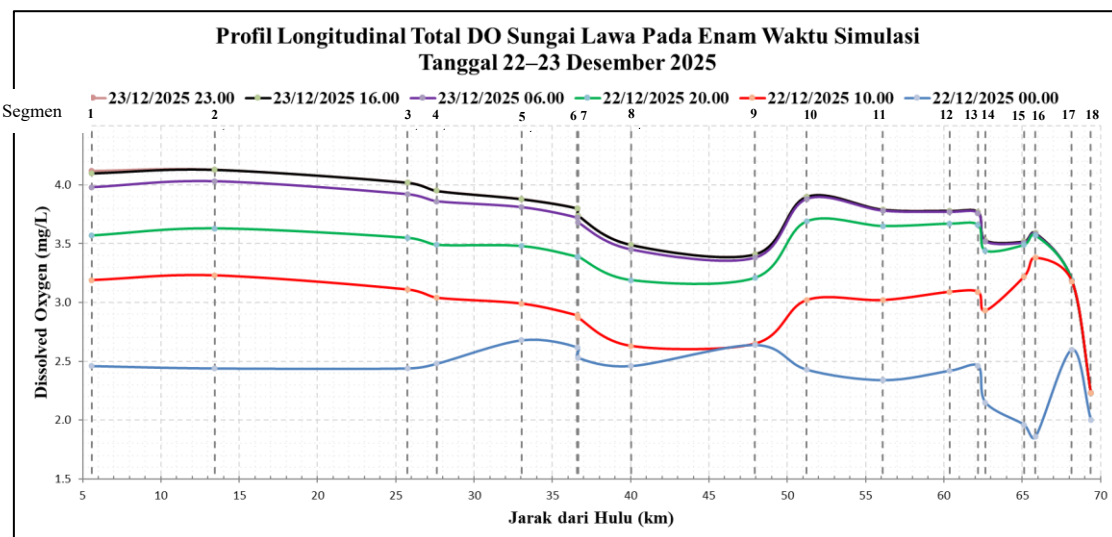
Hasil simulasi menggunakan WASP menunjukkan bahwa konsentrasi CBOD mengalami perubahan sepanjang jarak Sungai Lawa dari hulu ke hilir sepanjang sungai yang dimodelkan. Perubahan ini menggambarkan adanya pengaruh masukan lateral, karakteristik hidraulik, serta proses degradasi bahan organik karbon di sepanjang badan air. Pada beberapa segmen, nilai CBOD menunjukkan pola yang berbeda karena dipengaruhi oleh variasi debit, kecepatan aliran, waktu tinggal air dan masuknya pencemar dari anak sungai maupun saluran pembuangan. Profil longitudinal CBOD pada enam waktu simulasi ditunjukkan pada Gambar 3 dan digunakan untuk mengevaluasi perubahan konsentrasi bahan organik karbon selama periode pemodelan. Secara umum, CBOD merupakan parameter penting untuk menilai tekanan beban organik terhadap sistem sungai. Nilai CBOD yang mengalami kenaikan menunjukkan kebutuhan oksigen yang lebih besar untuk proses oksidasi biologis, sedangkan nilai CBOD yang mengalami penurunan menunjukkan berkurangnya bahan organik karbon yang terdegradasi di sepanjang aliran Sungai yang dimodelkan. Kondisi perubahan konsentrasi yang digambarkan pada kurva profil longitudinal menggambarkan pola perubahan kualitas air sungai Lawa terhadap jarak yang dibagi-bagi dalam 18 segmen dengan karakteristik yang berbeda.



Gambar 3. Profil Longitudinal CBOD Sungai Lawa pada Enam Waktu Simulasi

Hasil Simulasi DO

DO merupakan parameter penting karena mencerminkan ketersediaan oksigen untuk proses biologi di perairan. Hasil simulasi DO menunjukkan adanya variasi spasial dari hulu ke hilir serta variasi temporal pada enam waktu simulasi. Variasi DO dipengaruhi oleh beban organik, suhu air, kecepatan aliran, kedalaman, proses reaerasi, dan konsumsi oksigen akibat degradasi CBOD. Dalam sistem sungai yang menerima beban organik, peningkatan CBOD umumnya meningkatkan konsumsi oksigen sehingga dapat menurunkan DO. Profil longitudinal DO pada enam waktu simulasi ditunjukkan pada Gambar 4. Grafik tersebut memperlihatkan perubahan DO sepanjang ruas model dan menjadi dasar untuk mengevaluasi bagian sungai yang relatif mengalami tekanan oksigen terlarut. Perubahan DO yang tidak seragam antar segmen menunjukkan bahwa proses pemulihan oksigen tidak hanya ditentukan oleh waktu simulasi, tetapi juga oleh kondisi hidraulik dan masukan lateral di sepanjang aliran. Pada segmen 1 sampai dengan 18, dengan waktu simulasi yang sama, profil yang ditunjukkan melalui pemodelan hampir seragam, kecuali pada periode pemodelan 22 Desember 2025 jam 00.00 WITA.

