

Kajian Pencemaran Air Tanah Dangkal Akibat Lindi Di Sekitar Tpa Supit Urang Malang

ASSESSMENT OF GROUNDWATER CONTAMINATION BY LEACHATE AROUND SUPIT URANG LANDFILL, MALANG

*¹ Listari Husna Fitri dan ² Emenda Sembiring

Program Studi Magister Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha 10 Bandung 40132

Email: ¹listarihusnafitri@students.ac.id, ²emenda@fts1.itb.ac.id

Abstrak: Lindi merupakan salah satu masalah yang diakibatkan pengurugan sampah ke TPA. Lindi adalah limbah cair dari dekomposisi sampah di TPA yang dapat merembes ke dalam tanah sehingga dapat mencemari air tanah dangkal dan memberikan dampak bagi masyarakat yang menggunakan air tersebut. Penelitian ini dilakukan di TPA Supit Urang dan RW 5 Kelurahan Mulyorejo, Malang dengan tujuan untuk mengidentifikasi parameter klorida dan COD yang terkandung di dalam lindi dan air sumur penduduk serta untuk menguji model Domenico dan Robbins (1985) dan Domenico (1987) dalam memprediksi penyebaran kontaminan di dalam air tanah di Kelurahan Mulyorejo. Dengan menggunakan model Domenico dan Robbins (1985) dan Domenico (1987) yang dikembangkan menggunakan MATLAB, konsentrasi prediksi model didapatkan. Dari analisis yang dilakukan, konsentrasi BOD (405,003 mg/L), COD (782 mg/L) dan TKN (391,51 mg/L) pada lindi sudah melebihi baku mutu yang berlaku. Nilai COD yang terukur pada air tanah dari sumur warga dan sumur pantau juga sudah melebihi baku mutu yang berlaku, sedang konsentrasi klorida di dalam air tanah masih berada pada baku mutu yang berlaku. Simulasi model 1 dan 2 dimensi klorida memberikan hasil bahwa model kurang bisa memprediksi persebaran kontaminan sedangkan model 1 dan 2 dimensi COD memberikan hasil bahwa model dapat memprediksi persebaran kontaminan di daerah RW 5 Mulyorejo.

Kata kunci: TPA Supit Urang, lindi, air tanah, domenico, robbins

Abstract: Leachate is one of the problems caused by waste dumping to landfill. Leachate as liquid from decomposition of waste in landfill will infiltrate to soil so it can contaminate ground water and will make an impact for people who use the ground water. This study was conducted at Supit Urang Landfill and RW 5 Kelurahan Mulyorejo, Malang, with aim to identify the chloride and COD contained in leachate and groundwater and to test Domenico and Robbins (1985) and Domenico (1987) model in predicting contaminant spreading in groundwater. Using Domenico and Robbins (1985) and Domenico (1987) models were developed using MATLAB, concentration of model predictions was obtained. From the analysis, BOD concentrations (405,003 mg/L), COD (782 mg/L) and TKN (391,51 mg/L) in leachate have exceeded the quality standards. The COD concentration in groundwater from wells and monitoring wells have also exceeded the quality standards, while the concentration of chloride in groundwater is still in the quality standard. 1 and 2 dimensional chloride and COD models simulations give results that models can not predict the spread of contaminant in RW 5 Mulyorejo.

Keywords: Supit Urang Landfill, leachate, ground water, domenico, robbins

PENDAHULUAN

Berdasarkan informasi dari Kementerian Lingkungan Hidup RI tahun 2015, diketahui bahwa 90% kabupaten/kota di Indonesia masih menerapkan TPA *open dumping* (<http://www.menlh.go.id/rangkaian-hlh-2015-dialog-penanganan-sampah-plastik/>). TPA dengan sistem *open dumping* yang tidak memiliki pelapis dasar memiliki kemungkinan besar akan menimbulkan masalah seperti merembesnya lindi ke dalam air tanah sehingga mengakibatkan pencemaran air tanah (Han dkk., 2016). Dari penelitian yang dilakukan Brown dkk. tahun 1991 (Qasim and Chiang, 1994) dalam menginvestigasi toksisitas akut dan genetik dari lindi sampah

kota, diketahui lindi dari sampah kota mengandung banyak zat berbahaya yang sama dengan zat berbahaya yang ditemukan pada lindi dari sampah limbah bahan berbahaya dan beracun (B3).

Berbagai penelitian mengenai pencemaran lindi yang disebabkan oleh TPA telah dilakukan. Penelitian tersebut antara lain penelitian dilakukan oleh Han dkk. (2014) di sekitar TPA Kota Zhoukou, Provinsi Henan, China, Smahi dkk. (2013) di sekitar *Casablanca Landfill* Maroko dan El-Salam dan Abu-Zuid pada TPA Borg El-Arab di Mesir. Berdasarkan ketiga penelitian tersebut diketahui bahwa terdapat pencemaran yang terjadi pada air tanah di sekitar TPA yang diindikasikan akibat dari merembesnya lindi ke dalam tanah.

