

ANALISIS DAYA DUKUNG SUNGAI MENGGUNAKAN QUAL2Kw: STUDI KASUS SEGMENT SUNGAI GAJAHWONG, YOGYAKARTA**Ali Aulia Ghozali^{a, 1, *}, Yoshua^{b, 2)}, Dewi Eviane^{c, 3)} Agnes Dyah Novitasari Lestari^{d, 4)}**^{a)} Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih, Badan Riset dan Inovasi Nasional^{a), c)} Program Studi Magister Teknik Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Institut Teknologi Yogyakarta^{d)} Jurusan Kimia, Fakultas FMIPA, Universitas Negeri Papua, Manokwari (98314)¹⁾ ali.aulia.ghozali@brin.go.id, ²⁾ sishaanyoshuanobel@gmail.com, ³⁾ de.eviane@gmail.com,⁴⁾ a.dyahnovitasari@gmail.com**ABSTRAK**

Beberapa simulasi penentuan status mutu air Sungai Gajahwong, dan analisis pola penyebaran dan pencemaran pada air Sungai Gajahwong telah dilakukan dalam penelitian ini. Segmen yang diteliti berada pada segmen kawasan perkotaan, yakni dari titik Jembatan Balérejo hingga Bendungan Wirokertèn (6,84 km), sebanyak 7 titik pengambilan sampel. Data hasil pengamatan di lapangan kemudian dianalisis menggunakan Qual2Kw. Parameter yang diujikan yakni: pH, nitrat, fosfat, BOD, DO, dan suhu. Penelitian dilakukan pada Juni 2022. Model yang dibangun berdasarkan data input memiliki nilai eror yang rendah ($U = 0,09 \pm 0,08$), sehingga dapat digunakan untuk analisis lanjutan. Hasil analisis skenario menunjukkan beban cemaran pada Sungai Gajahwong telah melampaui daya dukungnya, khusus untuk parameter BOD dan fosfat. Secara alaminya, dengan kondisi beban cemaran eksisting pada T1, maka pada T7 kualitas air sungai diprakirakan mampu melakukan purifikasinya dengan baik. Untuk kondisi eksisting, maka diperlukan pengurangan beban cemaran pada Sungai Gajahwong segmen Balérejo-Wirokertèn 0,7-1,5× lipat untuk parameter BOD dan 4,7× lipat untuk parameter fosfat dari nilai data terakhir.

Kata kunci: kualitas air sungai, daya dukung daya tampung, pemodelan, Qual2Kw.

ANALYSIS OF RIVER CARRYING CAPACITY USING QUAL2Kw: STUDY CASE SEGMENT OF GAJAHWONG RIVER, YOGYAKARTA**ABSTRACT**

Several simulations of determining the water quality status of the Gajahwong River, as well as analysis of the distribution and pattern of pollution in the Gajahwong River water have been carried out in this research. The studied segments were the urban area segments, Balérejo Bridge to Wirokertèn Dam (6.84 km), with 7 sampling points. Data from field observations were then analyzed using Qual2Kw software. Some parameters were tested: pH, nitrate, phosphate, BOD, DO, and temperature. The research was conducted on June 2022. The model built based on input data had a low error value ($U = 0.09 \pm 0.08$), so it was able to be used for further analysis. The results of the scenario analysis showed that the pollutant load in the Gajahwong River had exceeded its carrying capacity, especially for BOD and phosphate parameters. Naturally, given the pollutant load conditions at T1, at T7 the river water quality would be estimated to be capable performing good purification. For existing conditions, it is necessary to reduce the pollutant load on the Balérejo-Wirokertèn section of the Gajahwong River by 0.7-1.5× for BOD and 4.7× for phosphate parameters at the recent value

Keywords: river water quality, carrying capacity, modelling, Qual2Kw

PENDAHULUAN

Introduksi limbah ke dalam badan air menjadi satu hal yang krusial. Sebab, adanya masukan bahan pencemar ke sungai mengakibatkan penurunan kualitas air. Status mutu air penting guna menggambarkan kondisi pencemaran suatu perairan. Selain itu, pemodelan kualitas air merupakan salah satu unsur pengelolaan sumber daya air sungai. Pemodelan berfungsi untuk memprediksi besaran dampak yang terjadi pada lingkungan. Prediksi tidak harus memberikan jawaban secara pasti kejadian yang akan terjadi, melainkan berusaha untuk mencari jawaban sedekat mungkin yang akan terjadi (Kannel et al., 2007). Dengan demikian dapat diketahui besaran daya tampung dan daya dukung yang masih dimiliki oleh badan air tersebut. Pemodelan dalam bentuk matematis merupakan solusi atas keterbatasan pendekatan eksperimen maupun analisis dalam membuat prediksi kualitas air sepanjang aliran sungai yang dibutuhkan untuk mengatasi masalah tersebut dalam upaya pengelolaan menjaga kualitas air sungai.

Salah satu pemodelan matematis yang dapat digunakan adalah model QUAL2Kw. Ada berbagai macam model kualitas air yang tersedia, tetapi ada banyak keunggulan menggunakan QUAL2Kw untuk pemodelan. Model QUAL2Kw memiliki beberapa keunggulan antara lain dapat membuat simulasi dispersi kontaminan pada badan sungai dalam bentuk satu dimensi dengan aliran berupa non-uniform (penampangnya tidak seragam) dan mampu membuat simulasi beban masuk dan keluar dari sumber pencemar (Irsanda, Karnaningroem, & Bambang S, 2014). Keuntungan utama pemakaian QUAL2Kw adalah bahwa model ini dikemas sebagai Excel Workbook berbasis windows yang membuat model menjadi sederhana dan cepat. Model ini mampu membuat simulasi beberapa parameter antara lain temperatur, pH, SOD, CBOD, DO, nitrogen organik, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , fosfor organik, fosfor anorganik, fitoplankton, total nitrogen dan total fosfor (Camargo, Calijuri, Santiago, Couto, & Silva, 2010).

