
MODEL DINAMIK PENGENDALIAN PENCEMARAN AIR KALI SURABAYA

Suwari^{1)*}, ETTY RIANI^{2)**}, Bambang Pramudya²⁾, dan Ita Djuwita²⁾

¹⁾Fakultas Sain dan Teknik Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto Penfui Kupang

²⁾Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor, Jl Raya Dramaga Kampus IPB-Bogor

Email: *suwari_chem68@yahoo.com, **etty_riani_harsono@yahoo.com

Abstract

The Surabaya River plays an important role as water supply of the Surabaya PDAM, irrigation, industry, transportation, and means of recreation. However, domestic, industrial, and agricultural waste that were discharged into the river stream polluted the Surabaya River and decreased the carrying capacity and assimilative capacity. Therefore, effort to monitor and control the Surabaya River water pollution need to be well organized and implemented. The aim of the research is to develop a model of water pollution control on Surabaya River region. The research was carried out based on field survey, in situ and laboratory sample examination, questionnaire, and expert judgment. Pollution control model developed in this study was built into three sub-models, namely: (1) ecology sub-model, (2) social sub-model, and (3) economy sub-model using powersim constructor 2.5 version. Pollution control scenarios were developed using prospective analysis. The results of water pollution parameters such as TSS, DO, BOD, COD, N-NO_x, and the level of mercury (Hg) were higher than the allowable class 1 standard. The sources of Surabaya River pollution mainly are domestic and industrial waste with total load of BOD, COD, and TSS are 55.49, 132.58, and 210.13 ton/day, respectively. According to water quality status, the Surabaya River is categorized as heavy polluted and the loading pollution need to be decreased. By using prospective analysis, there were five important factors that affect the future of the Surabaya River water pollution control, i.e.: (1) population growth and community awareness, (2) community perception, (3) implementation of regulations, (4) commitment/local government support, and (5) system and institutional capacity. There are three development scenarios, that are: pessimistic, moderate and optimistic. The moderate and optimistic scenario are the realistic scenarios that occur in the future for Surabaya River water pollution control in considering of ecology, social and economy aspects.

Keywords: *dynamic model, pollution control, prospective analysis, Surabaya River*

1. Pendahuluan

Pencemaran air telah menjadi permasalahan krusial di banyak negara dan mendapat perhatian peneliti di seluruh dunia (Huang and Morimoto, 2002). Kelangkaan dan kesulitan mendapatkan air bersih dan layak pakai menjadi permasalahan yang mulai muncul di banyak tempat dan semakin menggejala dari tahun ke tahun, tak terkecuali di Indonesia. Wilayah Indonesia memiliki 6% dari persediaan air dunia atau sekitar 21% persediaan air Asia Pasifik (KLH, 2005), namun kecenderungan konsumsi air naik secara eksponensial, sementara ketersediaan air bersih terus berkurang dengan cepat akibat kerusakan alam dan pencemaran yang diperkirakan sebesar 15–35% per kapita per tahun (KLH, 2009). Kondisi ini diperparah dengan

terbatasnya kemampuan mengakses dan memprediksi ketersediaan air, kualitas air, serta penggunaan dan keseimbangan air (Simonovic, 2002).

Kali Surabaya termasuk dalam sungai strategis Nasional. Pencemaran Kali Surabaya menjadi salah satu contoh kasus permasalahan pencemaran air yang mendapat perhatian banyak pihak dan telah menjadi isu nasional, karena kualitas air Kali Surabaya mempunyai multifungsi yang sangat vital dalam menunjang pembangunan daerah yaitu sebagai : sumber baku air minum, industri, pertanian, dan sarana rekreasi. Sementara itu kualitasnya cenderung mengalami penurunan (Masduqi, 2006). Beberapa studi tentang pencemaran Kali Surabaya telah dilaporkan. Hasil studi Purwatiningsih (2005) yang

dilakukan di sepanjang Kali Surabaya menunjukkan bahwa tingkat BOD dan DO di daerah studi tidak memenuhi baku mutu, kualitas struktur sungai 62,5% termasuk kategori sedang dan 37,5% termasuk kategori buruk. Sementara hasil riset Koemantoro (2007) menunjukkan bahwa beban pencemar BOD di titik lokasi *intake* PDAM Karang Pilang Surabaya mencapai 10,45 mg/L, jauh melebihi batas standar peruntukkan badan air kelas 1 yaitu 2 mg/L. Hasil pantauan Perum Jasa Tirta I (2007) nilai COD 41,5 mg/l dan BOD 15,0 mg/l. Hasil riset *Ecoton* dan *National Institute Minamata Disease* menunjukkan badan air, lumpur, kerang, ikan dan ekosistem Kali Surabaya telah terkontaminasi merkuri, timbal, kadmium, tembaga dan besi dengan kadar yang telah melebihi ambang batas (Arisandi, 2004). Kondisi ini jika tidak segera diambil tindakan pengendalian akan menimbulkan dampak ekologis, ekonomis dan sosial budaya, seperti kerusakan keseimbangan ekologi di aliran sungai, bertambahnya biaya pengolahan air oleh Perusahaan Air Minum, menurunnya nilai estetika, dan risiko kesehatan penduduk.

Pencemaran air sungai bersifat kompleks, dinamik, dan probabilistik karena unsur-unsur di dalamnya mengalami gejala tanspor dan transporasi, dan input yang masuk ke dalam sungai bervariasi terhadap waktu baik kualitas maupun kuantitasnya (Qin *et al.*, 2007; Maharani *et al.*, 2008). Variabel-variabel dalam sistem dinamik mencakup variabel *level*, variabel *rate*, dan variabel *auxiliary* (Zhang *et al.*, 2009). Model pendekatan klasik terbukti tidak mampu memprediksi ketersediaan dan penggunaan sumberdaya air yang sangat penting bagi perencanaan dan pengelolaan secara berkelanjutan akibat dinamika spasial (Nandalal and Semasinghe, 2006). Kompleksnya permasalahan dan banyaknya variabel yang berpengaruh dalam suatu sistem dapat digambarkan secara sederhana dan sistematis melalui sebuah model yang mencerminkan hubungan antara variabel-variabel yang berpengaruh dalam sistem tersebut. Karenanya, perlu dilakukan penelitian tentang pencemaran air

yang terjadi di Kali Surabaya menggunakan pendekatan sistem dinamik dengan melibatkan berbagai faktor yang berpengaruh, sehingga diharapkan dapat menghasilkan suatu model pencemaran air dan strategi pengendalian pencemaran secara holistik.