Hingga saat ini diketahui terdapat beberapa solusi analitik yang telah dikembangkan dan dijadikan rujukan bagi perkembangan persamaan transport kontaminan dalam media tanah. Solusi analitik pada umumnya terbatas pada kondisi yang ideal, seperti arah aliran yang seragam, media yang homogen serta reaksi kontaminan tanah yang relatif sederhana, namun sangat berguna sebagai prakiraan pertama atas penyebaran kontaminan dan digunakan sebagai verifikasi model atau solusi numerik. Salah satu solusi analitik tersebut adalah Solusi Domenico dan Robbins (1985) dan solusi Domenico (1987). Solusi Domenico dan Robbins (1985) dan Domenico (1987) merupakan solusi analitik untuk sumber kontaminan dengan injeksi menerus yang berbentuk bidang (*finite planar source*) seperti pada kebocoran tangki bawah tanah yang berisi bahan beracun dan berbahaya dan perembesan terus menerus dari lindi TPA (Notodarmojo, 2005). Solusi ini digunakan untuk memprediksi persebaran kontaminan pada penelitian ini.

Penelitian yang dilakukan di TPA Supit Urang dan RW 5 Kelurahan Mulyorejo Malang ini bertujuan untuk mengidentifikasi parameter klorida dan COD terkandung di dalam lindi dan air tanah dari air sumur penduduk di Kelurahan Mulyorejo dan menguji model Domenico dan Robbins (1985) dan Domenico (1987) dalam memprediksi penyebaran kontaminan di dalam air tanah di Kelurahan Mulyorejo.

METODOLOGI PENELITIAN

Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan berbagai referensi terkait dengan penelitian ini yang bersumber dari buku teks, jurnal dan penelitian-penelitian sebelumnya.

Pengumpulan Data Sekunder

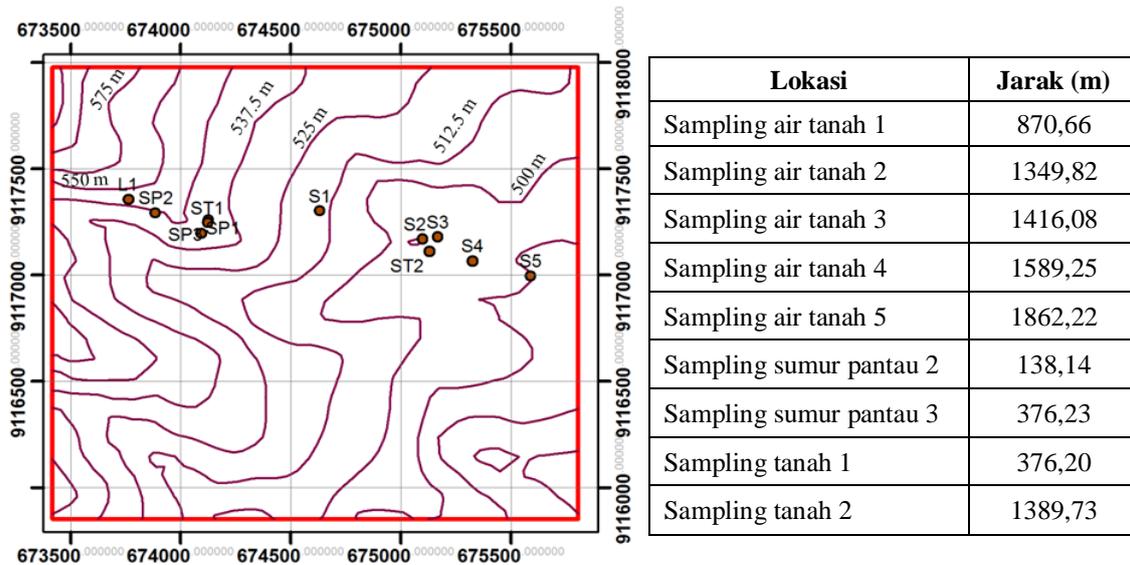
Pengumpulan data sekunder bertujuan untuk mengumpulkan data yang mendukung pengolahan data primer pada penelitian ini. Data sekunder mengenai kondisi lokasi penelitian didapatkan dari instansi-instansi terkait.

Penentuan Titik Sampling

Sampling tanah direncanakan dilakukan di TPA Supit Urang Malang dan di halaman salah satu rumah warga RW 5 Kelurahan Mulyorejo, sampling lindi akan dilakukan pada saluran lindi TPA Supit Urang sebelum masuk ke dalam kolam pengumpul lindi, kemudian akan dilakukan sampling air tanah dangkal pada sumur pantau TPA dan 5 sumur warga yang berada di RW 5 Kelurahan Mulyorejo yang searah dengan arah aliran air tanah. Lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada **Gambar 1** dan jarak pengambilan sampel air tanah dan tanah dari titik pengambilan lindi dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Pengambilan Sampel

Sampel tanah diambil dengan metode *undisturbed soil sampling*, sedangkan sampling lindi akan menggunakan metode *grab sampling* yang diambil pada saluran lindi sebelum masuk ke dalam kolam pengumpul lindi, sedangkan sampel air tanah akan diambil dengan mengacu pada SNI 6989.58:2008.