Sungai Gajahwong merupakan satu dari tiga sungai besar yang membelah Kota Yogyakarta selain Sungai Code dan Sungai Winongo. Sungai Gajahwong mengalami dampak pencemaran akibat semakin banyaknya bahan buangan dari limbah rumah tangga, industri, rumah sakit maupun hotel (Nuraini & Sunardi, 2010). Terdapat berbagai macam aktivitas antropogenik di sepanjang aliran sungai, baik berupa permukiman, pabrik, dan industri. Tentunya ini menjadi tantangan serius dalam pengelolaan sumber daya sungai. Dalam penelitian ini, model persebaran polutan juga dievaluasi. Parameter yang diamati merupakan parameter yang bersifat non-konservatif, yakni: BOD, DO, pH, suhu, nitrat, dan fosfat. Terakhir, daya tampung beban cemaran DO, BOD, nitrat, dan fosfat pada segmen tersebut akan dihitung, berdasarkan skenario-skenario sebelumnya.

METODE PENELITIAN

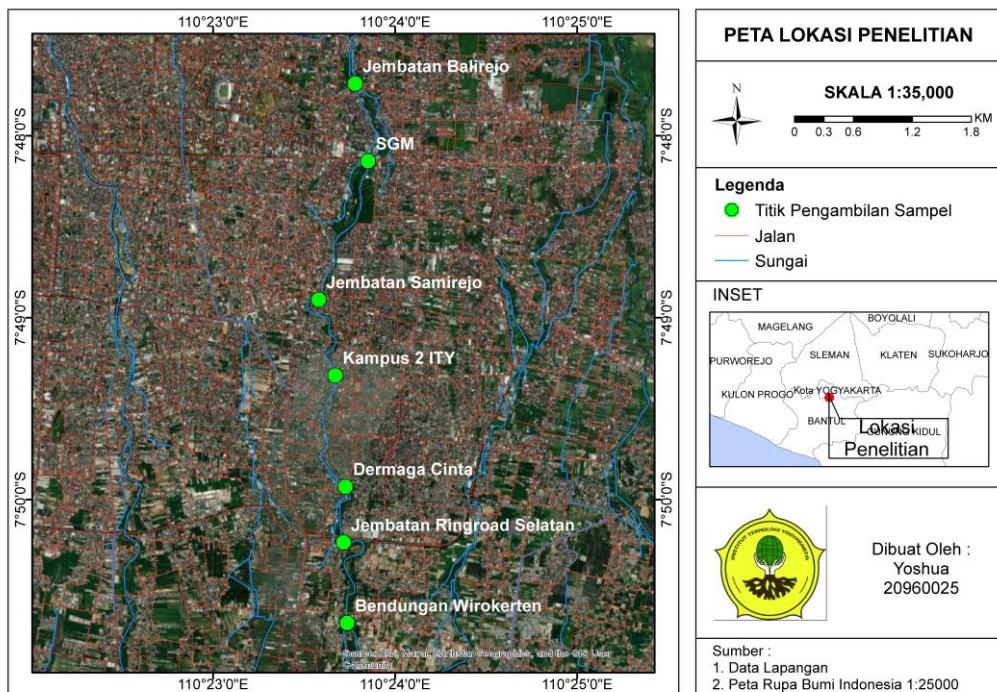
Pengambilan Sampel

Penelitian dilakukan di Sungai Gajahwong, D.I. Yogyakarta, pada segmen dari Jembatan Balérejo hingga Bendungan Wirokertèn pada 14-15 Juni 2022 (Tabel 1, Gambar 1). Sampel diambil pada pukul 08.00-12.00. Parameter yang diukur dalam penelitian ini terbagi ke dalam dua kelompok, yakni parameter fisik penampang sungai (debit, dimensi sungai), serta parameter kualitas air sungai (pH, nitrat, fosfat, BOD, DO).

Tabel 1 Lokasi Pengambilan Sampel

Titik Sampling	Lokasi	Koordinat	Jarak dari Hilir (km)	Jarak segmen (km)
1	Jembatan Balérejo	110°23'46.90"E 7°47'42.79"S	6,84	0,00
2	SGM	110°23'51.10"E 7°48'8.32"S	5,90	0,94
3	Jembatan Samirejo	110°23'34.87"E 7°48'54.03"S	4,31	1,59
4	Kampus 2 ITY	110°23'40.30"E 7°49'18.99"S	3,20	1,11
5	Dermaga Cinta	110°23'43.7"E 7°49'55.7"S	1,90	1,30

Titik Sampling	Lokasi	Koordinat	Jarak dari Hilir (km)	Jarak segmen (km)
6	Jembatan Ringroad Selatan	110°23'43.07"E 7°50'14.05"S	1,21	0,69
7	Bendungan Wirokertèn	110°23'44.29"E 7°50'40.62"S	0,00	1,21



Gambar 1 Peta pengambilan titik sampel

Pemodelan menggunakan QUAL2Kw

Hasil pengukuran sampel kemudian dikelompokkan menjadi 2, yakni parameter yang akan dimodelkan ke program QUAL2Kw dan yang tidak. QUAL2Kw hanya akan memodelkan parameter yang bersifat non-konsertatif. Dalam kasus ini, dari 10 parameter yang ada, 6 parameter menjadi input data program QUAL2Kw, yaitu: pH, nitrat, fosfat, BOD, DO, dan suhu. Data klimatologis diambil dari data histori yang disediakan pada situs <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>, dengan data input berupa koordinat tempat lokasi sampel dan waktu pengambilan sampel. Pemodelan menggunakan QUAL2Kw dibangun atas asumsi persamaan neraca massa untuk setiap konstituen konsentrasi tertentu (c_i). Secara matematis dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut (Kannel et al., 2007):

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} c_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i} c_i + \frac{E_{i-1}}{V_i} (c_{i-1} - c_i) + \frac{E_i}{V_i} (c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i$$

Keterangan:

- Q_i, Q_{i-1} : Debit pada reach ke- i , dan ke- $(i-1)$, (L/hari)
- $Q_{ab,i}$: Debit terabstraksi pada reach ke- i , (L/hari)
- V_i : Volume air pada reach ke- i , (L)
- W_i : Masukan suatu konstituen dari lingkungan ke sistem pada reach ke- i , (mg/hari)
- S_i : Sumber maupun timbunan suatu konstituen akibat mekanisme reaksi maupun transfer massa (mg/L/hari)

- E_i, E_{i-1}, E_{i+1} : Koefisien dispersi dalam lompok pada *reach* ke-*i*, ke-*(i-1)*, dan ke-*(i+1)* (L/hari)
 c_i, c_{i-1}, c_{i+1} : Konsentrasi dari suatu parameter kualitas air pada *reach* ke-*i*, ke-*(i-1)*, dan ke-*(i+1)* (mg/L)
 t : Waktu (hari)

Hasil perhitungan pemodelan kemudian dibandingkan dengan hasil perolehan data pengukuran di lapangan, kemudian dievaluasi menggunakan indeks U. Nilai Indeks U memiliki rentang 0-1. Semakin mendekati angka 1, model tersebut semakin tidak valid. Nilai U yang diterima adalah nilai U yang kurang dari 0.5 (A. D. N. Lestari, Sugiharto, & Siswanta, 2013).