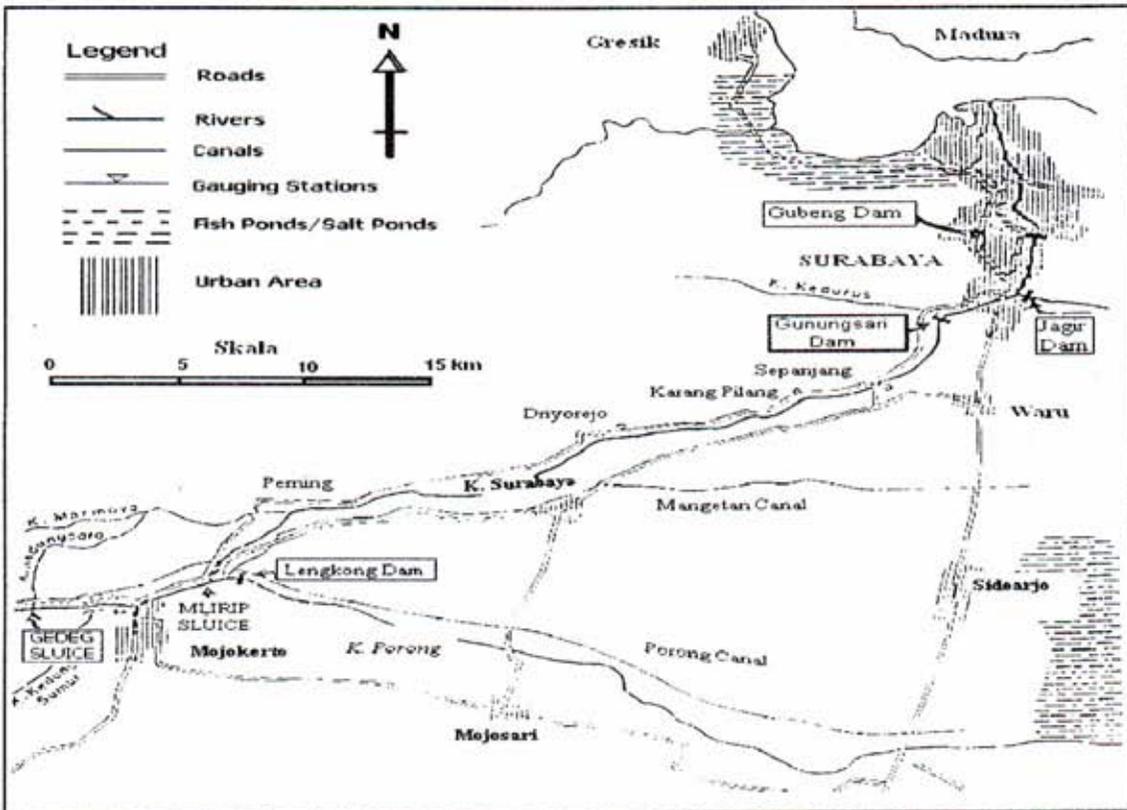
Tujuan utama penelitian yaitu membangun model dinamik pengendalian pencemaran air Kali Surabaya dalam rangka pengelolaan dan pemanfaatan Kali Surabaya secara berkelanjutan.

2. Metodologi

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di wilayah Kali Surabaya yang menerima beban limbah domestik, industri, dan pertanian. Pemilihan Kali Surabaya sebagai objek penelitian didasarkan atas : (1) permasalahan pencemaran air Kali Surabaya telah menjadi isu daerah Jawa Timur bahkan isu nasional yang melibatkan *multistakeholder*; (2) Kali Surabaya dimanfaatkan sebagai sumber air minum PDAM kota Surabaya sementara tingkat pencemaran terus meningkat; (3) aktivitas industri di bantaran Kali Surabaya terus meningkat disertai dengan peningkatan beban pencemaran akibat limbah industri yang dihasilkan; (4) tanpa tindakan pengendalian pencemaran Kali Surabaya berisiko terhadap kesehatan masyarakat. Peta lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

Penentuan stasiun/lokasi pengambilan contoh air sungai dilakukan secara *purposive sampling* yang dibedakan berdasarkan jarak dari Dam Jagir dan pertimbangan bahwa lokasi tersebut merupakan kawasan industri dan kawasan padat pemukiman. Enam lokasi pengambilan contoh yang dipilih yaitu : (1) Dam Gunungsari (2,60 km); (2) Jembatan Sepanjang (6,50 km); (3) Karangpilang (8,25 km); (4) Tambangan Bambe (12,00 km); (5) Tambangan Cangkir (15,60 km); dan (6) Jembatan Jrebeng (24,10 km).



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

2.2 Bahan dan Alat

Bahan kimia yang digunakan dalam penelitian ini meliputi NaOH, H₂SO₄, Na₂SO₃, NH₄Cl, buffer borat, H₃BO₃, natrium fenolat, NaClO, K₂Cr₂O₇, HgSO₄, Ag₂SO₄, indikator ferroin, Fe(NH₄)₂(SO₄)₂·6H₂O, asam sulfamat, MnCl₂, KI, Na₂S₂O₃, pereaksi Nessler, brusin, NaCl, NaNO₃, NaNO₂, akuades, sulfanilamid, N-(1-naftil)-etilendiamin dihidroklorida, amonium molibdat, SnCl₂, standar fosfat, fenolptalein, Hg(NO₃)₂, Pb(NO₃)₂, dan Cd(NO₃)₂. Peralatan yang digunakan dalam penelitian terdiri atas : seperangkat peralatan gelas untuk analisis kimia air, van dorn water sampler, coolbox, termometer, pHmeter, konduktometer, questioner, spektrofotometer, atomic absorption spectrometry (AAS), dan software powersim.

2.3 Metode Pengumpulan Data

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu analisis deskriptif kuantitatif dengan menggunakan data primer dan data sekunder. Data

primer yang digunakan mencakup data: parameter fisik-kimia air, kualitas air limbah (BOD, COD, TSS), sosial ekonomi, persentase penduduk pembuang limbah, dan persepsi dan partisipasi masyarakat, sedangkan data sekunder yang dikumpulkan yaitu debit air sungai, debit dan kualitas limbah, jumlah penduduk, dan data BOD dan COD per kapita. Pengumpulan data primer dilakukan melalui wawancara, kuesioner, survei lapangan serta pengukuran langsung dan di laboratorium. Wawancara pakar dilakukan untuk mengidentifikasi elemen kunci dalam analisis prospektif. Studi kasus dan literatur digunakan untuk memperoleh data sekunder dari instansi terkait atau literatur terutama hasil-hasil penelitian dengan kasus yang serupa.

2.4 Metode Analisis Data

Analisis parameter fisika dan kimia air mengacu pada metode APHA (1998). Parameter kualitas air yang dianalisis, metode, peralatan, dan tempat analisis disajikan dalam Tabel 1. Hasil analisis kualitas air

Tabel 1. Parameter Kualitas Air Dan Metode Analisis Serta Alat yang Digunakan

Parameter	Satuan	Metode Analisis	Peralatan	Tempat Analisis
I. Fisika				
1. suhu	°C	Pemuaian	Termometer	In situ
2. Konduktivitas	μ mho	Konduktometri	Konduktometer	In situ
3. TSS	mg/l	Gravimetri	Neraca Analitik	Laboratorium
II. Kimia				
1. pH	-	Potensiometri	pHmeter	In situ
2. DO	mg/l	Titration Winkler	Peralatan titrasi	Laboratorium
3. COD	mg/l	Titrimetri	Peralatan titrasi	Laboratorium
4. BOD	mg/l	Titrimetri	Peralatan titrasi	Laboratorium
5. NH ₃ (Amonia)	mg/l	Spektrofotometri	Spektrofotometer	Laboratorium
6. N-Nitrat	mg/l	Spektrofotometri	Spektrofotometer	Laboratorium
7. N-Nitrit	mg/l	Spektrofotometri	Spektrofotometer	Laboratorium
8. Fosfat	mg/l	Spektrofotometri	Spektrofotometer	Laboratorium
9. Kadar Hg	mg/l	Spektrometri	AAS	Laboratorium
10. Kadar Pb	mg/l	Spektrometri	AAS	Laboratorium
11. Kadar Cd	mg/l	Spektrometri	AAS	Laboratorium

Tabel 2. Analisis Kebutuhan Pada Sistem Pengendalian Pencemaran Air Kali Surabaya

