

ANALISIS DAYA TAMPUNG BEBAN PENCEMAR SUNGAI PESANGGRAHAN (SEGMENT KOTA DEPOK) DENGAN MENGGUNAKAN MODEL NUMERIK DAN SPASIAL

Analysis Pollution Load Capacity Pesanggrahan River (Segment Depok City) using Numeric and Spatial Model

Muhamad Komarudin^a, Sigid Hariyadi^b, Budi Kurniawan^c

^a Program Studi Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan, Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680 – komar2905@gmail.com

^b Departemen Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

^c Bidang Prasarana dan Jasa Bidang Pengendalian Pencemaran Lingkungan KLHK

Abstract. The objective of the study is to calculate and analyze the pollution load capacity of the specified river segment using combination of the water quality model “QUAL2Kw” and Geographic Information System (SIG). Location of the study is Pesanggrahan river in the Depok City sections. The result of modeling shows that the actual pollutant load discharged to the river section for BOD, COD and TSS are 8.257; 59.930 dan 48.975 kg/days, respectively. Meanwhile the allowable pollutant load or the pollution load capacity of the section of the river for those pollutant parameters are 8.111, 58.20; 49.085 kg/days, respectively. It indicates that the pollution load capacity of the section of the river has been exceeded that needs reduction as much as load of 146 kg/days for BOD, 1,650 kg/days for COD and 110 kg/days for TSS in order to meet the set water quality standard of the river section. The coefficient of determination (r^2) of 0,99 for BOD and COD and 0,998 for TSS indicates that the modelled concentration of BOD, COD and TSS and those concentration of measured results show the strong relationship and the low value difference. In addition, the calibration of modeling results have an error rate of less than 10% indicated by the value of RMSE of 0.065, 0.09, 0.2 for BOD, COD and TSS, respectively. The error value shows that the water quality modeling results can be used for predicting the pollution load capacity or the allowable pollutant load of the river section

Keywords: allowable pollutant load, GIS, Pesanggrahan River, pollution load capacity, QUAL2Kw

(Diterima: 03-06-2015; Disetujui: 10-08-2015)

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Proyeksi penduduk Indonesia (BPS 2012) menunjukkan bahwa jumlah penduduk Indonesia selama dua puluh lima tahun mendatang terus meningkat yaitu dari 240.7 juta pada tahun 2010 menjadi 304.9 juta pada tahun 2035. Jumlah penduduk yang terus meningkat tentunya akan diikuti dengan meningkatnya kegiatan dan usaha di berbagai sektor, yang pada akhirnya akan meningkatkan produksi limbah padat maupun cair yang harus ditampung oleh lingkungan. Produksi limbah yang dibuang ke media khususnya limbah cair yang dibuang ke sungai, apabila dilakukan secara terus menerus dapat mengakibatkan terjadinya pencemaran sehingga terjadi penurunan kualitas air sungai tersebut. Menurut Suriawira (2003) dalam Agustini et al. (2012) menyatakan bahwa berbagai aktivitas manusia dalam memenuhi kebutuhan hidupnya yang berasal dari kegiatan industri, rumah tangga, dan pertanian akan menghasilkan limbah yang memberi sumbangan pada penurunan kualitas air sungai. Peningkatan beban limbah yang dialirkan ke sungai dikhawatirkan akan melebihi daya tampungnya dan apabila daya tampungnya terlampaui dapat

mengakibatkan terganggunya daya dukung sungai yang pada akhirnya sumber daya alam ini akan mengalami kelangkaan baik ditinjau dari kuantitas maupun kualitas (Fadli NA 2008).

Daya Tampung media lingkungan tergantung kepada kapasitas asimilasi media lingkungan tersebut. Kapasitas asimilatif adalah kemampuan lingkungan hidup untuk menyerap hal-hal, energi dan/atau komponen lain yang masuk ke dalam lingkungan, baik oleh mereka sendiri atau melalui campur tangan manusia (Schroll *et al.* 2012). Berkaitan dengan fenomena pencemaran lingkungan, para peneliti pada umumnya menggunakan model untuk memahami secara mendetail proses yang terjadi dan menemukan tingkat pengaruh berbagai parameter terhadap terjadinya pencemaran.

Menurut Kurniawan (2013) pencemaran air di sungai merupakan proses yang kompleks sebagai representasi dampak dari interaksi antara zat pencemar, hidrogeomorfologi sungai dan aktivitas manusia. Untuk memprediksi Daya Tampung Beban Pencemaran (DTBP) di sungai diperlukan model sebagai alat (*tool*) yang mampu menirukan proses yang sesungguhnya, walaupun tentunya dengan menggunakan penyederhanaan dan asumsi-asumsi. Selanjutnya dikatakan juga bahwa perhitungan DTBP

sungai belum dapat dilakukan secara langsung karena kompleksitas faktor-faktor yang mempengaruhinya, oleh sebab itu digunakan metode pemodelan untuk menyederhanakan kompleksitas tersebut. Perhitungan DTBP sungai belum dapat dilakukan secara langsung karena kompleksitas faktor-faktor yang mempengaruhinya, oleh sebab itu, digunakan metode pemodelan untuk menyederhanakan kompleksitas tersebut (Kurniawan, 2013). Selanjutnya berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No 110 tahun 2003 Tentang Pedoman Penetapan Daya Tampung Beban Pencemaran Air Pada Sumber Air pasal 1 ayat a diuraikan bahwa daya tampung beban pencemaran air adalah kemampuan air pada suatu sumber air, untuk menerima masukan beban pencemaran tanpa mengakibatkan air tersebut menjadi tercemar. Namun demikian implementasi dari kebijakan ini masih terbatas dan masih banyak sungai-sungai yang belum di kaji mengenai daya tampungnya.

Penelitian yang mengintegrasikan metode QUAL2Kw dan SIG belum banyak dilakukan. Beberapa penelitian yang menggunakan metode ini atau salah satu metode, antara lain dilakukan oleh Baherem (2014), Abdi (2012), Lin *et al.* (2009), Turner, *et al.* (2009) dan Kannel *et al.* (2007),

Baherem (2014) menganalisis lokasi sumber pencemar dan mengkuantifikasi beban pencemaran serta menganalisis nilai daya tampung beban pencemaran sungai Cibanten. Lokasi sumber pencemar didekati dengan batas administrasi Kecamatan dan kuantifikasi beban pencemaran dengan pendekatan faktor emisi. Analisis daya tampung beban pencemaran dengan menggunakan model QUAL2Kw. Potensi beban pencemar limbah total *non point source* (NPS) dari seluruh sumber pencemar yang dianalisa (peternakan, penduduk, persampahan, pertanian, rumah sakit, hotel dan industri) untuk parameter BOD, COD dan TSS, kontribusi yang terbesar adalah dari sektor penduduk (Rumah Tangga). Analisis daya tampung dengan model QUAL2Kw menunjukkan daya tampung beban pencemar di wilayah penelitian sudah melewati kapasitas daya tampung sungai.

Abdi (2012) selain mengidentifikasi lokasi sumber-sumber pencemar dan menghitung beban pencemaran dan daya tampung beban pencemaran, penelitiannya juga menguji reliabilitas penggunaan model QUAL2Kw untuk menghitung beban pencemaran dan daya tampung beban pencemaran di sungai Batanghari. Hasil uji reliabilitas dengan *relative bias* dan *mean relative error* menunjukkan pemodelan QUAL2Kw dapat diterima di daerah penelitian, namun uji korelasi pada grafik pencar menunjukkan model hanya berlaku pada satu set data pemantauan saja. Selain menggunakan QUAL2Kw, Abdi (2012) juga menggunakan SIG untuk pembuatan peta-peta tematik, perhitungan luas, jarak dan koordinat lokasi, dalam perhitungan DTBP di sungai Batanghari, namun SIG belum digunakan untuk penelusuran sumber pencemar.

Lin *et al.* (2009) menggunakan QUAL2E untuk membangun sistem pengelolaan dan perlindungan daerah aliran sungai Kao-Ping, Taiwan, sebagai sumber air minum dimana pengembangan lahan dilarang dengan

alasan-alasan kesehatan dan penyediaan air minum yang sehat. QUAL2E merupakan versi terdahulu dari QUAL2Kw. Hasil penelitian adalah diperolehnya zona lindung yang paling optimal yang kemudian digunakan untuk memperkirakan jumlah biaya kompensasi didasarkan pada tiga mekanisme, yaitu: *land banking*, *conservation easement*, dan *transferable development rights*.