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2}}{\left[\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y'_i)^2} + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)^2} \right]}$$

Keterangan:

- y'_i : nilai prediksi model pada lokasi ke-*i*
 y_i : nilai data pengukuran lapangan pada lokasi ke-*i*
 n : jumlah data pengamatan berpasangan (prediksi-pengukuran)

Selama proses kalibrasi model, dilakukan penyesuaian nilai-nilai konstanta secara *trial and error* untuk mendapatkan nilai model yang baik. Kalibrasi hidrolik dilakukan dengan memasukkan data-data hidrolik sungai pada *worksheet* yang telah disediakan di program QUAL2Kw. Berikut adalah nilai koefisien yang perlu dipertimbangkan dalam proses *trial and error* selama kalibrasi model.

Tabel 2 Koefisien kekasaran Manning untuk saluran terbuka

Material	<i>n</i>
<i>Kanal Buatan</i>	
Beton	0,012
Dasar berbatu dengan sisi-sisi	
Beton	0,020
Batu mortar	0,023
Riprap	0,033
<i>Saluran Alami</i>	
Bersih, lurus	0,025-0,040
Bersih, berangin, terdapat lumut	0,030-0,050
Berlumut, seperti kolam, berangin	0,050
Aliran pegunungan dengan bebatuan besar	0,040-0,100
Terdapat reruntuhan ranting dan kayu	0,050-0,200

Sumber: Pelletier & Chapra, (2008)

Setelah didapatkan model yang dinilai representatif, beberapa skenario dikembangkan untuk perhitungan prakiraan daya tampung sungai. Daya tampung sungai didefinisikan sebagai kemampuan sungai untuk dapat menampung suatu kontaminan tanpa menyebabkan badan air mengalami pencemaran. Nilai daya tampung asumsi yang digunakan adalah nilai maksimum konsentrasi parameter sesuai dengan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Untuk mengestimasi daya tampung sungai, maka dilakukan perhitungan sesuai hasil skenario.

Tabel 3 Skenario yang Diujikan

Skenario ke-	Kualitas Air di Hulu	Sumber Polutan	Kualitas Sungai Hasil Pemodelan
1	Data eksisting	Data eksisting	Model
2	Data eksisting	Tanpa masukan polutan	Model
3	Data Kualitas Air Kelas II	Tanpa masukan polutan	Model
4	Data Kualitas Air Kelas II	Trial and Error	Data Kualitas Air Kelas II

HASIL DAN PEMBAHASAN

Model Eksisting Sungai Gajahwong

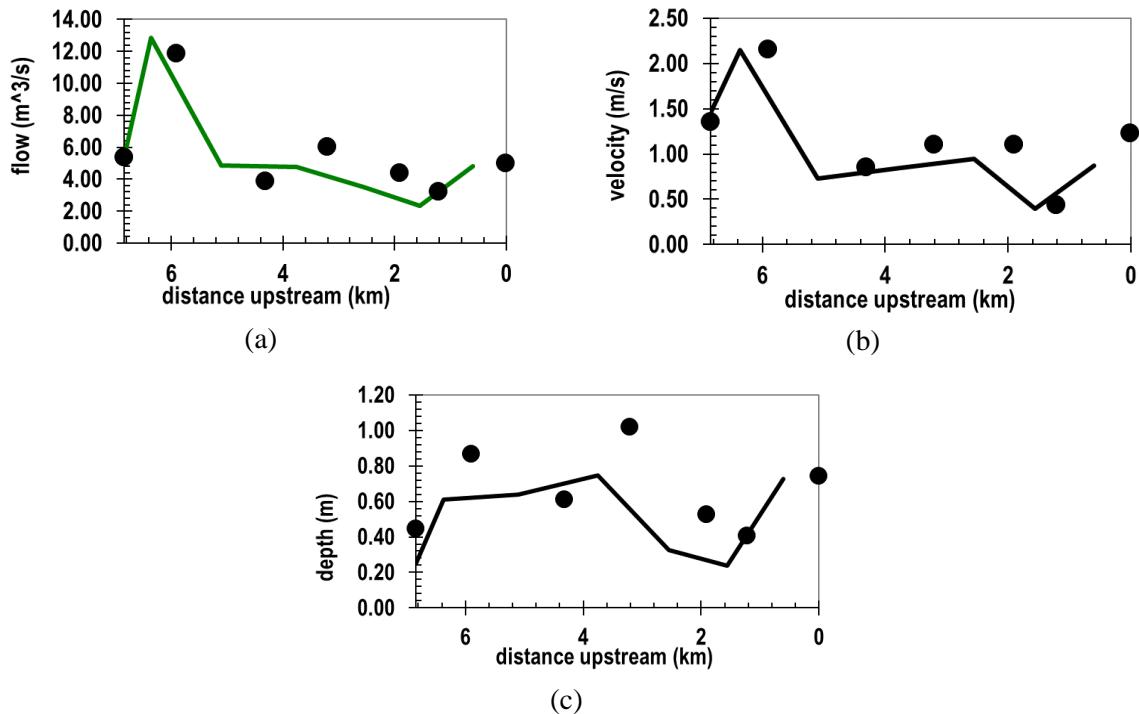
Kalibrasi Model Eksisting

Tabel 4 Data Hidrolik Sungai Gajahwong

Titik Sampel	Lebar (m)	Kedalaman (m)	Kecepatan (m/s)	Debit (m ³ /s)	Elevasi (m)	Slope	Manning
1	14,00	0,44	1,35	5,35	103	0,0106	0,03
2	9,80	0,87	2,15	11,85	93	0,0038	0,02
3	10,40	0,61	0,85	3,84	87	0,0072	0,08
4	7,50	1,02	1,10	5,99	79	0,0062	0,07
5	11,45	0,52	1,10	4,36	71	0,0087	0,05
6	24,20	0,40	0,43	3,18	65	0,0033	0,06
7	7,60	0,74	1,23	4,99	61	0,0033	0,05