No.	Pelaku	Kebutuhan
1.	PDAM Kota Surabaya (Pengelola air minum)	<ul style="list-style-type: none"> ◊ Pengendalian yang tepat sasaran dan berkelanjutan; ◊ Kualitas air Kali Surabaya memenuhi baku mutu air kelas 1; ◊ Harga dan pasokan air baku dari Kali Surabaya stabil; ◊ Peningkatan pendapatan perusahaan dari jasa air.
2.	Perum Jasa Tirta I (eksploitasi, pemeliharaan pengairan dan pengelolaan DAS)	<ul style="list-style-type: none"> ◊ Pengendalian yang melibatkan partisipasi masyarakat dan industri; ◊ Peningkatan partisipasi masyarakat dalam pembiayaan pengelolaan sungai; ◊ Kualitas air Kali Surabaya memenuhi baku mutu air kelas 1; ◊ Peningkatan pendapatan perusahaan dari jasa air.
3.	Badan Lingkungan Hidup Daerah (BLHD)	<ul style="list-style-type: none"> ◊ Setiap perusahaan memiliki IPLC dan mengoperasikan instalasi pengolahan air limbah (IPAL); ◊ Pengendalian yang melibatkan partisipasi masyarakat, bantuan dana dan kerjasama antar lembaga; ◊ Lingkungan perairan Kali Surabaya bersih dari limbah industri dan limbah domestik.
4.	Dinas PU Pengairan Jatim	<ul style="list-style-type: none"> ◊ Kualitas air Kali Surabaya memenuhi baku mutu air kelas 1; ◊ Setiap perusahaan memiliki IPLC dan mengoperasikan instalasi pengolahan air limbah (IPAL); ◊ Bantaran Kali Surabaya bebas dari pemukiman penduduk; ◊ Lingkungan perairan kali surabaya bersih dari limbah industri dan limbah domestik.
5.	Dinas Pariwisata	<ul style="list-style-type: none"> ◊ Kualitas air kali surabaya memenuhi baku mutu air kelas 1; ◊ Setiap perusahaan memiliki dan mengoperasikan instalasi pengolahan air limbah (IPAL); ◊ Partisipasi aktif semua pihak untuk menjaga kebersihan dan keindahan sungai dan ekosistem di sekitarnya; ◊ Peningkatan Pendapatan Asli Daerah; ◊ Lingkungan perairan Kali Surabaya bersih dan indah.

6. Industri	<ul style="list-style-type: none">◊ Kewajiban pengelolaan lingkungan dipermudah dan tidak berbelit-belit;◊ Biaya pengelolaan lingkungan rendah;◊ Teknologi pengolah limbah yang efektif dan efisien;◊ Pendapatan meningkat;◊ Kondisi lingkungan masyarakat kondusif.
7. Masyarakat	<ul style="list-style-type: none">◊ Kualitas kehidupan masyarakat luas tidak terganggu oleh dampak negatif pencemaran lingkungan;◊ Lingkungan perairan Kali Surabaya bersih dari limbah industri dan limbah domestik;◊ Pendapatan meningkat;◊ Penerapan <i>Corporate Social Responsibility</i> (CSR).

dibandingkan dengan Baku Mutu Perairan sesuai Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001. Status mutu air Kali Surabaya ditentukan dengan metode Storet. Analisis beban pencemaran dilakukan melalui pendekatan *Rapid Assessment* (WHO 1993) dan faktor konversi (emisi) yang diperoleh dari pustaka.

2.5 Desain Model Dinamik Pengendalian Pencemaran Air

Desain model dinamik pengendalian pencemaran air Kali Surabaya dilakukan dengan pendekatan sistem, yaitu suatu metode pemecahan masalah yang diawali dengan identifikasi kebutuhan yang menghasilkan suatu sistem operasional yang efisien. Model pengendalian pencemaran yang dibangun didasarkan pada beban limbah dan karakteristik pencemaran di Kali Surabaya, terutama karakteristik efluen dan kimia pencemar dan faktor-faktor yang berpengaruh dalam pencapaian tujuan.

Analisis sistem pengendalian pencemaran air Kali Surabaya melibatkan beberapa pelaku yang terlibat dalam sistem tersebut. Kunci kesuksesan dari sebuah sistem adalah jika semua pelaku yang terlibat dalam sistem dapat memperoleh manfaat dari sistem yang dibangun. Kebutuhan pelaku sistem pengendalian pencemaran Kali Surabaya ditunjukkan pada Tabel 2.

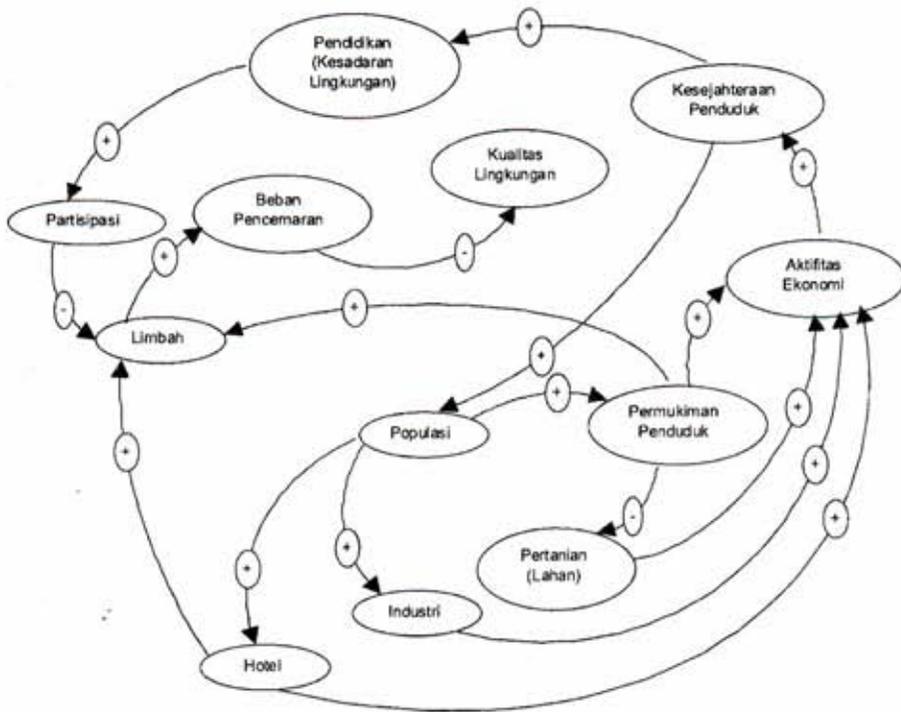
Identifikasi sistem dilakukan untuk memberikan gambaran terhadap komponen-komponen yang terlibat di dalam sistem yang dikaji dalam bentuk diagram lingkaran sebab akibat (*causal loop*) dan diagram *input output*. Diagram sebab akibat sistem pengendalian pencemaran air Kali Surabaya, ditunjukkan pada Gambar 2.