Kannel *et al.* (2007) mensimulasi beberapa variasi strategi pengelolaan kualitas air dengan QUAL2Kw di Sungai Bagmati, Nepal, selama periode kritis (kemarau) untuk mempertahankan mutu air sasaran dimana DO minimum 4 mg/L atau lebih; BOD maksimum 3 mg/L; Total N 2,5 mg/L; Total P 0,1 mg/L; temperatur air kecil atau sama dengan 20°C; pH pada range 6,5–8,5, dengan mempertimbangkan modifikasi beban pencemar, penambahan debit dan oksigenasi lokal. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa oksigenasi lokal efektif untuk mempertahankan kandungan DO minimum di sungai. Kombinasi antara modifikasi air limbah, penambahan aliran dan oksigenasi lokal cocok untuk mempertahankan batas kualitas air yang diperbolehkan.

Manurung, J. (2014) menghitung beban pencemaran setiap sumber pencemar dan daya tampung beban pencemaran di sungai Ciliwung. Tujuan penelitian ini sama dengan yang dilakukan penulis, tetapi metode SIG dan pemodelan QUAL2Kw tidak digunakan dalam penelitian ini. Hasil penelitian menunjukkan sumber pencemar yang dominan berasal dari limbah domestik dan secara keseluruhan beban pencemar yang masuk ke sungai Ciliwung sudah melampaui daya tampung beban pencemar.

Menurut Asdak (2010) karakteristik fisik perairan yang dianggap penting adalah konsentrasi larutan sedimen, suhu air, dan tingkat oksigen terlarut dalam sistem aliran air. Lebih lanjut diuraikan bahwa kandungan gas oksigen terurai dalam air mempunyai peranan menentukan kelangsungan hidup organisme akuantis dan untuk berlangsungnya proses reaksi kimia yang terjadi di dalam badan perairan. Konsentrasi oksigen dalam air mewakili status kualitas air pada tempat dan waktu tertentu, sehingga keberadaan muatan konsentrasi oksigen didalam air dapat dijadikan indikator ada atau tidaknya pencemaran disuatu perairan. Lebih lanjut dinyatakan bahwa pengukuran *biochemical oxygen demand* (BOD) dan *chemical oxygen demand* (COD) perlu dilakukan untuk menentukan status muatan oksigen di dalam air. Selain itu kualitas fisik perairan sebagian besar ditentukan oleh jumlah konsentrasi sedimen yang terdapat di perairan tersebut. Muatan sedimen dalam suatu sistem perairan memberikan pengaruh pada kedalaman cahaya matahari yang masuk ke dalam aliran air. Padatan Tersuspensi Total (TSS) adalah bahan-bahan tersuspensi yang terdiri atas lumpur dan pasir halus serta jasad-jasad renik yang terutama disebabkan oleh kikisan tanah dan erosi tanah yang terbawa ke badan air (Effendi 2003). Dalam penelitian ini, parameter kunci yang akan digunakan dalam analisis kualitas air adalah parameter BOD, COD dan TSS. Parameter kunci adalah parameter adalah parameter yang dapat mewakili kualitas lingkungan (Hadi 2007). Hal ini dilakukan

dengan pertimbangan bahwa parameter kunci tersebut dapat memperlihatkan gambaran tingkat kualitas air sungai Pesanggrahan yang digunakan untuk berbagai peruntukan.

Sungai-sungai di Indonesia masih banyak yang belum dihitung daya tampung beban pencemarannya, sementara di sisi lain, aktifitas di sepanjang sungai serta bantaranya terus bertambah mengikuti bertambahnya jumlah penduduk dan tuntutan kebutuhan ekonomi. Situasi seperti ini terjadi juga di Sungai Pesanggrahan sebagai salah satu sungai yang memberikan kontribusi penting bagi lingkungan hidup di wilayahnya. Sungai Pesanggrahan yang mengalir dari wilayah Kabupaten Bogor, Kota Depok, dan Kota Tangerang di Propinsi Jawa Barat, sampai ke wilayah Jakarta Selatan, Jakarta Barat, dan Jakarta Utara, di Propinsi DKI Jakarta merupakan sungai yang strategis baik bagi wilayah Propinsi DKI Jakarta, Banten maupun Jawa Barat.

Penelitian ini difokuskan pada perhitungan daya tampung lingkungan hidup dengan harapan dapat memberikan alternatif metode yang lebih komprehensif dalam perhitungan dan implementasi daya tampung beban pencemaran. Hal ini sejalan dengan pasal 4 Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 110 tahun 2003 yang memberikan peluang bagi dikembangkannya metode lain sesuai dengan kaidah ilmu pengetahuan dan kemajuan teknologi serta untuk menyesuaikan dengan situasi dan kapasitas aparatur daerah sebagai pelaksana di lapangan.

1.2. Rumusan Masalah

Menurut Murijal (2012) sungai Pesanggrahan dari hulu (Bogor, Jawa Barat) sampai dengan hilir (kemungkinan, DKI Jakarta) memiliki kisaran nilai ASPT 1 – 4.75 yang mengindikasikan bahwa kondisi perairan masuk ke dalam tingkat pencemaran sedang sampai tingkat pencemaran berat yang diakibatkan oleh pencemaran organik dan anorganik. Di sisi lain pemerintah melalui Keputusan Menteri Lingkungan Hidup no 110 tahun 2003 dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 01 Tahun 2010 telah menetapkan pedoman penetapan Daya tampung beban pencemaran air pada sumber air. Namun demikian pengukuran Daya Tampung beban pencemaran di Sungai Pesanggrahan belum pernah dilakukan. Untuk itu perlu dilakukan secara terintegrasi dengan analisis secara spasial terhadap sumber-sumber pencemarnya sehingga penetapan daya tampung beban pencemaran dapat diikuti dengan kebijakan pengendalian penurunan tingkat pencemaran yang lebih terpadu secara kewilayahan.

Beberapa pertanyaan penting yang dijawab melalui penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Jenis kegiatan apa saja yang memberikan kontribusi terhadap pencemaran di wilayah penelitian?
2. Berapa besar daya tampung beban pencemaran sungai pesanggrahan pada segmen wilayah penelitian?

1.3. Tujuan

- Melakukan identifikasi sumber pencemar dan analisis potensi beban pencemar yang masuk ke sungai dengan menggunakan pendekatan SIG.
- Menghitung dan Menganalisis DTBP sungai (Sungai Pesanggrahan segmen Kecamatan Sawangan, Kecamatan Limo dan Kecamatan Cinere Kota Depok) dengan aplikasi “QUAL2Kw”.

2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan adalah pemodelan numerik dan spasial. Metode pemodelan numerik adalah teknik yang digunakan untuk memformulasikan persoalan riil di lapangan secara matematik sehingga dapat dipecahkan dengan operasi perhitungan atau aritmatika. Untuk implementasi metode ini maka digunakan aplikasi “QUAL2Kw” dan metode pendekatan spasial digunakan untuk merujuk lokasi obyek sumber pencemar yang dianalisis peta persebarannya dengan menggunakan SIG.

2.1. Lokasi Penelitian

Berdasarkan Gambar 1 Peta Daerah Aliran Sungai Pesanggrahan (Dinas PU DKI 2006), menunjukkan bahwa Sungai Pesanggrahan melintasi 3 provinsi, mengalir dari wilayah Kabupaten Bogor dan Kota Depok Provinsi Jawa Barat, Kota Tangerang Selatan Provinsi Banten, sampai ke wilayah Jakarta Selatan, Jakarta Barat, dan Jakarta Utara, di Provinsi DKI Jakarta.