Gambar 1 Lokasi titik sampling

Tabel 1 Jarak lokasi sampling terhadap titik pengambilan lindi

Analisis Laboratorium dan Pengolahan Data

Sampel tanah yang diambil dianalisis di Laboratorium Mekanika Tanah Institut Teknologi Bandung untuk mengetahui karakteristik sifat fisik tanah meliputi berat jenis tanah, porositas dan distribusi komposisi tanah. Sampel lindi dan air tanah dianalisis di Laboratorium Air Institut Teknologi Bandung meliputi pengukuran parameter Cl⁻ dan COD dari sampel lindi dan air tanah. Analisis untuk parameter klorida menggunakan SNI 06-6989.19-2009 Bagian 19: Cara uji klorida (Cl⁻) dengan metode argentometri sedangkan parameter COD akan dianalisis menggunakan SNI 6989.73:2009 Bagian 73: Cara uji Kebutuhan Oksigen Kimiawi (*Chemical Oxygen Demand/COD*) dengan refluks tertutup secara titrimetri.

Setelah didapatkan hasil analisis laboratorium, hasil sampel tanah, lindi dan air tanah akan disajikan dalam bentuk penjelasan deskriptif dan dibandingkan dengan baku mutu yang berlaku. Kualitas air lindi akan dibandingkan dengan baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor p.59/Menlhk/ Setjen/Kum.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah sedangkan kualitas air tanah akan dibandingkan dengan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air. Selain itu juga akan dianalisis faktor-faktor yang dapat mempengaruhi kualitas lindi dan air tanah yang didapatkan.

Simulasi Model Analitik

Penentuan kecepatan air tanah akan dilakukan menggunakan persamaan yang dibuat oleh Pinder dkk. (1981) dengan melakukan pengukuran berdasarkan perbedaan tinggi muka air pada tiga sumur yang terkoneksi membentuk segitiga. Selanjutnya dengan menggunakan kecepatan air tanah yang diasumsikan sebagai kecepatan kontaminan, dilakukan simulasi menggunakan solusi analitik Domenico dan Robbins (1985) dan Domenico (1987) pada 1 dan 2 dimensi. Persamaan untuk solusi analitik Domenico dan Robbins (1985) untuk kontaminan konservatif adalah sebagai berikut (Domenico dan Schwartz, 1990):

$$C_{(x,y,z)} = \frac{C_0}{8} \operatorname{erfc} \left[\frac{(x-vt)}{2(\alpha_x vt)^{1/2}} \right] \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{(y+Y/2)}{2(\alpha_y x)^{1/2}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{(y-Y/2)}{2(\alpha_y x)^{1/2}} \right] \right\} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{(z+Z/2)}{2(\alpha_z x)^{1/2}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{(z-Z/2)}{2(\alpha_z x)^{1/2}} \right] \right\} \quad (1)$$

Sedangkan konsentrasi pada sumbu x, dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Domenico dan Schwartz, 1990):

$$C_{(x,0,0)} = \frac{C_0}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{(x-vt)}{2(\alpha_x vt)^{1/2}} \right] \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{Y}{4(\alpha_y x)^{1/2}} \right] \operatorname{erf} \left[\frac{Z}{4(\alpha_z x)^{1/2}} \right] \right\} \quad (2)$$

Untuk kontaminan non konservatif yang mengalami degradasi atau peluruhan seperti reaksi orde pertama, maka digunakan solusi Domenico (1987) sebagai berikut (Domenico dan Schwartz, 1990):

$$C_{(x,y,z,t)} = \left(\frac{C_0}{8} \right) \exp \left\{ \left(\frac{x}{2\alpha_x} \right) \left[1 - \left(1 + \frac{4\lambda\alpha_x}{v} \right)^{1/2} \right] \right\} \operatorname{erfc} \left[\frac{x-vt (1+4\lambda\alpha_x/v)^{1/2}}{2(2\alpha_x vt)^{1/2}} \right] \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{(y+Y/2)}{2(\alpha_y x)^{1/2}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{(y-Y/2)}{2(\alpha_y x)^{1/2}} \right] \right\} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{(z+Z/2)}{2(\alpha_z x)^{1/2}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{(z-Z/2)}{2(\alpha_z x)^{1/2}} \right] \right\} \quad (3)$$

