

Pemodelan Dispersi Fosfat dan Evaluasi Strategi Mitigasi Pencemaran Limbah Deterjen Domestik di Saluran Irigasi Cibarani Menggunakan HEC-RAS

Phosphorus Dispersion Modeling and Evaluation of Domestic Detergent Waste Pollution Mitigation Strategies in the Cibarani Irrigation Canal Using HEC-RAS

Ezzy Yuanita¹⁾ dan Doddi Yudianto^{1)*}

¹⁾Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan
Jln. Ciumbuleuit 94 Bandung, 40141 Jawa Barat

*Corresponding author: doddi_yd@unpar.ac.id

Diterima: 08 Agustus 2025; Direvisi: 27 April 2026; Disetujui: 29 Mei 2026

Abstract

Phosphate pollution from domestic detergent wastewater poses a significant challenge to urban water quality, particularly in small drainage channels where detergent-derived sources and dispersion patterns have not been thoroughly investigated. This study focuses on the Cibarani Irrigation Channel in Bandung, Indonesia, where phosphate primarily originates from household detergent discharge. The objective was to model the spatial-temporal dispersion of Total Phosphorus (TP) and evaluate two control strategies: substitution with low-phosphate detergents and partial technical reduction of TP concentration. A steady-flow hydrodynamic and water quality model was developed using HEC-RAS by incorporating field data on flow discharge, TP, DO, BOD, and NH₃-N, as well as community survey results. Model performance was evaluated using R², RMSE, and Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE). Simulations during wet and dry seasons showed that TP concentrations consistently exceeded the Class II water quality standard (0.2 mg/L), reaching peaks of 0.878 mg/L during the wet season and 0.578 mg/L during the dry season. The low-phosphate detergent scenario reduced TP concentrations by up to 58%, while the partial technical reduction scenario lowered concentrations close to the water quality standard even under low-flow conditions. Survey results indicated that all respondents were willing to adopt environmentally friendly detergents. The findings suggest that the combination of low-phosphate detergent use and partial technical TP reduction has the potential to become an effective management strategy for reducing phosphate pollution in urban drainage channels.

Keywords: phosphate pollution, detergent waste, HEC-RAS modeling, urban water quality, Cibarani Irrigation Channel

Abstrak

Pencemaran fosfat dari limbah deterjen domestik menjadi tantangan signifikan bagi kualitas air perkotaan, khususnya pada saluran drainase kecil yang sumber dan pola penyebarannya dari deterjen belum pernah dikaji secara mendalam. Penelitian ini berfokus pada Saluran Irigasi Cibarani di Bandung, Indonesia, di mana fosfat terutama berasal dari pembuangan deterjen rumah tangga. Tujuannya adalah memodelkan dispersi spasial-temporal total fosfat (TP) dan mengevaluasi dua strategi pengendalian, yaitu penggantian deterjen rendah fosfat dan penurunan teknis parsial konsentrasi TP. Model hidrodinamika dan kualitas air aliran tetap dikembangkan menggunakan HEC-RAS dengan memasukkan data lapangan debit, TP, DO, BOD, dan NH₃-N, serta hasil survei masyarakat. Kinerja model dievaluasi menggunakan metrik R², RMSE, dan Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE). Simulasi untuk musim hujan dan kemarau menunjukkan bahwa konsentrasi TP secara konsisten melebihi baku mutu Kelas II (0,2 mg/L), dengan puncak 0,878 mg/L pada musim hujan dan 0,578 mg/L pada musim kemarau. Skenario deterjen rendah fosfat menurunkan TP hingga 58%, sedangkan skenario penurunan teknis parsial TP mampu menurunkan konsentrasi mendekati baku mutu bahkan pada kondisi debit rendah. Hasil survei menunjukkan seluruh responden bersedia beralih ke deterjen ramah lingkungan. Temuan penelitian mengindikasikan bahwa kombinasi penggunaan deterjen rendah fosfat dan pengendalian teknis parsial TP berpotensi menjadi strategi pengelolaan yang efektif untuk mengurangi pencemaran fosfat pada saluran drainase perkotaan.

Kata Kunci: pencemaran fosfat, limbah deterjen, pemodelan HEC-RAS, kualitas air perkotaan, Saluran Irigasi Cibarani

PENDAHULUAN

Urbanisasi yang pesat di Indonesia menimbulkan tantangan besar dalam pengelolaan sumber daya alam dan keberlanjutan lingkungan (Suharjo et al., 2024). Salah satu dampaknya adalah penurunan kualitas air pada sistem perairan strategis, seperti Sungai Cikapundung di Kota Bandung, yang berperan sebagai sumber air baku dan sarana rekreasi (Wijaya et al., 2021). Peningkatan jumlah penduduk dan aktivitas domestik di wilayah perkotaan telah meningkatkan beban pencemar, termasuk pada saluran-saluran yang bermuara ke Sungai Cikapundung (Fitriana et al., 2024). Pencemaran air di wilayah perkotaan merupakan isu kritis yang timbul dari aktivitas domestik, industri, dan pertanian.

Salah satu saluran tersebut adalah Saluran Irigasi Cibarani, yang awalnya dibangun untuk irigasi tetapi kini mengalami perubahan fungsi menjadi saluran pembuangan limbah domestik. Perubahan fungsi ini meningkatkan beban pencemar, terutama dari limbah deterjen rumah tangga. Limbah deterjen mengandung surfaktan dan fosfat yang berpotensi menurunkan kualitas air secara signifikan (Wardhani & Alessandra, 2023). Meskipun telah tercemar, sebagian warga masih memanfaatkannya untuk budidaya ikan, yang menimbulkan risiko kesehatan dan lingkungan (Valera et al., 2024).

Air limbah deterjen mengandung fosfat dan surfaktan yang berkontribusi terhadap penurunan kualitas air. Surfaktan seperti LAS bersifat toksik dan dapat menghambat difusi oksigen terlarut, sedangkan fosfat umumnya hadir sebagai STPP yang meningkatkan efektivitas surfaktan dengan menurunkan kesadahan air (Chairattanamanokorn et al., 2025).

Dalam jangka panjang, fosfat yang dibuang tanpa pengolahan dapat terakumulasi di badan air dan menurunkan kualitas (Zhou et al., 2022). Dampaknya meliputi peningkatan pertumbuhan alga yang menurunkan oksigen terlarut dan mengganggu komunitas biota akuatik (Akinnowo, 2023; Glime, 2014), serta menimbulkan masalah kesehatan dan meningkatkan biaya pengolahan air untuk kebutuhan domestik maupun industri (Lin et al., 2022).

Berbagai strategi pengendalian pencemaran fosfat telah diusulkan, seperti penerapan instalasi pengolahan air limbah domestik dan pembatasan kandungan fosfat pada deterjen (Khanam et al., 2023). Namun, perumusan kebijakan yang tepat memerlukan informasi ilmiah mengenai pola penyebaran polutan di lapangan.

Pencemaran nutrien dari sumber domestik menjadi perhatian global, terutama pada saluran perkotaan kecil yang belum terintegrasi dengan sistem pengolahan limbah (Krimsky et al., 2021). Air limbah domestik diketahui menjadi sumber utama beban fosfor, khususnya pada kondisi aliran rendah dengan kemampuan pengenceran yang terbatas (Loiselle et al., 2024). Kondisi ini serupa dengan Saluran Irigasi Cibarani yang menerima limbah cucian mengandung deterjen dari kawasan permukiman padat dan bermuara ke Sungai Cikapundung.

Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada evaluasi kualitas air berbasis observasi atau menggunakan model seperti CE-QUAL-W2, SWAT, WASP8, dan MIKE11 yang umumnya diterapkan pada badan air alami berskala besar. Namun, pemodelan dispersi fosfat yang secara khusus bersumber dari limbah deterjen domestik pada saluran drainase atau irigasi perkotaan menggunakan HEC-RAS masih sangat terbatas. Kesenjangan riset ini penting karena saluran kecil memiliki karakteristik hidraulik, mekanisme pencampuran, dan respons pencemaran yang berbeda dibandingkan sungai alami. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut melalui integrasi simulasi hidrodinamika dan kualitas air menggunakan HEC-RAS serta evaluasi distribusi polutan dan skenario pengendalian pencemar berbasis hasil pemodelan pada Saluran Irigasi Cibarani.

Berbagai perangkat lunak pemodelan kualitas air tersedia. Namun, HEC-RAS dipilih dalam studi ini karena kemampuannya mensimulasikan hidrodinamika dan kualitas air secara terintegrasi, mendukung pemodelan kondisi steady maupun unsteady, serta memiliki antarmuka yang ramah pengguna dan bebas lisensi (Kim et al., 2023). HEC-RAS juga memungkinkan analisis parameter utama seperti *Total Phosphorus* (TP), *Dissolved Oxygen* (DO), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), dan *Ammonia* ($\text{NH}_3\text{-N}$) dalam satu sistem simulasi.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memodelkan penyebaran fosfat dari limbah deterjen di Saluran Irigasi Cibarani menggunakan HEC-RAS pada dua kondisi hidrologis yang berbeda, yaitu kondisi debit lebih rendah dan debit lebih tinggi yang diamati selama periode pengamatan. Selain itu, penelitian ini mengevaluasi dampak penggunaan tiga jenis deterjen yang umum dipakai oleh masyarakat terhadap kualitas air, dengan fokus pada parameter utama seperti *Total Phosphorus* (TP), *Dissolved Oxygen* (DO), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), dan *Ammonia* ($\text{NH}_3\text{-N}$). Selanjutnya, dilakukan simulasi skenario

pengendalian pencemaran berbasis perubahan produk dan intervensi teknis untuk menguji kemungkinan pencapaian baku mutu Kelas II. Pendekatan komprehensif ini menggabungkan analisis teknis, partisipasi masyarakat, dan evaluasi skenario mitigasi untuk menghasilkan rekomendasi pengelolaan kualitas air yang lebih efektif dan berkelanjutan bagi kawasan perkotaan.



