

# Persebaran Logam Berat pada Tanah dan Air Tanah Akibat Aktivitas Industri Rumah Tangga Peleburan Limbah Elektronik

Citra Nur Fadilah dan Welly Herumurti

Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

*e-mail:* herumurti@enviro.its.ac.id

**Abstrak**—Industri pengolahan PCB di suatu daerah di Jawa Timur telah beroperasi sejak tahun 2015 hingga tahun 2020, Paska penutupan industri belum diketahui dampak terhadap lingkungan sekitar. Kemudian dilakukan analisis pendahuluan pada kualitas air tanah dan tanah di wilayah tersebut. Hasil analisis menunjukkan bahwa terjadi pencemaran logam berat Pb sebesar 0,52 mg/L dan Cu sebesar 0,27 mg/L. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui persebaran logam berat Pb dan Cu pada tanah dan air tanah di sekitar wilayah industri dan mengetahui jarak aman sumur yang layak konsumsi terhadap sumber kontaminan sesuai dengan Pergub Jatim Nomor 72 Tahun 2013. Metode yang digunakan untuk mengukur sebaran logam berat adalah model transport kontaminan satu dimensi. Model ini menggunakan solusi numerik dengan metode beda hingga. Langkah dasar metode ini antara lain membagi grid waktu hingga 5 tahun dan membagi grid jarak per 100 meter hingga jarak terjauh yaitu 700 meter, mentransformasikan persamaan diferensial parsial model transport satu dimensi ke persamaan kerja beda hingga, dan melakukan simulasi konsentrasi. Hasil model simulasi konsentrasi Pb dari konsentrasi sumber 0,52 mg/L, 0,92 mg/L, 1,72 mg/L, 2,53 mg/L, 3,26 mg/L, 4,34 mg/L dan simulasi konsentrasi Cu dari konsentrasi sumber 0,27 mg/L, 0,65 mg/L, 0,83 mg/L, 1,64 mg/L, 1,94 mg/L, 2,18 mg/L, menunjukkan bahwa seluruh hasil persebaran logam berat Pb dan Cu dari grid jarak 100 hingga 700 m yang disimulasikan mengalami persebaran melebihi grid jarak terjauh 700 meter. Hal ini ditunjukkan dari hasil simulasi semua konsentrasi pada grid jarak dan waktu masih terdapat sisa konsentrasi. Jarak aman sumur terhadap titik pembakaran untuk logam berat Pb minimal 200 m dan logam berat Cu minimal 100 m. Faktor yang paling mempengaruhi persebaran kontaminan pada air tanah berdasarkan simulasi model secara berurutan adalah adveksi, disperse, dan faktor retardasi.

**Kata Kunci**— Adveksi, Air Tanah, Dispersi Hidrodinamik, Faktor Retardasi, Transport Kontaminan.

## I. PENDAHULUAN

PRINTED circuit board (PCB) adalah komponen inti dari peralatan listrik dan elektronik (EEE), masih memiliki nilai sumber daya yang berpotensi tinggi ketika menjadi WPCBs (limbah PCB). Isi logam mulia, seperti tembaga (Cu), timah (Sn), emas (Au), perak (Ag), dan paladium, relatif lebih tinggi pada WPCB dibandingkan dengan bijih alami [1]. PCB mengandung komponen logam sebanyak 40%, keramik 30%, dan plastik 30% [2]. PCB mengandung Cu (20%), Pb (2%), Sn (4%), Ni (2%), Fe (8%), Zn (1%), dan sebagian kecil logam berat lainnya seperti Ag (0,1%), Au (0,1%), dan Pd (0,005%) [3]. Industri pengolahan PCB tersebar di 6 Kelurahan dengan total industri 100 perusahaan,

industri terbanyak terdapat di salah satu kelurahan dengan jumlah 54 Industri. Industri ini berdiri sejak tahun 2015 dan ditutup tahun 2020 oleh pemerintah. Proses di industri ini dilakukan dengan pembongkaran manual dan peleburan menggunakan tungku atau kompor berbahan bakar LPG (*open burning*), dilakukan di tanah terbuka yang terletak di depan rumah dan pada tempat pembakaran yang tersedia, proses pencucian alat dilakukan di sumur yang merupakan sumber air bersih masyarakat setempat.

Paska penutupan industri belum diketahui dampak dari proses industri yang telah berlangsung untuk itu dilakukan analisis lebih lanjut mengenai dampak pada tanah dan air tanah di sekitar industri. Kemudian dilakukan pengujian awal pada tanah di titik tempat pembakaran dan pengujian awal untuk air sumur di 2 titik kelurahan antara lain air sumur rumah kepala dusun dan air sumur dekat pembakaran. Hasil pengujian awal menunjukkan bahwa tanah pada tempat pembakaran memiliki kandungan Pb sebesar 0,52 mg/L yang artinya melebihi baku mutu Pergub Jatim Nomor 72 Tahun 2013 Tentang Baku Mutu Air Limbah bagi Industri dan/atau Kegiatan Usaha Lainnya. Hasil pengujian awal air sumur rumah kepala dusun dan air sumur dekat pembakaran menunjukkan kandungan Pb mendekati batas baku mutu Permenkes Nomor 32 Tahun 2017 yaitu 0,03 mg/L dan 0,023 mg/L.

Berdasarkan hasil analisis pendahuluan tersebut dapat disimpulkan terjadi pencemaran pada tanah dan air tanah di sekitar wilayah industri, sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui sebaran logam berat yang terjadi di wilayah sekitar industri. Sebaran logam berat di tanah dan air tanah dapat melalui peristiwa adveksi dan dispersi hidrodinamis. Adveksi merupakan peristiwa perpindahan kontaminan bersama dengan aliran air tanah sedangkan dispersi hidrodinamis peristiwa yang terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi larutan dan perbedaan distribusi kecepatan aliran. Kedua peristiwa ini kemudian menjadi faktor yang dihitung untuk mengetahui jangkauan dari sebaran kontaminan [4].