Sedangkan konsentrasi pada sumbu x, dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Domenico dan Schwartz, 1990):

$$C_{(x,0,0,t)} = \left(\frac{C_0}{2} \right) \exp \left\{ \left(\frac{x}{2\alpha_x} \right) \left[1 - \left(1 + \frac{4\lambda\alpha_x}{v} \right)^{1/2} \right] \right\} \operatorname{erfc} \left[\frac{x-vt (1+4\lambda\alpha_x/v)^{1/2}}{2(2\alpha_x vt)^{1/2}} \right] \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{Y}{4(\alpha_y x)^{1/2}} \right] \operatorname{erf} \left[\frac{Z}{4(\alpha_z x)^{1/2}} \right] \right\} \quad (4)$$

dimana: C = konsentrasi kontaminan pada titik x dan waktu t, C₀ = konsentrasi kontaminan pada titik sumber, v = kecepatan air tanah yang sudah dikoreksi dengan faktor retardasi (m/tahun), λ = konstanta laju degradasi, t = waktu (tahun), Y = lebar sumber pencemar (m), Z = proyeksi kedalaman sumber terhadap akuifer (m), α_x = dispersivitas longitudinal (m), α_y = dispersivitas transversal (m), α_z = dispersivitas vertikal (m), x = jarak horizontal dari sumber dalam arah aliran tanah, y = jarak dari titik tengah sumber pencemar tegak lurus arah aliran

Dari hasil konsentrasi model yang didapatkan menggunakan *software* MATLAB, dilakukan uji sensitivitas untuk mengetahui parameter yang memiliki pengaruh terhadap model. Nilai sensitivitas dapat dihitung dengan persamaan 5 (Shih dan Rong, 2001).

$$S = \left| \left(\frac{df}{f} \right) \left(\frac{x}{dx} \right) \right| \quad (5)$$

dimana x adalah nilai *baseline input* dan f adalah nilai *model output*, sedangkan dx dan df adalah selang antara *input* dan *output* terbesar dan terkecil.

Setelah itu, dilakukan pengkalibrasian model dengan membandingkan hasil dari model yang telah disesuaikan asumsinya berdasarkan analisis sensitivitas dengan data observasi yang ada. Kalibrasi dapat dilakukan dengan menghitung nilai *Root Means Square of Errors* (RMSE), seperti pada persamaan 6 (Notodarmojo, 2005).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obsi} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (6)$$

dimana X_{obs} merupakan nilai observasi sedangkan X_{model} merupakan nilai dari model yang dilakukan.

Tahapan selanjutnya adalah tahapan validasi model, dimana dilakukan dengan cara membandingkan model yang telah dikalibrasi dengan data lapangan. Uji validasi dapat dilakukan dengan menghitung nilai chi kuadrat dari nilai-nilai model dan observasi. Persamaan untuk menghitung chi kuadrat dapat dilihat pada persamaan 7 (Schnoor, 1996).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{\hat{y}_i} \right) \quad (7)$$

dimana χ^2 adalah nilai chi kuadrat, y_i adalah nilai observasi sedangkan \hat{y}_i merupakan nilai model yang didapatkan.

Hipotesis pada uji chi kuadrat ini adalah:

H_0 = nilai konsentrasi model sama dengan nilai konsentrasi di lapangan

H_1 = nilai konsentrasi model tidak sama dengan nilai konsentrasi di lapangan

Nilai H_0 akan diterima jika nilai chi kuadrat lebih kecil dari nilai chi kuadrat pada tabel dengan derajat kebebasan dan tingkat kepercayaan tertentu. Derajat kebebasan dapat dihitung dengan rumus $n-1$ dimana n adalah banyaknya data pada kategori observasi dan model.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Sampel Tanah

Berdasarkan **Tabel 2** diketahui bahwa nilai permeabilitas tanah TPA adalah sebesar $1,884 \times 10^{-6}$ cm/detik atau $1,628 \times 10^{-3}$ m/hari. Pengukuran permeabilitas yang menggunakan *falling head permeability test* merupakan uji yang juga digunakan untuk menentukan nilai konduktivitas hidrolis, sehingga dapat diasumsikan bahwa nilai permeabilitas yang didapatkan merupakan nilai konduktivitas hidrolis dari tanah di daerah tersebut. Selain itu, berdasarkan segitiga tekstur tanah, dengan *particle size distribution* tanah TPA dan tanah dari rumah warga, diketahui bahwa tanah TPA dan tanah dari rumah warga merupakan tanah jenis lempung liat berdebu. Nilai konduktivitas hidrolis untuk kedua jenis tanah lempung liat berdebu berdasarkan United States Department of Agriculture (2013) diketahui adalah $1,41 - 4,23 \mu\text{m/detik}$ atau $0,122 - 0,365$ m/hari.