Gambar 1 Lokasi Penelitian (Saluran Irigasi Cibarani)

Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. Studi ini berfokus pada Saluran Irigasi Cibarani di Bandung, Indonesia, yang mengalami transformasi fungsi dari saluran irigasi menjadi penerima limbah domestik akibat urbanisasi pesat dan terbatasnya pengelolaan air limbah. Lokasi ini dipilih karena menerima beban limbah domestik yang tinggi, termasuk fosfat dari deterjen, mengalami tekanan lingkungan yang signifikan, serta masih dimanfaatkan masyarakat untuk budidaya ikan, yang menunjukkan paparan langsung terhadap risiko penurunan kualitas air. Akumulasi polutan deterjen telah berkontribusi terhadap degradasi kualitas air, berpotensi mengganggu ekosistem lokal, dan memengaruhi kondisi perairan hilir, termasuk Sungai Cikapundung. Selain itu, kajian mengenai pemodelan dispersi fosfat dari limbah deterjen domestik pada saluran perkotaan kecil menggunakan model hidrodinamika seperti HEC-RAS masih sangat terbatas. Kesenjangan ini menegaskan urgensi penelitian sekaligus mendukung kontribusi ilmiah studi ini melalui penerapan pemodelan untuk menganalisis perilaku transport polutan dan mengevaluasi strategi mitigasi yang relevan pada sistem perairan perkotaan.

METODOLOGI

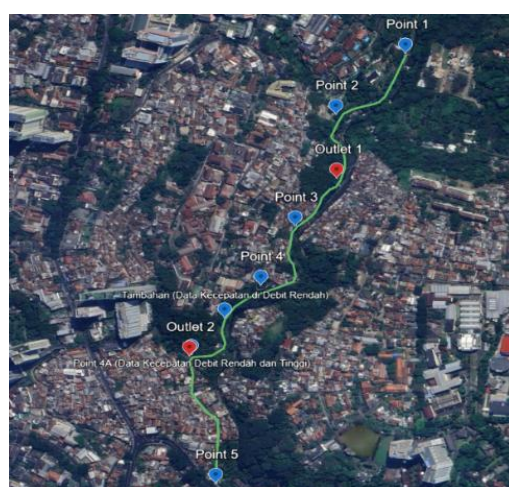
Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi untuk memodelkan penyebaran polutan fosfat dari limbah deterjen di Saluran Irigasi Cibarani, dengan tujuan menganalisis dampaknya terhadap kualitas air serta mengevaluasi strategi mitigasi yang potensial. Pendekatan ini

mengintegrasikan data lapangan dan pemodelan komputasi guna memberikan pemahaman komprehensif mengenai transportasi polutan dan implikasinya terhadap lingkungan dalam sistem perairan yang dinamis.

Data Penelitian

Pengumpulan data primer melibatkan pengukuran langsung di lapangan dan survei komunitas yang dilakukan di Saluran Irigasi Cibarani. Data dikumpulkan pada dua periode pengamatan tahun 2025 yang merepresentasikan kondisi hidrologi dengan debit tinggi dan debit lebih rendah, guna menangkap variasi dinamika aliran dan perilaku penyebaran polutan di dalam saluran.

1) Lokasi dan Titik Pengamatan



Gambar 2 Lokasi Penelitian (Saluran Irigasi Cibarani)

Penelitian dilakukan di Saluran Irigasi Cibarani, Kota Bandung, Indonesia, yang mengalami perubahan fungsi dari saluran irigasi menjadi penerima limbah domestik. Titik pengamatan ditentukan secara purposive untuk merepresentasikan kondisi hulu, tengah, dan hilir saluran serta mempertimbangkan keberadaan sumber masukan limbah domestik di sepanjang aliran.

Sebanyak lima titik utama pengamatan (Point 1–Point 5) digunakan dalam penelitian ini. Selain itu, dua titik outlet diidentifikasi sebagai lokasi masuknya limbah domestik ke saluran utama. Lokasi titik pengamatan penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.

2) Pengukuran Laju Aliran

Pengukuran laju aliran dilakukan pada titik representatif di hulu, tengah, dan hilir Saluran Irigasi Cibarani pada kondisi debit tinggi dan rendah untuk menangkap variabilitas hidrologi. Data ini krusial bagi simulasi hidraulik HEC-RAS karena variasi aliran memengaruhi kecepatan dan

pola penyebaran polutan. Kecepatan aliran diukur menggunakan Vernier LabQuest2 Kit, sedangkan kedalaman air ditentukan secara manual menggunakan pita ukur saat survei lapangan.

Tabel 1 Kecepatan Aliran pada Kondisi Debit Tinggi dan Debit Rendah

Titik	Jarak (m)	Kecepatan	
		Debit Tinggi	Debit Rendah
		(m/s)	(m/s)
P1	0	0,16	0,1
P2	286,81	0,16	0,03
P3	529,55	0,24	0,08
P4	584,75	0,31	0,08
Tambahan	684,34	-	0,39
P4A	923,15	0,26	0,11

Di lokasi hulu (P1), kedalaman air diukur sebesar 0,40 m pada kondisi debit tinggi dan 0,24 m pada kondisi debit rendah. Dengan mengombinasikan data kedalaman, kecepatan aliran (Tabel 1), dan geometri saluran, debit aliran yang masuk ke saluran diestimasi sebesar 0,3665 m³/s pada kondisi debit tinggi dan 0,0432 m³/s pada kondisi debit rendah. Nilai debit tersebut diasumsikan konstan dan digunakan sebagai kondisi batas hulu (*upstream boundary condition*) dalam simulasi model saluran.

Satu titik tambahan pada jarak 684,34 m digunakan untuk validasi kecepatan aliran pada kondisi debit rendah dan tidak digunakan dalam pengambilan sampel kualitas air. Selain titik utama

Tabel 2 Parameter Kualitas Air pada Kondisi Debit Tinggi dan Debit Rendah

Titik	Jarak (m)	Debit Tinggi				Debit Rendah			
		DO	BOD	TP	NH ₃	DO	BOD	TP	NH ₃
		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
P1	0	7,78	11	0,83	0,27	6,74	23	0,25	0,21
P2	286,81	7,73	11	0,83	0,27	6,84	23	0,25	0,21
P3	529,55	6,52	8	0,88	0,25	5,74	22	0,16	0,57
P4	584,75	6,13	8	0,59	0,30	5,46	25	0,23	0,74
P5	1063,55	6,04	9	0,36	0,37	4,61	27	0,58	2,52

Tabel 3 Parameter Kualitas Air Limbah Domestik pada Kondisi Debit Tinggi dan Debit Rendah

Titik	Jarak (m)	Debit Tinggi				Debit Rendah			
		DO	BOD	TP	NH ₃	DO	BOD	TP	NH ₃
		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
O1	338	4,58	74	2,0	5,36	4,29	166	3,84	9,59
O2	923,15	3,72	62	5,07	6,08	3,70	167	4,67	25,75

Data kualitas air pada titik O1 dan O2 digunakan sebagai input *lateral inflow condition* dalam simulasi kualitas air HEC-RAS.

4) Analisis Sampel Deterjen

Jenis deterjen ditentukan melalui survei masyarakat di sekitar Saluran Irigasi Cibarani,

P1 hingga P4A, diidentifikasi beberapa *point source* yang berasal dari pembuangan rumah tangga, usaha kecil, dan permukiman padat tanpa pengolahan limbah terpadu.

3) Pengambilan Sampel Kualitas Air

Sampel air diambil di beberapa titik sepanjang Saluran Irigasi Cibarani yang bertepatan dengan lokasi pengukuran laju aliran dan sumber pembuangan limbah deterjen. Parameter yang dianalisis meliputi *Total Fosfat (TP)*, *Dissolved Oxygen (DO)*, *Biochemical Oxygen Demand (BOD)*, dan *Ammonia (NH₃-N)*, yang merepresentasikan tingkat pencemaran dan keseimbangan ekosistem perairan (Chidiac et al., 2023). DO diukur in-situ menggunakan YSI ProQuatro dan divalidasi dengan titrasi Winkler (Metode Standar 4500-O.G). TP dianalisis dengan spektrofotometri UV-Vis sesuai SNI 6989-31:2021; BOD ditentukan melalui inkubasi lima hari menggunakan BD 600 dengan metode manometrik (USEPA-approved); dan NH₃-N dianalisis menggunakan metode fenat (Metode Standar 4500-NH₃). Hasil analisis digunakan untuk kalibrasi dan validasi model kualitas air HEC-RAS serta menilai kontribusi pencemaran dari limbah domestik berbasis fosfat dan surfaktan. Hasil pengukuran parameter kualitas air pada titik pengamatan utama disajikan pada Tabel 2, sedangkan karakteristik kualitas air limbah domestik pada titik masukan *lateral inflow* (O1 dan O2) ditunjukkan pada Tabel 3

menghasilkan tiga sampel yang mewakili variasi komposisi: deterjen bersurfaktan tinggi, bersurfaktan rendah, dan bersurfaktan tinggi berlabel ramah lingkungan. Ketiga sampel dianalisis di laboratorium untuk mengukur kandungan fosfatnya, yang digunakan dalam estimasi beban polutan ke Saluran Irigasi Cibarani.