2.2. Inventarisasi dan Perhitungan Potensi Beban Pencemar

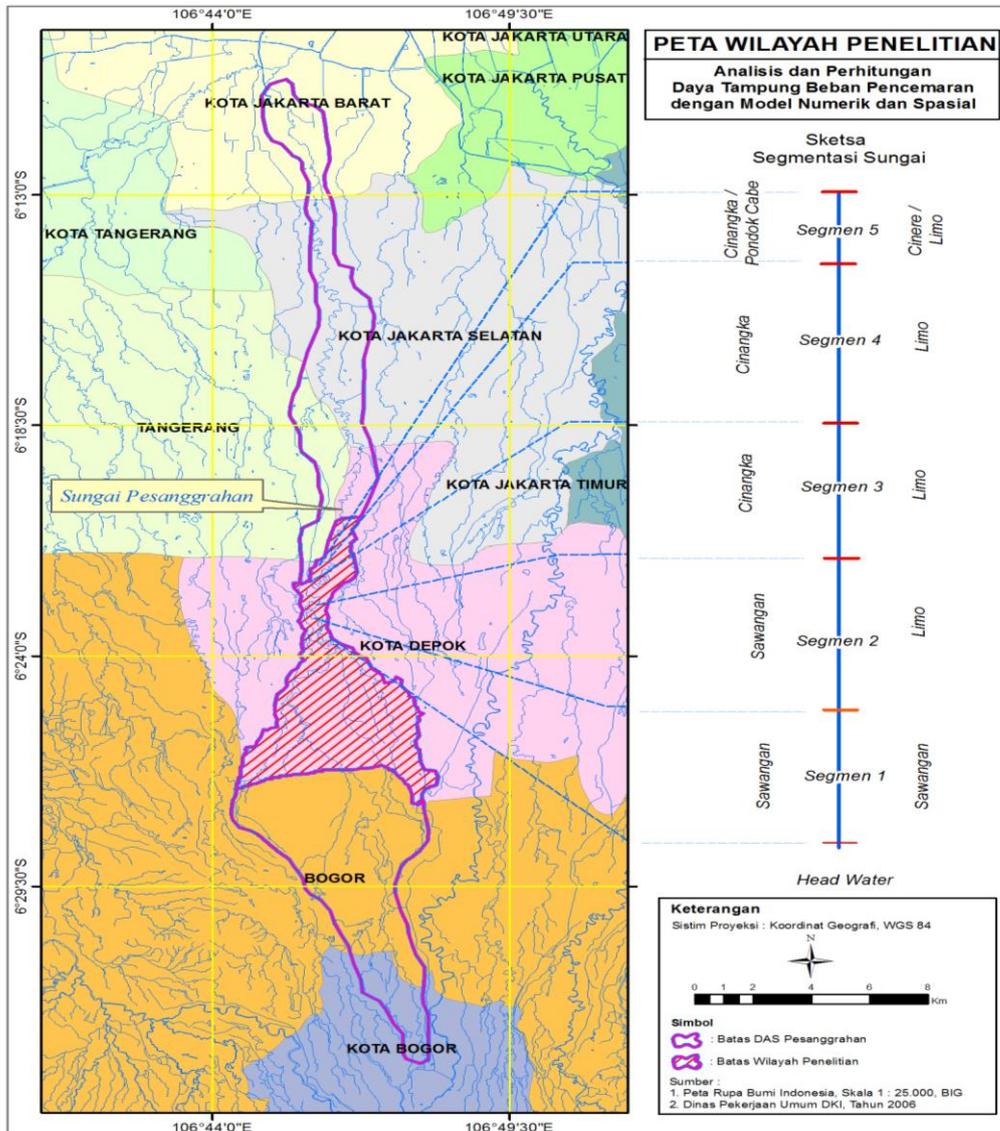
Menurut Asdak (2002) sumber pencemaran dapat dikelompokkan menjadi *point source* dan *non-point source*. *Point source* adalah tempat-tempat yang menjadi sumber pencemaran yang diketahui secara pasti, misalnya: limbah yang berasal dari pabrik kimia. *Non-point source* adalah pencemaran yang berasal dari area luas seperti pertanian, perdesaan atau permukiman yang tidak tersedia sistem riol secara khusus.

Dalam penelitian ini sumber pencemar air sungai dibedakan menjadi sumber pencemar titik (SPT) dan sumber pencemar non titik (SPNT). Disebut SPT apabila diketahui secara pasti di mana lokasi outlet sumber pencemarnya, sedangkan SPNT apabila sumber pencemar bersifat menyebar dan tidak diketahui secara pasti di mana lokasi bahan pencemar masuk ke dalam sungai. Limbah industri dapat dikategorikan sebagai SPT apabila lokasi *end pipe*-nya diketahui secara pasti. Pertanian, permukiman dan peternakan karena limbah yang dihasilkannya bersifat menyebar, dikategorikan sebagai SPNT.

Potensi Beban Pencemar (PBP) yang dihitung adalah yang bersumber dari SPT dan SPNT. Perhitungan PBP

menggunakan faktor effluent dan dihitung menurut parameter BOD, COD dan TSS. Analisis PBP dibantu dengan peta, seperti peta topografi atau Rupa Bumi, peta penggunaan lahan dan peta administrasi. Pendekatan ini mempermudah analisis hubungan kualitatif antara beban pencemar dengan sumber air sehingga

diketahui kontribusi masing-masing jenis sumber pencemar. Dalam penelitian ini potensi sumber pencemar yang akan dihitung berasal dari kegiatan rumah tangga, pertanian dan peternakan.



Gambar 1. Peta lokasi Sungai Pesanggrahan dan segmen daerah penelitian di wilayah Depok (Analisis GIS 2014)

a. Potensi Beban Pencemar Rumah Tangga

Mendiskripsikan Menurut Iskandar (2007), PBP limbah domestik dihitung menggunakan persamaan (1).

$$PBP = \alpha \times \text{jumlah penduduk} \times \text{faktor effluent} \times \text{rek} \dots (1)$$

dimana PBP adalah potensi beban pencemaran limbah domestik. Alpha (α) adalah koefisien yang menyatakan tingkat kemudahan limbah mencapai sungai yang nilainya berkisar antara 0.3 hingga 0.1. Semakin mudah limbah mencapai sungai semakin besar nilai α . KLH (2013) dalam kajian perhitungan beban pencemaran di sungai Barito besaran nilai α dibagi menjadi 3 kelas sebagai berikut:

- 1) Nilai $\alpha = 1$ digunakan untuk daerah yang lokasinya berjarak antara 0 sampai 100 meter dari sungai,
- 2) Nilai $\alpha = 0,85$ untuk lokasi yang berjarak diantara 100 – 500 meter dari sungai dan
- 3) Nilai $\alpha = 0,3$ untuk lokasi yang berjarak lebih besar dari 500 meter dari sungai.

rek adalah rasio ekivalen kota yang menyatakan perbedaan beban limbah domestik yang dihasilkan antara wilayah perkotaan, pinggiran dan pedalaman. Menurut Iskandar (2007) nilai besaran rasio tersebut berturut-turut adalah sebagai berikut: nilai 1 untuk daerah kota, 0.8125 pinggiran kota dan 0.6250 untuk pedalaman. Nilai faktor effluent dari limbah domestik adalah sebagai berikut: BOD 0.04 kg/hari, COD 0.055 kg/hari dan TSS 0.038 kg/hari (Iskandar 2007).

b. Perhitungan Potensi Beban Pencemaran dari Peternakan

Beban pencemaran dari peternakan dihitung dengan menggunakan faktor effluent. Data yang diperlukan dalam perhitungan ini adalah jenis dan jumlah ternak. Sementara itu, faktor effluent yang digunakan sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Faktor emisi ternak

Jenis Ternak	Potensi Beban Pencemar dari Peternakan				
	Koli Total (jmlh/ekor/hr)	BOD	COD	NO3	P-Total
Sapi	3,70E+06	292	716	0,1742	0,153
Domba	2,10E+05	55,68	136,23	0,0333	0,063
Ayam	4,30E+04	2,36	5,59	0,0011	0,003
Bebek	1,00E+05	0,88	2,22	0,0005	0,005

Sumber: Iskandar (2007) dengan modifikasi

c. Perhitungan Potensi Beban Pencemaran dari Pertanian

Perhitungan potensi beban pencemaran air yang bersumber dari aktifitas pertanian diperoleh berdasarkan data luas lahan pertanian dan jenis penggunaan lahan yang ada di wilayah penelitian. Perkiraan beban limbah dari areal pertanian dihitung dengan menggunakan nilai effluen pada Tabel 2.

