

PENERAPAN MODEL FUGASITAS PADA PENCEMARAN DDT DI WADUK SAGULING

Yandes Panelin

Program Studi Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik, Universitas Presiden

Jl. Ki Hajar Dewantara, Jababeka Education Park, Cikarang, Jawa Barat 17550

yandespanelin@gmail.com

Abstrak: Waduk Saguling adalah waduk buatan yang terletak di Kabupaten Bandung Barat pada ketinggian 643 m di atas permukaan laut dan berfungsi untuk membendung aliran Sungai Citarum yang merupakan sungai terbesar di Jawa Barat. Sungai Citarum Hulu telah terdeteksi adanya insektisida organoklorin, salah satunya DDT, maka dikhawatirkan insektisida organoklorin tersebut akan terakumulasi pada Waduk Saguling. Penelitian ini dilakukan untuk mengestimasi besarnya nilai fugasitas organoklorin DDT dan konsentrasinya di setiap kompartemen menggunakan model fugasitas level 3. Berdasarkan hasil perhitungan, nilai fugasitas DDT untuk media air adalah $1,78 \cdot 10^{-9}$ Pa, media sedimen adalah $9,64 \cdot 10^{-10}$ Pa, media tanah adalah $2,73 \cdot 10^{-17}$ Pa, dan media udara adalah $3,23 \cdot 10^{-14}$ Pa. Nilai fugasitas terbesar terdapat pada kompartemen air. Konsentrasi DDT pada kompartemen udara $9,1 \cdot 10^{-12}$ ppm, pada tanah $4,5 \cdot 10^{-11}$ ppm, pada air $6,9 \cdot 10^{-4}$ ppm, pada sedimen 0,99 ppm, pada ikan 0,013 ppm, pada tanaman air 0,005 ppm, dan pada moluska 0,002 ppm. Model fugasitas berguna dalam memprediksi distribusi penyebaran DDT di setiap kompartemen lingkungan di Waduk Saguling.

Kata Kunci : organoklorin, Waduk Saguling, fugasitas, konsentrasi organoklorin

Abstract: Saguling reservoir is an artificial reservoir located in West Bandung regency at an altitude of 643 m above sea level and serves to stem the Citarum River which is the largest river in West Java. Upper Citarum River has detected the organochlorine insecticide, one of them is DDT. It is feared that DDT can accumulate in Saguling Reservoir which is the first dam to stem the Citarum River. This is very worrying given Saguling has greatly affect to the lives of many people. This study was conducted to estimate the fugacity value and concentration of DDT in each environmental compartment, such as in water, sediment, fish, aquatic plants, and mollusks by using Fugacity models. From calculation result, average DDT fugacity in the air is $3.23 \cdot 10^{-14}$ Pa, on the soil $2.73 \cdot 10^{-17}$ Pa, in the water $1.78 \cdot 10^{-9}$ Pa, in sediments $9.64 \cdot 10^{-10}$ Pa. DDT concentration in the air compartment at Saguling Reservoir is $9.1 \cdot 10^{-12}$ ppm, on the ground $4.5 \cdot 10^{-11}$ ppm, in the water $6.9 \cdot 10^{-4}$ ppm, in sediments 0.99 ppm, in the fish 0.013 ppm, in the aquatic plant 0.005 ppm, and in the mollusk 0.002 ppm. Fugacity models are useful in predicting the distribution of DDT in each environmental compartment in Saguling Reservoir.

Key Words: organochlorines, Saguling Reservoir, fugacity, organochlorines concentration

PENDAHULUAN

Persistence Organic Pollutants (POPs) merupakan bahan kimia berbahaya yang menjadi perhatian dunia. Salah satu POP's yang menjadi perhatian adalah insektisida yang termasuk dalam golongan organoklorin seperti Aldrin, Dieldrin, Endrin, Chlordane, Hexachlorobenzene, Mirex, Toxaphene, Heptaklor, dan termasuk DDT. Penggunaan insektisida DDT sudah dilarang di gunakan di Indonesia melalui Peraturan Menteri Pertanian No.

24/Permentan/SR.140/4/2011, karena sifatnya yang persisten dan bioakumulatif.

Beberapa hasil penelitian sebelumnya mengemukakan bahwa bahan

aktif yang telah dilarang seperti aldicarb, alfa-sipermetrin, diazinon, dikofol, endosulfan, karbaril, kartap hidroklorida, klorotalonil, klorpirifos, mankozeb, permetrin, dan sipermetrin masih digunakan di DAS Citarum (Rochmanti, 2009). Senyawa DDT yang digunakan dalam penyemprotan tanaman perkebunan akan jatuh ke tanah, dan akan ikut terbawa oleh larian air akibat adanya hujan. Larian tersebut nantinya akan masuk ke badan air seperti sungai. Sungai Citarum akan terbendung pada Waduk Saguling. DDT dikhawatirkan terakumulasi pada Waduk Saguling. Pestisida organoklorin dapat terakumulasi pada sedimen dan biota yang ada di suatu perairan. Hal ini diperkuat

oleh penelitian yang dilakukan Wibowo (2010), yang menyatakan bahwa residu lindan, aldrin, heptaklor, dieldrin, DDT, dan endosulfan terdeteksi pada air, sedimen, ikan yang ada di Sungai Citarum. Hal yang sama juga akan terjadi apabila pencemar masuk ke Waduk Saguling. Oleh karena itu penelitian tentang estimasi dan hubungan konsentrasi DDT pada setiap kompartemen lingkungan di Waduk Saguling sangat penting untuk dilakukan.

Maksud dari penelitian ini adalah mengestimasi dan mengevaluasi penggunaan DDT menggunakan model fugasitas dan analisis hubungan antara pencemaran DDT pada kompartemen lingkungan di Waduk Saguling, hilir Das Citarum Hulu, Kabupaten Bandung. Tujuan dari penelitian ini adalah mengestimasi besarnya nilai fugasitas dan konsentrasi DDT dari setiap kompartemen lingkungan, yaitu pada air, sedimen, ikan, tanaman air, dan moluska menggunakan model fugasitas.