Titik P1-P5 merepresentasikan lokasi pengamatan kualitas air dan pengukuran hidraulik di sepanjang saluran. Titik O1-O2 menunjukkan lokasi masuknya limbah domestik yang dimodelkan sebagai *lateral inflow*, sedangkan RS (*river station*) merepresentasikan penampang melintang yang digunakan dalam konfigurasi model HEC-RAS. Posisi masing-masing lokasi ditentukan berdasarkan jarak dari hulu saluran.

Pembuangan domestik direpresentasikan sebagai *lateral inflow* pada beberapa titik yang awalnya diidentifikasi dari pemetaan geospasial studi terdahulu (Wijaya et al., 2021), kemudian diverifikasi dan disesuaikan melalui survei lapangan agar mencerminkan kondisi aktual pada periode pengamatan. Pada titik *inflow* aktif, dilakukan pengambilan sampel kualitas air, sedangkan debit lateral diestimasi menggunakan pendekatan volume-waktu untuk memperoleh nilai awal. Nilai tersebut selanjutnya dikalibrasi secara iteratif dalam HEC-RAS dengan meminimalkan deviasi kecepatan terhadap hasil observasi hingga tercapai konvergensi model. Dengan demikian, parameter debit lateral yang digunakan tidak bersifat arbitrer, melainkan merupakan hasil integrasi antara observasi lapangan dan kalibrasi berbasis data.

2) Kalibrasi Model

Kalibrasi model hidraulik dilakukan secara iteratif dengan menyesuaikan parameter aliran dan debit lateral hingga hasil simulasi mendekati data observasi lapangan, khususnya data kecepatan aliran pada titik pengamatan. Proses kalibrasi dilakukan untuk memastikan representasi kondisi hidraulik saluran dalam model HEC-RAS sesuai dengan kondisi aktual lapangan.

3) Kondisi Awal dan Kondisi Batas Kualitas Air (*Initial and Boundary Conditions*)

Setelah model hidraulik dikalibrasi, modul kualitas air HEC-RAS diaktifkan dengan menetapkan kondisi batas untuk semua skenario. Parameter yang dimodelkan meliputi *Total Fosfat* (TP), *Dissolved Oxygen* (DO), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), dan *Ammonia* (NH₃-N),

Kondisi awal (*initial condition*) ditentukan berdasarkan konsentrasi kualitas air hasil pengukuran lapangan pada titik observasi di sepanjang saluran. Kondisi batas hulu (*upstream boundary condition*) ditetapkan menggunakan konsentrasi parameter kualitas air pada titik hulu (P1), sedangkan kondisi batas hilir (*downstream boundary condition*) ditentukan berdasarkan asumsi aliran keluar normal (*normal depth condition*) pada ujung saluran model.

Beban polutan dari limbah domestik dimasukkan sebagai kondisi *lateral inflow* menggunakan hasil analisis laboratorium dari titik masuk limbah. Nilai parameter reaksi seperti laju deoksigenasi (K_d), reaerasi (K_r), serta transformasi fosfat dan amonia diambil dari literatur dan disesuaikan secara iteratif selama proses kalibrasi untuk memastikan hasil simulasi mampu merepresentasikan dinamika degradasi dan pemulihan kualitas air secara realistis.

4) Evaluasi Model

Kalibrasi model dilakukan dengan menyesuaikan parameter hidraulik dan kualitas air secara iteratif hingga hasil simulasi mendekati data observasi lapangan. Proses ini dilakukan menggunakan data kecepatan aliran dan parameter kualitas air pada titik pengamatan. Untuk memastikan keandalan dan akurasi model kualitas air yang dikembangkan, hasil simulasi dievaluasi menggunakan beberapa fungsi objektif statistik, yaitu *Root Mean Square Error* (RMSE), Koefisien Determinasi (R^2), dan Efisiensi *Nash-Sutcliffe* (NSE). Ketiga indikator ini mengukur sejauh mana nilai simulasi mendekati data lapangan yang diamati, baik dari segi deviasi absolut maupun korelasi.

Persamaan untuk metrik-metrik ini adalah sebagai berikut:

1) *Root Mean Square Error* (RMSE)

RMSE mengukur besarnya rata-rata kesalahan antara nilai simulasi dan nilai observasi. RMSE yang lebih rendah menunjukkan kesesuaian model yang lebih baik dengan data observasi (Hodson, 2022).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (O_t - S_t)^2} \quad (1)$$

2) Koefisien Determinasi (R^2)

R^2 menggambarkan proporsi varians variabel dependen yang dapat diprediksi dari variabel independen. Nilai yang mendekati 1 menunjukkan korelasi yang lebih kuat antara data simulasi dan data observasi.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{t=1}^T (O_t - \bar{O})(S_t - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (O_t - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^T (S_t - \bar{S})^2}} \right)^2 \quad (2)$$

3) Efisiensi Nash-Sutcliffe (NSE)

NSE adalah statistik ternormalisasi yang menentukan besarnya relatif varians residual dibandingkan dengan varians data terukur.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (O_t - S_t)^2}{\sum_{t=1}^T (O_t - \bar{O})^2} \quad (3)$$

Dimana:

- t : Indeks waktu atau jumlah data observasi
- O_t : Nilai observasi pada waktu ke- t
- S_t : Nilai simulasi pada waktu ke- t
- \bar{O} : Rata-rata nilai observasi
- \bar{S} : Rata-rata nilai hasil simulasi

Validasi dilakukan untuk setiap parameter kualitas air yang disimulasikan, yaitu *Total Fosfat* (TP), *Dissolved Oxygen* (DO), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), dan *Ammonia* ($\text{NH}_3\text{-N}$). Hasil evaluasi model ini menentukan kesesuaian model untuk menganalisis skenario pencemaran dan pengendalian kualitas air di Saluran Irigasi Cibarani.

5) Setup Temporal Simulasi

Frekuensi pembuangan limbah diasumsikan 2 kali sehari, masing-masing pada pukul 06.00 dan 18.00, masing-masing selama 1 jam, sesuai pola aktivitas harian yang ditemukan pada survei. Mayoritas responden (63,16%) mencuci pada pagi hari, dan sebagian lainnya pada sore hingga malam ($\pm 36,84\%$), sehingga pola ini mencerminkan dua periode puncak pembuangan dalam sehari. Simulasi dijalankan selama 24 jam untuk merepresentasikan dinamika penyebaran polutan setelah setiap peristiwa pembuangan, serta untuk menangkap proses transportasi, pengenceran, dan transformasi temporal parameter kualitas air.

6) Skenario Simulasi

Skenario simulasi dikembangkan untuk mengevaluasi pengaruh kandungan fosfat dari tiga jenis deterjen yang dipilih berdasarkan survei masyarakat dan hasil analisis laboratorium. Ketiga skenario tersebut terdiri atas D1, D2, dan D3, yang merepresentasikan variasi formulasi deterjen yang umum digunakan masyarakat. Pemilihan ketiga skenario ini bertujuan untuk membandingkan pengaruh variasi kandungan surfaktan dan fosfat terhadap kualitas air, termasuk mengevaluasi efektivitas klaim deterjen ramah lingkungan dalam menurunkan beban pencemaran.

Skenario D1 merepresentasikan deterjen konvensional dengan kandungan surfaktan tinggi (21%) dan diasumsikan memiliki kontribusi fosfat domestik yang tinggi. Skenario D2 merepresentasikan deterjen dengan kandungan surfaktan lebih rendah (8,9%) yang dipertimbangkan sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan. Sementara itu, skenario D3 merepresentasikan deterjen berlabel ramah lingkungan dengan kandungan surfaktan setara D1 (21%) untuk mengevaluasi apakah klaim ramah lingkungan berkorelasi dengan penurunan beban fosfat secara aktual.

Kandungan *Total Fosfat* (TP) dari masing-masing sampel deterjen dianalisis di laboratorium dan digunakan sebagai input konsentrasi *lateral inflow* dalam model kualitas air HEC-RAS. Pendekatan ini dilakukan agar skenario simulasi berbasis data empiris dan mampu merepresentasikan kondisi pencemaran domestik secara lebih realistis.

Selain skenario berbasis jenis deterjen, simulasi mitigasi juga dilakukan untuk mengevaluasi potensi pengurangan pencemaran melalui pendekatan teknis dan non-teknis. Pendekatan teknis meliputi pengenceran buangan di bagian hulu saluran, sedangkan pendekatan non-teknis mencakup perubahan waktu pembuangan limbah domestik berdasarkan pola aktivitas masyarakat hasil survei.

Setiap skenario mensimulasikan distribusi spasial dan temporal parameter kualitas air, termasuk Total Fosfat (TP), Oksigen Terlarut (DO), Kebutuhan Oksigen Biokimia (BOD), dan Amonia ($\text{NH}_3\text{-N}$), yang kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi area akumulasi polutan dan mengevaluasi efektivitas intervensi dalam meningkatkan kualitas air Saluran Irigasi Cibarani.

Tabel 4 Hasil Uji Laboratorium Konsentrasi Total Fosfat (TP) pada Tiga Jenis Deterjen

Sampel deterjen	TP (mg/l)
D1	1,521
D2	0,577
D3	1,355

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan temuan dari pengumpulan data lapangan, simulasi hidrodinamik dan kualitas air menggunakan *HEC-RAS*, serta analisis skenario untuk transpor polutan fosfat di Saluran Irigasi Cibarani. Hasil-hasil tersebut dibahas terkait dengan prinsip-prinsip ilmiah yang telah mapan mengenai transpor polutan, hidrologi perkotaan, dan pemodelan kualitas air, dengan analisis komparatif terhadap studi-studi yang relevan.