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menentukan persebaran konsentrasi logam berat Cu dan Pb pada tanah dan air tanah dalam jarak tertentu di suatu daerah studi menggunakan permodelan simulasi konsentrasi transport kontaminan satu dimensi, dan juga untuk mengetahui jarak aman sumur terhadap sumber kontaminan sehingga dapat diketahui sumur yang layak digunakan sebagai air bersih.

II. METODE PENELITIAN

A. Observasi Lapangan

Dalam penelitian ini, observasi awal dilakukan dengan observasi kondisi lapangan tempat pembakaran, posisi badan air, jumlah industri aktual, posisi air sumur warga sekitar industri baik sumur bor maupun sumur gali sehingga dapat digunakan peneliti untuk melakukan pengukuran simulasi konsentrasi.

B. Tahap Pengumpulan Data

Tahap ini bertujuan untuk mendapatkan bahan yang menunjang tercapainya tujuan penelitian.

1) Data Primer

Data primer yang dibutuhkan antara lain penelitian pendahuluan pada kualitas air sumur dan tanah Dusun Kalimati (wilayah industri), pengukuran jarak tempat pembakaran dengan sumur pemilik industri dan warga, posisi badan air, koordinat aktual rumah pemilik industri, dan observasi lapangan jenis sumur yang dimiliki oleh masyarakat sekitar industri.

2) Data Sekunder

Data sekunder yang dibutuhkan adalah peta wilayah studi, peta jenis tanah, peta kontur, jumlah aktual unit usaha daur ulang PCB, profil daerah studi, data konsentrasi kontaminan yang digunakan untuk simulasi konsentrasi, dan berbagai literatur pendukung teori dan konsep.

C. Pengukuran Analisis Pendahuluan untuk Tanah

Analisis pendahuluan dilakukan untuk memastikan bahwa terjadi pencemaran logam berat Pb dan Cu pada tanah di sekitar wilayah industri sehingga diperlukan analisis lebih lanjut [5].

D. Pengukuran Analisis Pendahuluan untuk Air Tanah

Analisis pendahuluan pada kualitas air tanah/sumur dilakukan untuk mengetahui kandungan yang ada dalam air minum warga sekitar industri. Pengukuran ini dilakukan untuk parameter kimia, biologis, dan fisik sesuai dengan Permenkes Tahun 2017 mengenai air sanitasi. Berikut merupakan tahapan analisis pendahuluan kualitas air tanah pada Gambar 1.

E. Tahap Pengolahan Data dan Penarikan Kesimpulan

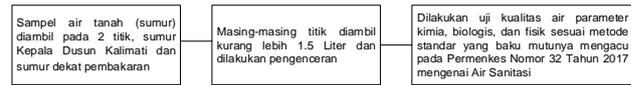
Analisis data dan pembahasan dilakukan setelah diperoleh data-data dari studi literatur, pengambilan data primer, pengambilan data sekunder dan pelaksanaan penelitian secara keseluruhan. Pembahasan meliputi perhitungan permodelan transport kontaminan satu dimensi logam berat Cu dan Pb dengan menggunakan rumus berikut [6]:

$$Dl \frac{\partial^2}{\partial^2 l} - vl \frac{\partial c}{\partial l} = \frac{\partial c}{\partial t}$$

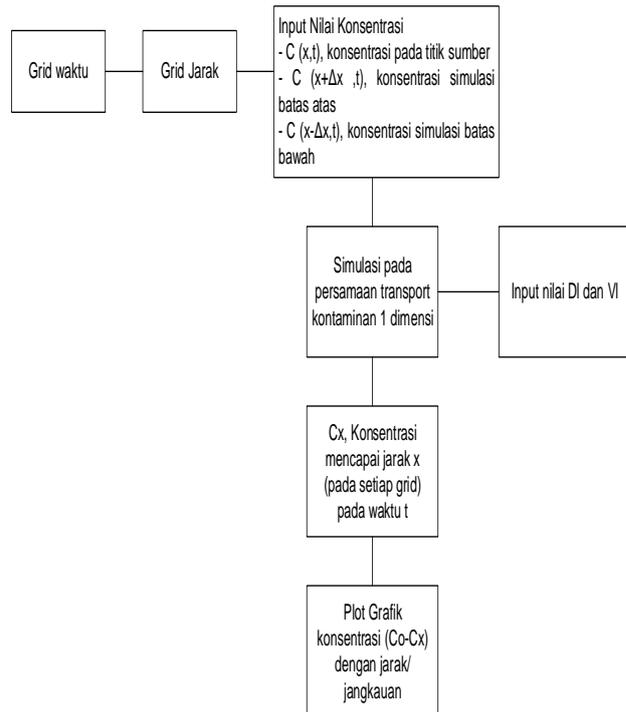
Keterangan:

- $Dl$  = Koefisien longitudinal dan dispersi hidrodinamik
- $c$  = Konsentrasi terlarut
- $vl$  = Rata-rata kecepatan air tanah linear
- $l$  = Jarak sepanjang alur
- $t$  = Waktu

$$\frac{1}{R} \left( Dl \frac{\partial^2}{\partial^2 l} - vl \frac{\partial c}{\partial l} \right) = \frac{\partial c}{\partial t}$$



Gambar 1. Tahapan pengukuran analisis air tanah.



Gambar 2. Alur permodelan simulasi konsentrasi.