METODOLOGI

Lokasi penelitian terletak di Waduk Saguling, Kabupaten Bandung Barat, Provinsi Jawa Barat. Pihak yang mengelola Waduk Saguling adalah PT Indonesia Power UBP Saguling. Data sekunder yang diperlukan untuk keperluan pemodelan antara lain, karakteristik fisika kimia pencemar DDT dan karakteristik kompartemen lingkungan di Waduk Saguling. Data sekunder yang dibutuhkan untuk perhitungan fugasitas adalah nilai koefisien *octanol-water* (Kow), koefisien *organic carbon* (Koc), konstanta Henry (H), tekanan uap pada fasa liquid, berat molekul, kerapatan, faktor biokonsentrasi pada biota, waktu paruh pada setiap kompartemen lingkungan, dan difusifitas molekul. Setiap nilai karakteristik tersebut diambil pada keadaan suhu 25 °C (Mackay et al., 2006).

Karakteristik waduk yang harus diketahui untuk perhitungan fugasitas adalah luas area waduk, kedalaman air, ketebalan tanah, ketebalan sedimen,

ketinggian atmosfer yang ditinjau, densitas biota, laju alir masuk atau keluar udara dan air, fraksi volume setiap subkompartemen, konten lemak biota, konten organik kompartemen, koefisien transfer massa, dan laju presipitasi hujan. Nilai-nilai tersebut didapatkan dari studi literatur (Mackay, 2001) dan dari hasil pengukuran lapangan.

Data primer penelitian didapatkan dengan melakukan pengukuran sampel-sampel kompartemen lingkungan, seperti air, sedimen, ikan, tanaman air, dan moluska. Konsentrasi input pencemar didapat dengan mengukur konsentrasi pencemar organoklorin di air sungai Citarum yang menjadi input dari Waduk Saguling. Sungai Citarum menjadi sungai tempat pembuangan limbah industri dan air larian dari daerah pertanian. Untuk kompartemen udara, input pencemar ke dalam sistem waduk dari udara dianggap sangat kecil sehingga nilainya dapat diabaikan.

Pengambilan sampel air, sedimen, tanaman air dan ikan pada Waduk Saguling dilakukan dengan metode komposit. Pengambilan sampel air menggunakan *water sampler*, dan sampel sedimen menggunakan *van grab sampler* dilengkapi dengan penggunaan *Geografic Positioning System* (GPS) untuk mengetahui lokasi titik pengambilan sampel.

Pengambilan sampel air akan dilakukan pada 12 titik. Tiga titik sampling berada di luar dari waduk, sedangkan sembilan titik sampling terdapat pada waduk. Lokasi ketiga titik tersebut terdapat pada daerah input waduk dan output waduk (dua titik). Data hasil analisa dari sembilan titik ini digunakan sebagai data validasi hasil perhitungan fugasitas. Data yang digunakan sebagai validasi model diambil pada musim kemarau dan musim hujan. Data untuk musim hujan menggunakan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Riwinta (2012), Rahmawati (2012), dan Retno (2012).

Sampel dilakukan prosedur ekstraksi organoklorin terlebih dahulu sebelum dianalisa menggunakan metode gas kromatografi. Preparasi sampel dilakukan di Laboratorium Higiene Industri dan Toksikologi, Teknik Lingkungan ITB. Analisis sampel dilakukan dengan kromatografi gas di Laboratorium Balai Penelitian Teknologi Pertanian dan Lingkungan di Bogor.

Metode Ekstraksi

Sampel diblender hingga halus, ditimbang sampai mencapai berat 25 mg, dimasukkan ke dalam cup homogenizer dan dicampur dengan aceton sebanyak 100 ml. Campuran sampel dan pelarut organik kemudian dihaluskan dengan menggunakan *homogenizer* selama 20 menit dengan kecepatan 100 rpm dan disaring. Hasil saringan kemudian dikocok dengan n-heksana sebanyak 25 ml menggunakan corong pisah. Kocok kuat corong pisah selama 3 menit dan diamkan sehingga terpisah bagian airnya di bagian bawah dan bagian larutan organiknya di bagian atas.

Contoh air kemudian dikocok ulang dengan n-heksana sebanyak 25 ml menggunakan corong pisah. Kocok kuat corong pisah selama 3 menit dan diamkan sehingga terpisah bagian air di bagian bawah dan pelarut organiknya di bagian atas. Buang bagian airnya dan masukkan larutan organik di dalam labu bundar. Larutan organik dimasukkan ke dalam kolom kromatografi yang berisi florisisil dan sodium sulfat anhidrat untuk mengikat sisa air yang ada dan pengotor.

Larutan kemudian dipekatkan dengan evaporasi menggunakan *rotary evaporator* sampai 1 ml. Bilas labu bundar menggunakan aceton sampai pengenceran 10 ml dan larutan sampel siap disuntikkan ke Gas Kromatografi.

Analisa Sampel dengan Gas Kromatografi

Sampel yang telah diekstraksi diinjeksikan ke dalam gas kromatografi. Konsentrasi

residu dihitung dengan cara mengukur tinggi puncak kromatogram kemudian dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$R = \frac{A_c}{A_s} \times K_s \times \frac{F_c}{B_c}$$

Keterangan:

R = Residu pada sampel (ppm)

A_c = Area puncak contoh (μV.min)

A_s = Area puncak standar (μV.min)

K_s = Konsentrasi standar (mg/L)