Pengumpulan Data Lapangan dan Kondisi Batas

Pengumpulan lapangan dan pengambilan sampel dilakukan pada 26 Februari 2025 (kondisi debit lebih tinggi) dan 20 Juni 2025 (kondisi debit lebih rendah), masing-masing pada pagi hari untuk menangkap puncak aktivitas domestik saat pembuangan limbah rumah tangga berlangsung. Sampel diambil dari bagian hulu saluran yang menerima aliran dari wilayah Watervang melalui Bendungan Leuwilimoos, kemudian dianalisis pada

lima titik utama (P1–P5) serta dua titik tambahan (O1 dan O2) di sepanjang saluran (lihat Gambar 2). Pengukuran kecepatan aliran dilakukan bersamaan di lokasi yang sama.

Hasil pengukuran parameter kualitas air pada titik utama pengamatan disajikan pada Tabel 2, sedangkan karakteristik kualitas air limbah domestik pada titik *lateral inflow* O1 dan O2 ditunjukkan pada Tabel 3. Selain titik P1–P5, diidentifikasi sumber pembuangan domestik, di mana O1 mewakili tujuh titik pembuangan di segmen hulu dan O2 mewakili tiga titik di segmen hilir. Keduanya berasal dari kawasan permukiman padat tanpa pengolahan limbah dan dimodelkan sebagai beban lateral tetap berdasarkan hasil uji laboratorium pada masing-masing kondisi pengamatan. Secara hidrologis, dinamika TP ditentukan oleh interaksi kondisi aliran, konsentrasi hulu, dan tambahan beban limbah domestik di sepanjang saluran. Berdasarkan Tabel 2 dan Tabel 3, pada kondisi debit lebih tinggi seluruh konsentrasi TP di titik utama pengamatan masih melampaui baku mutu Kelas II sebesar 0,2 mg/L. Nilai TP di P1 sebesar 0,834 mg/L meningkat hingga mencapai puncak di P3 sebesar 0,878 mg/L setelah menerima masukan dari O1 dengan konsentrasi TP sebesar 2,00 mg/L. Selanjutnya, konsentrasi TP menurun di P4 sebesar 0,588 mg/L dan P5 sebesar 0,356 mg/L meskipun terdapat masukan tambahan dari O2 sebesar 5,07 mg/L. Pola ini menunjukkan dominasi pengenceran dan pencampuran pada kecepatan 0,241–0,312 m/s serta kemungkinan sedimentasi fosfat terikat partikel.

Pada kondisi debit lebih rendah, konsentrasi TP di P1 tercatat sebesar 0,246 mg/L dan menurun di P3 menjadi 0,160 mg/L meskipun terdapat masukan TP dari O1 sebesar 3,84 mg/L. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pencampuran belum berlangsung homogen dan dimungkinkan terjadi pengendapan awal pada kecepatan aliran rendah. Selanjutnya, konsentrasi TP meningkat di P4 menjadi 0,231 mg/L dan mencapai puncak di P5 sebesar 0,578 mg/L yang mengindikasikan kontribusi tambahan dari masukan lateral O2 sebesar 4,67 mg/L serta rendahnya kapasitas pengenceran aliran. Kecepatan aliran yang relatif rendah pada kondisi debit lebih rendah, yaitu 0,100 m/s di P1, 0,028 m/s di P2, 0,083 m/s di P3 dan P4, serta 0,111 m/s di P5, menunjukkan waktu tinggal polutan yang lebih panjang dan pengenceran kurang efektif. Sebaliknya, pada kondisi debit lebih tinggi, peningkatan debit dan kecepatan aliran mendorong proses transportasi dan pengenceran polutan secara lebih cepat di sepanjang saluran. Meskipun demikian, tingginya konsentrasi TP pada

titik hulu menunjukkan bahwa beban fosfat tidak hanya berasal dari masukan lateral domestik di sepanjang saluran, tetapi juga dipengaruhi kualitas air masuk dari bagian hulu saluran.

Perbandingan antar segmen menunjukkan bahwa pada kondisi debit lebih tinggi terjadi peningkatan konsentrasi TP pada segmen P2–P3 akibat pengaruh O1 yang cepat tercampur dengan aliran utama, sedangkan pada segmen P4–P5 konsentrasi TP cenderung menurun akibat proses pengenceran yang lebih dominan. Pada kondisi debit lebih rendah, konsentrasi TP pada segmen P2–P3 menurun akibat pencampuran parsial dan kemungkinan pengendapan awal, sementara pada segmen P4–P5 terjadi peningkatan tajam akibat kontribusi O2 dan rendahnya kapasitas dilusi saluran.

Simulasi Hidrodinamika dan Kualitas Air Awal (Berdasarkan Hasil Observasi)

Simulasi aliran tetap satu dimensi (1D) menggunakan HEC-RAS dilakukan untuk memperoleh parameter hidrodinamika sebagai dasar pemodelan kualitas air di Saluran Irigasi Cibarani. Model ini berhasil menangkap perbedaan musiman khas DAS tropis, dengan mensimulasikan kondisi debit tinggi dan debit rendah. Pada kondisi debit rendah, aliran masuk yang rendah menghasilkan kecepatan aliran 0,028–0,083 m/s dan kedalaman 0,24 m di titik hulu (P1), menghasilkan debit hanya 0,0432 m³/s. Kondisi ini menciptakan energi hidrolis rendah dan waktu tinggal polutan yang lebih lama, mendukung akumulasi polutan. Sebaliknya, pada kondisi debit tinggi, debit meningkat hingga 0,3665 m³/s di P1, dengan kedalaman 0,40 m dan kecepatan 0,158–0,713 m/s (tertinggi di P5), yang meningkatkan kapasitas pengenceran dan transportasi polutan ke hilir (HEC-RAS Water Quality Technical Reference HEC-RAS Water Quality User's Manual, 2023).

Pola ini konsisten dengan prinsip hidrolika sungai, di mana kecepatan dan kedalaman aliran memengaruhi proses adveksi dan pengenceran. Dalam penelitian ini, titik P1–P5 merepresentasikan lokasi observasi kualitas air dan pengukuran hidraulik di lapangan, sedangkan RS (*River Station*) merupakan penampang melintang dalam model HEC-RAS yang digunakan untuk simulasi hidrodinamika dan kualitas air. Titik observasi dipetakan ke RS terdekat dalam konfigurasi model. Total debit meningkat secara kumulatif karena tambahan aliran limbah di beberapa RS, yang ditentukan melalui kalibrasi model berbasis kecocokan hasil simulasi dengan data observasi. Rincian distribusi debit ditampilkan pada **Tabel 5**.

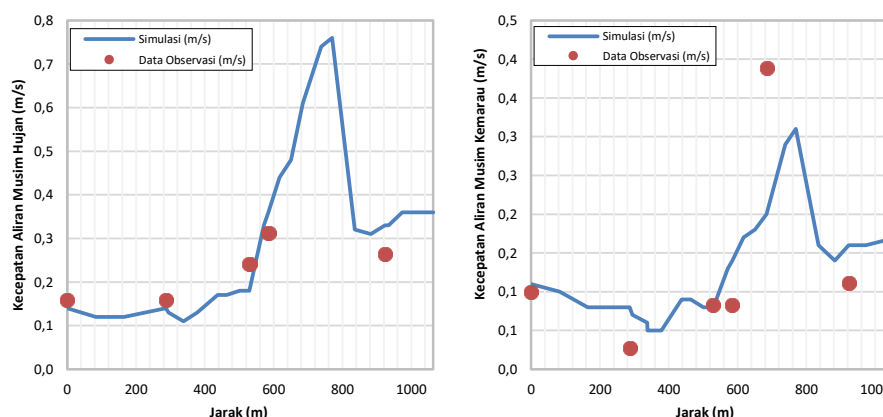
Tabel 5 Distribusi Inflow Limbah dan Debit di Setiap Titik RS pada Kondisi Debit Tinggi dan Debit Rendah

Debit Tinggi				Debit Rendah			
RS	Debit Masuk Limbah	Debit Keluar	Q Total	RS	Debit Masuk Limbah	Debit Keluar	Q Total
24	0,3670	0,0000	0,3670	24	0,0432	0,0000	0,0432
19	0,0108	0,0000	0,3778	19	0,0010	0,0000	0,0442
18	0,0108	0,0000	0,3885	18	0,0010	0,0000	0,0452
17	0,0177	0,0000	0,4062	17	0,0010	0,0000	0,0462
16	0,0277	0,0000	0,4339	16	0,0020	0,0000	0,0482
15	0,0277	0,0000	0,4616	15	0,0020	0,0000	0,0502
14	0,0277	0,0000	0,4893	14	0,0030	0,0000	0,0532
13	0,0368	0,0000	0,5260	13	0,0030	0,0000	0,0562
4	0,0217	0,0000	0,5477	4	0,0100	0,0000	0,0662
3	0,0297	0,0000	0,5774	3	0,0015	0,0000	0,0677
2	0,0607	0,0000	0,6381	2	0,0015	0,0000	0,0692

RS1 merepresentasikan batas hilir model (*downstream boundary*) dan tidak disertakan dalam **Tabel 5** karena tidak menerima tambahan *lateral inflow* maupun perubahan debit. Variasi debit tersebut mempengaruhi parameter hidrodinamika, terutama kecepatan dan kedalaman aliran, yang secara langsung berperan dalam proses transportasi advectif dan dispersi polutan sebagaimana dijelaskan dalam persamaan adveksi-dispersi. Kecepatan aliran yang lebih tinggi meningkatkan laju perpindahan polutan ke arah hilir, sementara kedalaman yang lebih besar meningkatkan kapasitas pengenceran dan mempengaruhi interaksi vertikal antara kolom air

dengan dasar serta dinding saluran.