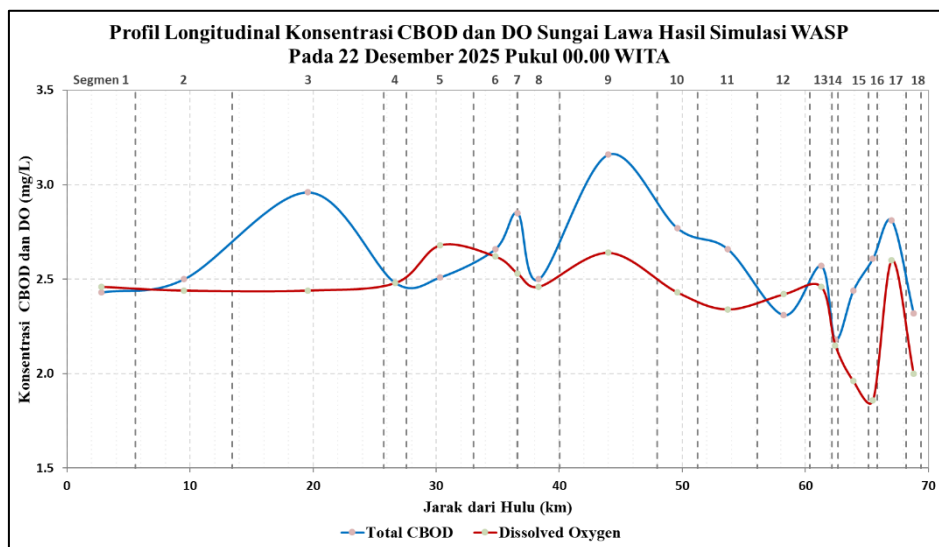


Gambar 4. Profil Longitudinal DO Sungai Lawa pada Enam Waktu Simulasi

Profil Longitudinal CBOD dan DO pada Waktu Simulasi Tertentu

Selain grafik gabungan enam waktu simulasi, hasil *running* WASP/WRDB juga dianalisis pada setiap waktu keluaran untuk melihat perubahan konsentrasi CBOD dan DO secara lebih rinci sepanjang jarak Sungai Lawa. Analisis per waktu ini penting karena simulasi dilakukan selama dua hari, yaitu 22–23 Desember 2025, sehingga perubahan kualitas air tidak hanya dilihat dari arah hulu-hilir, tetapi juga dari perkembangan temporal selama periode simulasi berlangsung.

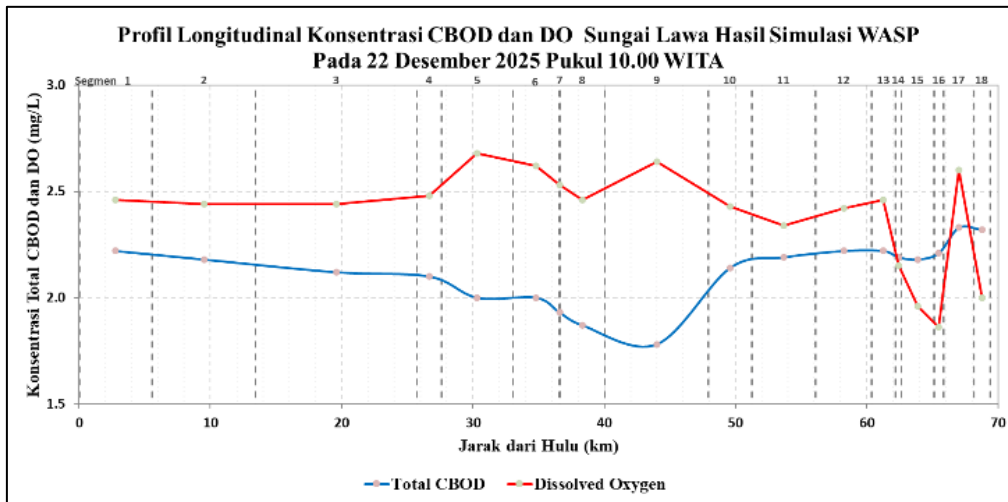
Pada 22 Desember 2025 pukul 00.00 WITA, konsentrasi CBOD masih berfluktuasi cukup besar sepanjang ruas sungai, dengan nilai relatif tinggi pada beberapa segmen tengah seperti terlihat pada Gambar 5. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada awal simulasi masih terdapat beban bahan organik yang cukup nyata pada beberapa bagian aliran, kemungkinan besar dipengaruhi oleh masukan dari aktivitas antropogenik di sekitar daerah aliran sungai. Pada waktu yang sama, DO berada pada kisaran rendah hingga sedang, dengan penurunan yang cukup signifikan teridentifikasi di beberapa segmen hilir. Pola distribusi spasial ini mengindikasikan adanya tekanan beban organik yang nyata terhadap ketersediaan oksigen terlarut pada awal periode pemodelan, di mana proses dekomposisi bahan organik secara biologis turut berkontribusi terhadap penurunan kadar DO di segmen-segmen tertentu.



Gambar 5. Profil Longitudinal Konsentrasi CBOD dan DO Sungai Lawa Hasil Simulasi WASP pada 22 Desember 2025 Pukul 00.00 WITA

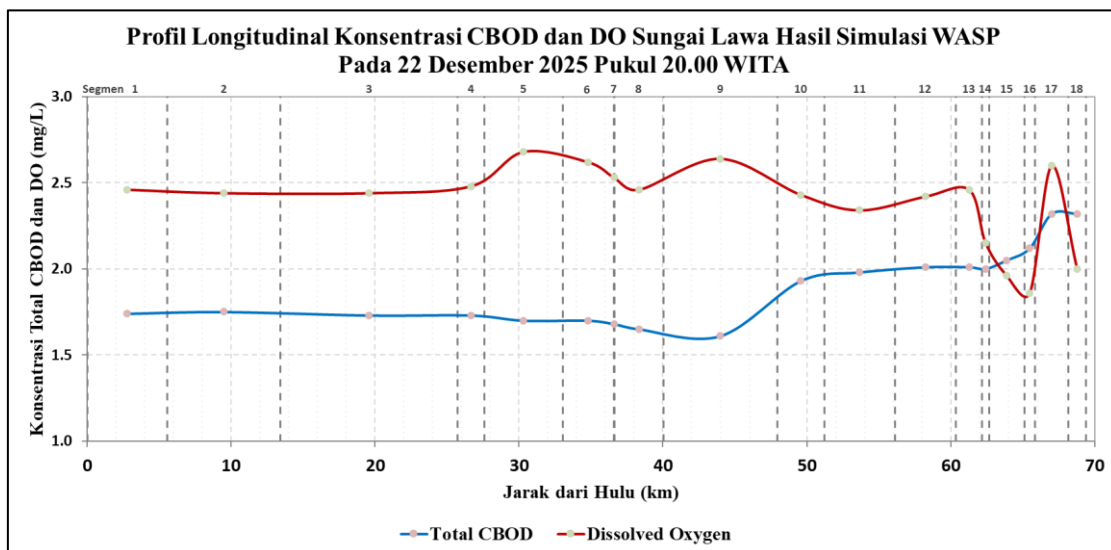
Pada 22 Desember 2025 pukul 10.00 WITA, konsentrasi CBOD secara umum mengalami penurunan dibandingkan awal simulasi, sebagaimana ditunjukkan oleh profil longitudinal pada Gambar 6. Penurunan tersebut tampak dominan pada segmen hulu hingga bagian tengah sungai. Kondisi ini mengindikasikan mulai berlangsungnya proses degradasi bahan organik karbon di dalam badan air, serta adanya pengaruh pengenceran oleh aliran sungai yang relatif besar pada saat periode pengamatan.