Tabel 2. Hasil analisis karakteristik tanah

Karakteristik Tanah	Sampel 1 (TPA Supit Urang)	Sampel 2 (Rumah Bapak Sunari)
Permeabilitas (cm/detik)	$1,884 \times 10^{-6}$	-
Kadar air (%)	44,18	54,40
Densitas basah (t/m^3)	1,59	1,56
Densitas kering (t/m^3)	1,10	1,01
<i>Specific gravity</i>	2,56	2,54
Porositas	0,57	0,60
<i>Particle size distribution</i>		
<i>Gravel</i> (%)	0	0
<i>Sand</i> (%)	18	12
<i>Silt</i> (%)	55	59
<i>Clay</i> (%)	27	29

Analisis Sampel Lindi

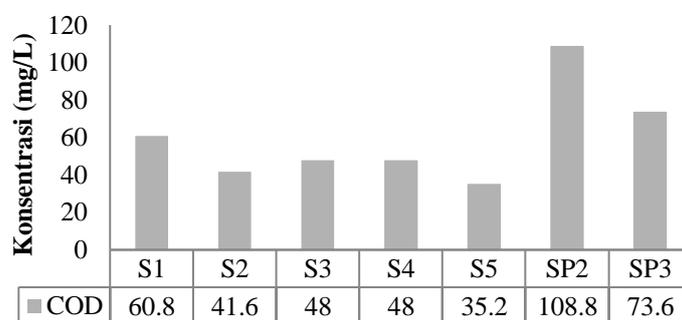
Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan terhadap sampel dapat dilihat bahwa nilai konsentrasi parameter BOD, COD dan TKN sudah melebihi baku mutu yang ditetapkan pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor p.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016. Hasil analisis sampel lindi dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil analisis karakteristik tanah

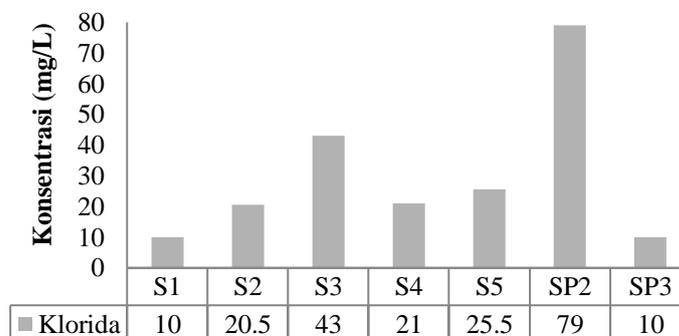
Parameter	Satuan	Nilai	Baku mutu
pH	-	8,317	6-9
BOD	mg/L	405,003	150
COD	mg/L	782	300
TSS	mg/L	88,667	100
TKN	mg/L	391,51	60
Merkuri	mg/L	9×10^{-6}	0,005
Kadmium	mg/L	< 0,001	0,1
Klorida	mg/L	1605	-
TDS	mg/L	6064	-

Analisis Sampel Air Tanah

Berdasarkan **Gambar 2** dapat dilihat, penurunan nilai konsentrasi COD dari titik S1 dan S2 yaitu 60,8 mg/L menjadi 41,6 mg/L, namun terjadi peningkatan konsentrasi COD pada titik S3 dan S4 yaitu menjadi 48 mg/L dan kembali menurun pada titik S5 yaitu sebesar 35,2 mg/L. Peningkatan pada titik S3 ini dapat dikarenakan kondisi sumur yang berada sangat dekat yaitu kurang lebih 1 m dengan kloset yang digunakan oleh pemilik rumah. Pipa air buangan yang dibuat oleh pemilik rumah bisa saja mengalami kebocoran dan mencemari tanah dan air tanah yang dapat meningkatkan konsentrasi COD di air sumur rumah tersebut. Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air mempersyaratkan baku mutu COD sebesar 10 mg/L untuk baku mutu air kelas 1 sehingga dapat disimpulkan bahwa konsentrasi COD pada sampel sudah melebihi baku mutu yang ditetapkan oleh peraturan tersebut.



Gambar 2. Grafik hasil analisis parameter COD pada air tanah



Gambar 3. Grafik hasil analisis parameter klorida pada air tanah

Konsentrasi klorida pada **Gambar 3** di kelima titik sampel air sumur warga mengalami peningkatan, terutama pada titik S3 yang memiliki nilai 43 mg/L. Peningkatan konsentrasi klorida pada titik S3 ini dapat dikarenakan letak sumur yang hanya berjarak kurang lebih 1 meter dengan kloset. Konsentrasi klorida pada kelima sumur warga dan pada kedua sumur pantau TPA masih berada di bawah baku mutu klorida yang ditetapkan pada Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air sebesar 600 mg/L. Walaupun konsentrasi klorida saat ini masih berada di bawah baku mutu yang ditetapkan, tapi tidak menutup kemungkinan akan terjadinya peningkatan konsentrasi klorida pada air sumur warga dan sumur pantau TPA bahkan setelah penutupan TPA.