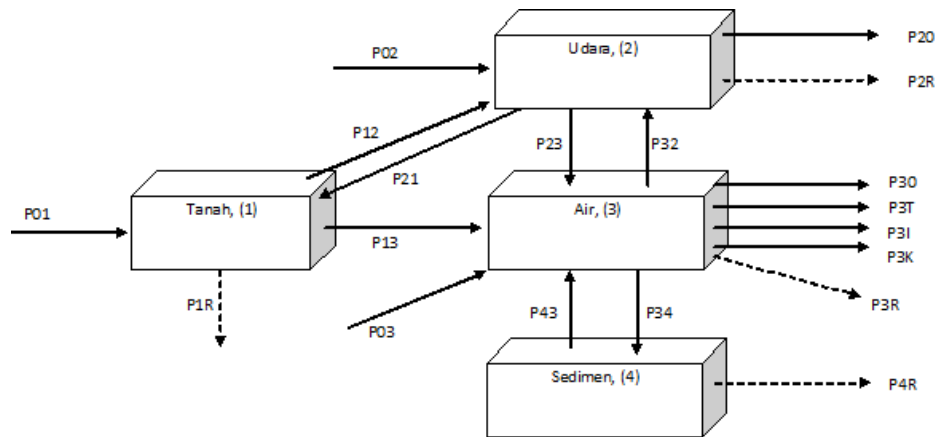
B_c = Berat contoh (gr) / (ml)

F_c = Faktor pengenceran (ml)

Formulasi dan penyusunan kerangka model fugasitas level 3 didasarkan pada persamaan neraca massa. Persamaan neraca massa menggambarkan situasi yang terjadi di dalam sistem waduk. Diagram konseptual pada sistem waduk yang digunakan untuk menyusun persamaan neraca massa digambarkan pada **Gambar 1**. Penjelasan notasi yang terdapat pada diagram tersebut dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Pada model fugasitas yang digunakan terdapat 4 kompartemen yaitu, kompartemen tanah, udara, air, dan sedimen. Pada kompartemen udara terdapat subkompartemen udara dan aerosol. Pada kompartemen air terdapat subkompartemen air, partikel tersuspensi, dan biota (ikan, tanaman air, dan moluska). Pada kompartemen sedimen terdapat subkompartemen air dan padatan pada sedimen.

Dari diagram tersebut dapat dibuat persamaan neraca massa yang menggambarkan berapa banyak pencemar yang masuk (di sebelah kiri persamaan) dan berapa banyak pencemar yang berdifusi ke kompartemen lain (di sebelah kanan persamaan) (lihat **Tabel 2** kolom 2). Dengan melakukan substitusi dari keempat persamaan neraca massa pada kolom 3, akan didapat persamaan untuk menghitung nilai fugasitas untuk setiap kompartemen.



Gambar 1. Diagram konseptual model fugasitas di Waduk Saguling

Persamaan tersebut dikembangkan dengan memperhitungkan adveksi, reaksi degradasi, difusi, deposisi basah dan kering, disolusi, *run off*, absorpsi, dan resuspensi. Nilai D merupakan parameter transpor yang memiliki satuan mol/Pa.h. Secara umum nilai D sama dengan laju alir (G , m³/jam) dikalikan kapasitas fugasitas (Z , mol/m³Pa). Kapasitas fugasitas dihitung untuk setiap kompartemen. Nilai Z untuk kompartemen udara tergantung dari nilai konstanta gas dan suhu udara di atas permukaan air waduk. Nilai Z untuk air berbanding terbalik dengan konstanta Henry. Dengan mengetahui nilai Z kompartemen air dan udara, maka nilai Z untuk kompartemen lain dapat dihitung, dengan sebelumnya mendapatkan nilai koefisien partisi antar dua kompartemen tersebut.

Setelah didapatkan nilai fugasitas (f) dan kapasitas fugasitas (Z) maka konsentrasi pencemar pada setiap kompartemen dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$C_{i,j} = Z_{i,j} \cdot f_{i,j}$$

$C_{i,j}$ = konsentrasi kontaminan ke- i pada kompartemen lingkungan ke- j (mol/m³)
 $Z_{i,j}$ = kapasitas fugasitas kontaminan ke- i pada kompartemen lingkungan ke- j (mol/m³Pa)

$f_{i,j}$ = Fugasitas kontaminan ke- i pada kompartemen lingkungan ke- j (Pa)

Tabel 1. Keterangan proses dalam diagram model fugasitas

Simbol	Proses Transfer
P_{01}	Input kontaminan ke dalam kompartemen tanah
P_{02}	Aliran udara adveksi ke dalam system waduk
P_{20}	Aliran udara adveksi ke luar system waduk
P_{12}	Evaporasi kontaminan dari tanah ke udara
P_{21}	Transfer kontaminan dari udara ke tanah
P_{23}	Transfer kontaminan dari udara ke air
P_{32}	Difusi dari air ke udara
P_{13}	<i>Runoff</i> kontaminan ke system waduk
P_{4R}	Reaksi degradasi pada kompartemen sedimen
P_{3T}	Biotransformasi oleh Eceng Gondok
P_{3I}	Biotransformasi oleh Ikan Nila
P_{3K}	Biotransformasi oleh Keong Mas
$P_{03/30}$	Aliran air advectif masuk/keluar waduk
P_{43}	Transfer kontaminan dari air ke sedimen
P_{34}	Transfer kontaminan dari sedimen ke air
P_{1R}	Reaksi degradasi pada kompartemen tanah
P_{2R}	Reaksi degradasi pada kompartemen udara
P_{3R}	Reaksi degradasi pada kompartemen air

Perhitungan fugasitas akan dilakukan pada sembilan zona, sehingga hasil hitung yang didapat dapat dibandingkan atau divalidasi dengan hasil sampling pada Sembilan titik di waduk. Luas setiap zona ditentukan dengan menggunakan bantuan *Google Earth*. Kedalaman waduk setiap zona didapatkan dari hasil pengukuran lapangan. Model waduk dalam perhitungan fugasitas ini memiliki satu input dan satu output. Besarnya debit yang masuk dan debit yang keluar dari sistem waduk adalah sama. Besarnya waduk pada musim kemarau dan musim hujan dibedakan. Batas dari waduk adalah lereng miring di sekitar waduk.

Pencemar yang masuk melalui input tunggal yaitu melalui Sungai Citarum diasumsikan teraduk sempurna. Skema kompartemen lingkungan yang berada pada Waduk Saguling dapat dilihat pada **Gambar 2**. Ilustrasi model waduk tampak atas dapat dilihat pada **Gambar 3**.