Berkurangnya konsentrasi CBOD menunjukkan bahwa sebagian bahan organik mulai terurai selama proses *transport* dari hulu ke hilir. Namun, pada bagian hilir terlihat kecenderungan peningkatan kembali konsentrasi CBOD pada beberapa segmen akhir. Pola ini dapat menunjukkan adanya akumulasi beban pencemar, perubahan karakteristik hidraulik, atau masukan pencemar tambahan dari anak sungai, saluran drainase, aktivitas domestik, perkebunan, maupun kegiatan lain di sekitar wilayah hilir. Sementara itu, konsentrasi DO masih menunjukkan variasi longitudinal, dengan nilai relatif lebih rendah pada beberapa segmen hilir. Hal ini menandakan bahwa proses pemulihan oksigen terlarut belum berlangsung secara merata, meskipun beban CBOD mulai berkurang pada sebagian besar ruas sungai.



Gambar 6. Profil Longitudinal Konsentrasi CBOD dan DO Sungai Lawa Hasil Simulasi WASP pada 22 Desember 2025 Pukul 10.00 WITA.

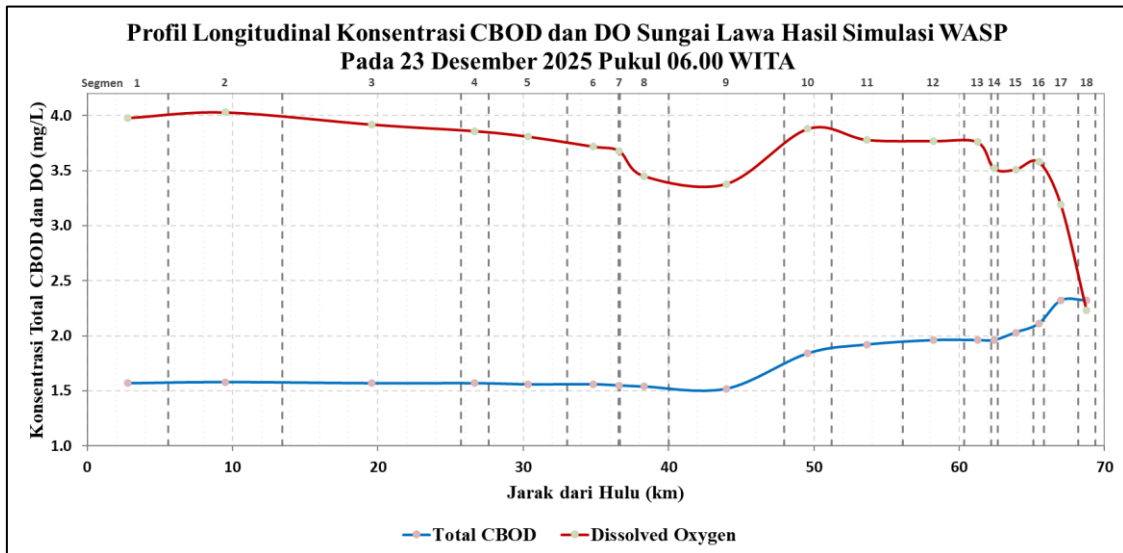
Pada profil longitudinal 22 Desember 2025 pukul 20.00 WITA pada Gambar 7, CBOD semakin menurun dan relatif lebih stabil pada bagian hulu sampai tengah sungai. Kenaikan CBOD mulai terlihat kembali pada bagian hilir, terutama setelah jarak sekitar 48 km hingga mendekati akhir segmen model. Pola tersebut menunjukkan adanya pengaruh masukan lateral atau perubahan karakteristik hidraulik di bagian hilir. DO pada waktu ini masih berfluktuasi dan mengalami penurunan pada beberapa segmen yang berdekatan dengan kenaikan CBOD.



Gambar 7. Profil Longitudinal Konsentrasi CBOD dan DO Sungai Lawa Hasil Simulasi WASP pada 22 Desember 2025 Pukul 20.00 WITA

Pada 23 Desember 2025 pukul 06.00 WITA, konsentrasi CBOD menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan tanggal 22 Desember 2025 sesuai profil longitudinal pada Gambar 8. Penurunan ini terutama terlihat pada bagian hulu hingga tengah sungai, yang mengindikasikan berkurangnya kandungan bahan organik akibat proses degradasi, pengenceran, dan *transport* aliran. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa beban pencemar organik mulai mengalami penurunan seiring waktu simulasi. Namun, pada bagian hilir, nilai CBOD kembali meningkat secara bertahap, kemungkinan dipengaruhi oleh akumulasi beban pencemar, perlambatan

aliran, atau adanya masukan pencemar tambahan dari segmen hilir. Sebaliknya, DO mengalami peningkatan yang cukup jelas, khususnya pada hulu dan tengah sungai. Peningkatan DO menunjukkan adanya pemulihan oksigen terlarut melalui proses reaerasi, menurunnya beban organik, serta kondisi aliran sungai yang penuh atau mendekati banjir, sehingga kemampuan sungai dalam memperbaiki kualitas air menjadi lebih baik.



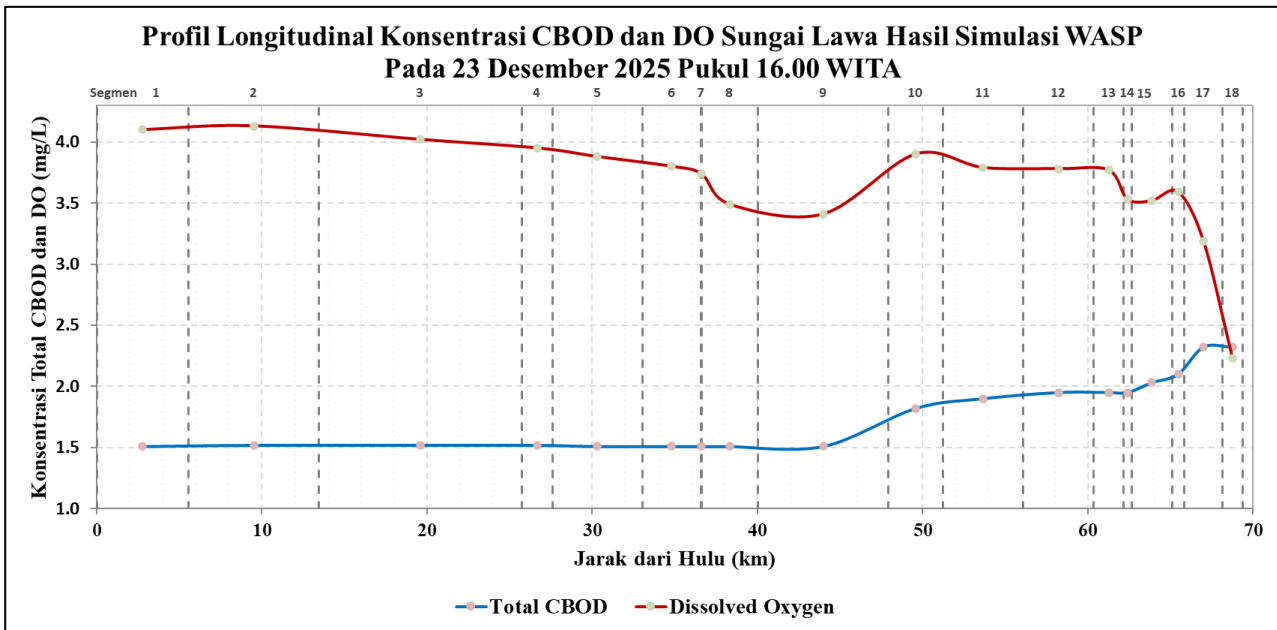
Gambar 8. Profil Longitudinal Konsentrasi CBOD dan DO Sungai Lawa Hasil Simulasi WASP pada 23 Desember 2025 Pukul 06.00 WITA