Peningkatan pencemaran air Kali Surabaya akan

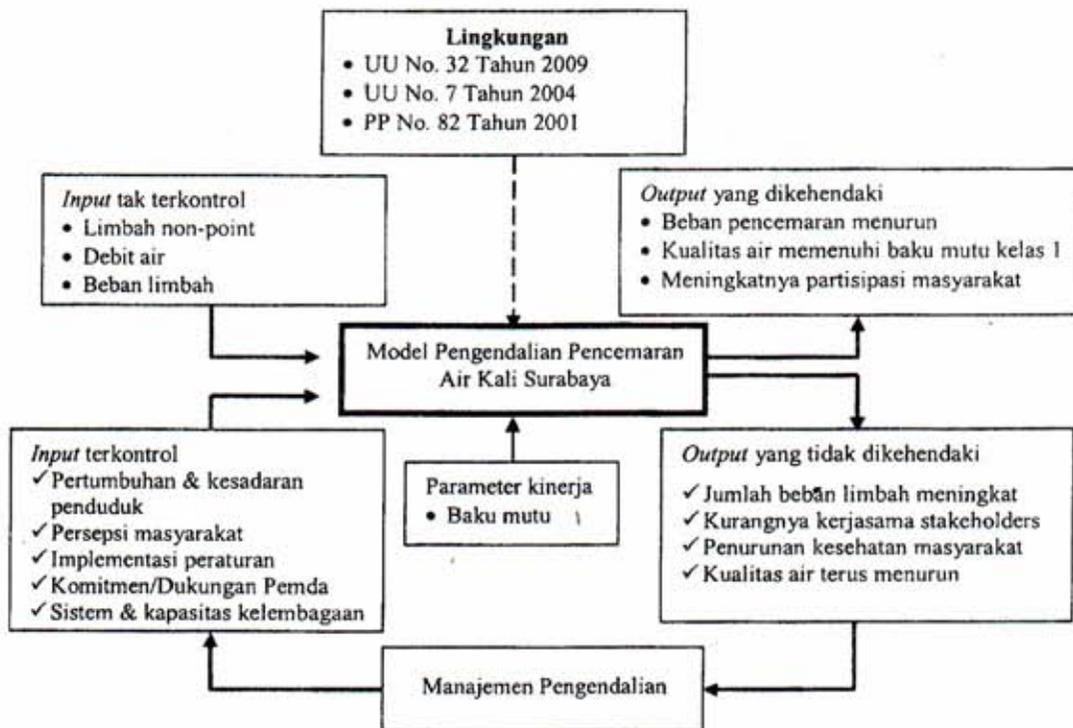
menurunkan kualitas air yang berdampak tidak hanya pada aspek ekologis dan ekonomis, namun juga pada aspek estetika dan kesehatan manusia. Pencemaran air bersifat kompleks, berubah dengan waktu (dinamik) dan terkait dengan *multistakeholder*. Oleh karena itu, dalam melakukan analisis sistem pengendalian pencemaran air membutuhkan beberapa informasi yang dapat digolongkan menjadi beberapa peubah, yaitu peubah *input*, peubah *output* dan parameter yang membatasi susunan sistem. Diagram *input output* yang sering disebut diagram kotak gelap (*black box*) menggambarkan hubungan antara *output* yang akan dihasilkan dengan *input* berdasarkan tahapan analisis kebutuhan dan formulasi permasalahan. Pada Gambar 3 diperlihatkan diagram *black box* sistem pengendalian pencemaran air Kali Surabaya.

Desain model dilakukan untuk melihat perilaku sistem dalam membantu perencanaan strategi pengendalian pencemaran air Kali Surabaya. Model bersandar pada hasil pendekatan kotak gelap dan kondisi faktual hasil studi yang dikombinasikan dengan konsep teoritis dari berbagai kepustakaan. Perangkat lunak yang digunakan sebagai alat bantu pemodelan sistem yaitu *powersim*. Model dinamik yang dibangun terdiri atas tiga sub model, yaitu:

- 1) submodel lingkungan, bagian pemodelan untuk mengetahui pengaruh variabel-variabel lingkungan, seperti permasalahan limbah dan pencemaran air Kali Surabaya terhadap keberlanjutan sistem;
- 2) submodel ekonomi, bagian pemodelan untuk mengetahui pengaruh variabel-variabel ekonomi, seperti pertumbuhan ekonomi, pertumbuhan sektoral, tingkat pendapatan, dan jumlah populasi penduduk terhadap keberlanjutan sistem;



Gambar 2. Diagram Lingkar Sebab Akibat Sistem Pengendalian Pencemaran Air



Gambar 3. Diagram input-output Sistem Pengendalian Pencemaran Air Kali Surabaya

- 3) submodel sosial, bagian pemodelan untuk mengetahui pengaruh variabel-variabel sosial, seperti jumlah populasi, kelahiran, kematian, imigrasi, emigrasi, pendidikan, dan partisipasi masyarakat terhadap keberlanjutan sistem.

Pengembangan skenario pengendalian pencemaran air Kali Surabaya dilakukan dengan menggunakan analisis prospektif.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Kondisi Eksisting Perairan Kali Surabaya

Kondisi eksisting perairan Kali Surabaya menggambarkan karakteristik fisik kimia perairan dibandingkan kriteria mutu air yang berlaku pada saat dilakukan penelitian. Hasil evaluasi kondisi eksisting menunjukkan bahwa kondisi suhu air, konduktivitas, pH, N-NO₃, N-NH₃, P-PO₄, Pb, dan Cd, rata-rata hasil 3-7 kali pengukuran pada setiap titik sampling masih memenuhi kriteria mutu air (KMA) kelas 1, sedangkan untuk parameter TSS, DO, BOD, COD, N-NO₂, dan kadar Hg menunjukkan hasil sebaliknya. Nilai rata-rata pengukuran parameter fisik kimia air Kali Surabaya ditunjukkan pada Tabel 3.

3.2 Beban Pencemaran dan Tingkat Pencemaran Kali Surabaya

Beban pencemaran menggambarkan jumlah suatu unsur pencemar yang terkandung dalam air atau air limbah. Sumber pencemar air Kali Surabaya yaitu: air limbah industri, air limbah rumah tangga, dan air limbah lainnya. Pencemar tersebut masuk ke Kali Surabaya melalui beberapa cara pengalirannya.

Aliran masuk ini dapat berupa *point source* atau aliran dengan saluran pada titik tertentu, seperti saluran drainase atau irigasi, anak sungai, dan *outlet* limbah industri. Sumber pencemar juga bisa berupa *non point source* atau aliran masuk yang tidak berupa saluran tertentu dan merata di sepanjang sungai sehingga debitnya sulit diukur.

Sumber pencemar Kali Surabaya dari limbah domestik berasal dari sanitasi masyarakat yang tinggal di sepanjang Kali Surabaya, sampah, detergen dan bahan buangan non-industri lainnya. Total beban pencemar bersumber limbah domestik (penduduk bantaran sungai, saluran limbah domestik, dan limbah hotel) yaitu: BOD 33,16 ton/hari, COD 71,74 ton/hari, dan TSS 161,65 ton/hari.

Di sepanjang Kali Surabaya terdapat sekitar 36 industri yang saluran pembuangan limbah cairnya menuju Kali Surabaya. Selain itu juga terdapat industri-industri yang letaknya di luar wilayah Kota Surabaya yang membuang limbahnya ke Kali Tengah (\pm 34 industri) yang akhirnya bermuara ke Kali Surabaya. Penyebaran industri pada daerah aliran Kali Surabaya terutama berlokasi di Driyorejo dan Karang Pilang. Beban pencemar Kali Surabaya sektor industri berasal dari industri yang membuang limbahnya langsung ke Kali Surabaya, buangan industri melalui Anak Sungai (Kali Tengah dan Kali Pening) dan saluran pembuangan Waru Gunung. Total beban BOD, COD, dan TSS Kali Surabaya bersumber industri berturut-turut adalah 22,22, 60,65, dan 38,82 ton/hari. Klasifikasi sumber pencemar Kali Surabaya dari limbah industri ditunjukkan pada Tabel 4.