Keterangan:

$R$  = Faktor retardasi

$$R = 1 + \frac{\rho b}{n} Kd$$

Keterangan:

$\rho b$  = Bulk mass density

$n$  = Porositas

$Kd$  = Koefisien distribusi

$$Dl = \alpha vl + D^*$$

Keterangan:

$Dl$  = Koefisien longitudinal dan dispersi hidrodinamik

$\alpha l$  = Dispersivitas longitudinal

$vl$  = Kecepatan air tanah

$D^*$  = Koefisien dispersi molekuler

Alur simulasi konsentrasi transport kontaminan satu dimensi dapat dilihat pada Gambar 2.

Transport kontaminan satu dimensi menggunakan solusi numerik sebagai solusi alternatif. Solusi numerik menggunakan metode beda hingga pada aplikasinya [4]. Dalam metode beda hingga ada tiga langkah dasar yaitu:

- a. Membagi wilayah (domain) dengan grid dan interval waktu.
- b. Mentransformasikan persamaan matematik (dalam hal ini persamaan diferensial parsial) menjadi persamaan aljabar.
- c. Memecahkan atau menghitung persamaan aljabar tersebut untuk seluruh domain.

Pada penelitian ini pembagian grid waktu dilakukan dengan membagi simulasi konsentrasi per 1 tahun hingga tahun ke-4, hal ini dikarenakan sebelumnya industri pengolahan PCB telah berdiri sejak tahun 2015 dan ditutup pada awal tahun 2020, berarti sudah 4 tahun sejak industri

Tabel 1.  
Pembagian grid jarak

Grid Jarak (m)
0-100
100-200
200-300
300-400
400-500
500-600
600-700

Tabel 2.  
Pembagian grid waktu

Grid Waktu (hari)
365
730
1095
1460

pengolah PCB ini berdiri. Berdasarkan hal tersebut maka dilakukan simulasi tahun ke-1 yaitu 2020 hingga 4 tahun ke depan untuk melihat sebaran sisa konsentrasi dari tahun ke tahun. Untuk grid jarak dilakukan dengan membagi jarak per 100 meter dari sumber kontaminan hingga industri PCB terjauh yang berada di jarak 700 m, sehingga diketahui sebaran konsentrasi per jarak 100 meter hingga 700 meter. Pembagian grid jarak dan grid waktu dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Pada setiap grid jarak yang sudah ditentukan pada Tabel 1, diambil 2 titik sumur untuk dilakukan perhitungan simulasi, hal ini digunakan untuk mengetahui beda muka air tanah antara 2 titik sumur. Sumur pemilik industri dan sumur warga sekitar terbagi menjadi 2 jenis sumur bor dan sumur gali. Sumur bor warga rata-rata digali sedalam 7-20 meter sedangkan sumur gali rata-rata digali sedalam 5-10 meter. Namun saat ini masyarakat setempat lebih banyak menggunakan sumur bor dikarenakan sumur gali yang ada memiliki warna air yang kuning dan berasa.

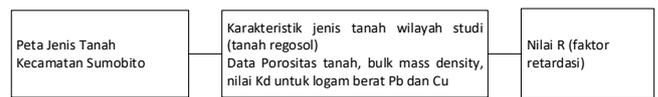
Sebelum melakukan simulasi perhitungan konsentrasi, maka perlu dilakukan perhitungan untuk mencari nilai dari komponen pendukung di dalam rumus antara lain faktor retardasi, konduktivitas hidrolik, gradient hidrolik, kecepatan air, dispersivitas longitudinal, dan dispersi hidrodinamik. Berikut merupakan tahap dalam melakukan perhitungan tersebut selengkapnya pada Gambar 3 hingga Gambar 9.

Persamaan transport kontaminan satu dimensi yang digunakan masih dalam bentuk persamaan diferensial sehingga perlu dilakukan penurunan persamaan kerja berdasarkan perluasan deret Taylor. Perluasan deret Taylor telah umum digunakan untuk mengembangkan persamaan kerja beda hingga [7]. Gambar 10 menunjukkan sistem nodal yang digunakan dalam perluasan deret Taylor.

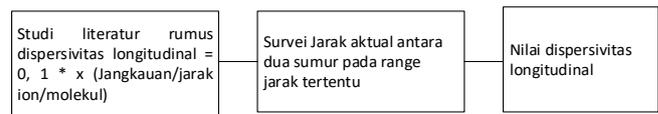
Persamaan kerja beda hingga transport kontaminan dalam kondisi aliran seragam dan aliran tunak (steady), untuk eksplisit dengan pendekatan *central difference* untuk turunan ruang adalah berikut:

Keterangan:

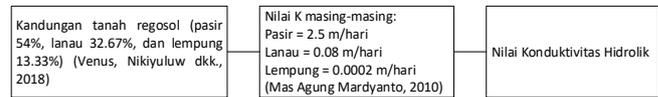
$C_{(x+\Delta x,t)}$  = Konsentrasi batas atas



Gambar 3. Langkah mengukur faktor retardasi.



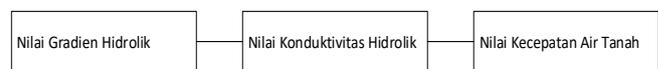
Gambar 4. Langkah menghitung dispersivitas longitudinal.



Gambar 5. Langkah menghitung konduktivitas hidrolik



Gambar 6. Langkah menghitung gradient hidrolik.



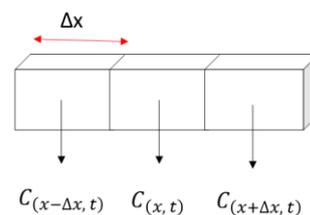
Gambar 7. Langkah menghitung kecepatan air tanah.



Gambar 8. Langkah menghitung dispersi hidrodinamik.



Gambar 9. Langkah menghitung simulasi konsentrasi.