Pada profil longitudinal Gambar 9, yaitu hasil simulasi pada 23 Desember 2025 pukul 16.00 WITA, pola konsentrasi CBOD cenderung stabil pada bagian hulu hingga tengah Sungai Lawa. Kondisi ini menunjukkan bahwa beban bahan organik karbon pada segmen tersebut relatif telah mengalami pengurangan dibandingkan periode awal simulasi. Penurunan dan kestabilan CBOD dapat dipengaruhi oleh proses degradasi bahan organik, pengenceran oleh debit sungai, serta *transport* massa selama aliran bergerak dari hulu ke hilir. Stabilitasnya konsentrasi CBOD juga mengindikasikan bahwa proses penguraian bahan organik dan pencampuran massa air mulai berlangsung lebih seimbang pada segmen hulu dan tengah.

Namun, pada bagian hilir, konsentrasi CBOD kembali menunjukkan peningkatan. Pola ini mengindikasikan adanya kemungkinan akumulasi bahan organik, perubahan karakteristik hidraulik, perlambatan aliran, atau masukan pencemar tambahan dari anak sungai, saluran drainase, aktivitas domestik, perkebunan, maupun kegiatan lain di sekitar wilayah hilir. Peningkatan CBOD di hilir juga dapat menunjukkan bahwa proses pengenceran dan degradasi bahan organik belum mampu sepenuhnya mengimbangi tambahan beban pencemar yang masuk pada bagian tersebut.

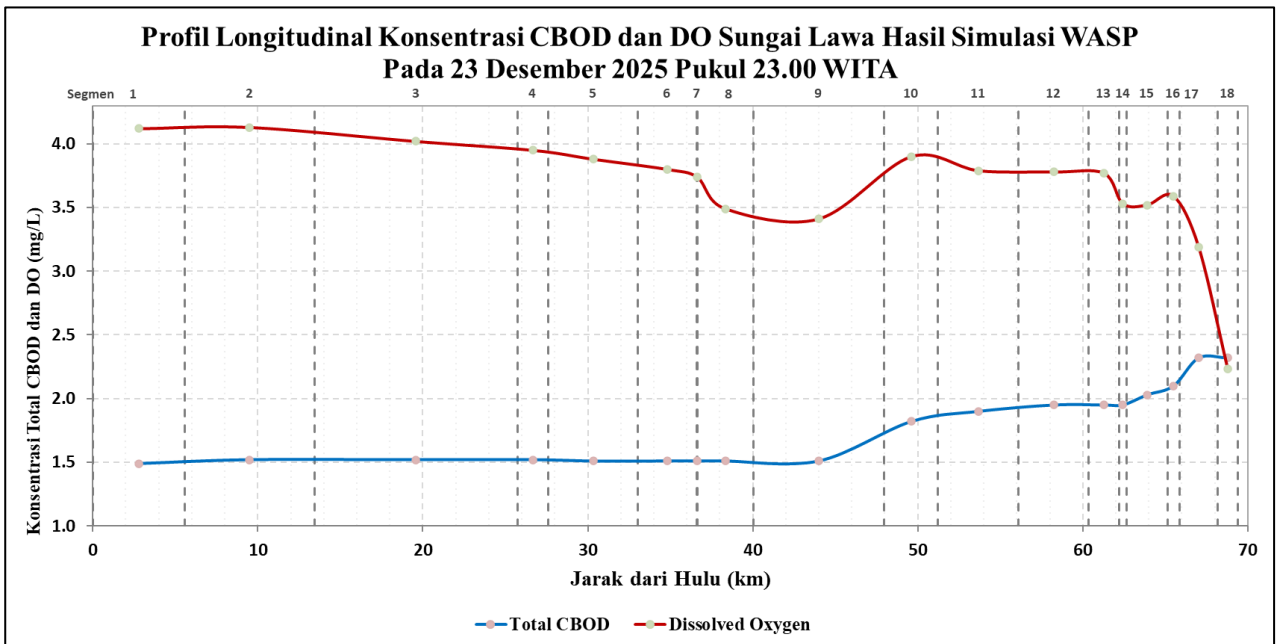
Sementara itu, konsentrasi DO masih relatif tinggi pada bagian hulu, tetapi mengalami penurunan bertahap ke arah hilir. Penurunan DO yang terjadi bersamaan dengan peningkatan CBOD menunjukkan bahwa proses oksidasi bahan organik masih berlangsung dan membutuhkan konsumsi oksigen terlarut. Semakin besar beban organik yang masuk ke badan air, semakin besar pula kebutuhan oksigen untuk proses dekomposisi biologis. Hal ini menyebabkan ketersediaan DO pada segmen hilir menjadi lebih rendah dibandingkan bagian hulu dan tengah.

Dengan demikian, segmen hilir masih menerima pengaruh beban organik atau mengalami proses pemulihan oksigen yang lebih lambat dibandingkan segmen lainnya. Kondisi ini memperlihatkan bahwa kualitas air bagian hilir lebih rentan terhadap penurunan oksigen terlarut. Secara keseluruhan, hasil simulasi pada waktu ini menunjukkan bahwa perbaikan kualitas air belum berlangsung merata, terutama pada segmen hilir Sungai Lawa.