Penentuan Kecepatan Air Tanah

Berdasarkan perhitungan kecepatan air tanah dengan menggunakan persamaan Pinder dkk. (1981), menggunakan nilai konduktivitas hidrolik United States Department of Agriculture (2013) didapatkan hasil kecepatan aliran air tanah minimum adalah 3,991 m/tahun dan kecepatan aliran air tanah maksimum adalah 11,942 m/tahun dengan arah aliran dari timur menuju tenggara dengan sudut sebesar $63,121^\circ$, sedangkan nilai kecepatan aliran berdasarkan nilai konduktivitas hidrolik sampel tanah adalah sebesar 0,051 m/tahun dengan sudut arah aliran sebesar $63,121^\circ$ dari arah timur menuju arah tenggara.

Model Penyebaran Kontaminan

Asumsi dasar yang digunakan pada solusi analitik ini dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Asumsi dasar yang digunakan dalam solusi analitik

Parameter	Satuan	Nilai	Sumber
Lebar sumber (y)	Meter	395	UPT TPA Supit Urang (2017)
Kedalaman sumber (z)	Meter	14	Asumsi
Porositas (n)	-	0,6	Laboratorium Mekanika Tanah Teknik Sipil ITB (2017)
Konduktivitas hidrolik (K)	Meter/hari	0,122-0,365 $1,628 \times 10^{-3}$	United States Department of Agriculture (2013) Laboratorium Mekanika Tanah Teknik Sipil ITB (2017)
Kecepatan air tanah	Meter/tahun	3,991-11,942 0,051	Perhitungan menggunakan Pinder (1981)
Waktu (t)	Tahun	24	UPT TPA Supit Urang (2017)
Dispersivitas longitudinal (α_x)	Meter	0,1x	Shih dan Rong (2001)
Dispersivitas transversal (α_y)	Meter	0,33 α_x	Shih dan Rong (2001)
Dispersivitas vertikal (α_z)	Meter	0,056 α_x	Shih dan Rong (2001)
Faktor retardasi (R_f)			
Klorida	-	1	
COD	-	1	Shih dan Rong (2001)
Konstanta laju degradasi	Hari ⁻¹	0,0016 – 0,0027 0,02475 – 0,099	Altaouqi dalam Dewi (2013) Tong dan Rong (2013)
Konsentrasi kontaminan (C_0) di lindi			
Klorida	mg/L	1605	Data lapangan
COD	mg/L	782	Data lapangan

Simulasi Model Klorida 1 Dimensi

Dilakukan simulasi model klorida 1 dimensi dengan melakukan perubahan pada nilai kecepatan aliran, dispersivitas longitudinal dan kedalaman sumber kontaminan sehingga dapat diketahui faktor mana yang memiliki nilai sensitivitas lebih tinggi. Setelah dilakukan simulasi model klorida 1 dimensi didapatkan hasil bahwa dispersivitas longitudinal merupakan faktor yang lebih sensitif dibandingkan dengan faktor kedalaman sumber kontaminan dan kecepatan aliran dalam mempengaruhi nilai konsentrasi model. Selanjutnya dilakukan pengkalibrasian model dengan menghitung nilai RMSE dimana didapatkan kalibrasi terendah saat nilai dispersivitas longitudinal sebesar 83 m, dengan nilai RMSE yang didapatkan sebesar 14,698. Nilai RMSE terkecil untuk variasi kedalaman sumber kontaminan adalah 14,698 adalah saat nilai kedalaman kontaminan sebesar 14 m, dan nilai RMSE untuk semua perubahan nilai kecepatan aliran adalah 14,698. Kemudian dilakukan analisis validasi, dimana model dapat dikatakan valid apabila H_0 diterima dengan nilai chi kuadrat lebih kecil daripada nilai chi pada tabel. H_0 adalah nilai konsentrasi model sama dengan nilai konsentrasi di lapangan dan H_1 adalah nilai konsentrasi model tidak sama dengan nilai konsentrasi di lapangan. Berdasarkan hasil analisis didapatkan hasil bahwa H_0 ditolak dikarenakan nilai chi kuadrat hitung sebesar 46,292 lebih besar dibandingkan nilai chi kuadrat tabel dengan kepercayaan 90% sebesar 7,77943.

Simulasi Model Klorida 2 Dimensi

Pada simulasi model ini dilakukan perubahan pada nilai kecepatan aliran, dispersivitas longitudinal dan nilai y untuk mengetahui faktor mana yang lebih sensitif. Berdasarkan analisis sensitivitas yang dilakukan didapatkan hasil bahwa nilai y memiliki sensitivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan perubahan nilai dispersivitas longitudinal dan kecepatan aliran. Selain itu juga dapat dilihat bahwa pada simulasi 2 dimensi ini nilai konsentrasi klorida meningkat di setiap titiknya, berbeda dengan hasil konsentrasi pada model klorida 1 dimensi yang menurun di setiap titiknya.