Pada musim kemarau, satu titik tambahan di jarak 684,340 meter dari hulu digunakan secara khusus untuk validasi model kecepatan aliran. Validasi ini dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi kecepatan HEC-RAS dengan data observasi lapangan pada debit tinggi dan debit rendah (**Gambar 3**). Secara umum, model mampu merepresentasikan pola distribusi kecepatan yang diamati di lapangan, meskipun terdapat perbedaan kecil di beberapa titik yang dapat disebabkan oleh variasi lokal geometri saluran dan ketidakpastian pengukuran.



Gambar 4 Perbandingan Kecepatan Aliran Simulasi dan Observasi pada Debit Tinggi dan Debit Rendah di Saluran Irigasi Cibarani

Frekuensi pembuangan limbah diasumsikan 2 kali sehari, masing-masing pada pukul 06.00 dan 18.00, masing-masing selama 1 jam, sesuai pola aktivitas harian yang ditemukan pada survei. Simulasi dijalankan selama 24 jam untuk merepresentasikan dinamika dispersi polutan setelah setiap peristiwa pembuangan, serta untuk menangkap proses temporal transportasi, pengenceran, dan transformasi parameter kualitas air.

Hasil simulasi kualitas air pada **Gambar 5** dan **Gambar 6** menunjukkan variasi spasial yang

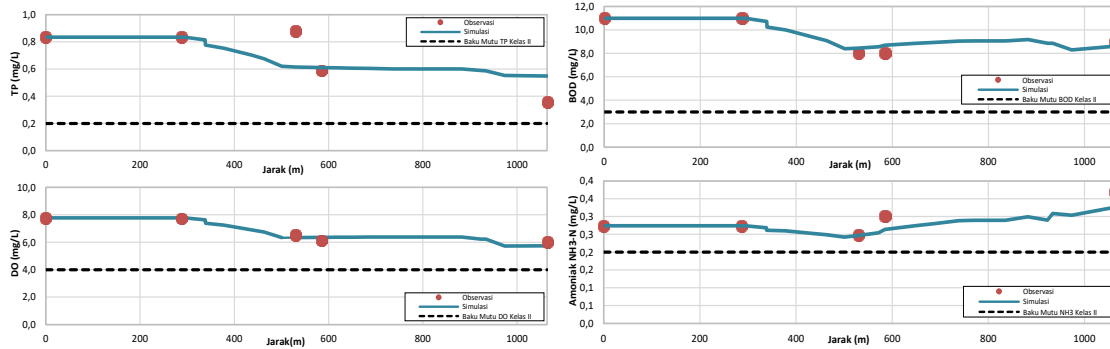
signifikan pada setiap parameter yang diamati, yaitu *Total Fosfat (TP)*, *Dissolved Oxygen (DO)*, *Biochemical Oxygen Demand (BOD)*, dan *Ammonia (NH₃-N)* di sepanjang Saluran Irigasi Cibarani. Variasi ini mencerminkan respons sistem akuatik terhadap beban polutan dan dinamika aliran yang berbeda di setiap titik pengamatan.

Hasil Simulasi Kondisi Debit Tinggi

Gambar 5 mengilustrasikan hasil simulasi musim hujan. Parameter DO menunjukkan penurunan ringan di hilir, sesuai dengan observasi, meskipun nilai simulasi sedikit lebih tinggi. Hal ini

mencerminkan efektivitas proses reaerasi dalam model akibat debit dan kecepatan aliran yang tinggi, yang mendukung difusi oksigen dari atmosfer,

sejalan dengan prinsip turbulensi dan luas permukaan paparan di badan air mengalir.



Gambar 5 Hasil TP, DO, BOD, dan NH 3 untuk Debit Tinggi

Parameter BOD relatif stabil namun melampaui baku mutu Kelas II (3 mg/L), baik pada hasil simulasi maupun observasi. Ini menandakan beban organik tinggi, terutama di lokasi dengan pembuangan limbah domestik langsung. Fluktuasi lokal di segmen tengah dan hilir kemungkinan mencerminkan variasi karakteristik limbah dan kondisi mikro yang sulit direpresentasikan dalam model satu dimensi (Zhang et al., 2020).

Sebaliknya, TP menunjukkan tren menurun di hilir, konsisten dengan data lapangan, namun tetap melebihi ambang batas Kelas II (0,2 mg/L). Kondisi ini menunjukkan bahwa selain kontribusi dari hulu, masukan limbah domestik di sepanjang saluran turut berperan dalam mempertahankan tingginya konsentrasi fosfat meskipun terjadi proses pengenceran pada debit tinggi. Temuan ini menegaskan persistensi polusi fosfat dalam sistem urban.

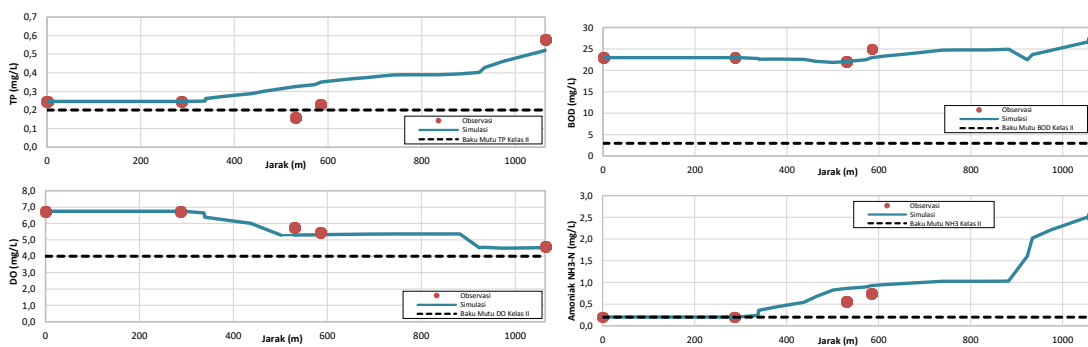
Untuk NH₃-N, hasil simulasi sesuai dengan observasi, menunjukkan peningkatan moderat di hilir. Konsentrasi amonia yang tetap tinggi mengindikasikan dekomposisi organik berkelanjutan dan terbatasnya nitrifikasi (Kim et al., 2023). Dalam jangka panjang, tingginya BOD dan fosfat memicu kondisi anaerobik yang menghambat kehidupan akuatik (Almroth-Rosell et al., 2021)

serta menghasilkan senyawa toksik seperti amonia dan hidrogen sulfida (Cao et al., 2024). Aliran fosfor akibat aktivitas manusia kini meningkat hingga empat kali lipat dibanding satu abad lalu.

Hasil Simulasi Kondisi Debit Rendah

Gambar 6 menyajikan hasil simulasi musim kemarau. Model HEC-RAS menunjukkan kinerja yang baik dalam merepresentasikan distribusi spasial polutan di Saluran Irigasi Cibarani. Nilai DO menurun dari 6,74 mg/L di hulu menjadi 4,52 mg/L di hilir, sejalan dengan observasi (4,61 mg/L). Penurunan ini mencerminkan rendahnya kapasitas reaerasi akibat debit kecil dan aliran lambat, yang memperpanjang waktu tinggal polutan dan meningkatkan konsumsi oksigen—karakteristik umum sungai perkotaan saat kering (Fletcher et al., 2013).

BOD tetap tinggi di seluruh segmen, dengan hasil simulasi dan observasi berkisar antara 22–27 mg/L, dan bahkan mencapai 167 mg/L di lokasi masukan limbah. Nilai ini jauh melebihi ambang batas 3 mg/L, menunjukkan tekanan pencemaran organik yang signifikan. Hal ini sejalan dengan temuan bahwa aliran rendah memperparah konsentrasi polutan organik (Mohammad Zadeh et al., 2024).



Gambar 6 Hasil TP, DO, BOD, dan NH 3 untuk Debit Rendah

Simulasi TP menunjukkan peningkatan dari hulu ke hilir, dengan nilai akhir 0,52105 mg/L (observasi: 0,578 mg/L). Konsentrasi tetap melebihi ambang batas 0,2 mg/L, mencerminkan akumulasi fosfat akibat rendahnya aliran dan pengenceran. Ini menekankan pentingnya proses pengenceran dalam mengendalikan beban nutrisi (Chen & Bai, 2019; Gurses et al., 2018).

NH₃-N juga menunjukkan akumulasi di hilir, dengan konsentrasi maksimum 2,54 mg/L (observasi: 2,518 mg/L), menandakan dekomposisi organik yang intens dan keterbatasan nitrifikasi dalam kondisi stagnan (Nguyen-tiêt et al., 2025). Nilai-nilai ini melampaui ambang batas 0,2 mg/L, mengindikasikan musim kemarau sebagai periode paling rentan terhadap penurunan kualitas air. Evaluasi kinerja menggunakan RMSE, R², dan NSE menunjukkan bahwa model menunjukkan kinerja yang sangat baik untuk DO dan NH₃-N (R² > 0,95; NSE > 0,93), serta cukup baik untuk BOD. Parameter TP memiliki R² dan NSE lebih rendah, khususnya di musim hujan, namun masih dapat diterima untuk studi di sistem sungai perkotaan. Secara keseluruhan, hasil statistik mendukung keandalan model dalam memetakan variasi spasial kualitas air di Saluran Irigasi Cibarani, sebanding dengan studi HEC-RAS sejenis.

Hasil penelitian ini menunjukkan pola yang konsisten dengan studi-studi serumpun terkait dominasi akumulasi nutrisi pada kondisi debit rendah. Konsentrasi TP yang meningkat pada musim kemarau sejalan dengan temuan Nyenje et al. (2014) pada saluran perkotaan tropis, yang menunjukkan bahwa retensi fosfor meningkat akibat waktu tinggal air yang lebih panjang. Kondisi debit rendah juga diketahui memperkuat akumulasi

nutrien karena berkurangnya kapasitas pengenceran serta meningkatnya interaksi antara proses transportasi dan transformasi pencemar, di mana *residence time* menjadi faktor pengendali utama, sebagaimana juga dilaporkan dalam berbagai studi pada sistem perairan terurbanisasi.