Tabel 2. Faktor effluen pertanian

Limbah Pertanian	Faktor effluen (kg/ha/musim tanam)		
	Sawah	Palawija	Perkebunan lain
BOD	18	9	9
N	20	10	3
P	10	5	1,5
TSS	0,04	2,4	1,6
Pestisida	0,16	0,08	0,024

Sumber: Iskandar (2007) dengan modifikasi

Dalam perhitungan potensi beban pencemar dari sumber pertanian tidak terdapat nilai faktor effluen untuk parameter COD, oleh karena itu parameter COD dari sumber pertanian tidak digunakan dalam penelitian ini.

d. Perhitungan Potensi Beban Pencemaran Air

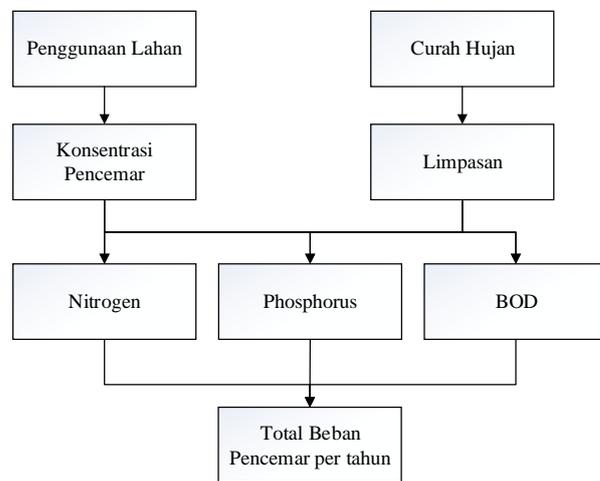
KLH (2013) mengkaji potensi sumber pencemar di DAS Barito, dimana total potensi beban pencemaran air merupakan hasil penjumlahan beban pencemaran sumber institusi, rumah tangga, peternakan, pertanian dan sampah yang masing-masing dihitung per kecamatan. Metode perhitungan digunakan dalam penelitian dengan rumus sebagai berikut:

$$Total\ Beban\ Pencemaran\ Air = Beban\ Pencemar\ Rumah\ tangga + Beban\ Pencemaran\ Peternakan + Beban\ Pencemaran\ Pertanian \dots\dots\dots (2)$$

(Sumber: KLH (2013) dengan modifikasi)

2.3. Sistem Informasi Geografi (SIG)

Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan suatu sistem yang digunakan untuk memperoleh, menyimpan, memanggil kembali, menganalisis dan menampilkan data spasial (Burrough 1998). Menurut Eisakhani *et al.* (2009) SIG dapat digunakan untuk modeling lingkungan seperti mendelineasi daerah aliran sungai, wilayah curah hujan dan indentifikasi sumber pencemar secara mudah dan akurat. Lebih lanjut dalam penelitiannya SIG digunakan untuk penilaian sumber pencemar *non point source* di Cameron Highlands. Data yang digunakan meliputi data elevasi yang tersedia, jaringan sungai, curah hujan, debit dan penggunaan lahan data set dari Cameron Highlands untuk estimasi beban polutan tahunan rata-rata dalam bentuk total nitrogen, fosfor dan kebutuhan oksigen biokimia (BOD). Kemampuan GIS dalam mengintegrasikan database dalam penelitian ini dapat seperti diagram alir pada Gambar 2.



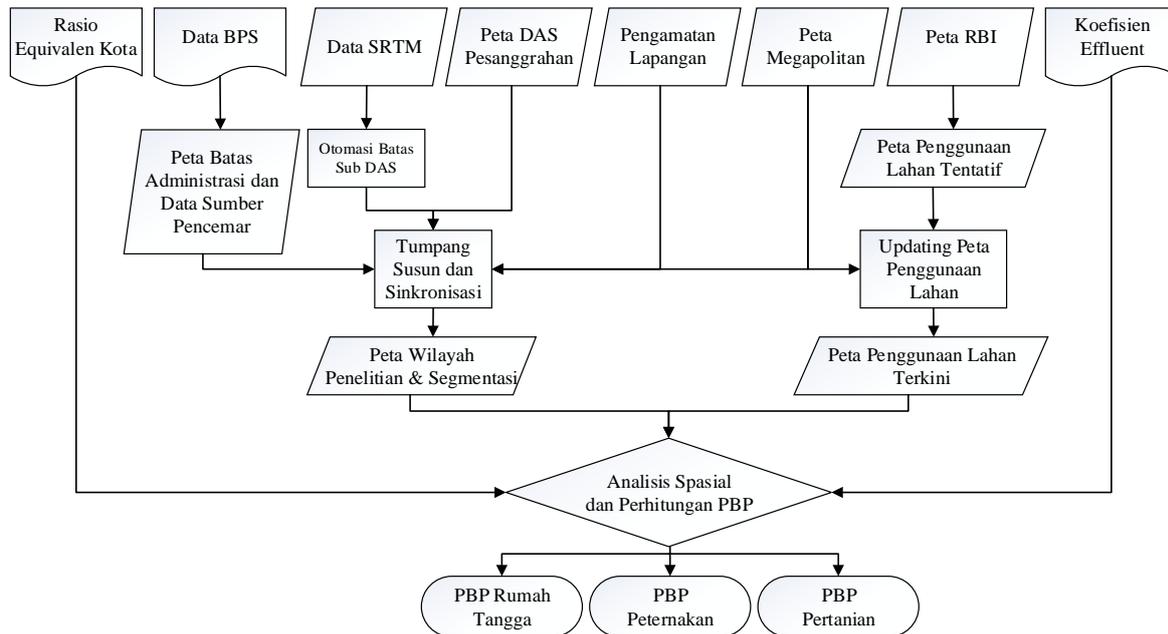
Gambar 2. Model GIS dalam penilaian sumber pencemar Non Point Source (Sumber: Eisakhani (2009))

Dalam penelitian ini, SIG digunakan untuk mengelola data keberadaan sumber pencemar secara kuantitatif dan kualitatif dengan teknik tumpang susun (*overlay*). Sebagai contoh untuk menghitung jumlah potensi beban pencemar yang masuk ke segmen ke i, maka diperlukan *layer* batas wilayah kelurahan, batas wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS) yang masuk ke setiap segmen dan batas permukiman. Dari ketiga *layer* tersebut kemudian di *overlay* sehingga dapat diketahui data potensi dari masing-masing sumber pencemar di setiap DAS. Selain itu SIG juga digunakan untuk menyusun peta dasar wilayah penelitian, analisis dan penyusunan peta batas DAS/Sub DAS, analisis dan penentuan segmentasi sungai serta penyajian peta-peta tematik lainnya.

Banaman (1996) menggunakan perangkat lunak SIG Arcview untuk mendelineasi batas sub das dan membuat segmentasi sungai. Dalam penelitian ini batas sub das akan didelineasi secara otomatis dengan menggunakan perangkat lunak Global Mapper, sedangkan perhitungan penilaian sumber pencemar non

point source dan panjang segmentasi akan dihitung dengan perangkat lunak SIG Arcgis. Selain itu SIG akan digunakan untuk mendapatkan irisan antara batas subdas dengan batas administrasi atau kombinasi unit

analisis dari batasan sub das dan administrasi, sebagaimana disajikan dalam diagram alir proses SIG pada Gambar 3.



Gambar 1. Diagram alir proses SIG dalam perhitungan potensi beban pencemar

2.4. Pemodelan Daya Tampung Beban Pencemar

Dalam penentuan daya tampung sungai, baku mutu air yang digunakan mengacu pada Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001. Pada penelitian ini digunakan baku mutu air kelas II karena sesuai dengan ketentuan pada pasal 55 Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001, jika suatu sungai belum ditentukan baku mutu airnya, maka berlaku baku mutu air kelas II.

Pemodelan DTBP dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak QUAL2Kw. QUAL2Kw adalah model kualitas air sungai yang dimaksudkan untuk mewakili versi modern dari model QUAL2E (Brown dan Barnwell 1987). Pelletier et al. (2005) menjelaskan

bahwa model QUAL2Kw mensimulasikan perpindahan dan perubahan sejumlah komponen kualitas air seperti temperatur, BOD, COD, oksigen terlarut (DO), fitoplankton dan berbagai bentuk nutrisi fosfor dan nitrogen.

