

**ANALISA RISIKO PENCEMARAN AIR TANAH PADA KABUPATEN
SIDOARJO DIDASARKAN PADA UJI KUALITAS AIR TANAH DAN
PEMETAAN KERENTANAN**

TESIS

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK PENGAIRAN
MINAT MANAJEMEN SUMBER DAYA AIR**

**Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
Memperoleh gelar Magister Teknik**



**ANDINA YASINTASARI
NIM. 176060400111005**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2019**

IDENTITAS TIM PENGUJI

JUDUL TESIS:

**ANALISA RISIKO PENCEMARAN AIR TANAH PADA KABUPATEN
SIDOARJO DIDASARKAN PADA UJI KUALITAS AIR TANAH DAN
PEMETAAN KERENTANAN**

Nama Mahasiswa : Andina Yasintarsi

NIM : 176060400111005

Minat : Manajemen Sumber Daya Air

KOMISI PEMBIMBING

Ketua : Emma Yuliani, ST., MT., Ph.D

Anggota : Dr. Eng. Riyanto Haribowo, ST., MT

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji I : Dr. Eng. Donny Harisuseno, ST., MT

Dosen Penguji II : Sri Wahyuni, ST., MT., Ph.D

Tanggal Ujian : 9 Juli 2019

SK Penguji :

PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa Tesis ini adalah hasil pemikiran saya dan tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi. Tesis ini juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Malang, Juli 2019

Mahasiswa,

Andina Yasintasari

NIM. 176060400111005



DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Lahir sebagai anak perempuan pertama dari dua bersaudara pada tanggal 31 mei 1994 di Kabupaten Probolinggo. Dibesarkan sebagai anak kedua dari pasangan suami dan istri- Bapak Haribowo bb Sutrisno dan Ibu Sri Lasinik. Menyelesaikan pendidikan SD sampai dengan SMA di Kota Malang, kemudian melanjutkan kuliah jenjang D4 di Politeknik Negeri Malang, Prodi Manajemen Rekayasa Konstruksi pada tahun 2012 dan lulus pada tahun 2016. Bercita-cita sebagai perancang busana dan penyair, tapi kemudian Tuhan menggoreskan takdir untuk belajar lebih banyak tentang bangunan dan air.