Gambar 10. Sistem nodal yang digunakan dalam perluasan deret Taylor.

$$\frac{C_{(x,t+\Delta t)} - C_{(x,t)}}{\Delta t} = \frac{1}{R} \left( -v_x \frac{C_{(x+\Delta x,t)} - C_{(x-\Delta x,t)}}{2\Delta x} + D_l \frac{C_{(x+\Delta x,t)} - 2C_{(x,t)} + C_{(x-\Delta x,t)}}{\Delta x^2} \right)$$

$C_{(x,t)}$  = Konsentrasi pada sumber

$C_{(x-\Delta x,t)}$  = Konsentrasi batas bawah

Simulasi konsentrasi dilakukan menggunakan data sekunder dari penelitian pendahuluan Tahun 2020 pada industri daur ulang elektronik yang menunjukkan bahwa logam berat Cu dan Pb hasil industri limbah elektronik dapat mencapai rata-rata 4,34 mg/L hingga 052 mg/L untuk Pb dan 2,18 mg/L hingga 0,27 mg/L untuk Cu yang selanjutnya di simulasikan pada masing-masing grid jarak 0-700 meter. Konsentrasi yang digunakan dalam simulasi ini adalah konsentrasi logam berat hasil analisis pendahuluan hingga memenuhi Pergub Jatim Nomor 72 Tahun 2013 Tentang Baku Mutu Air Limbah bagi Industri dan/atau Kegiatan Usaha Lainnya. Dari hasil simulasi tersebut didapatkan nilai

Tabel 3.  
Konsentrasi yang digunakan sebagai permodelan simulasi transport kontaminan satu dimensi

Konsentrasi Simulasi Cu (mg/L)	Konsentrasi Simulasi Pb (mg/L)
3	5
2.18	4.34
1.94	3.26
1.64	2.53
0,83	1.72
0,65	0,92
0,27	0,52
0,1	0,1

Tabel 4.  
Beda muka air tanah dan jarak masing-masing grid jarak

Nama	Jarak (m)	Jenis Sumur	Kedalaman Air Asumsi (m)	Jarak dari Tempat Pembakaran
Sumur Dekat Pembakaran 1	0-100	Gali	8	25
Sumur Dekat Pembakaran 2	0-100	Gali	6	10
Sumur Warga 1	100-200	Gali	10	143
Sumur Warga 2	100-200	Gali	8	155
Yunus	200-300	Bor	17	235
Feriandi	200-300	Bor	13	251
Rokim	300-400	Bor	17	370
Istiono	300-400	Bor	12	353
Patukah	400-500	Bor	14	477
Warto	400-500	Bor	11	487
Sukar	500-600	Bor	13	550
Didik	500-600	Bor	10	535
Suwarno	600-700	Bor	15	610
Maksum	600-700	Bor	12	661

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Koordinat Industri Aktual

Setelah dilakukan observasi lapangan diperoleh hasil bahwa jumlah industri aktual yang dulu beroperasi adalah 44 dan telah resmi berhenti beroperasi sejak Januari 2020, Peta sebaran industri selengkapnya pada Gambar 11 dan Tabel 4.

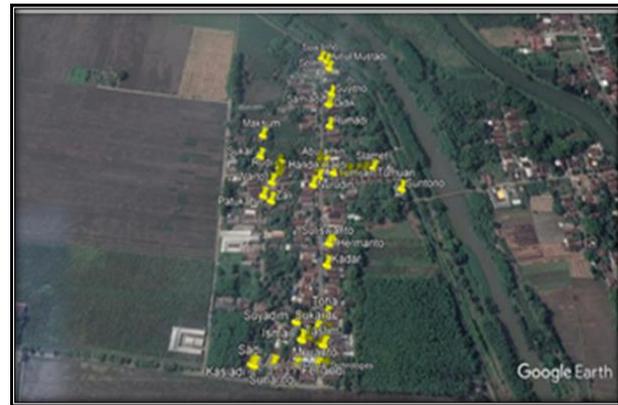
Seluruh industri di satu kelurahan di satu dusun yang memiliki dua tempat pembakaran, terletak dekat dengan badan air (Sungai besar, cabang, dan kecil).

#### B. Posisi Badan Air

Dusun dikelilingi oleh tiga badan air yang digunakan untuk pengairan sawah. Ketiga badan air ini tersambung oleh bendungan kecil pada masing-masing sungai sehingga dapat dialirkan air dari sungai utama ke sungai cabang dan sungai cabang ke sungai kecil melewati bendungan tersebut.

Kemudian dilakukan observasi lapangan untuk mengukur jarak dari tempat pembakaran terhadap sumur warga menggunakan aplikasi *google earth*. Sumur yang dimiliki warga dusun ada 2 jenis yaitu sumur gali dan sumur bor.

Kecepatan air tanah di dalam media porous tergantung pada gradient hidrolis dan parameter alirannya. Pada aliran media porous gradient hidrolis berbanding lurus dengan kecepatan, karena aliran dalam media porous adalah aliran laminar. Untuk persamaan gradient hidrolis adalah berikut: Gradient hidrolis ( $i$ ) = beda muka air tanah/L (panjang lintasan/aliran dimana terjadi head loss). Hasil perhitungan



Gambar 11. Peta wilayah industri (Google earth, 2020).

sebaran logam berat pada jarak terjauh dari konsentrasi terbesar hingga konsentrasi terkecil (yang memenuhi baku mutu). Selengkapnya konsentrasi yang digunakan untuk simulasi pada Tabel 3.