Untuk implementasi model QUAL2Kw diperlukan antara lain data debit aliran, kualitas air, kemiringan dasar saluran dan data klimatologi. Data debit dan kualitas air diperoleh dari hasil pengukuran dan pengambilan sampling air sesaat, sedangkan data klimatologi diperoleh dari data sekunder. Pengambilan sampel air dilakukan pada 5 segmen sungai. Simulasi model QUAL2Kw dilakukan dengan 2 skenario yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Skenario model QUAL2Kw

No	Skenario	Input Model				
		Kualitas Air di Headwater	Kualitas Air di Segmen 1-5	Debit Air di Headwater	Beban Pencemar Point Source	Beban Pencemar Non Point Source
1	Skenario 1	Hasil Sampling	Hasil sampling	Hasil Pengukuran	Hasil Inventarisasi	Hasil Inventarisasi
2	Skenario 2	Mutu Air Kelas 2	Mutu Air Kelas 2	Hasil Pengukuran	Hasil Inventarisasi	Trial-error

2.5. Uji Kesesuaian Model

Pengujian kesesuaian model perhitungan daya tampung beban pencemaran dilakukan dengan membandingkan antara nilai konsentrasi hasil analisa laboratorium (K) dengan konsentrasi model (Km). Data yang digunakan untuk pengujian kesesuaian model adalah pasangan data konsentrasi parameter BOD, COD dan TSS dari hasil analisa laboratorium dengan nilai konsentrasi parameter BOD, COD dan TSS dari

hasil simulasi menggunakan model QUAL2Kw. Pengujian kesesuaian model menggunakan nilai koefisien determinasi (R²) yang dirumuskan dengan persamaan (3).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(K_i - K_{mi})^2}{\sum(K_i - K_{mr})^2} \quad (3)$$

dimana K_i adalah konsentrasi hasil analisa laboratorium ke-i, K_{mi} adalah konsentrasi hasil model ke-i, dan K_{mr} adalah konsentrasi rata-rata model (modifikasi Indarto (2010)). Dari nilai koefisien determinasi (R²) dapat diperoleh nilai koefisien korelasi (r) yang merupakan

akar dari koefisien determinasi (R^2). Selain itu, pengujian kesesuaian model dilakukan dengan menghitung indikator kesalahan yaitu Root Mean Square Error (RMSE) (IOH-DPMA 1983 dalam Soewarno 1996) dengan persamaan (4).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{K - K_{mi}}{K_{mi}} \right]^2} \text{-----(4)}$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kondisi Tata Air Sungai Pesanggrahan

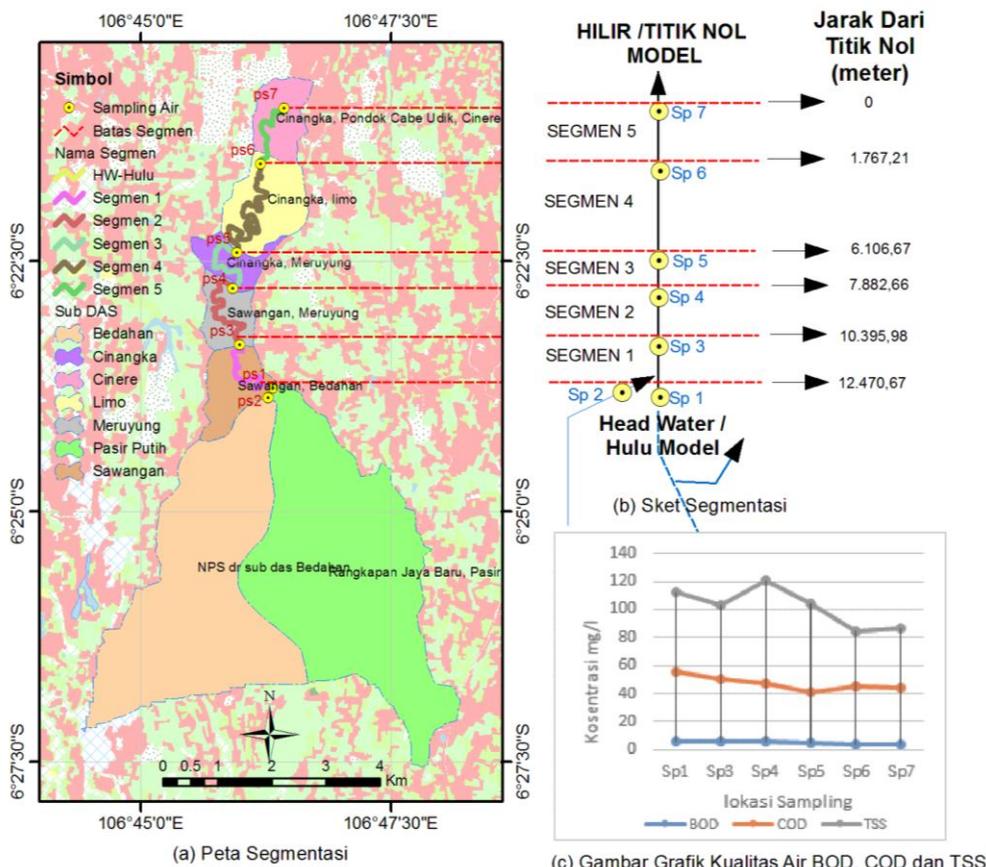
DAS Pesanggrahan yang terdapat di Kota Depok, Provinsi Jawa Barat memiliki peran sangat penting

sebagai penopang daya dukung lingkungan sekitarnya, terutama Kota Depok, Tangerang Selatan, Jakarta Selatan sampai dengan Kabupaten Tangerang. Sungai Pesanggrahan mempunyai panjang ± 73.68 km (Dinas PU 2006), dalam kajian ini segmentasi yang dianalisis mencakup panjang ± 12.4 Km, yang dari hulu ke arah hilir mencakup wilayah administrasi kabupaten Bogor, Kota Depok dan sebagian kecil Kota Tangerang Selatan. Perhitungan debit anak-anak sungai dan saluran untuk keperluan penentuan DTBP menggunakan data hasil pengukuran sesaat pada tanggal 2 November 2014 yaitu sebesar 2.2 m³/dt.

Tabel 4. Segmentasi Sungai Pesanggrahan dan lokasi sampling air

No	Uraian	Kode Sampel	Wilayah Administrasi	Jarak dari Hilir (m)
1	Head Water	HW/Sp1	Kabupaten Bogor, Kota Depok	12,401.78
2	Segmen 1	SP3	Kabupaten Bogor, Kota Depok	7,813.77
3	Segmen 2	Sp4	Kota Depok	6,037.78
4	Segmen 3	Sp5	Kota Depok	1,698.31
5	Segmen4	Sp6	Kota Depok	48.95
6	Segmen 5	Sp7	Kota Depok, Kota Tangerang Selatan	(0.00)

Sumber: Analisis SIG dan pengukuran lapangan, Oktober 2014



Gambar 4. Peta segmentasi dan zonasi sumber pencemar (Sumber: Analisis SIG dan pengukuran lapangan 2 November 2014)

3.2. Segmentasi Sungai Pesanggrahan

Dasar pertimbangan pembagian segmentasi sungai Pesanggrahan antara lain yaitu karakteristik morfologi sungai, batas DAS dan batas Administrasi, sehingga dalam penelitian ini ditetapkan 5 Segmen di sungai Pesanggrahan wilayah Kota Depok. Lokasi dan pembagian segmentasi serta hasil analisa kualitas air di tiap segmen seperti ditunjukkan pada gambar 4a, 4b dan 4c.

3.3. Potensi Beban Pencemaran

Beban pencemaran di wilayah penelitian didekati melalui perhitungan potensi beban pencemaran. Hasil perhitungan total potensi beban pencemar di wilayah penelitian memperlihatkan besaran beban pencemar BOD, COD dan TSS secara berurutan adalah 11,624.3; 14,367.2; 6,250.6 kg/hari. Wilayah Kecamatan Sawangan Kota Depok mempunyai PBP terbesar untuk BOD 7,106.6 kg/hari, COD 9,836.5 kg/hari dan TSS 3,100.4 kg/hari. Kecamatan Pamulang memberi kontribusi beban BOD 50.1 kg/hari, COD 49 kg/hari dan TSS 34.1 kg/hari. PBP dari setiap parameter menurut wilayah dan segmentasinya dapat dilihat pada Tabel 5.