Malang, Juli 2019
Penulis

UNIVERSITAS

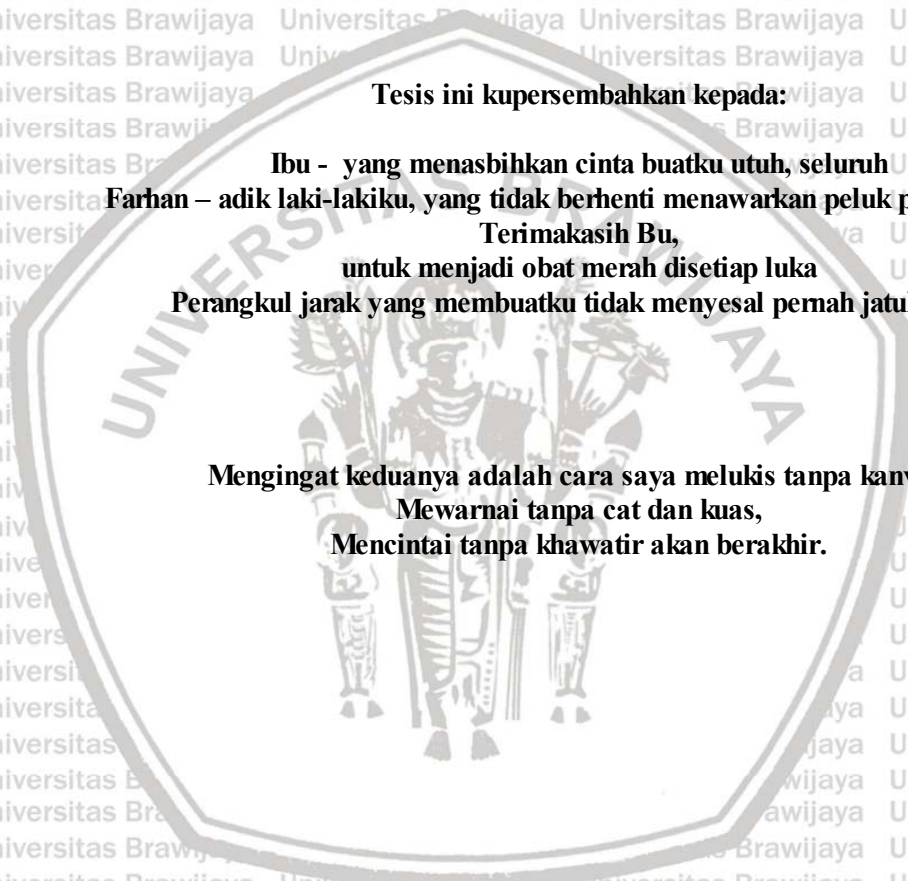


HALAMAN PERSEMBAHAN

Tesis ini kupersembahkan kepada:

Ibu - yang menasbihkan cinta buatku utuh, seluruh
Farhan – adik laki-lakiku, yang tidak berhenti menawarkan peluk paling candu
Terimakasih Bu,
untuk menjadi obat merah disetiap luka
Perangkul jarak yang membuatku tidak menyesal pernah jatuh cinta

Mengingat keduanya adalah cara saya melukis tanpa kanvas,
Mewarnai tanpa cat dan kuas,
Mencintai tanpa khawatir akan berakhir.



UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah puji syukur kepada Allah SWT, karena kehendak dan ridhaNya kami dapat menyelesaikan karya ilmiah (tesis) dengan baik. Penulis mengucapkan banyak terima kasih atas bantuan dan doa dari berbagai pihak yang telah membantu. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua, adik dan keluarga besar yang sudah mendukung secara moril dan materiil sehingga kami dapat menyelesaikan studi magister ini tepat waktu.
2. Ibu Emma Yuliani, ST., MT., Ph.D dan Bapak Dr. Eng. Riyanto Haribowo, ST., MT selaku dosen pembimbing.
3. Bapak Dr. Eng. Donny Harisuseno, ST., MT dan Ibu Sri Wahyuni, ST., MT., Ph.D selaku dosen penguji.
4. Bapak Dr. Eng. Donny Harisuseno, ST., MT selaku Ketua Program Studi Magister Sumber Daya Air.
5. Bapak dan Ibu dosen pengampu di lingkungan Teknik Pengairan Magister Sumber Daya Air Universitas Brawijaya.
6. Rekan-rekan MSDA angkatan tahun 2017 yaitu Ami Zuhairini, Yasnuar Muntaha, Yus Aktiva, Putri Ayu, Yura Kafiansyah, dan Ermo Fandianto.
7. Kakak-kakak tersayang, Firsty Adinda, Mahathir Muhammad, Raden Ajeng Mariyana, Nindya Risky, dan Yasnuar Muntaha.
8. Semua pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu per satu, kami ucapkan banyak terima kasih atas bantuannya.

Malang, Juli 2019

Penulis

ABSTRAK

Industri pertambangan dan perminyakan merupakan industri yang digemari saat ini, namun dampak aktivitas dari industri tersebut dapat mempengaruhi lingkungan sekitar. Diantaranya adalah penurunan kualitas air. Salah satu contoh aktivitas industri perminyakan yang berdampak bagi lingkungan adalah semburan lumpur di daerah Sidoarjo yang diakibatkan oleh aktivitas pengeboran minyak bumi. Semburan lumpur yang dimulai pada tanggal 27 Mei 2006 tersebut diketahui telah merusak infrastruktur dan merendam 600 ha lahan dan pemukiman. Permasalahan yang terjadi di Lumpur Sidoarjo adalah masih terus munculnya semburan lumpur sampai batas waktu yang tidak ditentukan. Keluaran akhir dari kajian ini adalah dapat memberikan gambaran tingkat keamanan air yang digunakan warga terdampak Lumpur Sidoarjo. Tujuan kajian adalah mendapatkan pola penyebaran polutan pada daerah terdampak dan melakukan analisa risiko kesehatan terhadap warga yang terdampak Lumpur Sidoarjo.

Untuk melihat resiko dari semburan lumpur tersebut, pembuatan peta kerentanan berdasarkan uji kerentanan air tanah menggunakan metode DRASTIC. Selain itu, indeks Pencemaran juga diperlukan untuk memberikan analisa risiko yang tepat. Lalu, dilakukan juga simulasi pola penyebaran polutan pada daerah terdampak dengan menggunakan program Hydrus-1D dengan skema pengaliran adveksi.