Analisa sensitifitas digunakan untuk mengetahui parameter mana yang memiliki pengaruh signifikan terhadap hasil hitung. Parameter input dalam perhitungan fugasitas, diuji dengan mengubah nilai parameter tersebut sejumlah $\pm 10\%$ dari nilai awal. Koefisien sensitifitas dihitung dengan menggunakan Persamaan

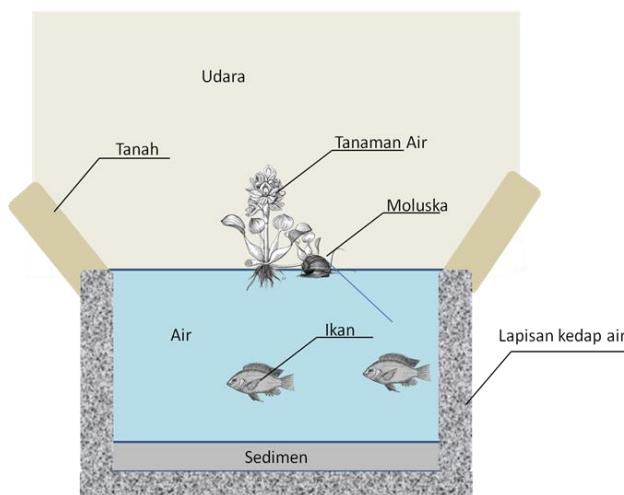
(Jorgensen, 1994 dalam Xu, F.-L., et al.2012) di bawah ini,

$$S = (Y_{1,1} - Y_{0,9}) / (0,2 \times Y)$$

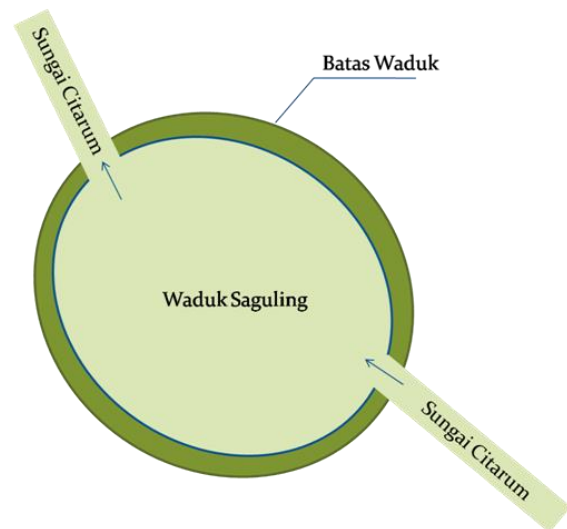
Y adalah output dari hasil hitung. $Y_{1,1}$ adalah output dari hasil hitung dimana input parameter ditambah nilainya sebesar 10% sedangkan $Y_{0,9}$ adalah output dari hasil hitung dimana input parameter dikurangi nilainya sebesar 10%. Output yang dimaksud adalah konsentrasi hasil hitung pada setiap kompartemen (tanah, udara, air, sedimen, ikan, tanaman air, dan moluska). Semakin besar nilai absolut koefisien sensitifitas semakin sensitif parameter tersebut.

Tabel 2. Persamaan neraca massa pada model fugasitas

Kompartemen (1)	Persamaan Neraca Massa (2)	Detail Persamaan Neraca Massa (3)
Tanah	$P_{01} + P_{21} = P_{12} + P_{13} + P_{1R}$	$E_1 + D_{21}.f_2 = (D_{12} + D_{13} + D_{1R}).f_1$
Udara	$P_{02} + P_{32} + P_{12} = P_{20} + P_{23} + P_{21} + P_{2R}$	$G_{02}.C_{02} + D_{32}.f_3 + D_{12}.f_1 = (D_{20} + D_{23} + D_{21} + D_{2R}).f_2$
Air	$P_{03} + P_{13} + P_{43} + P_{23} = P_{32} + P_{34} + P_{30} + P_{3T} + P_{3I} + P_{3K} + P_{3R}$	$G_{03}.C_{03} + D_{13}.f_1 + D_{43}.f_4 + D_{23}.f_2 = (D_{32} + D_{34} + D_{30} + D_{3T} + D_{3I} + D_{3K} + D_{3R}).f_3$
Sedimen	$P_{34} = P_{43} + P_{4R}$	$D_{34}.f_3 = (D_{43} + D_{4R}).f_4$



Gambar 2. Skema kompartemen di Waduk Saguling



Gambar 3. Tampak atas model waduk

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konsentrasi DDT Hasil Sampling

Pengambilan sampel dilakukan pada musim kemarau dan musim hujan. Untuk sampel air pada setiap titik dilakukan 2 kali pengambilan sampel dengan perbedaan kedalaman, yaitu pada permukaan dan pada setengah kedalaman. Apabila pada 1 titik sampling terdapat 1 data yang kosong akibat tidak terdeteksi (misal pada permukaan atau pada setengah kedalaman waduk), maka data kosong tersebut diasumsikan bernilai 1,5 kali dari limit deteksi analisa DDT menggunakan alat gas kromatografi (Smith et al., 2006).

Konsentrasi rata-rata hasil analisa setiap jenis sampel dapat dilihat pada **Tabel 3**. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa DDT masih melebihi baku mutu yang telah ditetapkan oleh pemerintah. Hal ini mengindikasikan bahwa DDT masih intensif digunakan sebagai insektisida pada usaha perkebunan di DAS Citarum.