Selain dari industri, kegiatan pertanian juga berpotensi mencemari Kali Surabaya. Daerah yang

Tabel 3. Kondisi Eksisting Fisik Kimia Perairan Kali Surabaya

Parameter	Terukur	KMA 1	Parameter	Terukur	KMA 1	Parameter	Terukur	KMA 1
Suhu	28,990	28,700 \pm 3,000	P-PO ₄	0,165	0,200	BOD	4,840	\leq 2,000
DHL	491,470	500,000	Pb	0,013	\leq 0,030	COD	16,030	\leq 10,000
pH	6,910	6,000 – 9,000	Cd	0,003	\leq 0,010	N-NO ₂	0,139	0,060
N-NO ₃	0,923	10,000	TSS	65,010	50,000	Hg	0,009	\leq 0,001
N-NH ₃	0,216	0,500	DO	4,060	\geq 6,000			

Keterangan satuan: Suhu ($^{\circ}$ C), DHL (μ S/cm), pH (tanpa satuan), parameter lain (mg/liter)

Tabel 4. Klasifikasi Sumber Pencemar Kali Surabaya dari Limbah Industri

Jenis industri	Jumlah industri	Beban (kg/hari)		Beban pencemar terhadap industri (%)		Beban pencemar terhadap total (%)	
		BOD	COD	BOD	COD	BOD	COD
Kertas dan Pulp	5	10.877,40	30.097,60	48,95	49,63	19,60	22,70
Makanan dan Minuman	9	2.449,24	5.548,72	11,02	9,15	4,41	4,18
MSG	1	3.207,35	9.003,42	14,43	14,85	5,78	6,79
Minyak dan Deterjen	6	349,46	708,78	1,57	1,17	0,63	0,53
Tekstil dan Kulit	5	327,68	867,49	1,47	1,43	0,59	0,65
Kimia, keramik dan Metalurgi	10	217,11	565,16	0,98	0,93	0,39	0,43

Tabel 5. Total Beban Pencemaran Kali Surabaya

No.	Sumber pencemar	Beban pencemaran (kg/hari)		
		BOD	COD	TSS
1	Limbah Domestik	33.165,54	71.741,02	161.650,07
2	Limbah Industri	22.222,25	60.645,03	38.823,35
3	Limbah Pertanian	101,08	190,33	660,70
Total		55.488,87	132.576,38	201.134,12

berpotensi menjadi sumber pencemaran limbah pertanian yaitu Kramat Temenggung dan Wonoayu. Total beban BOD, COD, dan TSS Kali Surabaya bersumber limbah pertanian berturut-turut adalah 101,08, 190,33, dan 660,70 kg/hari. Total beban pencemaran Kali Surabaya dari limbah domestik, limbah industri, dan limbah pertanian disajikan pada Tabel 5.

Limbah domestik memberikan kontribusi beban pencemar terbesar dibandingkan sumber pencemar lain (Tabel 5). Untuk BOD kontribusi limbah domestik mencapai 59,7%, industri 40,05%, dan pertanian 0,18%. Beban pencemar COD Kali Surabaya sebesar 54,11% bersumber dari limbah domestik, 45,74% (industri), dan 0,15% (pertanian). Sementara, ditinjau dari beban TSS sebesar 80,37% disebabkan limbah

domestik, 19,30% oleh limbah industri, dan 0,33% akibat limbah pertanian.

Status kualitas air atau indeks lingkungan perairan Kali Surabaya ditentukan dengan metode STORET. Indeks STORET dapat menggambarkan secara menyeluruh tentang kondisi umum kualitas air Kali Surabaya. Data parameter fisika dan kimia air hasil pengamatan dibandingkan dengan KMA kelas I, yang mencakup nilai minimum, maksimum dan nilai rata-rata setiap parameter yang kemudian diberi skor sesuai dengan tingkat pencemarannya. Status mutu Kali Surabaya menurut sistem STORET ditunjukkan pada Tabel 6.

3.3 Pemodelan Sistem Pengendalian Pencemaran Air Kali Surabaya

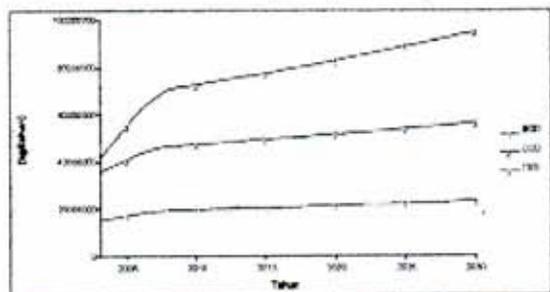
Tabel 6. Status Mutu Air Kali Surabaya berdasarkan Indeks STORET

No.	Lokasi/Stasiun	Skor		
		Kelas I	Kelas II	Kelas III
1.	Gunungsari	-104 (cemar berat)	-88 (cemar berat)	-40 (cemar berat)
2.	Jemb. Sepanjang	-84 (cemar berat)	-68 (cemar berat)	-16 (cemar sedang)
3.	Karang Pilang	-96 (cemar berat)	-72 (cemar berat)	-28 (cemar sedang)
4.	Tamb. Bambi	-92 (cemar berat)	-80 (cemar berat)	-24 (cemar sedang)
5.	Tamb. Cangkir	-104 (cemar berat)	-68 (cemar berat)	-8 (cemar ringan)
6.	Jemb. Jrebeng	-80 (cemar berat)	-32 (cemar berat)	-8 (cemar ringan)

Pemodelan sistem merupakan penyederhanaan dari sebuah objek atau situasi guna menemukan peubah-peubah penting dan tepat serta hubungan antar peubah dalam sistem berdasarkan hasil pendekatan kotak gelap (*black box*). Model pengendalian pencemaran Kali Surabaya disusun berdasarkan atas tiga sub-model yang saling terkait, yaitu sub-model lingkungan, sub-model ekonomi, dan sub-model sosial. Gabungan ketiga sub-model membentuk sebuah sistem pengendalian pencemaran air Kali Surabaya. *Stock flow* diagram model pengendalian pencemaran air Kali Surabaya dengan bentuk struktur modelnya disajikan pada Lampiran 1.

3.4 Simulasi Model

Simulasi model menggambarkan tingkat pencemaran Kali Surabaya yang ditunjukkan oleh parameter kualitas air. Parameter yang digunakan dalam simulasi model ini yaitu: BOD, COD, dan TSS. Hasil simulasi model disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Simulasi Model Berdasarkan Beban BOD, COD dan TSS dari Sumber Pencemaran

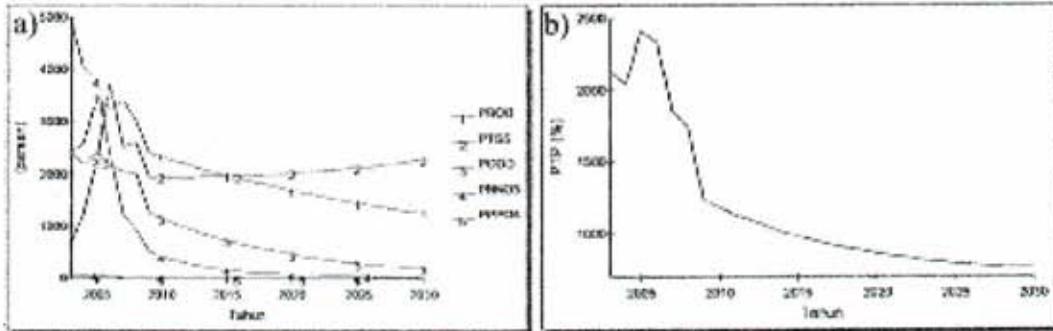
Hasil simulasi menunjukkan terjadinya peningkatan beban pencemaran air Kali Surabaya

akibat peningkatan beban BOD, COD, dan TSS dari sumber pencemaran selama tahun simulasi yang dibuat. Pada tahun 2003, beban pencemaran BOD, COD, dan TSS berturut-turut mencapai 15.649,32; 36.291,49 dan 42.172,96 ton/tahun. Pada tahun 2008, beban pencemaran tersebut meningkat masing-masing menjadi 19.825,01; 47.342,21 dan 71.468,27 ton/tahun. Peningkatan beban pencemaran BOD, COD, dan TSS terus berlangsung hingga akhir simulasi 2030, yaitu beban BOD 23.636,35; COD 57.013,59 dan TSS 95.638,29 ton/tahun