Kata kunci: uji kerentanan airtanah, indeks polutan, analisa risiko, Hydrus-1D, adveksi.

ABSTRACT

Mining and oil and gas industry were prevalent recently. However, the impact of the mining and oil and gas industry can affect the environment. One of the effects is the decrease in water quality. Another example of misconduct in the oil and gas industry is Lapindo mudflow. This mudflow has been flown out since 27 May 2006. This accident damaged infrastructure around the area and the mudflow already sink 600 ha of land and residential areas. This problem continues today, and nobody knows where it comes to an end. In this study, our outcome is to know the safety of the water resources around the mudflow area. The objective of this study is to know the distribution pattern of the pollutant and health risk analysis of the people around the mudflow area.

To know the health risk of the Lapindo mudflow, vulnerability map has been made based on the DRASTIC Index method. Also, Pollution Index method was needed to assess the risk analysis accurately. Besides that, in this study, simulation of the pollutant transport across the surrounding area has been simulated by using advection theory in Hydrus-1D.

Keywords: Groundwater vulnerability test, pollution index, risk analysis, Hydrus-1D, advection.



KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penyusun dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul **“ANALISA RISIKO PENCEMARAN AIR TANAH PADA KABUPATEN SIDOARJO DIDASARKAN PADA UJI KUALITAS AIR TANAH DAN PEMETAAN KERENTANAN”** Tesis ini merupakan persyaratan wajib untuk memperoleh gelar magister bagi setiap mahasiswa di Fakultas Teknik Jurusan Pengairan Universitas Brawijaya.

Pada kesempatan ini penyusun ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu tercinta untuk setiap doa dan pengharapan yang jadi tumpuan sampai pada titik ini, dan Hantu – adik yang tersayang yang selalu berbagi pertengkar dan cemilan selama penyusunan tesis ini.
2. Ibu Emma Yuliani, ST., MT., Ph.D dan Bapak Dr. Eng. Riyanto Haribowo, ST., MT selaku dosen pembimbing.
3. Bapak Dr. Eng Donny Harisuseno, ST, MT dan Ibu Sri Wahyuni, ST., MT., Ph. D selaku dosen penguji.
4. Staf dan dosen pengajar di Jurusan Pengairan.
5. Teman-teman mahasiswa Program Magister MSDA Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dan pihak-pihak lain yang sangat membantu dan mendukung demi kelancaran proposal tesis ini.

Penyusun menyadari atas keterbatasan ilmu dalam pembahasan tesis ini. Oleh karena itu, penyusun mengharapkan masukan berupa saran dan kritik yang bersifat membangun dari pembaca. Akhir kata, semoga tugas akhir ini bermanfaat. Amin.

Malang, Juli 2019
Penyusun

Andina Yasintarsi

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Identifikasi Masalah	2
1.3. Rumusan Masalah	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Tujuan dan Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Analisa Risiko	5
2.1.1. Analisa Risiko Kesehatan	6
2.2. Polusi Air Tanah	8
2.3. Air Tanah	9
2.3.1. Terjadinya Air Tanah	9
2.3.2. Sifat Batuan yang Mempengaruhi Air Tanah	10
2.4. Pendugaan Geolistrik	12
2.4.1. Metode Geolistrik Resistivitas	12
2.4.2. Faktor Geometri	13
2.4.3. Konsep Tahanan Jenis Semu	14
2.4.4. Paket Program IP2WIN	14
2.5. Kerentanan Air Tanah	15
2.5.1. Metode DRASTIC	15
2.5.2. Parameter DRASTIC	17
2.5.3. Pengolahan Data	19
2.6. Metode Indeks Pencemaran	23
2.7. Transpor Polutan	25
2.7.1. <i>Water Flow</i>	26
2.7.2. Transpor Kontaminan	28
2.7.3. Hydrus-1D	30

BAB III METODOLOGI

3.1. Deskripsi Daerah Penelitian.....	35
3.1.1. Lokasi Daerah Studi.....	35
3.1.2. Batas Wilayah Penelitian.....	35
3.1.3. Geologi Daerah Penelitian.....	36
3.1.4. Kandungan Lumpur Sidoarjo	37
3.2. Metode Pengumpulan Data.....	38
3.3. Metode Analisis Data	42
3.3.1. Transpor Polutan	44