Demikian pula, efektivitas pendekatan *source reduction* melalui deterjen rendah fosfat sejalan dengan temuan Mousavi dan Khodadoost (2019), yang menunjukkan bahwa pengurangan beban di sumber lebih efektif dibanding hanya mengandalkan pengenceran alami, terutama pada sistem dengan kapasitas asimilasi terbatas.

Dari sisi pemodelan, performa statistik HEC-RAS yang diperoleh pada studi ini (NSE 0,58–0,97) sebanding dengan Kim et al. (2023) yang melaporkan akurasi baik dalam simulasi parameter kualitas air. Namun, berbeda dari sebagian studi sebelumnya yang umumnya berfokus pada sungai alami atau skala DAS, studi ini menunjukkan bahwa sensitivitas model terhadap TP lebih tinggi dibanding DO dan NH₃-N, yang mengindikasikan bahwa proses transformasi fosfat di saluran kecil perkotaan lebih kompleks dan dipengaruhi oleh interaksi hidraulika lokal serta beban lateral yang tidak seragam. Secara fisik, hasil simulasi juga menunjukkan pola yang konsisten dengan proses hidraulik dan kualitas air di lapangan, di mana peningkatan beban limbah domestik menyebabkan kenaikan konsentrasi TP dan penurunan DO, sementara kondisi debit lebih rendah meningkatkan akumulasi polutan akibat kapasitas pengenceran yang terbatas dan waktu tinggal aliran yang lebih panjang. Temuan ini menegaskan pentingnya pendekatan spesifik skala saluran dalam analisis pencemaran nutrisi.

Tabel 6 Hasil Evaluasi Statistik Kinerja Model Kualitas Air Berdasarkan Parameter dan Musim

Parameter	Musim Hujan			Musim Kemarau		
	RMSE	R ²	NSE	RMSE	R ²	NSE
Kecepatan	0,0470	0,8391	0,3977	0,0857	0,6750	0,4686
DO	0,1879	0,9542	0,9396	0,2119	0,9691	0,9316
BOD	0,4044	0,9311	0,9111	0,8978	0,8037	0,7481
TP	0,1463	0,4690	0,4608	0,0947	0,7007	0,5818
NH ₃	0,0255	0,8569	0,6280	0,1556	0,9808	0,9673

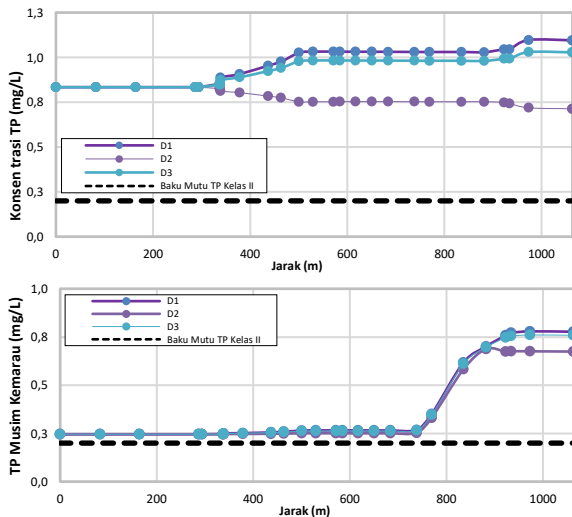
Simulasi Skenario Deterjen pada Konsentrasi Fosfat

Simulasi ini dirancang untuk mengevaluasi pengaruh berbagai formulasi deterjen terhadap konsentrasi Total Fosfat (TP) di Saluran Irigasi Cibarani sebagai bagian dari upaya pengelolaan kualitas air perkotaan. Tiga skenario diterapkan berdasarkan survei masyarakat dan hasil uji laboratorium terhadap kandungan fosfat. Skenario D1 (surfaktan 21%) merepresentasikan deterjen konvensional dengan asumsi kandungan fosfat

tinggi, yang dijadikan acuan karena kontribusinya yang besar terhadap polusi domestik. Skenario D2 (surfaktan 8,9%) mewakili formulasi dengan kandungan surfaktan dan fosfat lebih rendah, yang dipertimbangkan sebagai alternatif ramah lingkungan. Sementara itu, skenario D3 (surfaktan 21%) menguji efektivitas produk berlabel ramah lingkungan yang memiliki kadar surfaktan serupa D1 dalam menurunkan konsentrasi TP secara empiris. Seluruh sampel deterjen diuji laboratorium untuk mengetahui konsentrasi TP aktual, yang

kemudian digunakan sebagai input dalam model HEC-RAS, guna memastikan skenario yang berbasis data dan realistis.

Berdasarkan hasil uji laboratorium pada **Tabel 4**, meskipun D3 diklaim sebagai deterjen ramah lingkungan, kandungan fosfatnya tetap tinggi dan mendekati D1. Sebaliknya, D2 menunjukkan kadar TP terendah, yang memperkuat potensinya sebagai alternatif yang lebih aman bagi lingkungan akuatik. Temuan ini menekankan pentingnya validasi empiris dibandingkan hanya mengandalkan klaim pemasaran. Berdasarkan hasil evaluasi statistik sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 6**, simulasi penyebaran fosfat untuk ketiga skenario dilakukan menggunakan model HEC-RAS yang telah dikalibrasi dan divalidasi. Konsentrasi TP dari masing-masing deterjen dimasukkan sebagai input, menghasilkan distribusi spasial TP di sepanjang saluran, seperti ditampilkan pada **Gambar 6**.



Gambar 7 Sebaran Konsentrasi TP Di Saluran Irigasi Cibarani Menurut Jenis Deterjen

Gambar 7 ini menggambarkan simulasi skenario pembuangan limbah maksimum, merepresentasikan kondisi terburuk masukan fosfat ke badan air.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa seluruh skenario menghasilkan konsentrasi Total Fosfat (TP) melebihi baku mutu Kelas II (0,2 mg/L), dengan variasi signifikan tergantung pada jenis

deterjen. Skenario D1 (deterjen dengan surfaktan tinggi) menghasilkan lonjakan TP hingga 1,0973 mg/L setelah titik pembuangan, menunjukkan kontribusi fosfat terbesar yang sesuai dengan karakteristik produk berbasis fosfat sebagai bahan pembangun. Skenario D3 (deterjen berlabel ramah lingkungan) menunjukkan distribusi TP yang hampir setara dengan D1, dengan nilai maksimum 1,03 mg/L, menegaskan bahwa pelabelan ramah lingkungan tidak selalu mencerminkan kandungan fosfat rendah, sebagaimana dikritik dalam literatur terkait praktik greenwashing. Sebaliknya, skenario D2 (deterjen dengan surfaktan rendah) menunjukkan kinerja terbaik dengan TP maksimum 0,834 mg/L dan distribusi yang lebih stabil, meskipun belum memenuhi ambang batas, namun secara signifikan menurunkan beban fosfat dari sumbernya, mendukung strategi pengendalian pencemaran berbasis sumber.

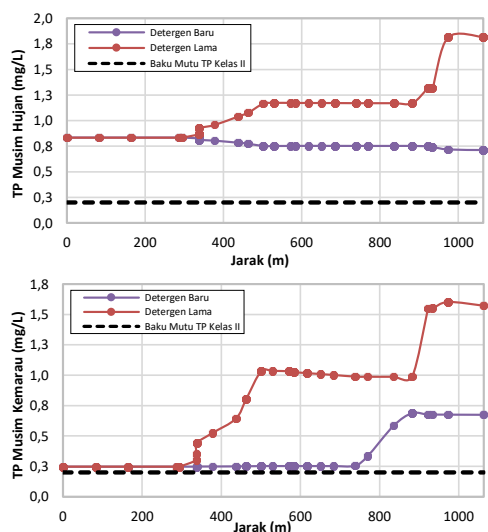
Dengan demikian, D2 merupakan alternatif yang paling efektif dan lebih ramah lingkungan, sementara kesamaan performa antara D3 dan D1 menggarisbawahi pentingnya regulasi yang ketat dan transparansi dalam pelabelan produk ramah lingkungan.

Perbandingan Skenario yang Direkomendasikan dengan Kondisi Aktual

Untuk memperkuat dasar rekomendasi kepada masyarakat, dilakukan analisis kuantitatif terhadap perubahan konsentrasi Total Fosfat (TP) akibat perbedaan input TP pada skenario deterjen D1, D2, dan D3 di titik lateral inflow O1 dan O2. **Tabel 7** menyajikan rentang konsentrasi TP hasil simulasi untuk masing-masing segmen saluran. Hasil menunjukkan bahwa pada kondisi eksisting (Deterjen Lama), konsentrasi TP meningkat tajam di hilir, dengan puncak mencapai 1,49 mg/L pada kondisi debit lebih tinggi dan 1,57 mg/L pada kondisi debit lebih rendah di segmen 900–1000 m. Sebaliknya, skenario D2 menunjukkan penurunan konsisten di seluruh saluran: nilai tertinggi hanya 0,83 mg/L di hulu pada kondisi debit lebih tinggi dan 0,69 mg/L di hilir pada kondisi debit lebih rendah, sedangkan nilai terendah mencapai 0,71 mg/L dan 0,67 mg/L secara berturut-turut.