Nilai aman sedimen berdasarkan *Threshold Effects Concentration* (TEC)

dan *Probable Effects Concentration* (PEC). Nilai TEC dan PEC ini didapatkan melalui studi oleh MacDonald et al., (2000). Jika nilai TEC terlewati maka kualitas pencemaran sedimen tergolong terpolusi moderat, sedangkan jika tidak melewati maka sedimen tidak terpolusi. Apabila konsentrasi pencemar dalam sedimen melebihi nilai PEC maka sedimen dalam keadaan terpolusi berat. Dari hasil analisa sampel sedimen di Waduk Saguling, dapat terlihat bahwa sedimen dalam kondisi terpolusi moderat. Selain dilakukan pengukuran konsentrasi DDT pada sedimen di area waduk, dilakukan juga pengukuran konsentrasi DDT pada sedimen yang terletak di titik outlet waduk. Hasil analisa menunjukkan bahwa konsentrasi pada musim kemarau adalah 0,009 ml/L dan pada musim hujan adalah 0,008 ml/L. Hal ini menunjukkan bahwa telah terjadi akumulasi DDT pada sedimen di area waduk, sehingga konsentrasi DDT yang keluar dari waduk sudah lebih kecil.

Tabel 3. Konsentrasi DDT hasil analisa sampel

Jenis Sampel	Standar Baku Mutu (ppm)	Konsentrasi Pencemar			
		Musim Kemarau	Status	Musim Hujan	Status
Air	0,002 ⁽¹⁾	0,0042	Melewati standar kualitas	0,0029	Melewati standar kualitas
Sedimen	0,0041 ⁽²⁾ 0,062 ⁽³⁾	0,057	Terpolusi moderat	0,051	Terpolusi moderat
Ikan	5 ⁽⁴⁾	0,2072	Memenuhi standar kualitas	0,0178	Memenuhi standar kualitas
Tanaman Air	TD	0,0107	-	0,036	-
Moluska	TD	0,1748	-	0,7466	-

Keterangan:

(1) : PP RI No.82 Tahun 2001

(2) : *Threshold Effect Concentration* (TEC), MacDonald et al., 2000

(3) : *Probable Effects Concentration* (PEC), MacDonald et al., 2000

(4) : *Extraneous Residue Limit* (ERL) (FAO/WHO, 1997)

TD: tidak diketahui

Ikan Nila merupakan jenis ikan yang dominan berada di Waduk Saguling. Dari hasil analisa sampel ikan terlihat bahwa

secara keseluruhan konsentrasi DDT pada musim kemarau lebih tinggi daripada pada musim hujan. Seperti juga dilaporkan pada

penelitian di Danau Paranoa Brasil, residu DDT pada sampel yang diambil pada musim kemarau lebih besar dibanding sampel yang diambil pada musim hujan (Caldas, 1999). Hal ini terjadi karena konsentrasi organoklorin yang tersedia (*bioavailable*) di air Waduk Saguling pada musim kemarau lebih tinggi daripada pada musim hujan. Pada saat musim hujan air waduk banyak mengandung partikulat. DDT akan terabsorpsi pada partikulat, sehingga jumlah yang terlarut akan lebih sedikit daripada di musim kemarau. Dengan melihat ketiga hasil analisa pada sampel air, sedimen, dan ikan, terlihat bahwa konsentrasi terkecil terdapat pada sampel air, dan konsentrasi tertinggi terdapat pada sampel ikan. Sampel ikan memiliki konsentrasi terbesar karena terjadi adanya proses bioakumulasi. Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Sarafiloska dan Jordanoski, 2011.

Eceng Gondok dapat menyerap pencemar DDT dikarenakan pada tanaman tersebut terdapat kandungan lemak sebesar 1,1 % (Mangisah et al., 2009). Pencemar DDT akan terakumulasi dalam jaringan lemak. Pada musim kemarau sampel tanaman mengandung lebih sedikit pencemar dibanding pada musim hujan.

Keong Mas banyak ditemukan menempel pada Eceng Gondok. Pencemar DDT dapat terakumulasi pada jaringan lemak. Keong mas memiliki kandungan lemak sebesar 0,51 % (Dewi, 2012). Menurut data hasil pengamatan konsentrasi pencemar yang terkandung dalam keong mas, dinyatakan dalam satuan mg/kg sampel, pada musim kemarau lebih kecil daripada konsentrasi yang terakumulasi pada musim hujan.

Hasil Perhitungan Konsentrasi Pencemar

Pencemar yang terdapat pada air dapat menguap ke udara, namun dikarenakan keterbatasan alat maka pengecekan konsentrasi organoklorin di udara tidak dapat dilakukan. Pencemar

yang ada di udara dapat turun ke permukaan air dan tanah, melalui deposisi basah dan deposisi kering. Sebagian kecil konsentrasi lainnya terbawa aliran udara keluar dari sistem waduk. Sejumlah kecil pencemar yang terdapat pada tanah dapat menguap kembali ke atmosfer, atau dapat juga terdegradasi oleh mikroba yang terdapat di tanah secara aerob. Pencemar organoklorin akan terikat kuat pada tanah, sehingga konsentrasi yang terbawa oleh aliran air (terlarut) akan sangat kecil. Hal ini dikarenakan organoklorin memiliki nilai Koc yang cukup besar. Pemaparan tersebut merupakan gambaran singkat mengenai daur hidup yang terjadi pada organoklorin di Waduk Saguling.

Sebelum dapat mengetahui konsentrasi pencemar di setiap kompartemen lingkungan yang ada pada Waduk Saguling, maka dilakukan perhitungan nilai fugasitas pada setiap kompartemen. Nilai tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4**. Hasil perhitungan fugasitas disajikan dalam nilai rata-rata dari semua zona. Dari tabel tersebut terlihat nilai fugasitas terbesar terdapat pada kompartemen air. Hal ini dipengaruhi oleh karakteristik DDT yang tidak mudah larut dalam air, sehingga memiliki kecenderungan tinggi untuk berpindah ke kompartemen lain.