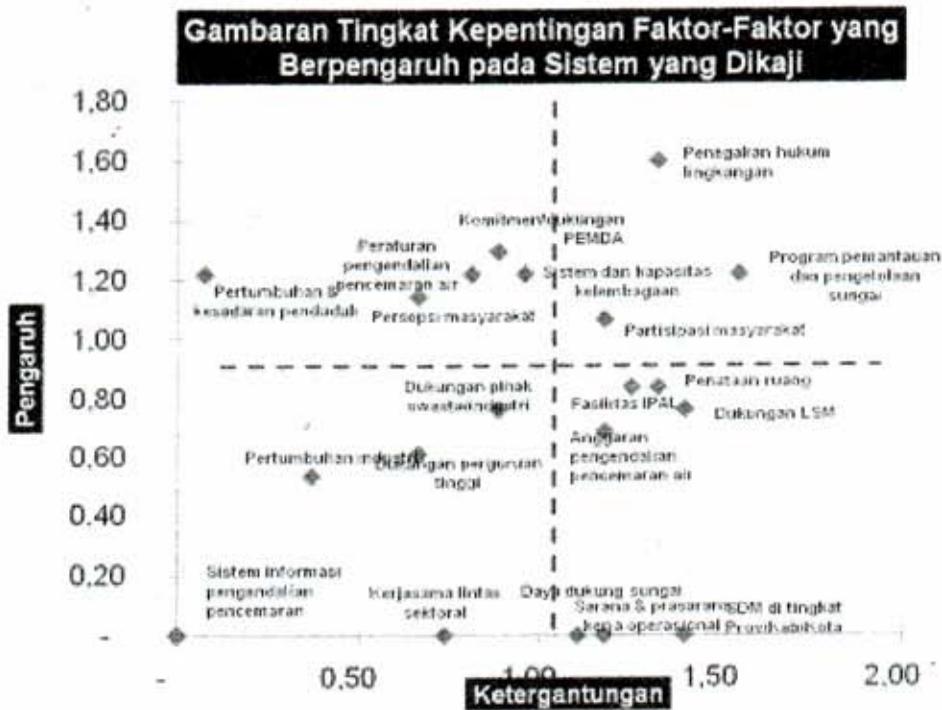
Berdasarkan perhitungan persentase beban pencemaran (%BP) dibandingkan kapasitas asimilasi (KA) tiap parameter, diketahui bahwa parameter TSS dan BOD memiliki % BP paling tinggi dibandingkan dengan ketiga parameter lainnya, sedangkan berdasarkan tingkat kecenderungan, hanya parameter TSS yang mengalami peningkatan % BP selama tahun simulasi. Demikian juga, nilai persentase beban pencemaran total (PTP) dibandingkan KA, memperlihatkan bahwa terjadi penurunan PTP selama tahun simulasi. Pada tahun 2003, nilai PTP 21,33 kali KA. Pada tahun 2008 nilai PTP menurun menjadi 17,38 kali KA. Pada akhir tahun simulasi (2030), nilai PTP terus menurun menjadi 7,65 kali KA. Hasil simulasi model disajikan pada Gambar 5.

3.5 Analisis Prospektif

Analisis prospektif dilakukan dengan tujuan untuk mempersiapkan tindakan strategis dengan cara menentukan faktor-faktor kunci yang berperan penting dan melihat apakah dibutuhkan perubahan di masa depan berdasarkan kondisi yang ada. Hasil analisis prospektif ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 5. Hasil Simulasi Model Berdasarkan Persentase Beban Pencemaran: (a) tiap parameter dan (b) persentase total



Gambar 6. Pengaruh dan ketergantungan antar faktor pada sistem pengendalian pencemaran air Kali Surabaya

Berdasarkan hasil analisis prospektif berupa matriks pengelompokan empat kuadran (Gambar 6), dapat diidentifikasi pengaruh dan ketergantungan faktor-faktor dalam upaya pengendalian pencemaran air Kali Surabaya. *Kuadran I* (kiri atas) merupakan kelompok faktor yang memberikan pengaruh kuat terhadap kinerja sistem dengan ketergantungan yang rendah terhadap keterkaitan antarfaktor. Kuadran I terdiri atas lima faktor, yaitu: (1) pertumbuhan penduduk dan kesadaran masyarakat, (2) persepsi

masyarakat, (3) implementasi peraturan pengendalian pencemaran air, (4) komitmen/dukungan Pemda, dan (5) sistem dan kapasitas kelembagaan. Kelima faktor pada kuadran I merupakan variable penentu yang digunakan sebagai *input* di dalam sistem yang dikaji. *Kuadran II* (kanan atas) merupakan kelompok faktor yang memberikan pengaruh kuat terhadap kinerja sistem namun mempunyai ketergantungan yang tinggi terhadap keterkaitan antarfaktor, sehingga digunakan sebagai variabel penghubung (*stake*) di

dalam sistem. Kuadran ini terdiri atas tiga faktor, yaitu: (1) penegakan hukum lingkungan, (2) program pemantauan dan pengelolaan sungai, dan (3) partisipasi masyarakat. *Kuadran III* (kanan bawah) merupakan kelompok faktor yang memiliki pengaruh lemah terhadap kinerja sistem dan ketergantungan yang tinggi terhadap keterkaitan antar faktor, sehingga digunakan sebagai variabel terikat (*output*) di dalam sistem. Kuadran ini terdiri atas tujuh faktor, yaitu: (1) penataan ruang, (2) fasilitas pengolah air limbah/IPAL, (3) dukungan LSM, (4) anggaran pengendalian pencemaran air, (5) daya dukung sungai, (6) sarana dan prasarana kerja operasional, dan (7) Sumberdaya manusia di tingkat Provinsi/Kabupaten/Kota. *Kuadran IV* (kiri bawah) merupakan kelompok faktor yang memiliki pengaruh lemah terhadap kinerja sistem dan ketergantungan juga rendah terhadap keterkaitan antarfaktor. Kuadran ini terdiri atas lima faktor, yaitu: (1) dukungan pihak swasta/industri, (2) pertumbuhan industri, (3) dukungan perguruan tinggi, (4) sistem informasi pengendalian pencemaran, dan (5) kerjasama lintas sektoral.

Berdasarkan hasil penilaian pengaruh langsung antar faktor sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 6, dari 20 faktor kunci yang teridentifikasi didapatkan lima faktor yang mempunyai pengaruh yang kuat terhadap kinerja sistem dengan ketergantungan antarfaktor yang rendah. Kelima faktor tersebut perlu dikelola dengan baik dan dibuat kondisi (*state*) yang mungkin terjadi di masa depan untuk pengendalian pencemaran air Kali Surabaya.