Tabel 7 Rentang Konsentrasi TP pada Saluran Irigasi Cibarani berdasarkan Jenis Deterjen

Posisi Saluran (m)	Debit Tinggi		Debit Rendah	
	TP – Deterjen Lama Kondisi Eksisting (mg/L)	TP – Deterjen Baru (D2) (mg/L)	TP – Deterjen Lama Kondisi Eksisting (mg/L)	TP – Deterjen Baru (D2) (mg/L)
0 – 100 m	0,83	0,83	0,246	0,246
200 – 400 m	0,92 – 1,04	0,81 – 0,78	0,25 – 0,64	0,24 – 0,24
500 – 800 m	1,08 – 1,17	0,75 – 0,74	0,80 – 0,98	0,25 – 0,58
900 – 1000 m	1,26 – 1,49	0,71 – 0,72	0,98 – 1,57	0,69 – 0,67



Gambar 8 Distribusi Konsentrasi TP Deterjen Lama vs. Deterjen Baru (Skenario D2)

Gambar 8 memperlihatkan distribusi spasial TP antara kedua skenario. Terlihat jelas bahwa Deterjen Baru D2 menghasilkan konsentrasi TP yang lebih rendah di seluruh saluran. Meskipun nilai TP masih melebihi baku mutu air Kelas II (0,2 mg/L), tren penurunan signifikan mendukung efektivitas pendekatan pengurangan dari sumber (*source reduction*) dalam pengendalian polusi nutrisi, sebagaimana direkomendasikan dalam berbagai kebijakan pengelolaan kualitas air untuk sumber non-titik.

Tabel 8 Perbandingan Ekonomi dan Karakteristik Deterjen Eksisting dan Ramah Lingkungan yang Direkomendasikan

Deterjen	Volume	Harga	Harga per Liter	Klaim Jumlah Cuci	Harga Sekali Cuci (40ml) / 5kg	Catatan
Deterjen Surfaktan Rendah & Rendah Fosfat (D2)	4.5 liter	Rp92.400	±Rp20.533	77 kali	Rp1.199/cuci	Lebih hemat dan minim pencemar
Deterjen Lama Kondisi Eksisting	80 ml sachet	Rp1.850	±Rp23.125	2 kali	Rp925/cuci	Umum dipakai, tapi berdampak buruk

*) Takaran cuci sesuai petunjuk kemasan masing-masing produk

Perbandingan harga menunjukkan bahwa biaya mencuci menggunakan deterjen ramah lingkungan hanya sedikit lebih tinggi, yakni sekitar Rp275 per cucian, dibandingkan deterjen konvensional. Selisih ini dianggap wajar mengingat manfaat jangka panjang terhadap kualitas air, kebersihan saluran, dan pengurangan residu busa. Analisis ekonomi ini, bersama dengan keuntungan ekologis, mendukung kelayakan penggunaan deterjen alternatif sesuai dengan prinsip konsumsi berkelanjutan.

Seluruh responden (22 orang) menyatakan kesediaan beralih ke deterjen ramah lingkungan

Skenario yang Direkomendasikan dan Tanggapan Masyarakat

Berdasarkan hasil simulasi, Skenario D2 (deterjen rendah fosfat dan surfaktan) menunjukkan penurunan signifikan konsentrasi TP di Saluran Irigasi Cibarani, mendekati baku mutu Kelas II sesuai PP No. 22 Tahun 2021. Oleh karena itu, skenario ini direkomendasikan sebagai strategi utama mitigasi pencemaran domestik. Sebagai bagian dari pendekatan partisipatif, dilakukan wawancara terhadap 22 responden yang dipilih secara purposif untuk mewakili tiga wilayah permukiman di sepanjang saluran, yaitu RT 01/RW 04 di segmen hulu, RT 03/RW 05 di segmen tengah, dan RT 02/RW 06 di segmen hilir. Pemilihan ini bertujuan agar tanggapan yang diperoleh dapat merepresentasikan persepsi dari seluruh segmen wilayah yang terpengaruh oleh kualitas air saluran. Mereka diberi penjelasan mengenai hasil simulasi, dampak deterjen terhadap lingkungan, serta rekomendasi produk ramah lingkungan. Seluruh responden menyatakan setuju untuk beralih, ditandai dengan pengisian formulir persetujuan.

Produk yang direkomendasikan adalah Deterjen Surfaktan Rendah 4,5 L, yang terbukti memiliki kadar fosfat dan surfaktan lebih rendah. Studi ini juga mengevaluasi aspek ekonomi dari produk alternatif dibandingkan kondisi eksisting penggunaan deterjen masyarakat guna memperkuat dasar implementasi di masyarakat.

atas dasar kepedulian terhadap kondisi saluran, terutama dalam menjaga kebersihan, mencegah bau, dan mengurangi pencemaran. Namun, karena responden hanya mewakili sebagian kecil pengguna Saluran Irigasi Cibarani, dan deterjen lama kondisi eksisting tetap dominan akibat harga yang lebih terjangkau, kebiasaan, serta kemudahan akses, tantangan perubahan perilaku masih signifikan. Oleh karena itu, selain strategi berbasis kesadaran masyarakat, studi ini juga mengembangkan skenario teknis sebagai pendekatan komplementer untuk mengendalikan beban fosfat secara lebih efektif.

Strategi Pengurangan Kandungan Fosfat

Studi ini mengevaluasi skenario hipotetik pengurangan parsial konsentrasi Total Fosfat (TP) tanpa mengubah jenis deterjen yang digunakan masyarakat, untuk mengevaluasi potensi pendekatan teknis dalam menurunkan beban polutan tanpa intervensi perilaku.

Strategi ini dilakukan dengan menyesuaikan konsentrasi TP pada kondisi batas hulu dan kondisi awal saluran agar mendekati ambang batas Kelas II (0,2 mg/L) sesuai Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 (Pemerintah Republik Indonesia, 2021), serta menerapkannya secara bertahap dari stasiun RS16 ke hilir, di mana RS16 merepresentasikan segmen tengah-hilir saluran yang mulai menerima akumulasi beban lateral dari

kawasan permukiman padat dan peningkatan debit akibat masukan limbah domestik. Pemilihan segmen hilir mencerminkan potensi penerapan intervensi teknis terfokus, seperti pra-pengolahan limbah rumah tangga padat penduduk atau pemasangan alat pengendali fosfat di titik temu aliran.

Dalam simulasi, konsentrasi TP di stasiun RS16 hingga RS2 disesuaikan agar mendekati 0,2 mg/L untuk kondisi awal dan batas, sementara RS17 dan segmen hulu tetap menggunakan data aktual. Hasil simulasi dibandingkan dengan kondisi eksisting untuk mengevaluasi dampaknya terhadap distribusi spasial TP di sepanjang saluran, sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 9 Perbandingan antara Simulasi Aktual dan Skenario Penurunan Fosfat

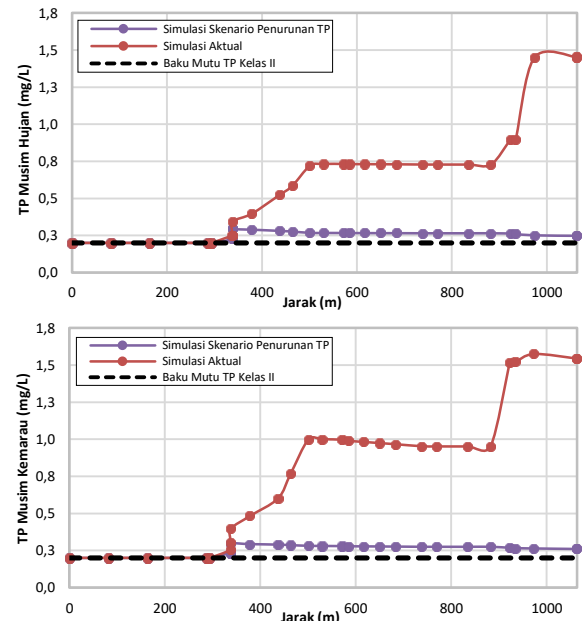
Posisi Saluran (m)	Debit Tinggi		Debit Rendah	
	Simulasi Aktual	Simulasi Skenario Penurunan TP	Simulasi Aktual	Simulasi Skenario Penurunan TP
0 – 100 m	0,2	0,2	0,2	0,2
200 – 400 m	0,20 – 0,52	0,20 – 0,28	0,20 – 0,60	0,20 – 0,28
500 – 800 m	0,58 – 0,73	0,28 – 0,26	0,76 – 0,95	0,28 – 0,27
900 – 1000 m	0,73 – 1,01	0,26 – 0,24	0,95 – 1,54	0,27 – 0,26

Gambar 9 memperlihatkan distribusi spasial Total Fosfat (TP) untuk dua skenario, menyoroti dampak penurunan konsentrasi TP di stasiun RS16 terhadap dispersi polutan. Skenario pengurangan parsial disimulasikan secara teknis dengan menurunkan konsentrasi awal dan batas TP di segmen hilir (RS16) hingga mendekati baku mutu Kelas II sebesar 0,2 mg/L, tanpa mengubah jenis deterjen yang digunakan masyarakat. Pada musim hujan, kondisi aktual menunjukkan peningkatan TP dari 0,2 mg/L di hulu (0–100 m) hingga 1,01 mg/L di hilir (900–1000 m) akibat kontribusi limbah domestik dan laju pembuangan tinggi.

Namun, pada skenario teknis, konsentrasi TP maksimum di hilir turun drastis menjadi 0,24–0,26 mg/L, mewakili penurunan lebih dari 75%, dengan nilai TP di seluruh segmen berkisar antara 0,2–0,28 mg/L, mendekati ambang batas. Hasil ini menunjukkan potensi penurunan akumulasi fosfat apabila diterapkan intervensi teknis pengurangan TP pada segmen hilir.