Gambar 9. Profil Longitudinal Konsentrasi CBOD dan DO Sungai Lawa Hasil Simulasi WASP pada 23 Desember 2025 Pukul 16.00 WITA

Pada 23 Desember 2025 pukul 23.00 WITA, pola longitudinal sesuai Gambar 10, CBOD dan DO relatif mirip dengan pukul 16.00 WITA. CBOD pada bagian hulu sampai tengah tetap rendah dan stabil, sedangkan bagian hilir menunjukkan peningkatan. DO masih tinggi pada bagian hulu, kemudian menurun menuju bagian hilir. Kondisi ini menunjukkan bahwa setelah dua hari simulasi, proses degradasi bahan organik telah menurunkan konsentrasi CBOD pada sebagian besar ruas sungai, tetapi bagian hilir masih menjadi zona yang perlu diperhatikan karena menunjukkan CBOD lebih tinggi dan DO lebih rendah.



Gambar 10. Profil Longitudinal Konsentrasi CBOD dan DO Sungai Lawa Hasil Simulasi WASP pada 23 Desember 2025 Pukul 23.00 WITA



Secara keseluruhan, analisis pada enam waktu simulasi menunjukkan perubahan temporal yang jelas pada parameter CBOD dan DO di sepanjang Sungai Lawa. Konsentrasi CBOD cenderung menurun dari awal hingga akhir simulasi, terutama pada bagian hulu dan tengah sungai. Penurunan ini mengindikasikan berkurangnya beban bahan organik karbon, yang dipengaruhi oleh proses degradasi bahan organik, pengenceran akibat debit tinggi, serta *transport* massa sepanjang aliran. Sebaliknya, konsentrasi DO cenderung meningkat pada hari kedua simulasi, khususnya di beberapa segmen hulu dan tengah. Peningkatan tersebut menunjukkan adanya pemulihan oksigen terlarut melalui proses reaerasi dan berkurangnya konsumsi oksigen akibat penurunan CBOD. Pola ini memperlihatkan hubungan berlawanan antara CBOD dan DO, yaitu ketika beban organik menurun, ketersediaan oksigen terlarut meningkat. Namun, bagian hilir masih menunjukkan nilai DO yang lebih rendah dibandingkan segmen lainnya. Kondisi ini mengindikasikan bahwa segmen hilir memiliki respons kualitas air lebih kritis, sehingga perlu menjadi perhatian utama dalam pengelolaan beban pencemar Sungai Lawa.

Hubungan CBOD dan DO

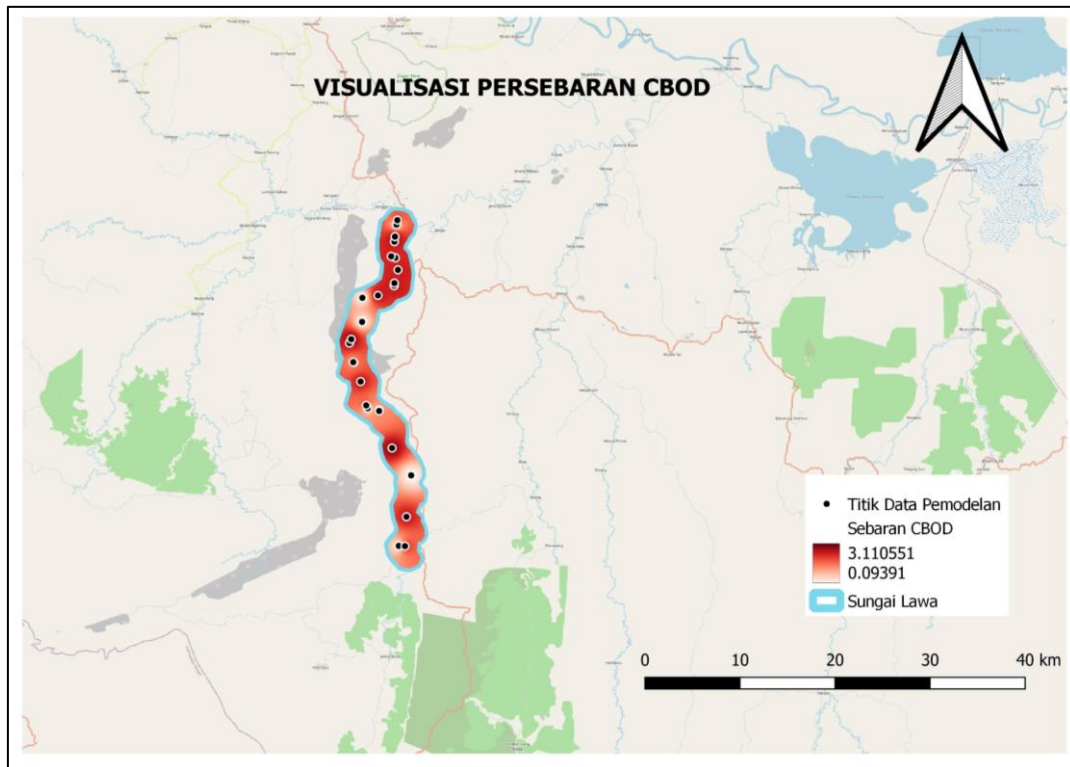
Hubungan CBOD dan DO pada Sungai Lawa menunjukkan interaksi antara beban organik karbon dan ketersediaan oksigen terlarut. CBOD yang lebih tinggi dapat meningkatkan kebutuhan oksigen untuk proses biodegradasi sehingga berpotensi menurunkan DO. Sebaliknya, ketika konsentrasi CBOD menurun dan kondisi hidraulik mendukung reaerasi, DO berpotensi meningkat. Pola ini sesuai dengan mekanisme dasar kualitas air sungai, yaitu keseimbangan antara proses deoksigenasi akibat degradasi bahan organik dan proses reaerasi dari atmosfer.

Dalam konteks Sungai Lawa, variasi konsentrasi CBOD dan DO dapat dikaitkan dengan tekanan aktivitas antropogenik di daerah aliran sungai, seperti aktivitas domestik masyarakat, pertambangan batubara, perkebunan kelapa sawit, serta masukan dari anak sungai dan saluran buangan. Aktivitas tersebut berpotensi menambah beban bahan organik dan memengaruhi ketersediaan oksigen terlarut di badan air. Oleh karena itu, penggunaan model WASP membantu menggambarkan dinamika perubahan kualitas air secara spasial dan temporal. Hasil simulasi tidak hanya menunjukkan perubahan konsentrasi pencemar, tetapi juga memperlihatkan pengaruh jarak dari hulu ke hilir, debit, kecepatan aliran, masukan lateral, serta kondisi hidrologis saat Sungai Lawa berada dalam keadaan penuh atau hampir banjir. Kondisi tersebut penting untuk memahami pola transport dan pengenceran pencemar di sungai.