Besarnya massa yang berpindah dari suatu kompartemen ke kompartemen lainnya dapat dilihat pada **Gambar 4**. Nilai-nilai yang tertera pada skema tersebut merupakan nilai rata-rata pada dua musim dan sembilan zona di waduk. Dari hasil perhitungan (lihat **Gambar 4**), rata-rata laju penguapan DDT dari tanah dari semua zona di dua musim adalah $6,123 \cdot 10^{-13}$ mol per jam, laju penguapan DDT dari media air adalah $6,7 \cdot 10^{-6}$ mol/jam, laju absorpsi pencemar ke dalam sedimen adalah $1,77 \cdot 10^{-2}$ mol/jam, konsentrasi pencemar yang masuk ke waduk dari tanah akibat proses perlindian sebesar $3,6 \cdot 10^{-15}$ mol/jam, laju biotransformasi ke ikan sebesar $4,1 \cdot 10^{-6}$ mol/jam, laju biotransformasi ke tanaman air sebesar

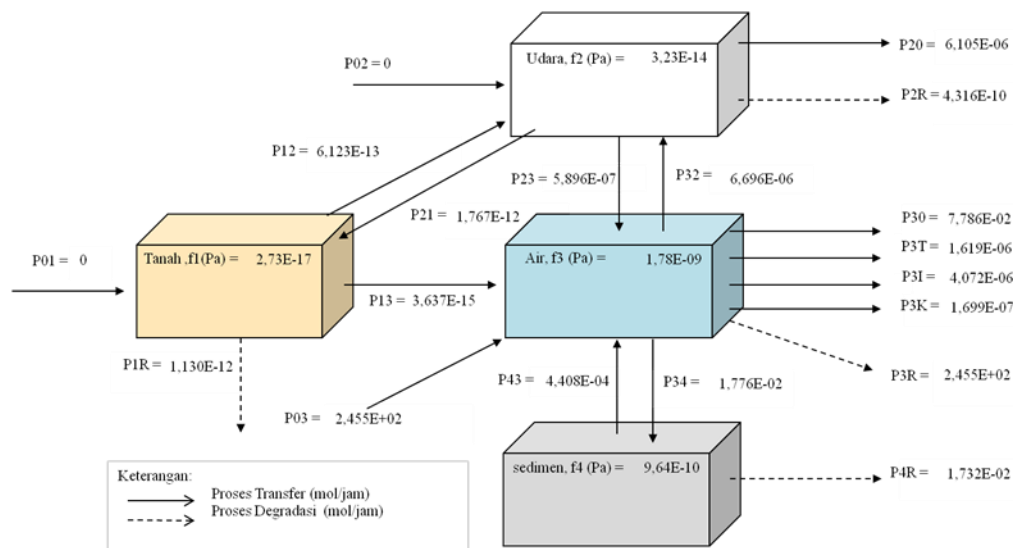
$1,6 \cdot 10^{-6}$ mol/jam, laju biotransformasi ke moluska sebesar $1,7 \cdot 10^{-7}$ mol/jam, dan laju transformasi pencemar akibat degradasi di media air sebesar 245 mol/jam.

Dari hasil hitung dapat dilihat bahwa pencemar yang terdapat pada air dapat terikat cukup banyak kedalam sedimen. Pencemar akan terikat pada partikulat dalam air dan partikulat tersebut akan mengendap ke dalam sedimen. Namun pencemar yang terdapat di sedimen dapat kembali ke air, dikarenakan adanya proses difusi. Sebagian kecil pencemar akan terakumulasi ke dalam biota yang ada di Waduk Saguling. Biota yang ada di waduk di asumsikan hanya Ikan Nila, Eceng gondok, dan Keong Mas. Sebagian besar lainnya terdegradasi dan terbawa aliran air keluar dari waduk.

Dengan mengetahui nilai fugasitas dan kapasitas fugasitas, maka konsentrasi pencemar DDT pada setiap kompartemen dapat dihitung. Hasil hitung konsentrasi pada setiap kompartemen dapat dilihat pada **Tabel 5**. Nilai pada tabel tersebut merupakan nilai rata-rata dari kesembilan zona dan dari dua musim. Dari hasil hitung tersebut dapat dilihat bahwa konsentrasi DDT tertinggi ada pada sedimen, lalu pada biota perairan waduk, air, tanah, dan udara. Hal ini dikarenakan karakteristik utama dari DDT yang mudah terarbsorpsi pada senyawa organik. Konsentrasi DDT pada udara akan sangat kecil dikarenakan adanya reaksi degradasi oleh sinar ultraviolet dan radikal hidroksil.

Tabel 4. Nilai fugasitas setiap kompartemen

Kompartemen	Fugasitas (Pa)	
	Musim Kemarau	Musim Hujan
Tanah	3,70E-17	2,24E-17
Udara	4,04E-14	2,95E-14
Air	2,23E-09	1,62E-09
Sedimen	1,20E-09	8,78E-10



Gambar 4. Skema fugasitas pencemar DDT

Tabel 5. Konsentrasi rata-rata DDT di berbagai kompartemen lingkungan berdasarkan hasil perhitungan

Kompartemen	Konsentrasi (ppm)
Tanah	4,5E-11
Udara	9,1E-12
Air	6,9 E-04
Sedimen	0,99
Ikan	0,01386
Tanaman Air	0,00516
Moluska	0,00201

Validasi

Keakuratan hasil perhitungan dapat diketahui dengan membandingkan konsentrasi hasil hitung dengan hasil analisa dari sampling yang dilakukan. Perbandingan konsentrasi hasil hitung dan hasil analisa untuk setiap kompartemen dapat dilihat pada **Tabel 6**. Hasil hitung pada tabel tersebut merupakan rata-rata dari semua zona dan dua musim. Hasil hitung kompartemen air, ikan, tanaman air, dan moluska secara umum menunjukkan bahwa hasil yang cukup dekat dengan hasil analisa sampling. Perbedaan yang cukup jauh antara hasil hitung dan hasil analisa terlihat pada kompartemen sedimen. Konsentrasi DDT pada sedimen merupakan hasil akumulasi selama bertahun-tahun sehingga cukup sulit untuk mengestimasi konsentrasi pencemar pada sedimen. Perhitungan konsentrasi DDT

pada sedimen menggunakan data-data dalam rentang waktu selama 1 tahun.