Tahap selanjutnya adalah proses kalibrasi model. Dalam proses kalibrasi model diperlukan data hidrolik Sungai Gajahwong pada tiap segmen pengambilan sampel. Data hidrolik yang diambil, yaitu: debit, laju, dan kedalaman sungai. Ketiga data ini dimasukkan ke dalam *tab hydraulic data*. Tabel 4 berisi data hidrolik yang telah diolah. Berdasarkan data tersebut, kalibrasi model data hidrolik dilakukan. Hasil pemodelan dapat dilihat pada Gambar 2. Kalibrasi parameter debit dilakukan dengan menambahkan data debit *dummy* pada *tab diffuse sources*. Sementara itu, data kecepatan dan kedalaman sungai dikalibrasi dengan mengatur ulang nilai pada parameter Manning dalam *tab reach*.

Hasil pemodelan menunjukkan adanya ketidaksesuaian model terhadap data yang diobservasi. Hasil *fitness* model senilai 0,6827. Hal ini menunjukkan, secara umum hasil pemodelan dapat menjelaskan sekitar 68% dari variasi perilaku model. Nilai ini lebih dari 50%, sehingga model sudah dapat diterima untuk digunakan pada analisis lanjutan (H. Lestari, Haribowo, & Yuliani, 2019; Ratnaningsih, Lestari, Nazir, & Fauzi, 2018). Selama proses ini, dilakukan proses *trial-error* penyesuaian nilai-nilai parameter pada **Error! Reference source not found.**. Proses *trial-error* ini bersifat iteratif, sedemikian sehingga nilai *fitness* model yang didapat semakin maksimal. Nilai *fitness* model berada pada skala 0-1. Semakin nilai *fitness* model mendekati 1, menandakan model yang dibangun sudah lebih sesuai dengan perilaku sistem aliran di sungai.



Gambar 2 Perbandingan model dan data: (a) debit sungai, (b) kecepatan alir sungai, (c) kedalaman sungai

Tabel 5 Data Sampling, Hasil Pemodelan, serta Nilai Parameter U

Titik Sampel	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	Nitrat ($\mu\text{g/L}$)	Fosfat ($\mu\text{g/L}$)	Suhu (°C)	pH	Debit (m^3/s)	H (m)	v (m/s)
Data Sampling									
1	5,8	1,92	219	1.141	28	8,9	5,35	0,44	1,35
2	6,8	1,92	228	1.139	28	8,9	11,85	0,87	2,15
3	5,4	4,31	228	1.142	28	8,8	3,84	0,61	0,85
4	6,5	6,7	192	1.141	27	8,8	5,99	1,02	1,10
5	6,1	11,49	183	1.157	27,5	8,8	4,36	0,52	1,10
6	5,9	4,31	196	1.145	27,5	8,8	3,18	0,40	0,43
7	6,1	6,7	201	1.151	27,5	8,8	4,99	0,74	1,23
Data Hasil Pemodelan									
1	5,80	1,92	220,00	1.141,00	28,00	8,90	5,35	0,25	1,45
2	5,66	5,39	233,52	1.139,54	28,00	8,90	12,85	0,61	2,15
3	6,03	5,30	198,03	1.137,61	27,98	8,92	4,86	0,64	0,73
4	6,33	5,14	189,00	1.135,88	27,96	8,92	4,76	0,75	0,85
5	7,14	4,94	143,59	1.132,56	27,94	8,92	3,51	0,32	0,94
6	7,74	4,77	111,58	1.128,00	27,91	8,90	2,31	0,24	0,40
7	4,65	7,29	268,21	1.150,45	27,65	9,11	4,81	0,73	0,87
Nilai U	0,09	0,26	0,11	0,01	0,01	0,01	0,07	0,15	0,08
Nilai U Agregat									
$0,09 \pm 0,08$									

Setelah dilakukan kalibrasi data hidrolik, validasi data kualitas air dan hidrolika sungai pada tiap segmen dilakukan. Validasi data kualitas air sungai menggunakan nilai parameter U. Sebanyak 9 parameter yang dimasukkan ke dalam model, 3 parameter hidrolika sungai (debit, kecepatan, dan

kedalaman) dan 6 parameter non-konservatif (suhu, DO, BOD, pH, nitrat, dan fosfat) dievaluasi menggunakan parameter nilai U. Tabel 9 berisi perbandingan hasil pemodelan dengan data sampling di lapangan serta nilai U. Hasil parameter U secara agregat menunjukkan hasil yang baik, dengan nilai rerata 0,09 (Tabel 5). Ini menandakan tingkat eror secara rerata dari setiap parameter adalah 9%. Nilai eror tertinggi didapat dari parameter BOD, nitrat, dan kedalaman sungai.

Simulasi Kualitas Air Sungai Eksisting

A. Skenario 1

Skenario 1 merupakan skenario keadaan eksisting sungai Gajahwong, sesuai dengan data-data input yang dimasukkan. Dalam skenario ini, banyaknya input dari *point sources* dan *diffuse sources* dimasukkan dalam tab yang telah disediakan. Data debit *diffuse source* dan point sources dapat dilihat pada Tabel 6. Beberapa asumsi besaran data input untuk debit dan kualitas beban cemaran sebagai berikut:

- Asumsi besaran limbah yang digunakan adalah penggunaan air harian per kapita di kawasan perkotaan (190 L/orang/hari), dan sebesar 75% dari kebutuhan air terkonversi sebagai air limbah yang masuk ke aliran sungai. Akumulasi dari limbah cair hotel dan perumahan ini ditambahkan per segmennya.
- Asumsi yang dilakukan tidak mempertimbangkan kontur geografis sekitar sungai.
- Data input suhu dan pH diasumsikan sama seperti di data lapangan.
- Data input DO diasumsikan sebesar 1 mg/L (diasumsikan pengolahan tidak baik)
- Data input nitrat dan fosfat diasumsikan berturut-turut 10 mg/L dan 1,5 mg/L
- Pada segmen yang memiliki hotel dan permukiman, nilai BOD sebesar 52,5 mg/L. Sementara itu bila hanya ada permukiman diasumsikan 30 mg/L (segmen 4-5 dan 6-7). Nilai 52,5 diambil dari rerata maksimum limbah BOD yang diperbolehkan menurut Pergub DIY No. 7/2010 (hotel: 75 mg/L) dan Permen LHK No. P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 (IPAL permukiman 30 mg/L).
- Parameter *dummy* pada tiap-tiap segmen diberikan untuk menyesuaikan data hasil model dengan data pengamatan. Parameter *dummy* ini berfungsi sebagai estimasi angka konsentrasi yang tidak terukur atau belum dimasukkan ke dalam asumsi.