Konsentrasi yang di simulasikan memiliki batas atas dan batas bawah sehingga apabila melakukan simulasi konsentrasi sumber 0,27 mg/L maka konsentrasi batas atas dan batas bawah menggunakan 0,65 mg/L dan 0,1 mg/L. Kemudian didapatkan hasil simulasi konsentrasi yang tersebar pada jarak  $x$  dan sisa konsentrasi yang terdapat pada jarak  $x$  yang ke selanjutnya di plot pada grafik.

Setelah simulasi dilakukan maka dapat diketahui jarak dari masing-masing konsentrasi, sehingga dapat ditentukan pada jarak berapa kontaminan telah memenuhi baku mutu. Data ini dapat digunakan sebagai penentu jarak aman sumur terhadap sumber kontaminan.

Sebagian besar masyarakat dusun sudah menggunakan sumur bor dikarenakan biaya pemasangan yang lebih murah, air sumur lebih bersih, dan tidak berasa dibandingkan sumur gali. Namun masih ada beberapa warga yang menggunakan sumur gali sebagai sumber kebutuhan air bersih.

#### C. Kecepatan Air Tanah

Pengukuran kecepatan air tanah dilakukan dengan menggunakan prinsip dalam hukum Darcy [8].

$$V = -Ki = k \frac{h}{l}$$

Keterangan:

$K$  = Konduktivitas hidrolis

$i$  = Gradient hidrolis

$h$  = Beda muka air tanah

$l$  = Jarak antar sumur

Untuk mengukur nilai gradient hidrolis perlu dilakukan pengukuran beda muka air tanah dan jarak antar sumur terlebih dahulu. Pengukuran ini dilakukan dengan pengambilan titik sampel pada setiap grid jarak ditentukan secara acak. Hasil pengukuran beda muka air tanah dan jarak sumur serta dan dapat dilihat pada Tabel 4.

gradient hidrolis pada masing-masing grid jarak dapat dilihat pada Tabel 5.

Nilai Konduktivitas hidrolis dapat ditentukan dengan mengetahui jenis tanah pada wilayah studi. Pada Dusun Kalimati memiliki jenis tanah regosol dengan kandungan pasir 54%, lanau/silt 32,67%, dan lempung 13,33% [9]Nilai konduktivitas hidrolis untuk pasir 2,5 m<sup>3</sup>/hari, nilai  $K$  untuk

Tabel 5.  
Nilai gradien hidrolik pada setiap grid jarak

Jarak	Beda Muka Air	L (jangkauan)	<i>i</i>
0-100	2	15	0,133333
100-200	2	12	0,166667
200-300	4	16	0,25
300-400	5	17	0,294118
400-500	3	10	0,3
500-600	3	15	0,2
600-700	3	51	0,058824

Tabel 6.  
Kecepatan air tanah pada masing-masing grid jarak

Jarak	Beda Muka Air	L (jangkauan)	<i>i</i>	<i>v</i>
0-100	2	15	0,133333	0,18352
100-200	2	12	0,166667	0,2294
200-300	4	16	0,25	0,344101
300-400	5	17	0,294118	0,404824
400-500	3	10	0,3	0,412921
500-600	3	15	0,2	0,275281
600-700	3	51	0,058824	0,080965

lanau 0,08 m<sup>3</sup>/hari, dan nilai K lempung 0,0002 m<sup>3</sup>/hari. Sehingga nilai K total adalah:

Konduktivitas Hidrolik total

$$= ((2,5 \text{ m}^3/\text{hari} \times 54\%) + (0,08 \text{ m}^3/\text{hari} \times 32,67\%) + (0,0002 \text{ m}^3/\text{hari} \times 13,33 \text{ \%}))$$

$$= 1,35 \text{ m}^3/\text{hari} + 0,0261 \text{ m}^3/\text{hari} + 0,0000266 \text{ m}^3/\text{hari}$$

$$= 1,37616 \text{ m}^3/\text{hari}$$

Setelah diketahui nilai K dan nilai *i* maka dilakukan perhitungan kecepatan air tanah pada masing-masing grid jarak sesuai dengan persamaan di atas. Salah satu contoh perhitungannya sebagai berikut:

Sumur A dan Sumur B pada Grid Jarak 200-300 m

$$H/\text{beda muka air tanah} = (17 - 13) \text{ m} = 4 \text{ m}$$

$$L/\text{jangkauan ion/molekul} = (251 - 235) \text{ m} = 16 \text{ m}$$

Maka nilai *i* (Gradien Hidrolik):

$$i = H/L$$

$$i = 4 \text{ m}/16 \text{ m} = 0,25 \text{ m}$$

Kemudian dilakukan perhitungan *V* air tanah:

$$V = Ki$$

$$V = 1,37616 \times 0,25 = 0,344101 \text{ m}^3/\text{hari}$$

Jadi, kecepatan air tanah pada jarak 200-300 m adalah 0,344101 m<sup>3</sup>/hari. Hasil dari perhitungan masing-masing kecepatan air tanah dalam setiap grid jarak selengkapnya pada Tabel 6.

#### D. Faktor Retardasi

Retardasi pada transport kontaminan dapat terjadi akibat pengaruh reaksi-reaksi kimia yang terjadi di dalam tanah. Hal ini menyebabkan kecepatan kontaminan relatif pelan. Faktor retardasi merupakan suatu penggambaran efek penurunan kecepatan pergerakan atau transportasi solute, akibat rekasi dengan tanah [5]. Persamaan faktor retardasi sebagai berikut:[5]

Dispersivitas cenderung proporsional dengan jarak yang ditempuh oleh molekul atau ion, dan dapat diperkirakan secara kasar sebagai 0,1 kali jarak tempuh ion atau molekul [5]. Penentuan nilai dispersivitas dapat dilakukan dengan menggunakan rumus [11]:

$$al = 0,1 * X$$

$$at = 0,33 * al$$

$$av = 0,056 * at$$

Tabel 7.  
Nilai dispersivitas longitudinal setiap grid jarak

Jarak	<i>al</i>
0-100	1.5
100-200	1.2
200-300	1.6
300-400	1.7
400-500	1
500-600	1.5
600-700	5.1