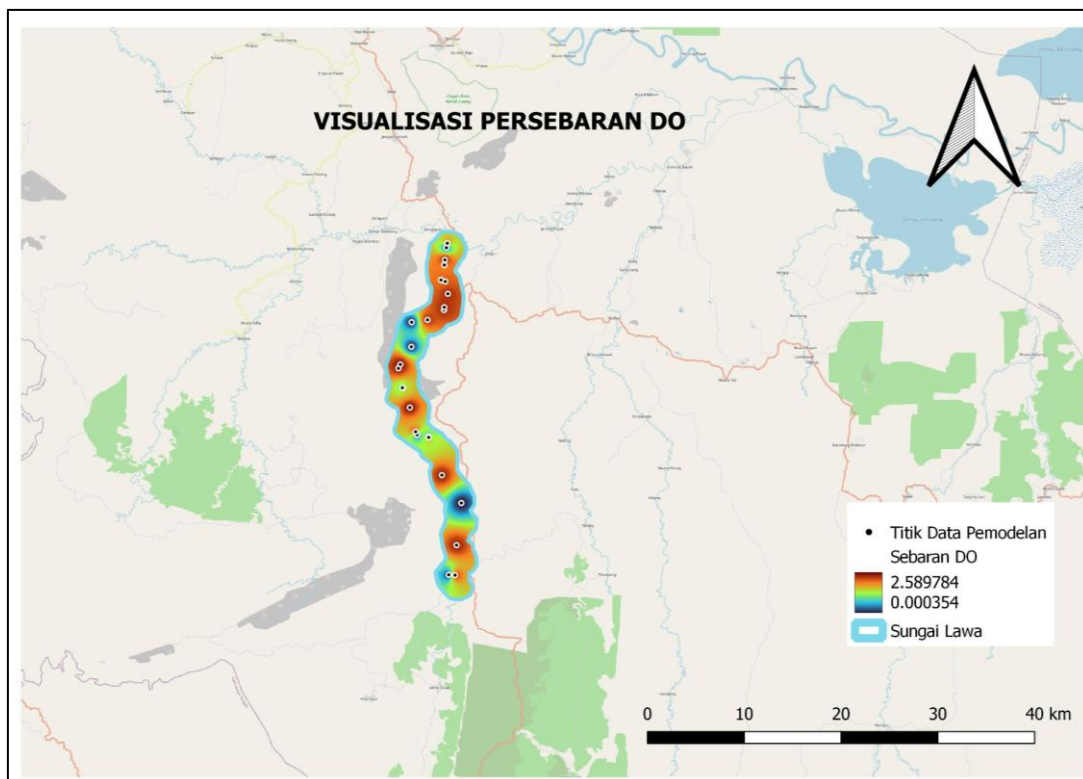
Visualisasi Persebaran CBOD dan DO

Visualisasi spasial hasil simulasi digunakan untuk memperjelas pola persebaran CBOD dan DO di sepanjang alur Sungai Lawa. Peta sebaran disusun berdasarkan titik data hasil pemodelan pada ruas utama sungai, sehingga variasi konsentrasi dapat diamati secara spasial, tidak hanya melalui grafik profil longitudinal. Melalui visualisasi ini, perubahan kualitas air dari hulu ke hilir menjadi lebih mudah dipahami, terutama dalam mengidentifikasi segmen dengan konsentrasi CBOD relatif lebih tinggi dan segmen dengan nilai DO relatif rendah. Informasi tersebut penting untuk menunjukkan area yang berpotensi mengalami tekanan kualitas air yang lebih besar.

Selain itu, visualisasi spasial membantu menggambarkan hubungan antara peningkatan beban organik dan penurunan oksigen terlarut pada lokasi tertentu. Peta sebaran juga memperlihatkan kecenderungan perubahan kualitas air secara lebih jelas antar segmen sungai, baik pada bagian hulu, tengah, maupun hilir. Melalui penyajian ini, area dengan konsentrasi CBOD relatif tinggi dan nilai DO relatif rendah dapat diidentifikasi secara lebih mudah. Kondisi tersebut penting karena menunjukkan segmen sungai yang berpotensi mengalami tekanan pencemaran lebih besar. Dengan demikian, visualisasi ini dapat menjadi dasar dalam mengevaluasi kondisi kualitas air, menentukan segmen prioritas pengendalian pencemaran, serta mendukung interpretasi hasil model secara lebih informatif. Penyajian dalam bentuk peta memudahkan pembaca memahami lokasi-lokasi kritis secara visual, sehingga hasil simulasi tidak hanya bersifat numerik, tetapi juga dapat digunakan sebagai bahan pendukung dalam perencanaan pengelolaan kualitas air sungai secara lebih efektif, terarah, dan berbasis lokasi.



Gambar 11. Visualisasi Persebaran CBOD di Sungai Lawa



Gambar 12. Visualisasi Persebaran DO di Sungai Lawa



GIS memungkinkan visualisasi hasil simulasi dalam bentuk peta spasial, yang mempermudah interpretasi distribusi spasial variabel kualitas air, pencemaran air dari industri maupun pertanian [7], [8], [9]. Berdasarkan Gambar 11, sebaran CBOD terlihat mengikuti alur utama Sungai Lawa dan terkonsentrasi pada titik-titik pemodelan di sepanjang ruas sungai. Area dengan intensitas warna lebih tinggi menunjukkan bagian sungai dengan konsentrasi CBOD yang relatif lebih besar. Pola ini sejalan dengan hasil profil longitudinal, yang menunjukkan bahwa nilai CBOD tidak seragam dari hulu ke hilir karena dipengaruhi oleh kondisi awal, proses transport, degradasi bahan organik, serta masukan lateral dari anak sungai dan saluran buangan.