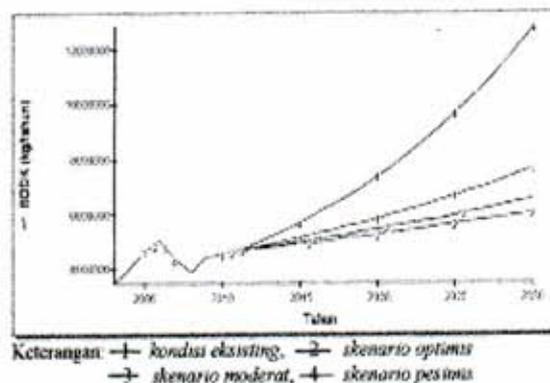
3.6 Simulasi Skenario

Berdasarkan alternatif keadaan yang teridentifikasi pada beberapa faktor yang berpengaruh langsung dalam pengendalian pencemaran air Kali Surabaya, dapat disusun skenario yang mungkin terjadi di masa yang akan datang dengan melakukan kombinasi yang mungkin terjadi antarkondisi faktor tersebut, dengan membuang kombinasi yang tidak sesuai (*incompatible*). Kombinasi antara kondisi faktor menghasilkan tiga skenario pengendalian pencemaran air Kali Surabaya, yaitu (1) skenario pesimis, (2) skenario moderat, dan (3) skenario optimis. Untuk mengaitkan skenario yang disusun ke dalam model, dilakukan interpretasi kondisi faktor ke dalam peubah model, sehingga skenario yang

bersangkutan dapat disimulasikan.

Simulasi model dilakukan terhadap skenario untuk mengetahui perilakunya masing-masing. Kajian dilakukan terhadap peubah yang dianggap menentukan arah kebijakan pengelolaan Kali Surabaya di masa yang akan datang, yaitu hasil simulasi tingkat beban pencemaran Kali Surabaya dari tiap skenario. Ketiga skenario memberikan hasil yang berbeda pada peubah yang dikaji, di mana secara umum perbedaan antarskenario mulai tampak pada tahun 2011. Hasil simulasi skenario beban sumber pencemaran BOD Kali Surabaya (BODK) disajikan pada Gambar 7.

Berdasarkan simulasi model beban sumber pencemaran BOD Kali Surabaya (BODK) untuk tiap skenario menunjukkan, bahwa skenario pesimis (4) memberikan tingkat pencemaran yang sangat tinggi dibandingkan dengan kedua skenario lainnya. Skenario optimis (2) dan moderat (3) memiliki proyeksi tingkat pencemaran yang rendah dan berada di bawah tingkat pencemaran kondisi eksisting (1). Gambaran proyeksi beban pencemaran BODK ketiga skenario pada tahun 2003 besarnya sama yaitu 3.562.561 kg/tahun dan mengalami peningkatan pada tahun 2011 menjadi 4.715.995,32 kg/tahun, namun setelah penerapan skenario terjadi perbedaan mencolok beban pencemaran BODK antarskenario hingga akhir simulasi tahun 2030. Pada akhir tahun simulasi (2030), beban pencemaran BODK menjadi 12.839.105,33 kg/tahun (skenario pesimis), 6.601.676,22 kg/tahun (skenario moderat), dan 6.092.223,05 kg/tahun (skenario optimis). Peningkatan beban pencemaran BODK skenario pesimis (4) adalah yang paling besar dibandingkan peningkatan beban BODK dua



Gambar 7. Prediksi Beban Pencemaran BOD Kali Surabaya Hasil Simulasi Skenario Sampai Tahun 2030

skenario lainnya dan berada di atas beban pencemaran kondisi eksisting (1), sementara peningkatan beban pencemaran BODK skenario optimis (2) berdasarkan skenario model adalah yang paling rendah jika dibandingkan kedua skenario lainnya. Hasil perbandingan antar skenario terhadap kondisi eksisting dari beberapa peubah disajikan pada Tabel 7.

Surabaya di mana persen rata-rata total dibandingkan kapasitas asimilasinya membaik hingga 36,21% (skenario optimis) dan 25,23% (skenario moderat) dari kondisi eksisting. Hal ini menunjukkan bahwa terjadinya peningkatan interpretasi kondisi (*state*) faktor-faktor kunci, yaitu pertumbuhan penduduk dan kesadaran masyarakat dengan nilai interpretasi saat ini sebesar 30,85% naik menjadi 53,90%, persepsi

Tabel 7. Perbandingan antar skenario

No	Peubah	Perbedaan antar Skenario (%)		
		Optimis dengan Eksisting	Moderat dengan Eksisting	Pesimis dengan Eksisting
1	BODK	-20,89	-14,27	+66,72
2	TSSK	-43,57	-31,09	+218,43
3	CODK	-43,25	-24,49	+36,38
4	NNO3K	-60,62	-36,68	+63,61
5	PPO4K	-48,04	-27,60	+42,18
6	PTP	-36,21	-25,23	+156,63

Berdasarkan hasil simulasi model diketahui bahwa skenario pesimis secara umum berdampak terhadap semakin memburuknya kondisi kualitas air Kali Surabaya, di mana persen rata-rata total dibandingkan kapasitas asimilasinya memburuk hingga 156,63% dari kondisi eksisting. Hal ini menunjukkan bahwa terjadinya penurunan interpretasi kondisi (*state*) faktor-faktor kunci, yaitu pertumbuhan penduduk dan kesadaran masyarakat dengan nilai interpretasi saat ini sebesar 30,85% turun menjadi 15,43%, persepsi masyarakat dengan nilai interpretasi saat ini 42,15% turun menjadi 21,08%, implementasi peraturan pengendalian pencemaran air dengan nilai interpretasi saat ini sebesar 43,2% turun menjadi 21,6%, komitmen/dukungan Pemda dengan nilai interpretasi saat ini sebesar 43,35% turun menjadi 21,68%, dan sistem dan kapasitas kelembagaan dengan nilai interpretasi saat ini sebesar 45,7% turun menjadi 22,85%, berdampak pada terjadinya peningkatan persen rata-rata total beban pencemaran dibandingkan kapasitas asimilasinya sebesar 1,56 kali lebih besar dibandingkan kondisi pengelolaan saat ini di masa akan datang (kondisi eksisting), yaitu pada akhir tahun simulasi 2030.

Sementara itu, untuk skenario optimis dan skenario moderat secara umum berdampak terhadap semakin membaiknya kondisi kualitas air Kali

masyarakat dengan nilai interpretasi saat ini sebesar 42,15% naik menjadi 61,43%, implementasi peraturan pengendalian pencemaran air dengan nilai interpretasi saat ini sebesar 43,2% naik menjadi 62,1%, komitmen/dukungan Pemda dengan nilai interpretasi saat ini sebesar 43,35% naik menjadi 62,23%, dan sistem dan kapasitas kelembagaan dengan nilai interpretasi saat ini sebesar 45,7% naik menjadi 63,8%, berdampak pada peningkatan persen rata-rata total beban pencemaran dibandingkan kapasitas asimilasinya sebesar 0,25 kali lebih baik dibandingkan kondisi pengelolaan saat ini di masa akan datang (kondisi eksisting), yaitu pada akhir tahun simulasi 2030. Pada skenario optimis dengan kondisi pertumbuhan penduduk dan kesadaran masyarakat dengan nilai interpretasi saat ini sebesar 30,85% naik menjadi 76,95%. Persepsi masyarakat dengan nilai interpretasi saat ini sebesar 42,15% naik menjadi 80,71%. Sementara itu, implementasi peraturan pengendalian pencemaran air dengan nilai interpretasi saat ini sebesar 43,20% naik menjadi 81,00%, komitmen/dukungan Pemda dengan nilai interpretasi saat ini sebesar 43,35% naik menjadi 81,11%, sistem dan kapasitas kelembagaan dengan nilai interpretasi saat ini sebesar 45,70% naik menjadi 81,90%. Hal tersebut akan berdampak pada peningkatan persen rata-rata total beban pencemaran dibandingkan kapasitas asimilasinya sebesar 0,36 kali

lebih baik dibandingkan kondisi pengelolaan saat ini di masa akan datang (kondisi eksisting), yaitu pada akhir tahun simulasi 2030.