Tabel 8.  
Hasil dispersi hidrodinamik tiap grid jarak

Jarak	<i>al</i>	<i>Dl</i>
0-100	1.5	0,275281
100-200	1.2	0,275281
200-300	1.6	0,550561
300-400	1.7	0,688201
400-500	1	0,412921
500-600	1.5	0,412921
600-700	5.1	0,412921

$$R = 1 + \frac{\rho b}{n} Kd$$

Nilai *Kd* pada tanah tergantung pada karakter geokimia pada tanah dan pada air yang mengalir pada pori tanah berdasarkan studi literatur dimana koefisien distribusi untuk logam berat  $\rho b$  adalah 0,4 L/kg [9] dan nilai *Kd* untuk logam berat Cu dalam rentang 0,1-3,6 L/kg [10]. Sehingga nilai *Kd* untuk Cu yang dipilih adalah 0,3 L/kg. Porositas tanah yang diasumsikan adalah 70%. Kemudian dihitung nilai faktor retardasi (*R*) masing-masing logam berat:

Untuk Cu :

$$R = 1 + \frac{1,6 \text{ gr/cm}^3}{0,7} 0,3 \text{ L/kg}$$

$$R = 1 + \frac{1,6 \text{ kg/dm}^3}{0,7} 0,3 \text{ L/kg}$$

$$R = 1,685714 \text{ L/kg}$$

Untuk Pb:

$$R = 1 + \frac{1,6 \text{ gr/cm}^3}{0,7} 0,4 \text{ L/kg}$$

$$R = 1 + \frac{1,6 \text{ kg/dm}^3}{0,7} 0,4 \text{ L/kg}$$

$$R = 1,914286 \text{ L/kg}$$

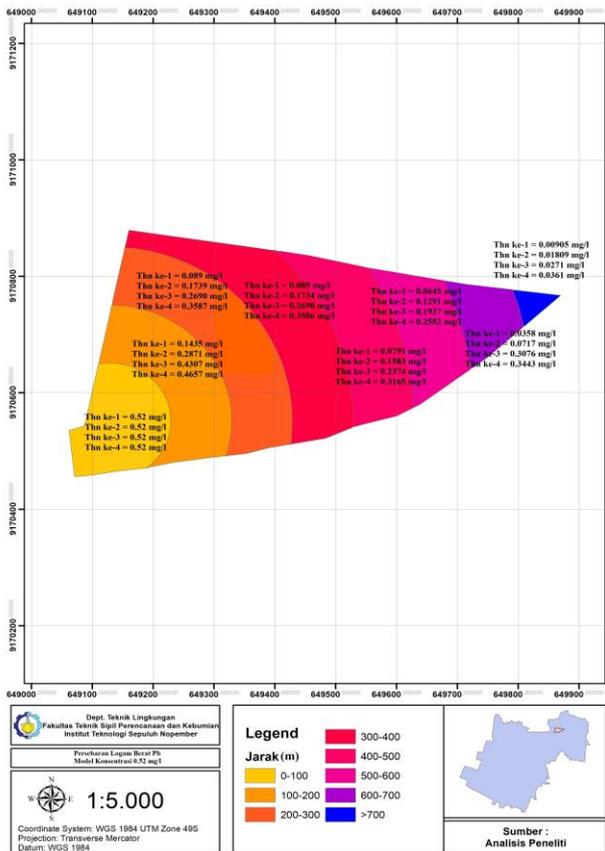
#### E. Dispersi Hidrodinamik

Dalam memodelkan transport kontaminan perlu dilakukan penentuan efek-efek dari dispersi yang terjadi pada 2 komponen [10]:

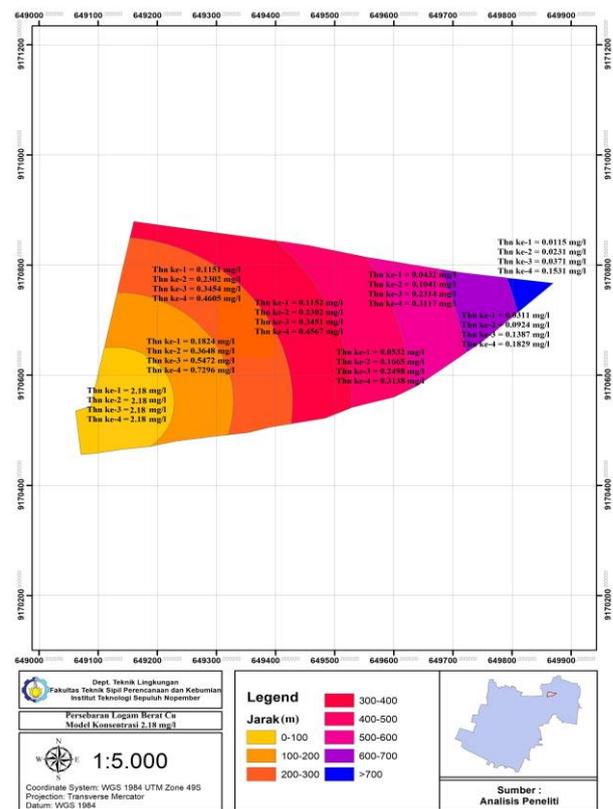
- Dispersi longitudinal
- Dispersi transversal

Hasil perhitungan dispersivitas longitudinal pada permodelan simulasi ini dapat dilihat pada Tabel 7. Dispersi hidrodinamik dapat diketahui setelah mendapatkan nilai *al* dan *vl*. Untuk nilai dispersi hidrodinamik pada permodelan ini dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$Dl = al \times vl$$



Gambar 12 Peta persebaran logam berat pb model konsentrasi 0,52 mg/L.