Berdasarkan sumber pencemarnya maka limbah dari rumah tangga merupakan penyumbang paling besar baik untuk parameter BOD, COD maupun TSS. PBP

pencemar terbesar berasal dari Kota Depok dan masuk ke setiap segmen sungai. PBP BOD, COD dan TSS dari Kota Depok yang bersumber dari rumah tangga sebesar 5,876.3 kg/hari (BOD), 8,079.8 kg/hari (COD) dan 579,8 kg/hari (TSS), dari pertanian sebesar 2,328.5 kg/hari (BOD), 46.7 kg/hari (TSS) sedangkan dari Peternakan sebesar 2,267.5 kg/hari (BOD) dan 5,399.2 kg/hari (COD). Secara keseluruhan sumber potensi beban pencemar terbesar berasal dari kegiatan rumah tangga seperti ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 5. Potensi beban pencemar BOD, COD dan TSS menurut batas administrasi di wilayah penelitian

No	Wilayah Administrasi	Cakupan Segmen	Parameter (kg/hari)		
			BOD	COD	TSS
1.	Kabupaten Bogor	Segmen 1	1,101.9	839.2	587.3
2	Kota Depok	Head Water, Segmen 1 - 5	10,472.2	13,479.0	5,629.2
3	Kota Tangerang Selatan	Segmen 5	50.1	49.0	34.1
TOTAL (A + B + C)			11.623,2	14.367,2	6.250,6

Sumber: Analisis tahun 2015

Tabel 6. Potensi beban pencemar di wilayah penelitian berdasarkan parameter dan sumber pencemar (rumah tangga, pertanian dan peternakan)

No	Wilayah dan Lokasi Segmen	PBP Rumah Tangga (kg/hari)			PBP Pertanian ¹⁾ (kg/hari)			PBP Peternakan ²⁾ (kg/hari)		
		BOD	COD	TSS	BOD	COD	TSS	BOD	COD	TSS
1	Kab. Bogor (Segmen 1)	610.3	839.2	579.8	491.6	0	7.5	0	0	0
2	Kota Depok (Head Water, Segmen 1 - 5)	5,876.3	8,079.8	5,582.4	2,328.5	0	46.7	2,267.5	5,399.2	0
3	Kota Tangerang Selatan (Segmen 5)	35.6	49.0	33.8	14.5	-	0.3	-	-	-
Total		6,522.2	8,968.0	6,196.1	2,834.6	-	54.5	2,267.5	5,399.2	-

1) PBP parameter COD dari pertanian tidak dihitung

2) PBP parameter TSS dari peternakan tidak dihitung

Menurut Benaman dalam Eishakani (2009) memperkirakan rata-rata konsentrasi polutan menurut tipe penggunaan lahannya, dimana permukiman mempunyai rata-rata konsentrasi tertinggi dibandingkan tipe penggunaan lahan lainnya seperti yang disajikan pada Tabel 7.

Lokasi sumber pencemar ditelusuri dengan menggunakan pendekatan Sub Daerah Aliran Sungai yang bermuara segmen-segmen 1, 2, 3, 4 dan segmen 5 di sungai Pesanggrahan seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

3.4. Kualitas Air Pesanggrahan

Sungai merupakan badan air utama yang digunakan untuk kegiatan domestik, industri, pertanian dan sering membawa limbah perkotaan, air limbah industri dan limpasan musiman dari lahan pertanian (Mustapa *et al.* 2004). Kualitas air sungai adalah gabungan dari beberapa senyawa yang saling terkait, yang mengalami

variasi dari kondisi lokal, temporal dan juga dipengaruhi oleh volume aliran air (Mandal *et al.* 2010).

Untuk analisa kualitas air Sungai Pesanggrahan, baku mutu air yang digunakan adalah mutu air kelas II karena belum ditetapkan kelasnya. Hal ini sesuai dgn Peraturan Pemerintah No. 82 Tahun 2001 Tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air. Kondisi kualitas air dari arah hulu ke hilir yang diwakili oleh parameter BOD, COD dan TSS mempunyai nilai konsentrasi yang berfluktuasi dan cenderung menurun nilainya.

Untuk parameter BOD dan COD terjadi kenaikan pada segmen 5 sedangkan untuk parameter TSS terjadi kenaikan pada segmen 2 dan segmen 5. Kenaikan ini kemungkinan disebabkan keberadaan pemukiman penduduk dengan kepadatan yang tinggi sebagai sumber pencemar TSS pada segmen Sub DAS Cinangka dan Sub DAS Cinere. Murijal (2012) menyatakan bahwa berdasarkan indeks biotik, kondisi perairan

sungai pesanggrahan dari hulu sampai dengan hilir masuk ke dalam tingkat pencemaran sedang sampai tingkat pencemaran berat.

Tabel 7. Perkiraan konsentrasi BOD dalam air limpasan di tiap penggunaan lahan

Tipe penggunaan lahan	Konsentrasi BOD (mg/l)
Perkotaan dengan kepadatan tinggi	9
Permukiman	15
Pertanian	5
Tanah Kosong	6
Hutan	6
Wetlands	6
Tubuh Air	0
Lahan Tandus	13

Sumber: Eishakhani (2009) dengan modifikasi

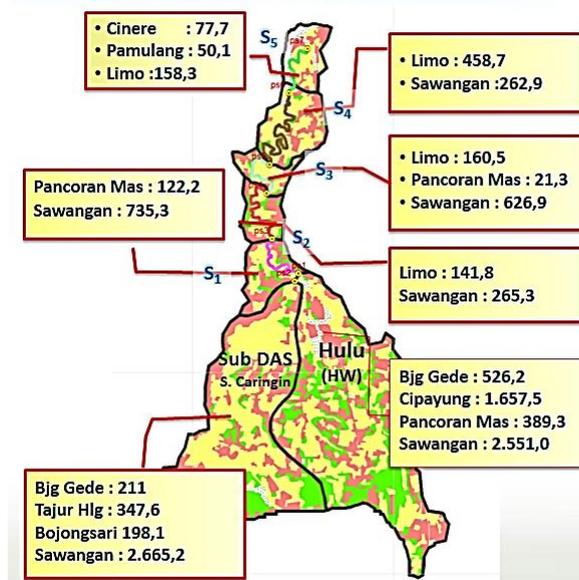
3.5. Daya Tampung Beban Pencemaran

a. Parameter BOD

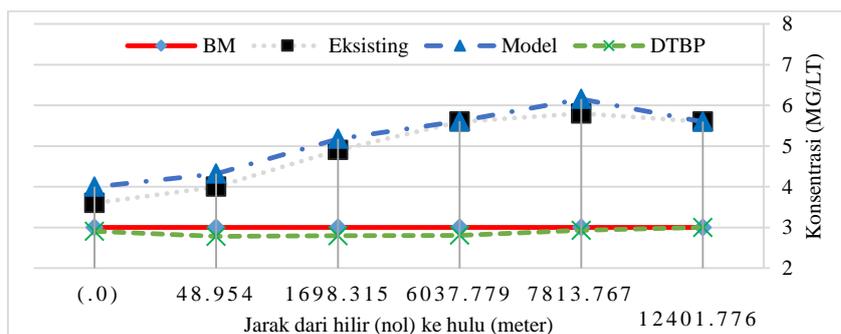
Berdasarkan Gambar 6 grafik kualitas air hasil observasi menunjukkan bahwa konsentrasi BOD berfluktuasi dan cenderung menurun dari hulu ke hilir.

Hasil simulasi model QUAL2Kw dengan menggunakan skenario II untuk parameter BOD menunjukkan bahwa di seluruh segmen, konsentrasi BOD telah melewati kelas II (Gambar 4). Hal ini dapat diartikan bahwa Sungai Pesanggrahan sudah tidak memiliki daya tampung beban pencemaran (DTBP) air untuk parameter BOD. Total beban pencemaran air eksisting untuk parameter BOD yang masuk ke Sungai Pesanggrahan 8,257.6 kg per hari. Beban terbesar disumbang dari wilayah hulu sungai yang mencakup 8,103.2 atau 98.1 % dari seluruh beban pencemar.