Ketidaksamaan antara hasil hitung dan hasil analisa dapat disebabkan oleh banyak hal. Pada penelitian ini tidak dilakukan pengukuran konsentrasi pencemar pada sungai-sungai kecil di sekitar waduk, hanya pada sungai Citarum saja, sehingga hasil hitung konsentrasi pencemar pada air dapat lebih kecil.

Asumsi-asumsi angka yang digunakan dalam perhitungan jelas dapat mempengaruhi hasil hitung. Proses-proses alam yang sangat kompleks yang tidak dapat dituangkan kedalam persamaan juga dapat mempengaruhi hasil hitung. Pengambilan sampel komposit juga dapat mempengaruhi hasil hitung, sehingga hasil yang didapat kurang representatif untuk waduk yang sebenarnya.

Tabel 6. Perbandingan konsentrasi antara hasil analisa sampel dan hasil hitung

Kompartemen	Konsentrasi DDT Hasil Analisa (mol/m ³)								
	Zona 1B	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9
Air	0,014	0,015	0,013	0,008	0,007	0,008	0,010	0,010	0,043
Sedimen	0,190	0,214	0,171	0,175	0,240	0,146	0,437	0,422	0,275
Ikan	4,7E-04	3,7E-05	3,8E-04	5,2E-04	1,6E-04	3,1E-04	1,8E-04	3,0E-05	-
Tanaman Air	6,5E-05	3,0E-05	6,2E-05	3,6E-05	3,2E-05	8,5E-05	9,7E-05	4,0E-05	8,2E-05
Moluska	4,8,E-04	1,9,E-04	4,8,E-04	2,9,E-03	2,0,E-03	1,5,E-04	5,7,E-04	8,2,E-03	-
Kompartemen	Konsentrasi DDT Hasil Hitung (mol/m ³)								
	Zona 1B	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9
Air	0,095	0,188	0,139	0,018	0,048	0,033	0,023	0,037	0,034
Sedimen	0,005	0,010	0,007	0,001	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002
Ikan	5,7E-05	1,2E-04	8,5E-05	8,8E-06	2,9E-05	1,9E-05	1,3E-05	2,3E-05	1,8E-05
Tanaman Air	1,8E-05	3,7E-05	2,7E-05	2,8E-06	9,0E-06	5,9E-06	4,1E-06	7,3E-06	5,6E-06
Moluska	8,2E-06	1,7E-05	1,2E-05	1,3E-06	4,2E-06	2,7E-06	1,9E-06	3,4E-06	2,6E-06

Analisa Sensitifitas

Dari 64 parameter yang dihitung, terdapat 32 parameter yang memiliki sensitifitas lebih besar dari 0,5. Hasil hitung koefisien sensitifitas dapat dilihat pada **Tabel 7**. Dari tabel perhitungan diatas terlihat bahwa parameter yang paling berpengaruh dalam perhitungan fugasitas organoklorin adalah nilai Log Kow dan Log Koc. Hal ini dikarenakan organoklorin bersifat lipofilik, sehingga distribusinya dilingkungan sangat berpengaruh dari tendensinya untuk berikatan dengan

senyawa organik atau jaringan lemak. Faktor lain yang ikut berpengaruh dalam perhitungan fugasitas adalah suhu, faktor BCF, konten lemak biota, konten organik, dan properti fisik kimia waduk. Dengan mengetahui faktor dominan dalam daur hidup DDT di Waduk Saguling, dapat disimpulkan bahwa buangan DDT ke badan air dapat langsung mempengaruhi seluruh kompartemen waduk. Hal serupa diutarakan dari penelitian oleh Wang et al., (2012).

Tabel 7. Koefisien sensitifitas dari parameter model fugasitas

Parameter	Output						
	tanah	udara	air	sedimen	ikan	tanaman air	moluska
Log Kow	-	-	-	-	19,593	19,593	19,593
Log Koc	-8,061	-15,897	-	-	-15,897	-15,897	-15,897
Tekanan Uap fasa liquid, PL	0,822	-	-	-	-	-	-
Berat Molekul	-1,010	-1,010	-1,010	-1,010	-1,010	-1,010	-1,010
Densitas	1,111	1,111	1,111	1,111	1,111	1,111	1,111
waktu paruh-air	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,900
waktu paruh-sedimen	-	-	-	0,956	-	-	-
waktu paruh-tanah	0,694	-	-	-	-	-	-
Faktor biokonsentrasi pada ikan	-	-	-	-	1,000	-	-
Faktor biokonsentrasi pada tanaman air	-	-	-	-	-	1,000	-
Faktor biokonsentrasi pada keong mas	-	-	-	-	-	-	1,000
Luas area tiap zona lokasi di danau	-	-	-1,010	-1,010	-1,010	-1,010	-1,010
Luas area danau	-0,914	-0,914	-	-	-	-	-
Ketebalan tanah	-0,697	-	-	-	-	-	-
Kedalaman air tiap zona lokasi di danau	-1,010	-1,010	-1,010	-1,010	-1,010	-1,010	-1,010
Ketebalan sedimen	-	-	-	-0,965	-	-	-
Densitas partikel tersuspensi	-1,010	-1,010	-	-	-1,010	-1,010	-1,010
Suhu udara di atas waduk	-	-1,015	-	-	-	-	-
Laju alir udara masuk ke system waduk	-0,914	-0,914	-	-	-	-	-
Laju alir air masuk ke system waduk musim kemarau	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Fraksi volume partikel tersuspensi di dalam air	-	-	0,976	-	-	-	-
konten lemak Ikan Nila	-	-	-	-	1,000	-	-
konten lemak Keong Mas	-	-	-	-	-	-	1,000
konten lemak Eceng Gondok	-	-	-	-	-	1,000	-
konten organik karbon partikel tersuspensi	-1,010	-1,010	-	-	-1,010	-1,010	-1,010
Konstanta gas	-	-1,015	-	-	-	-	-
Koefisien transfer massa udara diatas permukaan air	0,913	0,913	-	-	-	-	-
Fraksi volume aerosol	-0,824	-	-	-	-	-	-
Panjang jalur difusi diatas permukaan tanah	-1,009	-	-	-	-	-	-
Laju deposisi sedimen	-	-	-	1,000	-	-	-