Sementara itu, untuk data *point sources* berikut adalah asumsi-asumsi yang dipergunakan dalam pembangunan model.

- Terdapat 3 point sources: (a) 450 m³/hari (rerata dari 250-650 m³/hari) pada segmen 1-2 (Saptutyningsih, 2003), (b) 5x dari debit *diffuse sources* dari segmen 4-5 (asumsi 5x debit normal), dan (c) 61,83 m³/hari dari segmen 6-7 (Kuncoro & Soedjono, 2022).
- Suhu diambil dari data literatur, yakni: (a) 30 °C (Saptutyningsih, 2003), (b) 26,4°C (Sekarwati, Murachman, & Sunarto, 2015), (c) 31,90°C (Kuncoro & Soedjono, 2022)
- Nilai DO diasumsikan telah mencapai batas minimum yang aman pada kelas 2, yakni 4 mg/L
- Nilai BOD: (a) 30 mg/L segmen 1-2 (baku mutu air limbah industri Pergub DIY 7/2010) , (b) batas tertinggi BOD Kelas 2, 3 mg/L, segmen 4-5 , (c) 56,31 mg/L (Kuncoro & Soedjono, 2022) segmen 6-7
- Nilai pH : (a) 8 (Saptutyningsih, 2003) segmen 1-2, (b) 6, segmen 4-5 dan 6-7 (baku mutu air limbah industri Pergub DIY 7/2010)

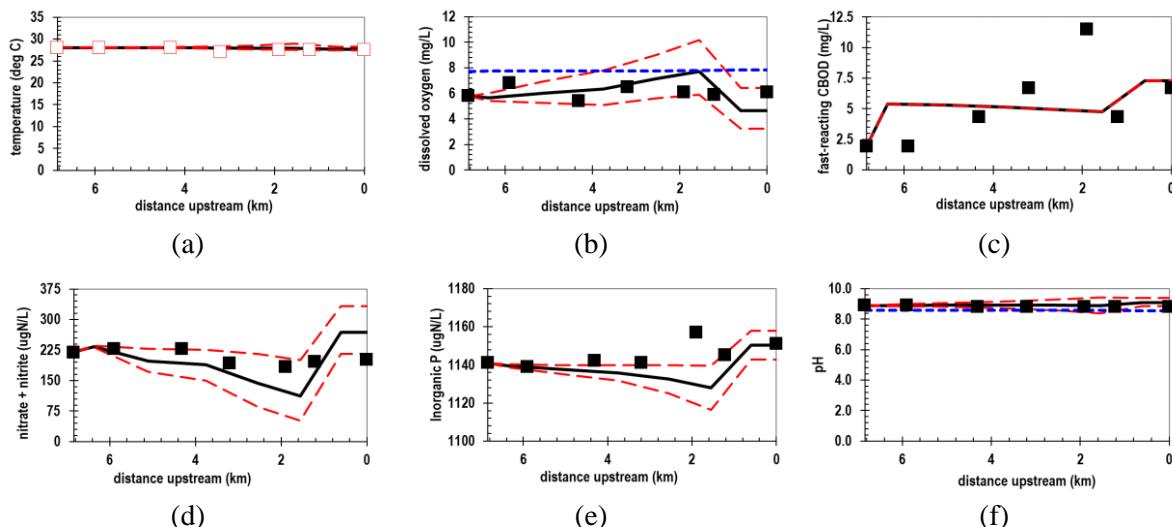
Tabel 6 Debit input tiap segmen dari pencemar tipe *point source* dan *diffuse source*

No.	Segmen	Diffuse Source (m ³ /s)	Point Source (m ³ /s)
1	1-2	$1,669 \times 10^{-4}$	$5,21 \times 10^{-3}$
2	2-3	$2,114 \times 10^{-4}$	-
3	3-4	$9,940 \times 10^{-4}$	-
4	4-5	$0,223 \times 10^{-4}$	$2,32 \times 10^{-4}$

No.	Segmen	Diffuse Source (m^3/s)	Point Source (m^3/s)
5	5-6	$9,937 \times 10^{-4}$	-
6	6-7	$0,225 \times 10^{-4}$	$7,15 \times 10^{-4}$

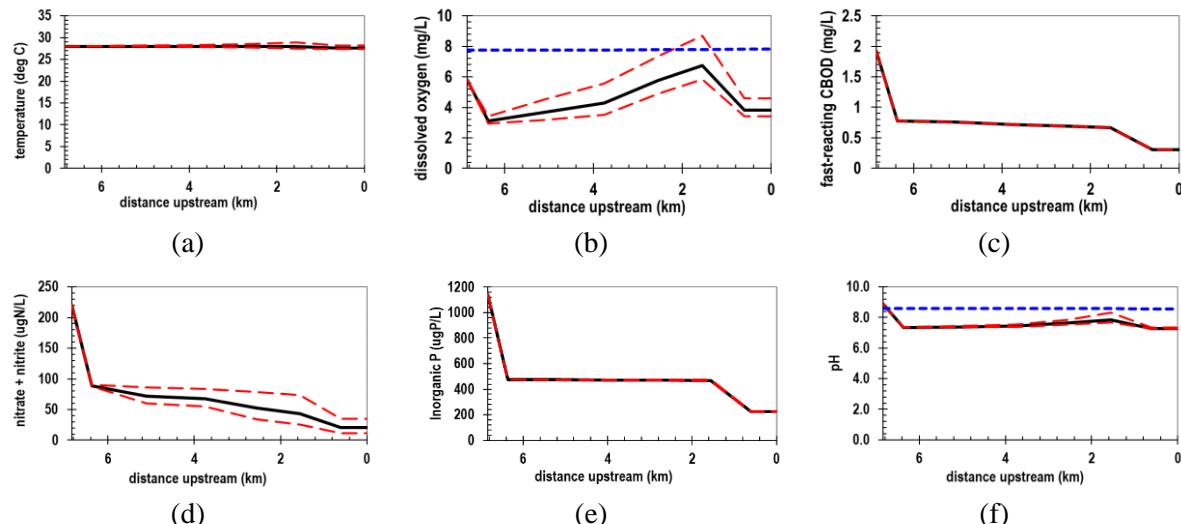
Berdasarkan asumsi-asumsi tersebut, maka hasil pemodelan untuk parameter DO, BOD, pH, nitrat, fosfat dan suhu sebagai berikut (*Gambar 3*). Berdasarkan data hasil simulasi, secara grafis dapat terlihat hasil pemodelan cukup mendekati nilai data pengamatan. Hal ini cukup berbeda dengan parameter nitrat, fosfat, dan BOD. Hasil pengamatan grafis ini sesuai dengan nilai validasi menggunakan skala U (

Tabel 5).