4. Simpulan dan Saran

4.1 Simpulan

- 1) Kualitas air Kali Surabaya pada kondisi eksisting telah melampaui baku mutu air (KMA) kelas I dan memerlukan penurunan beban pencemaran. Nilai rata-rata parameter TSS, DO, BOD, COD, N-NO₂, dan kadar Hg tidak memenuhi KMA kelas I pada semua stasiun pengamatan.
- 2) Status mutu air Kali Surabaya berdasarkan nilai indeks STORET termasuk kelas D atau berada dalam kondisi tercemar berat dengan nilai indeks berkisar -80 hingga -104. Parameter DO, BOD, COD N-NO₂, dan Hg memberikan kontribusi tertinggi terhadap buruknya status mutu air Kali Surabaya.
- 3) Pencemar Kali Surabaya terutama bersumber dari limbah domestik, limbah industri, dan limbah pertanian. Total beban pencemaran Kali Surabaya untuk BOD 55,49 ton/hari, COD 132,58 ton/hari, dan TSS 210,13 ton/hari. Untuk parameter BOD kontribusi limbah domestik 59,77%, limbah industri 40,05%, dan limbah pertanian 0,18%. Sumber beban pencemar COD 54,11% berasal dari limbah domestik, 45,74% (industri), dan 0,15% (pertanian), sedangkan beban TSS 80,37% bersumber dari limbah domestik, 19,30% oleh limbah industri, dan 0,33% akibat limbah pertanian.
- 4) Model pengendalian pencemaran air Kali Surabaya yang dibangun dapat menggambarkan perilaku sistem nyata. Ada lima faktor yang memiliki pengaruh kuat terhadap kinerja sistem dan ketergantungan antarfaktor yang rendah, yaitu pertumbuhan penduduk dan kesadaran masyarakat, persepsi masyarakat, implementasi peraturan pengendalian pencemaran, komitmen/dukungan pemda, sistem dan kapasitas kelembagaan.
- 5) Hasil prediksi beban pencemaran air Kali Surabaya yang akan terjadi selama 20 tahun mendatang akan sangat bergantung pada kebijakan yang akan dipilih oleh pengelola Kali Surabaya. Kebijakan yang dapat diterapkan untuk menekan beban pencemaran Kali Surabaya agar sesuai dengan baku mutu air

kelas I berdasarkan prioritas yaitu menurunkan laju pertumbuhan penduduk dan meningkatkan kesadaran masyarakat, meningkatkan persepsi masyarakat, melaksanakan peraturan pengendalian pencemaran air secara tegas dan konsisten, meningkatkan komitmen/dukungan Pemerintah Daerah, dan meningkatkan sistem dan kapasitas kelembagaan pengelola Kali Surabaya.

- 6) Skenario moderat dan optimis merupakan skenario realistis yang terjadi di masa depan untuk pengendalian pencemaran air Kali Surabaya dengan mempertimbangkan aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi, namun perlu didukung beberapa aspek kebijakan.

4.2 Saran

- 1) Mengingat pencemaran Kali Surabaya terjadi secara menyeluruh dari hulu sampai hilir dan sistem pengendalian pencemaran air yang telah ada belum memadai, maka pemulihan pencemaran Kali Surabaya harus dilakukan secara terpadu dengan melibatkan seluruh *stakeholders* yang melakukan segala aktivitas yang mempengaruhi kualitas dan kuantitas air Kali Surabaya. Upaya-upaya yang disarankan antara lain:
 - (a) mewajibkan kepada pihak industri untuk membangun instalasi pengolahan limbah secara individu atau melakukan pengendalian pencemaran air secara gabungan (*cluster*) bagi industri dengan lokasi berdekatan yang secara teknis dapat dilaksanakan;
 - (b) melakukan sosialisasi larangan pemanfaatan lahan bantaran Kali Surabaya dan peningkatan kesadaran masyarakat terhadap lingkungan;
 - (c) meningkatkan pengawasan dan pemantauan rutin pada industri di sepanjang Kali Surabaya (tidak hanya terbatas pada industri prioritas Prokasih dan Proper saja);
 - (d) menerapkan peraturan tata ruang di sepanjang daerah aliran sungai;
 - (e) mengintensifkan Program Sidak dan Program Patroli Kali Surabaya.
- 2) Perlu penelitian lanjutan yang mengkaji sumber beban pencemaran yang belum diteliti terutama dari limbah peternakan.

Daftar Pustaka

- APHA. 1998. *Standart Method for the Examination of Water and Waste Water*. 20^{ed}. American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Pollution Control Federation, Washington.
- Arisandi, P. 2004. *Air, Dua Juta Orang Surabaya Sulit Mendapatkannya*. Ecological Observation And Wetlands Conservation (Ecoton), Driyorejo, Gresik.
- Huang, Z. Morimoto H. 2002. *Water Pollution Models Based on Stochastic Diferential Equations*. Department of Earth and Environmental Sciences, Nagoya University, Japan.
- KLH. 2005. *Status Lingkungan Hidup Indonesia 2005*. Kementerian Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia, Jakarta.
- KLH. 2009. *Status Lingkungan Hidup Indonesia 2008*. Kementerian Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia, Jakarta.
- Koemantoro, H. 2007. *Strategi Pemenuhan Baku Mutu Badan Air Lokasi Intake PDAM Karang Pilang Surabaya*. Tesis. Tidak Dipublikasikan. Teknik Manajemen Lingkungan. Intitut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya.
- Maharani, A. Ciptomulyono U, Santosa B. 2008. Pengembangan Model Optimasi Manajemen Pengelolaan Kualitas Air Kali Surabaya dengan *Interval Fuzzy Linier Programming (IFLP)*. *Prosiding Seminar Nasional Manajemen Teknologi VIII Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya, 2 Agustus 2008*.
- Masduqi, A. 2006. *Aplikasi Linier Programming untuk Optimisasi Pengolahan Limbah Industri di Kali Surabaya*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya.
- Nandalal, K.D.W., Semasinghe, S.B.A.D. 2006. A System Dynamics Simulation Model for the Assessment of Water Resources in Sri Lanka. *32nd WEDC International Conference*, Colombo, Sri Lanka.
- PJT I. 2007. *Kualitas Air Sungai di Wilayah Sungai Brantas*. Laboratorium Perum Jasa Tirta I, Malang.
- Purwatiningsih, S. 2005. *Kajian Kualitas Kali Surabaya Ditinjau dari Aspek Lingkungan, Peraturan Perundangan dan Kelembagaan*. Tesis. Teknik Manajemen Lingkungan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya.
- Qin, X.S. Huang, G.H. Zeng, G.M. and A. Chakma. 2007. "An Interval-Parameter Fuzzy Nonlinear Optimization Model for Stream Water Quality Management Under Uncertainty", *European Journal of Operational Research*, 180:1331-1357.
- Simonovic, S.P. 2002. "World Water Dynamics: Global Modeling of Water Resources", *Journal of Environmental Management*, 66:249-267.
- WHO. 1993. *Rapid Assessment of Sources of Air, Water, and Land Pollution*. World Health Organization, Genewa.
- Zhang, H. Zhang, X. and B. Zhang. 2009. "System Dynamic Approach to Urban Water Demand Forecasting". *Transaction of Tianjin University*, 15(1):70-74.

Lampiran 1. Stock flow diagram model pengendalian pencemaran air Kali Surabaya