Pada musim kemarau, konsentrasi TP aktual meningkat tajam dari 0,2 mg/L di hulu menjadi 1,54 mg/L di hilir akibat rendahnya debit aliran yang membatasi kapasitas pengenceran dan memperparah akumulasi fosfat. Namun, skenario pengurangan parsial berhasil menekan konsentrasi TP di hilir menjadi 0,26–0,27 mg/L, menunjukkan efektivitas intervensi teknis dalam memitigasi polusi bahkan di bawah kondisi

hidrologis yang tidak menguntungkan ini suatu aspek krusial dalam pengelolaan sumber daya air di wilayah dengan perbedaan musim yang signifikan. Penyesuaian tersebut secara umum merepresentasikan efisiensi pengurangan TP sebesar ±70–80% dibandingkan kondisi eksisting di segmen hilir.



Gambar 9 Distribusi Spasial Konsentrasi Total Fosfat (TP) antara Kondisi Aktual dan Skenario Penurunan Parsial di Saluran Irigasi Cibarani

Kesimpulan dan Rekomendasi

Penelitian ini berhasil memodelkan penyebaran fosfat dari limbah deterjen domestik di Saluran Irigasi Cibarani menggunakan HEC-RAS dan menunjukkan bahwa akumulasi pencemar dipengaruhi oleh interaksi beban limbah domestik dan kondisi hidrologi musiman. Konsentrasi Total Fosfat (TP) meningkat pada musim kemarau akibat rendahnya pengenceran hingga mencapai 0,578 mg/L, sedangkan pada musim hujan konsentrasi TP di beberapa titik masih melampaui baku mutu air Kelas II sebesar 0,2 mg/L. Temuan ini menunjukkan bahwa pencemaran fosfat pada saluran perkotaan kecil dengan dominasi limbah domestik merupakan masalah persisten dan sensitif terhadap perubahan debit. Simulasi menunjukkan bahwa penggunaan deterjen rendah fosfat (D2) lebih efektif dibanding deterjen konvensional maupun produk berlabel ramah lingkungan yang masih mengandung fosfat relatif tinggi. Selain itu, penurunan parsial konsentrasi fosfat di batas hulu dan kondisi awal saluran mampu menekan akumulasi polutan di hilir, termasuk pada kondisi debit rendah. Dengan demikian, strategi pengendalian yang efektif adalah kombinasi antara *source reduction* dan intervensi teknis pada titik beban pencemar tinggi.

Hasil penelitian juga mengonfirmasi bahwa akumulasi nutrisi pada kondisi aliran rendah merupakan fenomena umum pada sistem perairan perkotaan, sehingga pendekatan yang diusulkan berpotensi direplikasi pada wilayah dengan karakteristik serupa. Pengendalian fosfat secara terintegrasi diperlukan untuk menurunkan konsentrasi TP hingga mendekati atau memenuhi baku mutu 0,2 mg/L melalui kombinasi pengurangan beban di sumber, pengolahan awal limbah domestik, dan peningkatan partisipasi masyarakat.

Rekomendasi teknis meliputi penerapan sistem pra-pengolahan sederhana pada titik buangan utama seperti O1 dan O2, terutama pada segmen hilir yang menunjukkan akumulasi fosfat tertinggi, serta pengembangan teknologi pengolahan yang sesuai untuk meningkatkan efektivitas penurunan fosfat hingga mendekati baku mutu. Dari sisi kebijakan, diperlukan dukungan penggunaan deterjen rendah fosfat melalui edukasi publik, pengawasan terhadap klaim produk ramah lingkungan, serta penguatan regulasi pembatasan kandungan fosfat pada deterjen domestik. Penelitian lanjutan disarankan mencakup pemodelan aliran tidak lenggang (*unsteady flow*), analisis sensitivitas parameter reaksi kualitas air, serta evaluasi kuantitatif

efektivitas teknologi mitigasi dengan target penurunan fosfat hingga memenuhi baku mutu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Sumber Daya Air Universitas Katolik Parahyangan atas dukungan layanan uji kualitas air seluruh sampel yang digunakan dalam studi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Akinnowo, S. O. (2023). Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. In *Environmental Challenges* (Vol. 12). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733>
- Almroth-Rosell, E., Wählström, I., Hansson, M., Väli, G., Eilola, K., Andersson, P., Viktorsson, L., Hieronymus, M., & Arneborg, L. (2021). A Regime Shift Toward a More Anoxic Environment in a Eutrophic Sea in Northern Europe. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.799936>
- Cao, Z., Zhu, R., Li, Y., Kakade, A., Zhang, S., Yuan, Y., Wu, Y., & Mi, J. (2024). Mitigation of ammonia and hydrogen sulfide emissions during aerobic composting of laying hen waste through NaOH-modified biochar. *Journal of Environmental Management*, 365, 121634. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.121634>
- Chairattanamanokorn, P., Imai, T., Sudiarta, G. A. W., Fujii, A., Migita, Y., Kitazato, M., Yoshida, M., Kanyama, T., & Kawahara, T. (2025). Evaluating the impact of replacing synthetic detergents with fatty acids made soap on microbial dynamics and wastewater treatment efficiency. *Environmental Engineering Research*, 30(3). <https://doi.org/10.4491/eer.2024.327>
- Chen, L., & Bai, Q. (2019). Optimization in decision making in infrastructure asset management: A review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 9, Number 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app9071380>
- Fitriana, F., Yudianto, D., & Seo, Y. C. (2024). Application of QUAL2Kw for Water Quality Modeling in the Cibarani Irrigation Channel, Bandung City, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1343(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1343/1/012014>
- Fletcher, T. D., Andrieu, H., & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, 51, 261–279.

- <https://doi.org/10.1016/J.ADVWATRES.2012.09.001>
- Giagnorio, M., Amelio, A., Grüttner, H., & Tiraferri, A. (2017). Environmental impacts of detergents and benefits of their recovery in the laundering industry. *Journal of Cleaner Production*, 154, 593–601. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.012>
- Glime, J. M. (2014). *Photosynthesis in Aquatic Bryophytes* (pp. 201–231). https://doi.org/10.1007/978-94-007-6988-5_12
- Gurses, M. S., Erkey, C., Kizilel, S., & Uzun, A. (2018). Characterization of sodium tripolyphosphate and sodium citrate dehydrate residues on surfaces. *Talanta*, 176, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.07.092>
- HEC-RAS Water Quality Technical Reference HEC-RAS Water Quality User's Manual. (2023).
- Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. In *Geoscientific Model Development* (Vol. 15, Number 14, pp. 5481–5487). Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>
- Khanam, Z., Sultana, F. M., & Mushtaq, F. (2023). Environmental Pollution Control Measures and Strategies: An Overview of Recent Developments. In M. and M. A. B. and G. N. L. M. Mushtaq Fayma and Farooq (Ed.), *Geospatial Analytics for Environmental Pollution Modeling: Analysis, Control and Management* (pp. 385–414). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45300-7_15
- 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>
- Krimsky, L. S., Lusk, M. G., Abeels, H., & Seals, L. (2021). Sources and concentrations of nutrients in surface runoff from waterfront homes with different landscape practices. *Science of the Total Environment*, 750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142320>
- Lin, L., Yang, H., & Xu, X. (2022). Effects of Water Pollution on Human Health and Disease Heterogeneity: A Review. In *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246>
- Loiselle, S., Bishop, I., Moorhouse, H., Pilat, C., Koelman, E., Nelson, R., Clymans, W., Pratt, J., & Lewis, V. (2024). Citizen scientists filling knowledge gaps of phosphate pollution dynamics in rural areas. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12389-5>
- Mohammad Zadeh, M., Arabi, M., Dell, T., & Sharvelle, S. (2024). A web-based urban hydrology model for municipal scale applications. *Environmental Modelling & Software*, 179, 106096. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2024.106096>
- Nguyen-tiêt, A. M., Letelier-Gordo, C. O., & Aalto, S. L. (2025). Rapid H₂S production in layers of freshwater and marine fish organic waste from recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2025.102578>
- Suharjo, I. P., Leksono, A. A. R., Aththaariq, M. F., Adnan, U. A., Evangelista, & Priadi, G. D. (2024). Examining urban development trends and characteristics: Future of public transportation in greater bandung. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1294(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1294/1/012001>
- Valera, J. P. R., Castillo, K. M. D. J., Mendez, C. M. B., & Basilio, E. R. (2024). Evaluating Awareness and Practices in Household Wastewater Management in Riverside Dwellers: Implications for Policy and Education. *International Journal of Environment, Engineering and Education*, 6(3), 145–154. <https://doi.org/10.55151/ijeedu.v6i3.140>
- Wardhani, E., & Alessandra, V. G. (2023). *The Impact of the Sarimukti Landfill's on the Water Quality of the Cipanawuan River*. 20(2), 316–325.
- Wijaya, J., Yudianto, D., & Fitriana, F. (2021). The Use of Drop-Structures to Increase the Dissolved Oxygen Level along the Cibarani Irrigation Channel. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 55–66. <https://doi.org/10.22146/jcef.3603>
- Zhang, T., Xiao, Y., Liang, D., Tang, H., Xu, J., Yuan, S., & Luan, B. (2020). A physically-based model for dissolved pollutant transport over impervious surfaces. *Journal of Hydrology*, 590, 125478. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.125478>
- Zhou, H., Margenot, A. J., Li, Y., Si, B., Wang, T., Zhang, Y., Li, S., & Bhattarai, R. (2022). Phosphorus pollution control using waste-based adsorbents: Material synthesis, modification, and sustainability. In *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* (Vol. 52, Number 12, pp. 2023–2059). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1866414>