Gambar 3 Hasil pemodelan Skenario 1: (a) suhu, (b) DO, (c) BOD, (d) nitrat, (e) fosfat, (f) pH

B. Skenario 2

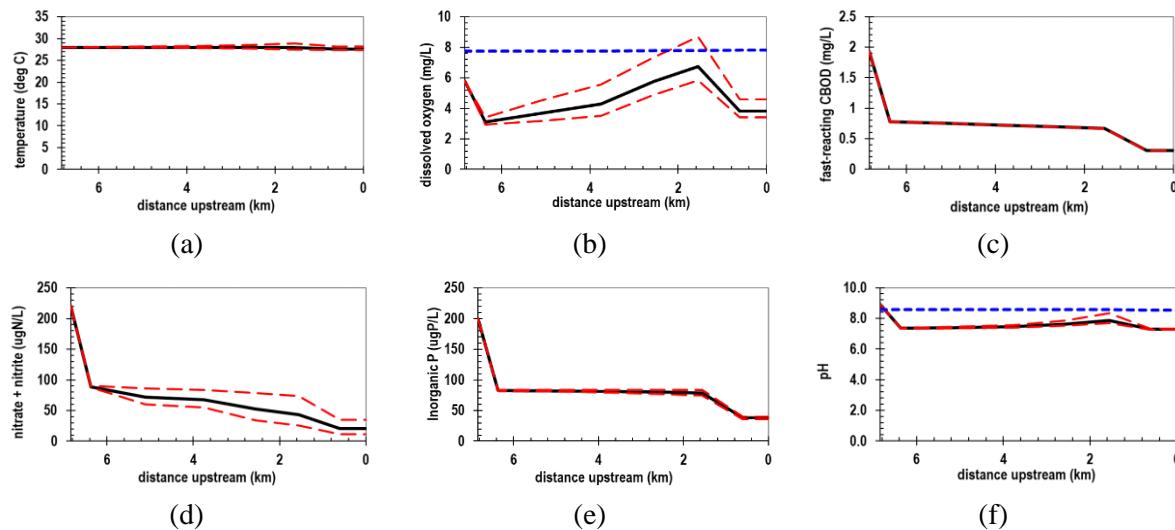


Gambar 4 Hasil pemodelan Skenario 2: (a) suhu, (b) DO, (c) BOD, (d) nitrat, (e) fosfat, (f) pH

Skenario 2 menandakan apabila tidak terdapat input cemaran sama sekali, baik berupa input dari *diffuse sources* (data asumsi dan *dummy*) maupun *point sources*. Dengan demikian, hasil pengamatan Skenario 2 dapat digunakan untuk melihat kondisi kemampuan purifikasi alami sungai, andaikata kondisi pada T1 tetap seperti data pengamatan. Pada skenario ini, isian pada tab *diffuse sources* dan *point sources* dihilangkan. Gambar hasil pemodelan Skenario 2 dapat dilihat pada Gambar 4.

Berdasarkan hasil pemodelan terlihat bahwa seluruh parameter cenderung mengalami penurunan hingga ke hilir, kecuali parameter suhu dan DO. Hal ini mengindikasikan, tanpa adanya beban cemaran yang masuk, proses *self-purification* dapat berjalan dengan baik pada segmen Sungai Gajahwong Balérejo-Wirokertèn. Walaupun telah terjadi *self-purification*, tidak semua parameter mampu diturunkan hingga mencapai batas dari baku mutu air sungai Kelas 2. Parameter fosfat hampir menyentuh batas atas dari batas maksimum baku mutu air sungai Kelas 2 (0,2 mg/L). Berbeda dengan parameter-parameter lainnya yang sudah dapat memenuhi baku mutu Kelas 2, bahkan hingga ke Kelas 1.

C. Skenario 3

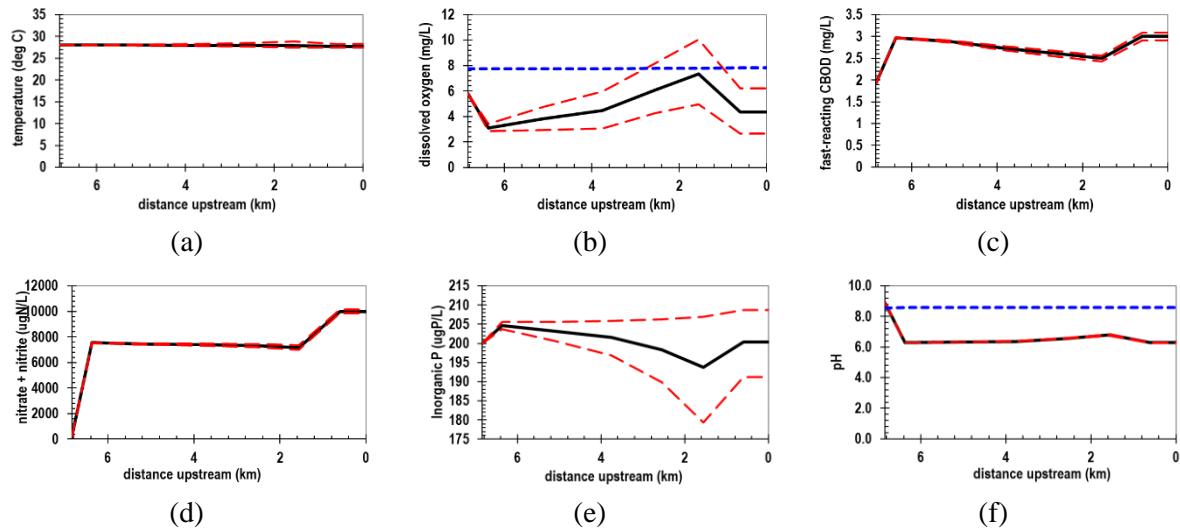


Gambar 5 Hasil pemodelan Skenario 3: (a) suhu, (b) DO, (c) BOD, (d) nitrat, (e) fosfat, (f) pH