Konsentrasi BOD hasil sampling menunjukkan beban pencemar eksisting masih lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi BOD yang diinginkan seperti diperlihatkan pada Gambar 6. Konsentrasi BOD yang diperbolehkan tersebut diperoleh dari simulasi menggunakan skenario 2. Beban pencemaran BOD total yang diperbolehkan masuk ke seluruh segmen Sungai Pesanggrahan 8,111.1 kg/hari. Bila dibandingkan dengan beban riil yang masuk, maka terdapat selisih sebesar 146.5 kg/hari atau rata-rata setiap segmen harus menurunkan beban pencemar sebesar 16.6 % agar memenuhi DTBP. Profil BOD sesuai dengan DTBP ini dapat diperoleh dengan menggunakan skenario yaitu BOD di hulu disesuaikan dengan mutu air kelas II.



Gambar 5. Peta Potensi Beban Pencemar (PBP) berdasarkan lokasi sumber dan kontribusinya ke setiap segmen di Sungai Pesanggrahan



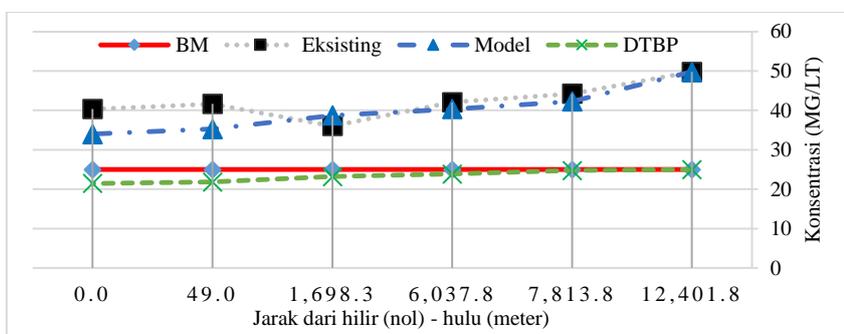
Gambar 6. Grafik kualitas air eksisting, model, DTBP dan baku mutu BOD

b. Parameter COD

Konsentrasi COD di hulu sudah melewati kelas II, namun demikian mulai segmen 1 sampai dengan segmen terakhir mengalami penurunan konsentrasi (Gambar 7). Beban pencemaran air eksisting total untuk parameter COD yang masuk ke Sungai Pesanggrahan 59,930.00 Kg/hari. Sumber pencemar dari hulu segmen 1 lebih besar dibandingkan dengan segmen-segmen dibawahnya. Sumber pencemar ini masuk melalui Sungai Caringin yang bermuara ke Sungai Pesanggrahan. Segmen 1 memberikan kontribusi terbesar mencakup 58,453.19 Kg/hari atau 97.5% dari seluruh beban pencemar.

DTBP diperoleh dengan simulasi skenario 2 yaitu COD di hulu memenuhi mutu air kelas 2 (25 mg/l), disamping menurunkan beban pencemar di anak sungai dan yang langsung masuk ke Sungai Pesanggrahan (Gambar 7). Beban pencemaran COD total yang diperbolehkan masuk ke seluruh segmen Sungai

Pesanggrahan 58,280.7 kg/hari. Bila dibandingkan dengan beban riil yang masuk, maka terdapat selisih sebesar 1,650 kg/hari. Analisis pemodelan menunjukkan sungai sudah tidak memiliki DTBP untuk parameter BOD dan COD. Secara umum sumber pencemar masuk ke Sungai Pesanggrahan melalui anak sungai dan saluran terbuka dan atau langsung melalui runoff. Tingginya konsentrasi parameter kualitas air tersebut kemungkinan disebabkan oleh banyaknya aktifitas masyarakat yang membuang air limbah di sempadan anak sungai. Adanya riam (karangteristik hidrolis) di beberapa titik di bagian hulu mengakibatkan reaerasi relatif cepat sehingga mendukung kemampuan sungai untuk memurnikan sendiri, namun dibagian hilir kemiringan hidrolis sungai Pesanggrahan yang kecil dan melandai menyebabkan terakumulasinya polutan yang masuk dan reaerasi berkurang, sehingga kemampuan sungai untuk memurnikan sendiri (*self purification*) juga menurun dan akhirnya menyebabkan konsentrasi bahan pencemar di kolom air tinggi.



Gambar 7. Grafik kualitas air eksisting, model, DTBP dan baku mutu COD

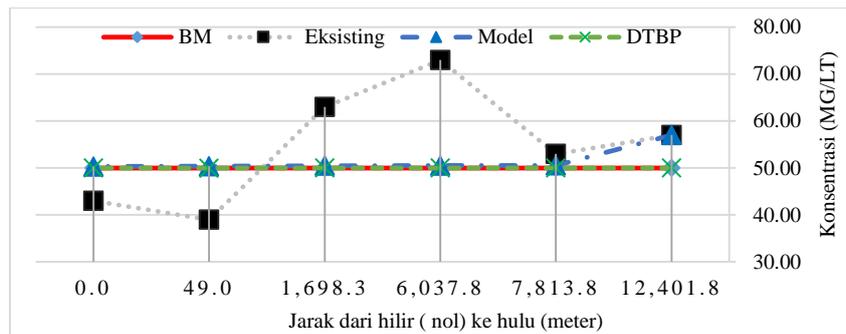
c. Parameter TSS

Konsentrasi TSS di hulu sebesar 57.0 mg/l, berarti melebihi baku mutu air kelas II. Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa mulai segmen 1 sampai dengan segmen 5 berfluktuasi cenderung menurun, untuk TSS ini dapat dikatakan bahwa Sungai Pesanggrahan di segmen 1, segmen 2, segmen 3 sudah tidak memiliki daya tampung beban pencemaran (DTBP) air untuk parameter TSS (kelas II). Total beban pencemaran untuk parameter TSS adalah sebesar 49,444.9 kg/hari. Sumber pencemar dari hulu segmen 1 lebih besar dibandingkan segmen yang lainnya. Sumber pencemar ini masuk melalui Sungai Caringin yang bermuara ke Sungai Pesanggrahan. Segmen 1 memberikan kontribusi terbesar mencakup 95.8 % dari seluruh beban pencemar. Konsentrasi TSS menurut DTBP diperoleh dengan simulasi skenario 2 yaitu TSS di hulu memenuhi mutu air kelas 1 (50 mg/l) dan penurunan beban pencemar di anak sungai maupun yang langsung masuk ke Sungai Pesanggrahan. Total beban pencemaran TSS yang diperbolehkan masuk ke seluruh segmen Sungai Pesanggrahan 3.888,00 kg/hari. Dibandingkan dengan beban riil yang masuk, maka terdapat selisih 3,233.71 kg/hari yang berarti perlu

diturunkan beban pencemar di setiap segmen rata-rata sebesar 33.0 % agar kualitas air Sungai Pesanggrahan memenuhi kelas yang ditetapkan untuk parameter TSS.

3.6. Daya Tampung Beban Pencemaran

Model perhitungan daya tampung dengan QUAL2Kw diuji dengan mencari nilai R² dan RMSE. Koefisien determinasi (R²) hasil pengujian terhadap kualitas air hasil pemodelan dengan eksisting pada parameter BOD, COD dan TSS adalah sebesar 0.99 untuk BOD dan COD serta 0.998 untuk TSS. Nilai tersebut menunjukkan bahwa keeratn hubungan antara nilai konsentrasi BOD, COD dan TSS hasil pemodelan adalah kuat dan perbedaan nilainya sangat kecil. Nilai Konsentrasi BOD, COD dan TSS hasil model memiliki tingkat kesalahan kurang dari 10% ditunjukan oleh nilai RMSE sebesar 0.065 untuk BOD, 0.09 untuk COD dan 0.20 untuk TSS. Hasil uji menunjukkan bahwa model kualitas air hasil model cukup teliti untuk memprediksi kualitas air parameter BOD dan COD di Sungai Pesanggrahan, namun dari hasil penelitian ini model kualitas air tidak cukup teliti untuk memprediksi parameter TSS dari kualitas air di Sungai Pesanggrahan.



Gambar 8. Grafik kualitas air eksisting, model, DTBP dan baku mutu TSS

4. Kesimpulan

Secara spasial dapat ditelusuri sumber pencemar yang masuk ke Sungai Pesanggrahan adalah melalui anak sungai dan saluran terbuka dan atau langsung melalui runoff. Potensi beban pencemar di wilayah penelitian bersumber dari limbah rumah tangga, pertanian dan peternakan. Kontribusi beban pencemar terbesar berasal dari limbah rumah tangga.