Gambar 13. Peta persebaran logam berat cu model konsentrasi 2.18 mg/L.

**Keterangan:**

- $Dl$  = dispersi hidrodinamik
- $al$  = dispersivitas longitudinal
- $vl$  = kecepatan air tanah

Berikut merupakan salah satu contoh perhitungan nilai  $Dl$  pada grid jarak 200-300 m:

$$Dl = 1,6 \text{ m} \times 0,344101 \text{ m}^3/\text{hari}$$

$$Dl = 0,550561 \text{ m}^2/\text{hari}$$

Hasil perhitungan selengkapnya pada Tabel 8.

**F. Hasil Model Sebaran**

Pada persamaan kerja beda hingga, dapat diketahui bahwa terdapat konsentrasi batas atas dan batas bawah yang digunakan untuk simulasi. Sebagai contoh apabila konsentrasi sumber kontaminan yang disimulasikan adalah 0,52 mg/L, maka konsentrasi batas atas adalah 0,92 mg/L dan konsentrasi batas bawah adalah 0,1 mg/L (memenuhi baku mutu). Konsentrasi tersebut disimulasikan pada masing-masing grid jarak (0-700 m) dan pada tahun ke-1 hingga tahun ke-4.

Berikut salah satu contoh perhitungan dari model konsentrasi sumber sebesar 0,52 mg/L:

Tahun ke-1 pada grid jarak 0-100 m

$$\frac{C_{(x,t+\Delta t)} - 0,52}{365} = \frac{1}{1,914286} \left( -0,18352 \frac{0,92 - 0,1}{2(100)} + 0,275281 \frac{0,92 - (2 \times 0,52) + 0,1}{100^2} \right)$$

$$C_{(x,t+\Delta t)} = 0,376428379 \text{ mg/l}$$

Tahun ke-1 pada grid jarak 100-200 m

$$\frac{C_{(x,t+\Delta t)} - 0,52}{365} = \frac{1}{1,914286} \left( -0,2294 \frac{0,92 - 0,1}{2(200)} + 0,275281 \frac{0,92 - (2 \times 0,52) + 0,1}{200^2} \right)$$

$$C_{(x,t+\Delta t)} = 0,430307103 \text{ mg/l}$$

Tahun ke-1 pada grid jarak 200-300 m

$$\frac{C_{(x,t+\Delta t)} - 0,52}{365} = \frac{1}{1,914286} \left( -0,3441 \frac{0,92 - 0,1}{2(300)} + 0,550561 \frac{0,92 - (2 \times 0,52) + 0,1}{300^2} \right)$$

$$C_{(x,t+\Delta t)} = 0,43031 \text{ mg/l}$$

Tahun ke-1 pada grid jarak 300-400 m

$$\frac{C_{(x,t+\Delta t)} - 0,52}{365} = \frac{1}{1,914286} \left( -0,4048 \frac{0,92 - 0,1}{2(400)} + 0,6882 \frac{0,92 - (2 \times 0,52) + 0,1}{400^2} \right)$$

$$C_{(x,t+\Delta t)} = 0,440865962 \text{ mg/l}$$

Tahun ke-1 pada grid jarak 400-500 m

$$\frac{C_{(x,t+\Delta t)} - 0,52}{365} = \frac{1}{1,914286} \left( -0,4129 \frac{0,92 - 0,1}{2(500)} + 0,4129 \frac{0,92 - (2 \times 0,52) + 0,1}{500^2} \right)$$

$$C_{(x,t+\Delta t)} = 0,45543371 \text{ mg/l}$$

Tahun ke-1 pada grid jarak 500-600 m

$$\frac{C_{(x,t+\Delta t)} - 0,52}{365} = \frac{1}{1,914286} \left( -0,2753 \frac{0,92 - 0,1}{2(600)} + 0,41292 \frac{0,92 - (2 \times 0,52) + 0,1}{600^2} \right)$$

$$C_{(x,t+\Delta t)} = 0,484128965 \text{ mg/l}$$

Tahun ke-1 pada grid jarak 600-700 m

$$\frac{C_{(x,t+\Delta t)} - 0,52}{365} = \frac{1}{1,914286} \left( -0,0081 \frac{0,92 - 0,1}{2(700)} + 0,41292 \frac{0,92 - (2 \times 0,52) + 0,1}{700^2} \right)$$

$$C_{(x,t+\Delta t)} = 0,510954771 \text{ mg/l}$$

Untuk simulasi pada tahun selanjutnya hingga tahun ke-4 dilakukan dengan cara yang sama.

Kemudian dilakukan analisis spasial hasil simulasi konsentrasi dari tahun ke-1 hingga ke-4 dengan grid jarak 100-700 meter, sehingga menghasilkan peta sebaran logam berat masing-masing model konsentrasi. Gambar 12 menunjukkan peta sebaran logam berat Pb model konsentrasi 0,52 mg/L dan Gambar 13 menunjukkan peta sebaran logam berat Cu model konsentrasi 2.18 mg/L.