Skenario 3 mengikuti Skenario 2. Perbedaan utamanya adalah input dari T1 yang telah memenuhi baku mutu Kelas 2. Parameter yang masih masuk ke dalam baku mutu kelas 2 dipertahankan nilainya. Sementara itu, nilai parameter fosfat diturunkan menjadi batas maksimum baku mutu air sungai Kelas 2 (0,2 mg/L). Dengan demikian, dapat terlihat kondisi minimal pencemaran yang dapat dipurifikasi pada kondisi yang ideal. Hasil pemodelan Skenario 3 dapat dilihat pada Gambar 5. Secara garis besar, tidak terdapat perbedaan pola antara hasil dari Skenario 2 dan Skenario 3. Satu hal yang jelas terlihat adalah parameter fosfat semakin dapat dipurifikasi oleh sistem lingkungan sungai. Hal ini menandakan, kondisi T1 yang telah sesuai dengan baku mutu menyebabkan kualitas air sungai di semua segmen masuk ke dalam kategori Kelas 1.

D. Skenario 4

Skenario 4 adalah skenario asumsi beban cemaran berat yang muncul dari polutan-polutan *point sources* dan *diffuse sources*. Asumsi yang dibangun berdasarkan cemaran maksimum yang timbul dari masing-masing sumber pencemar. *Headwater* (T1) diasumsikan telah sesuai dengan baku mutu Kelas 2, sesuai dengan Skenario 3. Tujuan dari Skenario 4 adalah memperkirakan beban cemaran yang masih dapat ditampung pada Balérejo-Wirokertèn agar tidak melewati baku mutu Kelas 2. Dalam proses ini dilakukan trial-error pada input tab *diffuse sources*. Input point sources mengikuti Skenario 1. Hasil pemodelan ditampilkan pada Gambar 6. Hasil pemodelan menunjukkan, introduksi pencemar yang cukup tinggi masih dapat dipurifikasi oleh sistem Sungai Gajahwong segmen Balérejo-Wirokertèn, dengan catatan, kondisi pada T1 mengikuti nilai kualitas air pada Skenario 1. Perlu menjadi catatan, walaupun pada segmen studi ini terlihat nitrat dan fosfat masih dapat tertampung dalam jumlah yang tinggi, diasumsikan nilai denitrifikasi, sedimentasi, maupun kebutuhan O₂ mengikuti nilai default pada program Qual2Kw.



Gambar 6 Hasil pemodelan Skenario 4: (a) suhu, (b) DO, (c) BOD, (d) nitrat, (e) fosfat, (f) pH

Analisis Daya Tampung dan Daya Dukung

Tabel 7 Daya Dukung Skenario 1 dan Skenario 4

Titik Sampe I	Skenario 1					Skenario 4			
	DO (kg/hari)	BOD (kg/hari)	Nitrat (kg/hari)	Fosfat (kg/hari)	DO (kg/hari)	BOD (kg/hari)	Nitrat (kg/hari)	Fosfat (kg/hari)	
1	832,5	499,5	4.523,2	-435,2	832,5	499,5	4.523,2	0,0	
2	1.841,3	-2.657,3	10.845,7	-1.043,4	-984,8	27,5	2.725,7	-5,2	
3	851,8	-967,1	4.114,6	-393,6	-78,4	46,4	1.069,0	-1,3	
4	958,3	-878,6	4.034,5	-384,8	189,9	114,2	1.067,4	-0,6	
5	953,3	-588,1	2.988,9	-282,8	630,0	121,6	816,6	0,5	
6	746,0	-352,7	1.974,8	-185,3	668,7	100,5	565,5	1,2	
7	271,3	-1.783,1	4.045,6	-395,1	147,1	-0,3	-1,0	-0,1	

Tabel 7 berisi informasi beban cemaran dari skenario 1 dan 4. Skenario 2 dan 3 tidak menghasilkan beban cemaran, sebab nilai konsentrasi tidak dimasukkan pada *tab point resources* dan *diffuse resources*. Nilai DT yang dibandingkan adalah dari Skenario 1 dan Skenario 4. Parameter yang akan dievaluasi nilai DT-nya adalah DO, BOD, nitrat, dan fosfat. Parameter pH dan suhu tidak dihitung nilai beban cemarannya. Berdasarkan data hasil pemodelan, Skenario 4 sudah turut mempertimbangkan kemampuan sistem Sungai Gajahwong segmen Balérejo-Wirokertèn untuk melakukan purifikasi alami. Oleh sebab itu, nilai beban cemaran pada Skenario 4 berfluktuasi.

Hasil perhitungan menunjukkan pada kondisi eksisting (Skenario 1) terdapat 2 parameter yang telah melampaui baku mutu air sungai Kelas 2, yakni BOD dan fosfat. Analisis nilai daya dukung pada titik pengambilan lokasi menunjukkan besar daya dukung yang telah terlampaui (tanda negatif). Sementara itu, pada Skenario 4, terjadi beberapa pengurangan daya dukung dari beberapa parameter pada segmen 1-3. Terjadinya pengurangan daya dukung ini sebab sepanjang segmen 1-3 terdapat kawasan permukiman dan satu industri yang mengeluarkan limbah cairnya. Walaupun demikian efek purifikasi sungai turut membantu menaikkan kembali daya dukung pada segmen-segmen selanjutnya (Tabel 7).

Mengingat parameter BOD dan fosfat telah melampaui ambang batas, maka diperlukan penurunan beban cemaran yang masuk. Tabel 8 menghitung nilai penurunan pencemaran teoretis yang diperlukan, sedemikian sehingga pada titik pengamatan terjadi penurunan konsentrasi parameter lingkungan. Hasil analisis menunjukkan untuk parameter BOD diperlukan penurunan beban cemaran antara 50-80% pada segmen 1-6, sementara itu pada segmen 6-7 hingga 150%. Sementara itu, untuk kadar fosfat sejak dari T1 sudah diperlukan pengurangan hingga 470%.