Keterangan:

- : nilai S (koefisien sensitifitas) kurang dari 0,5

KESIMPULAN

Pemakaian pestisida sebagai pembasmi hama di DAS Citarum telah berakibat hadirnya sejumlah konsentrasi DDT di Waduk Saguling. Konsentrasi organoklorin DDT pada air waduk masih melebihi standar baku mutu yang ditetapkan oleh Peraturan Pemerintah No. 82 Tahun 2001. Nilai fugasitas rata-rata dari seluruh zona waduk pada kedua musim untuk media air adalah $1,78 \cdot 10^{-9}$ Pa, media sedimen adalah $9,64 \cdot 10^{-10}$ Pa, media tanah adalah $2,73 \cdot 10^{-17}$ Pa, dan media udara adalah $3,23 \cdot 10^{-14}$ Pa. Nilai fugasitas terbesar terdapat pada kompartemen air. Konsentrasi DDT pada kompartemen udara $9,1 \cdot 10^{-12}$ ppm, pada tanah $4,5 \cdot 10^{-11}$ ppm, pada air $6,9 \cdot 10^{-4}$ ppm, pada sedimen 0,99 ppm, pada ikan 0,013 ppm, pada tanaman air 0,005 ppm, dan pada moluska 0,002 ppm.

Pemakaian DDT yang telah bertahun-tahun mengakibatkan adanya akumulasi pada sedimen di Waduk Saguling dan kondisinya dalam keadaan terpolusi moderat. Daur hidup DDT di waduk sangat dipengaruhi oleh nilai Kow dan Koc. Model fugasitas berguna dalam memprediksi distribusi penyebaran DDT di setiap kompartemen lingkungan di Waduk Saguling.

Penelitian selanjutnya sebaiknya dilakukan pengukuran konsentrasi dan debit di sungai-sungai kecil yang dapat menjadi input bagi Waduk Saguling.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kepada Ibu Katharina Oginawati yang telah memberikan arahan dalam penelitian ini. Penelitian ini dibiayai oleh DIKTI.

Daftar Pustaka

Caldas E.D., Coelho R., Souza L.C.K.R., dan Ciba S.C. (1999). Organochlorine Pesticide in Water, Sediment, and Fish of Paranoa Lake of Brazilia Brazil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 62(2), 199-206.

Cioce, D. (2008). The Patterns of Distribution of Organochlorine Pesticides in Sediment in the Letort Spring Run, Cumberland

County, Pennsylvania. Department of Environmental Studies: Dickinson College

Dewi, Y.P. (2012). Perubahan Kandungan Asam Lemak dan Kolesterol Keong Mas (*Pomacea canaliculata*) Akibat Proses Pengolahan. Tugas Akhir Sarjana: Departemen Teknologi Hasil Perairan, Institut Pertanian Bogor.

Li, Q., Zhu T., Qiu X., Hu J., dan Vighi M. (2006). Evaluating The Fate Of P,P'-DDT In Tianjin, China Using A Non-Steady-State Multimedia Fugacity Model. *Ecotoxicology And Environmental Safety* 63, 196-203.

Mangisah, I., Sukamto, B. dan Nasution, M H. (2009). Implementation of Fermented Eceng Gondok In Duck Ration. *Journal of the Indonesian Tropical Animal Agriculture*, 34 (2). pp. 127-133. ISSN 0410-6320

MacDonald, D.D., C.G. Ingersoll, dan T.A. Berger. (2000). Development and evaluation of consensus based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 39:20-31.

Mackay, D. (2001). Multimedia Environmental Models. Boca Raton: CRC Press LLC

Mackay, D., Shiu, W.Y., Ma, K.C., dan Lee, S.C. (2006). Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals, Volume IV, Nitrogen and Sulfur Containing Compounds and Pesticides. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

Rahmawati, S. I. (2012). Distribusi Organoklorin Pada Air, Sedimen, Moluska Dan Ikan Di Waduk Saguling. Tugas Akhir Sarjana: Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Retno, R. (2012). Analisis Resiko Organoklorin Pada Manusia Pengonsumsi Ikan Nila (*Oreochromis Niloticus*) Dari Waduk Saguling. Tugas Akhir Sarjana: Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Riwinta, R. (2012). Bioakumulasi Insektisida Organoklorin Pada Tanaman Air Di Waduk Saguling. Tugas Akhir Sarjana: Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Rochmanti. (2009). Identifikasi Penggunaan Organoklorin di Daerah Aliran Sungai Citarum Hulu, Desa Kertasari. Tugas Akhir Sarjana: Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Sarafiloska, E. V., dan Jordanoski, M. (2011). Study of Organochlorine Pesticide Residues In Water, Sediment And Fish Tissue In Lake Ohrid (Macedonia/Albania). *Macedonian*

- Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 163–179.
- Smith, D., Silver, E., dan Harnly, M. (2006). Environmental Samples Below The Limits Of Detection – Comparing Regression Methods To Predict Environmental Concentrations. California Department of Health Services, California.
- Wang, C., Feng, Y., Sun, Q., Zhao, S., Gao, P., dan Li, B. L. (2012). A multimedia fate model to evaluate the fate of PAHs in Songhua River, China. *Environmental Pollution*, 164 : 81-88
- Wibowo, N. (2010). Analisis Kandungan Endosulfan Pada Air, Sedimen, Dan Ikan Serta Potensi Akumulasi Pada Organ Hati (Studi Kasus Sungai Citarum Hulu). Tugas Akhir Sarjana: Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
- Xu, F.L., Qin N. , Zhu Y., He W., Kong X.Z., Barbour M. T., He Q.S., Wang Y., Ou-Yang H.L., dan Tao S. (2012) : Multimedia fate modeling of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Lake Small Baiyangdian, Northern China. *Ecological Modelling*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.04.010>