Berdasarkan analisis kalibrasi didapatkan hasil bahwa pada simulasi model dengan variasi nilai y , nilai RMSE terendah adalah 11,298 pada saat simulasi model dengan nilai y sebesar 750 m, sedangkan pada simulasi model dengan perubahan nilai dispersivitas longitudinal, nilai RMSE terendah sebesar 11,298 adalah pada saat nilai dispersivitas longitudinal bernilai 87,01 m dan nilai RMSE untuk semua simulasi model dengan perubahan nilai kecepatan adalah 11,298. Selanjutnya dilakukan validasi dengan menggunakan hasil konsentrasi model dari simulasi yang menggunakan nilai dispersivitas longitudinal 87,01 m, y sebesar 750 m dan kecepatan aliran sebesar 3,991 m/tahun.

Dari perhitungan chi kuadrat pada tahapan validasi ini didapatkan nilai chi kuadrat sebesar 31,573. Nilai chi kuadrat ini lebih besar dari nilai chi kuadrat tabel dengan tingkat kepercayaan 90% dengan derajat kebebasan 4 sebesar 7,77943, sehingga dapat disimpulkan H_0 ditolak dan nilai konsentrasi model tidak sama dengan nilai konsentrasi di lapangan.

Simulasi Model COD 1 Dimensi

Perubahan yang dilakukan untuk mengetahui faktor mana yang memiliki kesensitivitas lebih tinggi pada simulasi model ini meliputi perubahan terhadap kecepatan aliran, nilai dispersivitas longitudinal, retardasi, nilai konstanta laju degradasi dan konsentrasi. Berdasarkan hasil analisis sensitivitas pada simulasi model COD 1 dimensi, didapatkan hasil bahwa dispersivitas longitudinal merupakan faktor dengan nilai sensitivitas yang lebih tinggi dibandingkan perubahan yang lain. Kemudian diikuti oleh faktor konsentrasi, sedangkan perubahan kecepatan, retardasi dan konstanta laju degradasi memiliki nilai sensitivitas sebesar 0 di setiap titiknya.

Dari hasil kalibrasi yang dilakukan pada simulasi model dengan perubahan perubahan dispersivitas longitudinal, didapatkan nilai RMSE terkecil yaitu 4,070 saat nilai dispersivitas longitudinal sebesar 12 m, sedangkan nilai RMSE terkecil dari simulasi model dengan perubahan konsentrasi adalah pada saat konsentrasi 760 mg/L dengan nilai RMSE sebesar 3,879 dan nilai

RMSE untuk seluruh variasi perubahan kecepatan aliran, retardasi dan konstanta laju degradasi adalah sebesar 3,879.

Analisis validitas dilakukan dengan menghitung chi kuadrat dari nilai konsentrasi sebenarnya dan nilai konsentrasi yang didapatkan dari simulasi model dengan menggunakan konsentrasi COD 760 mg/L, kecepatan sebesar 3,991 m/tahun, dispersivitas longitudinal 12 m, retardasi 1 dan konstanta laju degradasi sebesar 0,9855. Dari perhitungan chi kuadrat didapatkan hasil nilai chi kuadrat hitung adalah 1,728, dimana nilai chi kuadrat hitung ini lebih kecil dibandingkan dengan nilai chi kuadrat tabel dengan derajat kebebasan 4 dan dengan tingkat kepercayaan 90% yaitu sebesar 7,77943, dan disimpulkan nilai konsentrasi model sama dengan nilai konsentrasi di lapangan.

Simulasi Model COD 2 Dimensi

Simulasi model ini dilakukan dengan melakukan perubahan terhadap kecepatan aliran, nilai dispersivitas longitudinal, nilai y dan konsentrasi sehingga dapat diketahui faktor yang memiliki tingkat sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan yang dilakukan. Dari analisis sensitivitas yang dilakukan diketahui bahwa faktor nilai y merupakan faktor yang memiliki nilai sensitivitas paling tinggi dibandingkan dengan faktor yang lain. Faktor kedua yang lebih sensitif adalah konsentrasi diikuti dengan nilai dispersivitas longitudinal.

Selanjutnya dilakukan analisis kalibrasi dengan menghitung nilai RMSE dari simulasi model yang telah dilakukan. Berdasarkan perhitungan RMSE didapatkan hasil pada simulasi model dengan perubahan nilai y sebesar 520 memiliki nilai RMSE terendah yaitu sebesar 17,73, sedangkan pada perhitungan RMSE dengan variasi nilai konsentrasi didapatkan hasil bahwa nilai RMSE terendah adalah 17,984 saat variasi konsentrasi sebesar 800 mg/L. Untuk nilai RMSE terendah dari hasil kalibrasi dengan menggunakan variasi dispersivitas longitudinal didapatkan hasil RMSE terendah 5,766 saat dispersivitas longitudinal sebesar 1400 m dan nilai RMSE pada seluruh variasi kecepatan aliran adalah 5,766.