Hasil model simulasi logam berat Pb untuk konsentrasi 0,52 mg/L yang telah dilakukan menunjukkan bahwa pada sebaran tahun pertama, jarak aman sumur agar tidak terkontaminasi logam berat Pb sesuai peraturan di atas adalah 200 meter, dikarenakan pada jarak tersebut konsentrasi sisa sebaran menunjukkan 0,089 mg/L di mana konsentrasi tersebut memenuhi baku mutu. Untuk sebaran pada tahun ke-2 menunjukkan bahwa konsentrasi sisa sebaran pada jarak 600 meter sudah memenuhi baku mutu dengan jumlah 0,071 mg/L. Sebaran tahun ke-3 menunjukkan hasil bahwa sisa konsentrasi telah memenuhi baku mutu pada jarak 700 meter dengan jumlah 0,027 mg/L, sedangkan tahun ke-4 juga pada jarak ke 700 meter dengan jumlah sisa konsentrasi sebaran 0,036 mg/L. Hasil model simulasi logam berat Cu untuk konsentrasi sumber 0,27 mg/L, 0,65 mg/L, 0,83 mg/L, 1,64 mg/L, 1,94 mg/L menunjukkan bahwa seluruh hasil simulasi pada jarak 0 hingga 700 meter telah memenuhi baku mutu

Pergub Jatim Nomor 72 Tahun 2013. Untuk model konsentrasi sumber sebesar 2.18 mg/L yang telah dilakukan menunjukkan bahwa pada tahun pertama hingga tahun keempat jarak aman sumur agar tidak terkontaminasi logam berat Pb sesuai peraturan di atas adalah 100 meter, dengan hasil sisa konsentrasi berurutan sebagai berikut 0,18 mg/L, 0,36 mg/L, 0,54 mg/L, dan 0,72 mg/L. Untuk peta model sebaran logam berat konsentrasi lainnya hasilnya hampir sama dengan model konsentrasi logam berat Pb 0,52 mg/L dan Cu 2,18 mg/L. Hal yang membedakan hanya nilai konsentrasi per jarak dan per waktu.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi perhitungan konsentrasi logam berat Pb dan Cu dapat disimpulkan bahwa; (1) Persebaran Logam Berat Pb dan Cu dari grid jarak 100 hingga 700 meter menunjukkan bahwa konsentrasi yang disimulasikan mengalami persebaran melebihi grid jarak terjauh 700 meter. Hal ini ditunjukkan dari hasil simulasi semua konsentrasi pada grid jarak dan waktu masih terdapat sisa konsentrasi.

Persebaran Logam Berat Pb dan Cu dari grid waktu 1 tahun hingga 4 tahun menunjukkan bahwa semakin lama waktu sebaran logam berat secara kontinu maka semakin besar konsentrasi yang tersebar pada setiap titik grid jarak. Faktor yang paling mempengaruhi persebaran kontaminan pada air tanah berdasarkan simulasi model adalah adveksi, kemudian dispersi dan yang terakhir adalah faktor retardasi; (2) Jarak aman sumur untuk logam berat Pb pada model konsentrasi 0,52 mg/L, 0,92 mg/L, 1.72 mg/L, 2.53 mg/L, dan 4.34 mg/L dari tahun pertama hingga keempat menunjukkan jarak variatif dengan jarak terdekat adalah 200 meter. Untuk jarak aman sumur logam berat Cu pada konsentrasi 0,27 mg/L, 0,65 mg/L, 0,83 mg/L, 1.64 mg/L, 1.94 mg/L, dan 2.18 mg/L menunjukkan bahwa hampir seluruh simulasi konsentrasi pada jarak 0 hingga 700 meter pada tahun pertama hingga keempat telah memenuhi baku mutu kecuali untuk konsentrasi 2.18 mg/L pada jarak 0-100 meter dari tahun pertama hingga keempat tidak memenuhi baku mutu, namun memenuhi pada jarak 100 meter lebih.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia yang telah memberikan dukungan finansial melalui Beasiswa Bidik Misi tahun 2016-2020 serta terima kasih kepada seluruh pihak yang terlibat dalam pengerjaan penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Q. Tan, L. Liu, M. Yu, and J. Li, "An innovative method of recycling metals in printed circuit board (PCB) using solutions from PCB production," *J. Hazard. Mater.*, vol. 390, p. 121892, 2020.
- [2] S. Pinho, M. Ferreira, and M. F. Almeida, "A wet dismantling process for the recycling of computer printed circuit boards," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 132, 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.01.022.
- [3] D. Dutta and S. Goel, "Electronic Waste (E-Waste) Generation and Management," in *Advances in Solid and Hazardous Waste Management*, Bengal Barat: Springer, 2017, pp. 249–266.
- [4] S. Notodarmojo, "Penerbit Tanah dan Air Tanah." Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2005.
- [5] E. D. L. Putra, C. Aman, and others, "Analisis logam Pb, Cd, Cu, dan Zn dalam ketam batu, dan lokan segar yang berasal dari Perairan Belawan secara spektrofotometri serapan atom," *Maj. Kedokt. Nusant.*, vol. 42, no. 1, 2009.
- [6] M. D. LaGrega, P. L. Buckingham, and J. C. Evans, *Hazardous Waste Management*. New York: Waveland Press, 2010.
- [7] B. Carnahan and H. A. Luther, *Applied Numerical Methods*. New York: Wiley, 1969.
- [8] V. Nikiyuluw, R. Soplanit, and A. Siregar, "Efisiensi pemberian air dan kompos terhadap mineralisasi NPK pada tanah regosol," *J. Budid. Pertan.*, vol. 14, no. 2, pp. 105–122, 2018.
- [9] J. D. Allison and T. L. Allison, "Partition Coefficients for Metals in Surface Water, Soil, and Waste," *United States Environmental Protection Agency*, 2005.
- [10] P. L. Younger, *Groundwater in the Environment: An Introduction*. USA: John Wiley & Sons, 2009.
- [11] D. C. V. Purba and I. M. Kamil, "Analisis pola penyebaran logam berat pada air tanah dangkal akibat lindi di sekitar tempat pemrosesan akhir (TPA) Jatibarang Semarang," *J. Tek. Lingkungan.*, vol. 21, no. 2, pp. 149–158, 2015.