Total beban pencemar di sungai Pesanggrahan sudah melampaui DTBP sehingga perlu penurunan beban pencemar agar kualitas air sungai memenuhi baku mutu kelas II. Total beban pencemar di wilayah penelitian adalah 8.257 Kg/Hr untuk parameter BOD, 59.930 Kg/Hr untuk COD dan 48.975 Kg/Hr untuk TSS. Total daya tampung beban pencemar adalah 8.111 Kg/Hr untuk parameter BOD, 58.280 Kg/hari untuk COD dan 49.085 Kg/Hari untuk TSS. Total penurunan beban yang harus dilakukan agar kualitas air sungai pesanggrahan memenuhi Baku Mutu Air Sungai Kelas II adalah sebesar 146 kg/Hari untuk BOD, 1.650 kg/Hari untuk COD dan 110 Kg/Hari untuk TSS.

Sistem Informasi Geografi (SIG) dapat digunakan untuk penelusuran sumber-sumber pencemar dan model "QUAL2Kw" cukup teliti untuk memprediksi kualitas air di Sungai Pesanggrahan. Nilai Konsentrasi BOD, COD dan TSS hasil model memiliki tingkat kesalahan kurang dari 10 % ditunjukkan oleh nilai RMSE sebesar 0,052 untuk BOD, 0,029 untuk COD dan 0.049 untuk TSS. Nilai kesalahan tersebut menunjukkan bahwa model kualitas air hasil model cukup teliti untuk memprediksi kualitas air di sungai Pesanggrahan.

Daftar Pustaka

[1] Abdi, Z., 2011. Kajian daya tampung beban pencemaran Sungai Batanghari. Tesis. Program Studi Geografi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

[2] Agustiniingsih, A., S. B. Sasongko, Sudarno, 2012. Analisis kualitas air dan strategi pengendalian pencemaran air Sungai Blukar Kabupaten Kendal. Jurnal Presipitasi 9(2), ISSN 1907-187X.

[3] Andersen, J., B. Kjaergard, H. Schroll, 2012. Carrying capacity: an approach to local spatial planning in Indonesia. The Journal of Transdisciplinary Environmental Studies 11(1).

[4] Asdak, C., 2002. Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai. Edisi Revisi. Gajah Mada University Press, Yogyakarta.

[5] Asdak, C., 2010. Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai. Edisi Revisi. Gajah Mada University Press, Yogyakarta.

[6] Baherem, 2014. Strategi pengelolaan sungai berdasarkan daya tampung beban pencemaran dan kapasitas asimilasi, studi kasus: Sungai Cibanten Provinsi Banten. Tesis. Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor, Bogor.

[7] Borrough, P. A., R. A. McDonnell, 1998. Principles of Geographical Information Systems. Osford University Press.

[8] [BPS] Badan Pusat Statistik, 2012. Proyeksi Penduduk Indonesia 2010 -2035. BPS, Jakarta.

[9] Brown, L., C. Barnwell, 1987. The Enhanced Stream Water Quality Models Qual2E and Qual2E-UNCAS. Documentation and User Manual. U.S. Environmental Protection Agency. [http:www.epa.gov].

[10] Davis, M. L., D. A. Cornwell, 1991. Introduction to Environmental Engineering. Second edition. Mc-Graw-Hill, Inc., New York.

[11] Dinas PU DKI, 2006. Laporan Studi. [Tidak dipublikasi]. Dinas Pekerjaan Umum DKI, Jakarta.

[12] Effendi, H., 2003. Telaah Kualitas Air Bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan. Kanisius, Jakarta.

[13] Eko, I. W., S. Anong, 1996. Karakteristik beban pencemaran limbah penduduk di Bandung dan Yogyakarta. Bulletin Pus Air, Media Kegiatan Penelitian Keairan 5(21), pp. 15-35.

[14] Eiskhani, M., A. Pauzi, O. Karim, A. Malakahmad, M. S. Kutty, M. H. Isa, 2009. GIS based non pointsource of pollution simulation in Cameron Highlands, Malaysia. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Geophysical Engineering 3(3).

[15] Fadly, N. A., 2008. Daya tampung dan daya dukung Sungai Ciliwung serta strategi pengelolaannya. Tesis. Program Studi Teknik Sipil, Program Pascasarjana Bidang Ilmu Teknik, Universitas Indonesia, Depok.

[16] Hadi, A., 2005. Prinsip Pengelolaan Pengambilan Sampel Lingkungan. Gramedia, Jakarta.

[17] Hariyadi, S., 2004. BOD dan COD sebagai parameter pencemaran air dan baku mutu air limbah. Makalah Pengantar Falsafah Sains. Sekolah Pascasarjana. Institut Pertanian Bogor, Bogor .

[18] Harris, F., 2006. Global Environmental Issues, ISBNs; 0-470-84560-0 (HB);0-470-84561-9 (PB). John Wiley & Sons, Ltd.

[19] Indarto, 2010. Hidrologi: Dasar Teori dan Contoh Aplikasi Model Hidrologi. PT. Bumi Aksara, Jakarta.

[20] Iskandar, 2007. Panduan Pelatihan Pengelolaan Kualitas Air. Puslitbang Sumberdaya Air Kementerian Pekerjaan Umum, Jakarta.

[21] Kannel, P. R., S. Lee, Y. S. Lee, S. R. Kanel, G. J. Pelletier, 2007. Application of automated QUAL2Kw for water quality modelling and management in the Bagmati River, Nepal. Ecological Modelling 202. Elsevier. pp.503-517.

- [22] [KLH-RI] Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia, 2003. Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 110 Tahun 2003 Tentang Pedoman Penetapan Daya Tampung Beban Pencemaran Pada Sumber Air. KLH RI, Jakarta.
- [23] [KLH-RI] Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia, 2013. Kajian Daya Tampung Beban Pencemaran Sungai Barito. Laporan Kegiatan Pusat Pengelolaan Ekoregion Kalimantan.
- [24] [KLH-RI] Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia, 2013. Penghitungan Beban Pencemaran Lingkungan Hidup Sungai Ciliwung. Laporan Kegiatan. Kementerian Negara Lingkungan Hidup, Jakarta.
- [25] Kurniawan, B., 2013. Kajian daya tampung beban pencemar air untuk penataan ruang. Buletin Tata Ruang, Kementerian Pekerjaan Umum Edisi Mei-Juni 2013.
- [26] Lin, C., T. Huang, D. Shaw, 2009. Applying water quality modeling to regulating land development in a watershed (a case study on the Kao-Ping Watershed, Taiwan). *Water Resource Manage* 24, pp. 629-640. doi: 10.1007/s11269-009-9462-x.
- [27] Mandal, P., Upadhyay, R., Hasa, A. 2010. Seasonal and spatial variation of Yamuna River water quality in Delhi, India. *Environ Monit Assess* 170 (1):661-670. doi:10.1007/s10661-009-1265-2.
- [28] Manurung, J., 2014. Kajian beban pencemaran dan daya tampung beban pencemaran sungai Ciliwung Hulu Segmen Kabupaten Bogor. Skripsi. Departemen Konservasi Sumberdaya Hutan dan Ekowisata Fakultas Kehutanan Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- [29] Murijal, A., 2012. Penilaian kualitas Sungai Pesanggrahan dari bagian hulu (Bogor, Jawa Barat) hingga bagian hilir (Kembangan, DKI Jakarta) berdasarkan indeks biotik. Skripsi. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Departemen Biologi. Universitas Indonesia, Depok.
- [30] Mustapha, A., A. Z. Aris, H. Juahir, M. F. Ramli, N. Kura, 2013. River water quality Assessment using envirometric technique: case study of Jakarta River Basin. *Environ Sci Pollut Res*. Doi:10.1007/s11356-013-1542-z.
- [31] Pelletier, G., Chapra, Hua-Tao, 2005. Qual2Kw: a framework for modeling water quality in stream and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Env. Mod. & Soft. J.* 21, pp. 419-425.
- [32] Raju, P. L. N., 2006. Fundamentals of Geographical Information System. [<http://www.wamis.org/agm/pubs/agm8/paper-6>].
- [33] Soewarno, 1996. Model Penguapan pada Pos Iklim di Pulau Jawa. *Majalah Geografi Indonesia* No. 18, pp. 15-35.