Pada tahapan validasi, digunakan nilai-nilai dari faktor yang memiliki nilai RMSE terendah yaitu kecepatan 3,991 m/tahun, dispersivitas longitudinal 1400 m, konsentrasi 800 mg/L dan nilai y sebesar 520 m. Berdasarkan analisis validitas, diketahui bahwa H_0 ditolak dikarenakan nilai chi kuadrat hitung sebesar 3,516 lebih kecil dibandingkan nilai chi kuadrat tabel dengan derajat kebebasan 4 dengan tingkat kepercayaan 90% yaitu sebesar 7,77943, sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai konsentrasi model sama dengan nilai konsentrasi di lapangan

KESIMPULAN

Konsentrasi klorida dan COD di dalam lindi adalah 1605 mg/L dan 782 mg/L, dimana berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor p.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah nilai konsentrasi COD yang terkandung pada lindi sudah melebihi baku mutu yang ditetapkan oleh peraturan tersebut yaitu 300 mg/L. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, kelas 1 pada peraturan tersebut mempersyaratkan baku mutu COD sebesar 10 mg/L, sehingga dapat disimpulkan bahwa konsentrasi COD pada sampel sudah melebihi baku mutu yang ditetapkan oleh peraturan tersebut. Sedangkan konsentrasi klorida pada kelima sumur warga masih berada di bawah baku mutu klorida yang ditetapkan pada Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air sebesar 600 mg/L. Berdasarkan analisis validitas, didapatkan hasil bahwa H_0 ditolak dikarenakan nilai chi kuadrat hitung yang didapatkan untuk simulasi model 1 dan 2 dimensi parameter klorida lebih besar dari nilai chi kuadrat tabel. Pada simulasi model 1 dan 2 dimensi parameter COD, H_0 tidak dapat ditolak karena nilai chi kuadrat hitung lebih kecil dibandingkan chi kuadrat tabel. Selain itu juga disimpulkan bahwa model Domenico dan Robbins (1985) kurang dapat memprediksi persebaran klorida sedangkan model Domenico (1987) dapat memprediksi persebaran COD di RW 5 Kelurahan Mulyorejo, Malang.

Daftar Pustaka

- Data kabupaten/kota yang menerapkan *open dumping* pada tahun 2015 merupakan pernyataan dari Kementerian Lingkungan Hidup RI, data diperoleh melalui situs internet: <http://www.menlh.go.id/rangkaian-hlh-2015-dialog-penanganan-sampah-plastik/>. Diunduh pada tanggal 1 Mei 2016
- Dewi, R.S. (2013): *Studi penyebaran kontaminan lindi di air tanah dangkal (Studi kasus: TPA Kopiluhur Cirebon)*, Tesis, Institut Teknologi Bandung
- Domenico, P.A. dan Schwartz, F.W. (1990): *Physical and chemical hydrogeology*, John Willey & Sons Inc., New York
- El-Salam, M.M.A. dan Abu-Zuid, G.I. (2014): Impact of landfill leachate on the groundwater quality: a case study in Egypt, *Journal of Advanced Research*. **6**, 579 – 586
- Han, Z., Ma, H., Shi, G., He, L., Wei, L dan Shi, Q. (2016): A review of groundwater contamination near municipal solid waste landfill sites in China, *Science of Total Environment*. 1-10
- Laboratorium Mekanika Tanah Teknik Sipil ITB. (2017)
- Notodarmojo, S. (2005): *Pencemaran tanah dan air tanah*, Institut Teknologi Bandung, Bandung
- Pinder, G.F., Celia, M. dan Gray, W.G. (1981): Velocity calculation from randomly located hydraulic heads, *Ground Water*, **19**, 262 – 264
- Qasim, S.R and Chiang, W. (1984): *Sanitary landfill leachate – generation, control and treatment*, Technomic Publishing Company Inc, Texas
- Smahi, D., Fekri, A. Dan El Hammoumi, O. (2013): Environmental impact of casablanca landfill on groundwater quality, Morocco, *International Journal of Geosciences*, **4**, 202-2011
- Schnoor, J.L. (1996): *Environmental modeling: Fate and transport of pollutants in water, air, and soil*, Wiley & Sons, Inc., New York
- Shih, T. Dan Rong, Y. (2001): *Manual for domenico non-steady state spreadsheet analytical model (for continous source release)*, California Regional Water Quality Control Board - Los Angeles Region, Los Angeles
- Tong, W. dan Rong Y. (2013): *Domenico spreadsheet analytical model manual*, Underground Storage Tank Section California Regional Water Quality Control Board - Los Angeles, Los Angeles
- UPT TPA Supit Urang. (2017)
- United States Department of Agriculture, data diperoleh melalui situs internet: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/office/ssr10/tr/?cid=nrcs144p2_07484 6. Diunduh pada tanggal 29 Mei 2017