Tingginya kadar fosfat dan BOD ini menunjukkan adanya limpasan buangan *greywater* yang tinggi pada badan sungai. Khusus untuk parameter fosfat, tingginya konsentrasi fosfat diduga diakibatkan oleh pembuangan limbah detergen (Rahmadani et al., 2021; Rosilla, Azizah, & Setiawati, 2016; Wulandari, Yudha Perwira, & Made Ernawati, 2021). Hal ini dapat dideduksi dari banyaknya pemukiman di sepanjang Sungai Gajahwong segmen Balérejo-Wirokertèn. Selain itu, terdapat banyak pipa-pipa pembuangan langsung dari selokan dan pemukiman yang mengarah ke sungai. Kajian lebih lanjut perihal persentase sektor penyumbang cemaran dan perpanjangan segmen studi diperlukan untuk perbandingan daya dukung daya tampung sungai pada segmen dengan kondisi *landscape* yang berbeda.

Tabel 8 Target penurunan nilai beban cemaran pada titik pemantauan

Titik Sampel	Penurunan (%)			
	DO	BOD	Nitrat	Fosfat
1	0,00	0,00	0,00	470,50
2	0,00	79,76	0,00	469,77
3	0,00	76,80	0,00	468,80
4	0,00	71,22	0,00	467,94
5	0,00	64,64	0,00	466,28
6	0,00	58,88	0,00	464,00
7	0,00	142,98	0,00	475,22

KESIMPULAN

Model persebaran polutan di Sungai Gajahwong segmen Balérejo-Wirokertèn menunjukkan telah terjadinya kelebihan beban cemaran pada segmen tersebut. Implikasinya daya dukung sungai telah terlampaui. Kontribusi terbesar pencemaran berasal dari parameter BOD dan fosfat. Secara garis besar, persentase penurunan BOD yang dicapai berkisar 70%-150%, sementara itu penurunan fosfat mencapai setidaknya 470% dari beban cemaran semula.

DAFTAR PUSTAKA

- Camargo, R. de A., Calijuri, M. L., Santiago, A. da F., Couto, E. de A. de, & Silva, M. D. F. M. e. (2010). Water quality prediction using the QUAL2Kw model in a small karstic watershed in Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensis*, 22(4), 486–498. <https://doi.org/10.4322/actalb.2011.012>
- Irsanda, P. G. R., Karnaningroem, N., & Bambang S. D. (2014). Analisis Daya Tampung Beban Pencemaran Kali Pelayaran Kabupaten Sidoarjo Dengan Metode Qual2kw. *Jurnal Teknik POMITS*, 3(1), 47–52. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v3i1.5681>
- Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y. S., Kanel, S. R., Pelletier, G. J., & Kim, H. (2007). Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecological Modelling*, 202(3–4), 503–517. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.12.033>
- Kuncoro, Y. M., & Soedjono, E. S. (2022). Studi Pustaka: Teknologi Pengolahan Air Limbah pada Industri Penyamakan Kulit. *Jurnal Teknik ITS*, 11(3), 142–149.
- Lestari, A. D. N., Sugiharto, E., & Siswanta, D. (2013). Aplikasi Model QUAL2Kw untuk Menentukan Strategi Penanggulangan Pencemaran Air Sungai Gajahwong yang Disebabkan oleh Bahan Organik. *Jurnal Manusia Dan Lingkungan*, 20(3), 284–293. <https://doi.org/10.22146/jml.18496>
- Lestari, H., Haribowo, R., & Yuliani, E. (2019). Determination of Pollution Load Capacity Using QUAL2Kw Program on The Musi River Palembang. *Civil and Environmental Science Journal*, II(02), 105–116.
- Nuraini, E., & Sunardi. (2010). Kualitas Lingkungan Sungai Code dan Gajahwong Ditinjau dari Kadar Cu dan Cr dalam Cuplikan Sedimen. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIV HFI Jateng & DIY*, 328–338. Semarang.

- Pelletier, G., & Chapra, S. (2008, July). QUAL2Kw Theory and Documentation: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality. *Washington State, Department of Ecology*, Vol. 08-03–xxx. Olympia. Retrieved from <http://www.ecy.wa.gov/biblio/04030???.html>
- Pemerintah Republik Indonesia. Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. , Pub. L. No. 22, Peraturan Pemerintah (2021). ID.
- Rahmadani, P. A., Wicaksono, A., Jayanthi, O. W., Effendy, M., Nuzula, N. I., Kartika, A. G. D., ... Haryanti, A. (2021). Analisa Kadar Fosfat sebagai Parameter Cemaran Bahan Baku Garam pada Badan Sungai, Muara, dan Pantai di Desa Padelagan Kabupaten Pamekasan. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan Dan Perikanan*, 2(4), 318–323. <https://doi.org/10.21107/juvenil.v2i4.12835>
- Ratnaningsih, D., Lestari, R. P., Nazir, E., & Fauzi, R. (2018). Pengembangan Indeks kualitas Air sebagai Alternatif Penilaian Kualitas Air Sungai. *Jurnal Ecolab*, 12(2), 53–61. <https://doi.org/10.20886/jklh.2018.12.2.53-61>
- Rosilla, R., Azizah, M., & Setiawati, D. (2016). Kadar Fosfat dalam Air Sungai Cikaniki. *Jurnal Sains Natural Universitas Nusa Bangsa*, 5(2), 124–131.
- Saptutyningsih, E. (2003). Analisis Manfaat-Biaya Instalasi Pengolahan Air Limbah PT Sari Husada Yogyakarta. *Jurnal Ilmu Ekonomi Studi Pembangunan*, 3(2), 121–140.
- Sekarwati, N., Murachman, B., & Sunarto. (2015). Dampak Logam Berat Cu (Tembaga) dan Ag (Perak) pada Limbah Cair Industri Perak terhadap Kualitas Air Sumur dan Kesehatan Masyarakat serta Upaya Pengendaliannya di Kotagede, Yogyakarta. *Jurnal Ekosains*, 7(1), 64–76.
- Wulandari, N., Yudha Perwira, I., & Made Ernawati, N. (2021). Profil Kandungan Fosfat pada Air di Daerah Aliran Sungai (DAS) Tukad Ayung, Bali. *Current Trends in Aquatic Science IV*, (2), 108–115.