Gambar 12 menunjukkan visualisasi persebaran DO di Sungai Lawa. Variasi warna pada peta menggambarkan perbedaan konsentrasi oksigen terlarut pada titik-titik pemodelan. Bagian dengan nilai DO lebih rendah mengindikasikan segmen yang mengalami tekanan oksigen lebih besar, sedangkan bagian dengan nilai DO lebih tinggi menunjukkan kondisi pemulihan oksigen yang relatif lebih baik. Secara umum, visualisasi ini mendukung hasil simulasi temporal yang menunjukkan adanya peningkatan DO pada periode akhir simulasi, meskipun beberapa bagian sungai masih memperlihatkan konsentrasi DO yang lebih rendah akibat pengaruh beban organik, kondisi hidraulik, dan masukan lateral.

Validasi Model DO

Validasi model DO dilakukan pada enam waktu simulasi untuk mengevaluasi waktu pemodelan yang paling mendekati data observasi. Hasil validasi menunjukkan bahwa performa model berbeda antar waktu simulasi. Nilai galat terendah menunjukkan waktu simulasi dengan kesesuaian terbaik terhadap data observasi.

Tabel 7. Hasil Validasi Model DO pada Enam Waktu Simulasi

Waktu Simulasi	MAE (mg/L)	RMSE (mg/L)	MAPE (%)	R ²
22/12/2025 00.00	0,32	0,37	13,86	0,07
22/12/2025 10.00	0,63	0,70	27,62	0,01
22/12/2025 20.00	1,05	1,11	45,76	0,00
23/12/2025 06.00	1,25	1,33	54,53	0,05
23/12/2025 16.00	1,30	1,38	56,47	0,08
23/12/2025 23.00	1,30	1,38	56,52	0,08

Berdasarkan Tabel 7, performa terbaik model DO terjadi pada 22 Desember 2025 pukul 00.00 WITA. Pada waktu tersebut, nilai MAE sebesar 0,32 mg/L, RMSE sebesar 0,37 mg/L, dan MAPE sebesar 13,86%. Nilai tersebut merupakan galat terendah dibandingkan waktu simulasi lainnya. Dengan demikian, berdasarkan indikator galat, waktu simulasi tersebut paling mendekati data observasi lapangan.

Meskipun galat pada waktu awal relatif kecil, nilai R² pada semua waktu simulasi tergolong rendah. Hal ini menunjukkan bahwa pola spasial hasil simulasi belum sepenuhnya mengikuti variasi data observasi. Rendahnya R² dapat dipengaruhi oleh jumlah data observasi yang terbatas, ketidakpastian lokasi dan waktu pencocokan data, variasi lokal kondisi hidraulik, serta ketidakpastian masukan beban pencemar. Oleh karena itu, interpretasi validasi tidak hanya didasarkan pada R², tetapi juga mempertimbangkan MAE, RMSE, dan MAPE sebagai indikator besar galat model.

Validasi Model CBOD

Validasi model CBOD dilakukan pada enam waktu simulasi untuk mengevaluasi kemampuan model dalam merepresentasikan perubahan konsentrasi bahan organik karbon sepanjang Sungai Lawa. Indikator validasi yang digunakan meliputi MAE, RMSE, MAPE, dan R², sehingga performa model dapat dibandingkan antar waktu simulasi.

Validasi parameter organik dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi CBOD terhadap data BOD hasil pengukuran lapangan sebagai pendekatan representatif terhadap beban bahan organik karbon. Perbandingan ini digunakan untuk mengevaluasi kecenderungan model, dengan mempertimbangkan bahwa CBOD dan BOD merupakan parameter yang tidak sepenuhnya identik secara analitik.



Tabel 8. Hasil Validasi Model CBOD pada Enam Waktu Simulasi

Waktu Simulasi	MAE (mg/L)	RMSE (mg/L)	MAPE (%)	R ²
22/12/2025 00.00	0,26	0,30	9,86	0,04
22/12/2025 10.00	0,47	0,55	17,59	0,00
22/12/2025 20.00	0,71	0,77	26,66	0,01
23/12/2025 06.00	0,79	0,86	30,14	0,02
23/12/2025 16.00	0,82	0,89	31,20	0,02
23/12/2025 23.00	0,82	0,89	31,20	0,02

Berdasarkan Tabel 8, hasil validasi CBOD menunjukkan performa terbaik pada 22 Desember 2025 pukul 00.00 WITA, dengan nilai MAE sebesar 0,26 mg/L, RMSE sebesar 0,30 mg/L, dan MAPE sebesar 9,86%. Nilai galat tersebut merupakan yang terendah dibandingkan waktu simulasi lainnya, sehingga kondisi awal simulasi merupakan waktu pemodelan yang paling mendekati data observasi untuk parameter CBOD. Pada waktu simulasi berikutnya, nilai galat CBOD meningkat, ditunjukkan oleh kenaikan RMSE dari 0,55 mg/L pada 22 Desember 2025 pukul 10.00 WITA menjadi 0,77 mg/L pada 22 Desember 2025 pukul 20.00 WITA, kemudian mencapai 0,86 mg/L pada 23 Desember 2025 pukul 06.00 WITA dan 0,89 mg/L pada 23 Desember 2025 pukul 16.00-23.00 WITA. Peningkatan galat ini menunjukkan bahwa ketidakpastian model bertambah seiring bertambahnya waktu simulasi. Hal tersebut dapat dipengaruhi oleh dinamika masukan lateral, proses degradasi bahan organik, debit aliran, serta keterbatasan data observasi temporal yang digunakan sebagai pembandingan.

Nilai R² pada validasi CBOD relatif rendah pada seluruh waktu simulasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun galat absolut pada waktu awal relatif kecil, pola spasial hasil simulasi belum sepenuhnya mengikuti variasi data observasi. Dengan demikian, interpretasi hasil CBOD lebih tepat digunakan untuk menjelaskan kecenderungan spasial-temporal bahan organik karbon, sedangkan klaim ketelitian model perlu dibatasi pada waktu simulasi dengan nilai galat terendah. Penggunaan MAE, RMSE dan MAPE secara bersamaan memberikan evaluasi yang lebih menyeluruh terhadap performa model CBOD dan DO, karena masing-masing metrik menangkap aspek *error* yang berbeda [10], [11]. Gabungan berbagai metrik *error* dan analisis spasial dengan GIS dapat meningkatkan transparansi dan kredibilitas evaluasi model kualitas air sungai. Integrasi ini membantu identifikasi *hotspot* pencemaran dan validasi spasial model [12], [13], [14].

Implikasi Pengelolaan Kualitas Air

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa model WASP dapat digunakan untuk mengevaluasi kecenderungan spasial-temporal kualitas air Sungai Lawa berdasarkan CBOD dan DO. Informasi ini penting untuk mengidentifikasi bagian sungai yang berpotensi menerima tekanan beban organik lebih besar serta waktu simulasi yang menunjukkan kondisi paling mendekati hasil pengamatan. Model ini dapat digunakan untuk memprediksi dampak fenomena alam dan aktivitas manusia terhadap kualitas air, seperti eutrofikasi, pencemaran industri [3]. Bagi Sungai Lawa, hasil pemodelan dapat digunakan sebagai dasar awal untuk menyusun skenario pengendalian beban pencemar organik. Strategi pengelolaan dapat diarahkan pada pengawasan masukan dari kegiatan domestik, pertambangan, perkebunan, serta saluran buangan yang masuk ke sungai. Pengembangan model pada tahap berikutnya dapat dilakukan dengan menambahkan skenario reduksi beban CBOD agar dapat menilai kemampuan sungai dalam memenuhi target mutu air.

4. Kesimpulan

Model kualitas air Sungai Lawa berhasil dibangun menggunakan WASP pada ruas sepanjang sekitar 69,38 km yang direpresentasikan menjadi 18 segmen dengan fokus simulasi pada parameter CBOD dan DO. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konsentrasi CBOD mengalami perubahan spasial dan temporal selama periode 22–23 Desember 2025, dengan kecenderungan menurun dari awal hingga akhir simulasi. Sebaliknya, konsentrasi DO cenderung meningkat pada hari kedua simulasi seiring dengan penurunan CBOD dan



berlangsungnya proses pemulihan oksigen terlarut, meskipun beberapa segmen hilir masih menunjukkan nilai DO yang lebih rendah dibandingkan bagian hulu dan tengah sungai.

Validasi model pada enam waktu simulasi menunjukkan bahwa performa terbaik untuk parameter CBOD dan DO terjadi pada 22 Desember 2025 pukul 00.00 WITA. Pada waktu tersebut, validasi CBOD menghasilkan MAE 0,26 mg/L, RMSE 0,30 mg/L, MAPE 9,86%, dan R^2 0,04, sedangkan validasi DO menghasilkan MAE 0,32 mg/L, RMSE 0,37 mg/L, MAPE 13,86%, dan R^2 0,07. Hasil penelitian ini merepresentasikan kondisi aliran tinggi pada periode 22–23 Desember 2025, sehingga penerapannya pada kondisi hidrologis lain perlu didukung oleh data observasi tambahan serta validasi pada periode debit berbeda.

Referensi

- [1] D. Alfrianti and A. Sudradjat, “Managing organic pollutant loads in the Lower Cileungsi River, Indonesia,” *Water Policy*, vol. 26, no. 10, pp. 959–977, Oct. 2024, doi: 10.2166/wp.2024.023.
- [2] K. C. Deepa Varsa, A. W. A. Rahiman, E. Arunbabu, K. J. Antony, and N. Priyadarshini, “Water quality simulation using the WASP model for eutrophication control in a South Indian Reservoir,” *Water Pract. Technol.*, vol. 18, no. 11, pp. 2740–2758, Nov. 2023, doi: 10.2166/wpt.2023.173.
- [3] M. Zelazny, M. Bryła, B. Ozga-Zielinski, and T. Walczykiewicz, “Applicability of the WASP Model in an Assessment of the Impact of Anthropogenic Pollution on Water Quality—Dunajec River Case Study,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 3, Feb. 2023, doi: 10.3390/su15032444.
- [4] N. Obin, H. Tao, F. Ge, and X. Liu, “Research on water quality simulation and water environmental capacity in lushui river based on wasp model,” *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 20, Oct. 2021, doi: 10.3390/w13202819.
- [5] D. Castillo *et al.*, “Modeling Metal(loid)s Transport in Arid Mountain Headwater Andean Basin: A WASP-Based Approach,” *Water (Switzerland)*, vol. 17, no. 13, Jul. 2025, doi: 10.3390/w17131905.
- [6] NASA POWER, “NASA POWER Data Access Viewer,” NASA Langley Research Center. Accessed: Apr. 09, 2026. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [7] Z. Liao, C. Zhou, W. Tian, T. Hu, and R. Guo, “CBR-based integration of a hydrodynamic and water quality model and GIS—a case study of Chaohu City,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 7, pp. 6436–6449, Mar. 2019, doi: 10.1007/s11356-018-3862-5.
- [8] J. Vasilev, P. Petrov, and J. Jordanov, “A Practical Approach of Data Visualization from Geographic Information Systems by Using Mobile Technologies,” *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, vol. 18, no. 3, pp. 4–15, 2024, doi: 10.3991/ijim.v18i03.46655.
- [9] A. Das, “A data-driven approach utilizing machine learning (ML) and geographical information system (GIS)-based time series analysis with data augmentation for water quality assessment in Mahanadi River Basin, Odisha, India,” *Discover Sustainability*, vol. 6, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1007/s43621-025-01464-7.
- [10] T. O. Hodson, “Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not,” Jul. 19, 2022, *Copernicus GmbH*. doi: 10.5194/gmd-15-5481-2022.
- [11] M. M. Mundu, J. I. Sempewo, A. Goparaju, and D. E. Uti, “Comparative Analysis of Model Evaluation Metrics in Energy Systems, Environmental Modeling, and Sustainability Science,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 2026, no. 1, 2026, doi: 10.1155/er/6170467.
- [12] A. A. Mamun, M. Nuruzzaman, and M. N. Salleh, “Assessing Reaeration Rate Equations for Modelling Dissolved Oxygen of Pusu River in Malaysia,” *ASM Science Journal*, vol. 18, 2023, doi: 10.32802/asmscj.2023.1193.
- [13] A. Jaffar, N. M. Thamrin, M. S. A. M. Ali, M. F. Misnan, A. I. M. Yassin, and N. M. Zan, “Spatial interpolation method comparison for physico-chemical parameters of river water in Klang River using MATLAB,” *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 11, no. 4, pp. 2368–2377, Aug. 2022, doi: 10.11591/eei.v11i4.3615.



- [14] A. Muhammad *et al.*, “A Localized Evaluation of Surface Water Quality Using GIS-Based Water Quality Index along Satpara Watershed Skardu Baltistan, Pakistan,” *ISPRS Int. J. Geoinf.*, vol. 13, no. 11, Nov. 2024, doi: 10.3390/ijgi13110393.