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Kawasan Lumpur Sidoarjo	51
4.1.1 Penentuan Batas Daerah Studi	51
4.2 Pengolahan Data Geolistrik	52
4.2.1 Perhitungan Tahanan Jenis Sebenarnya	52
4.3 Interpretasi Lapisan Bawah Tanah.....	53
4.4 Analisa Hidrologi.....	54
4.5 Interpretasi Peta Jenis Tanah	56
4.6 Penentuan Kemiringan Lereng	57
4.7 Analisis Parameter DRASTIC Indeks	59
4.7.1 Penentuan Rating Parameter DRASTIC	59
4.7.2 Penentuan Bobot Parameter DRASTIC	62
4.7.3 Perhitungan DRASTIC Indeks	80
4.8 Analisis Parameter Indeks Pencemaran.....	86
4.9 Analisa Risiko Kesehatan	84
4.10 Transpor Polutan	88
4.11 Kalibrasi Model Persebaran.....	96
4.12 Rekomendasi.....	100

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	103
5.2 Saran.....	104

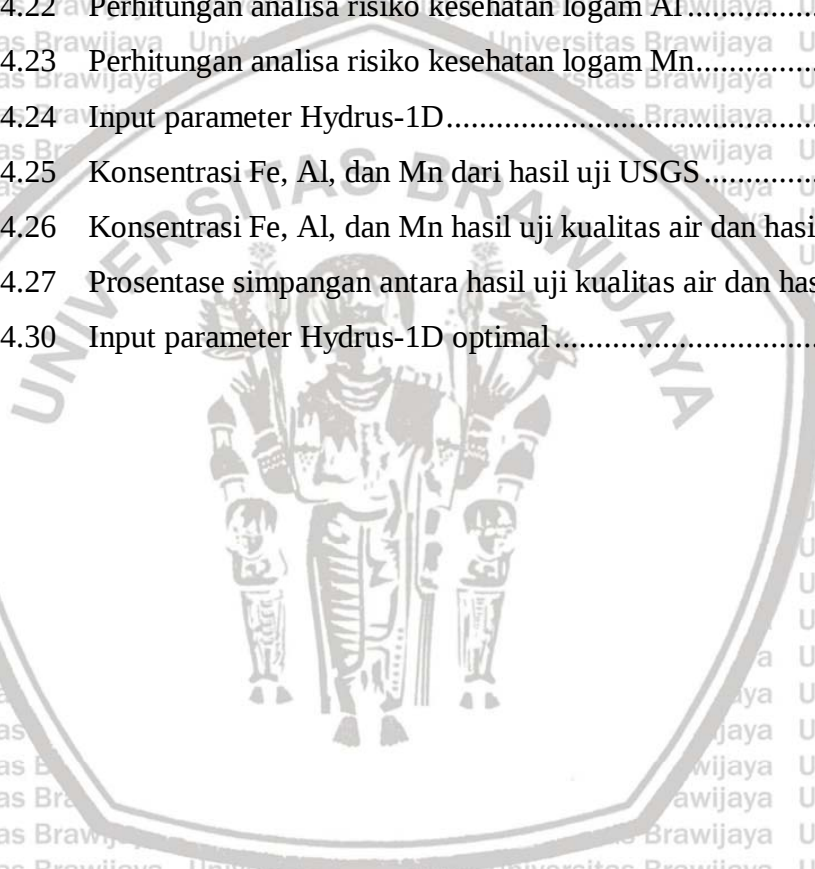
DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Nilai konduktifitas hidraulik (K) pada berbagai jenis batuan.....	20
Tabel 2.2	<i>Weight of DRASTIC Parameters</i>	21
Tabel 2.3	<i>Rating of depth to watertable</i>	21
Tabel 2.4	<i>Rating of recharge</i>	22
Tabel 2.5	<i>Rating of aquifer media</i>	22
Tabel 2.6	<i>Rating of soil media</i>	23
Tabel 2.7	<i>Rating of topography</i>	23
Tabel 2.8	<i>Rating of impact of vadose zone</i>	24
Tabel 2.9	<i>Rating of hydraulic Conductivity</i>	24
Tabel 2.10	Kriteria tingkat pencemaran	25
Tabel 2.11	Kategori kelas <i>Index Pollutant</i>	26
Tabel 2.12	<i>Default initial estimates of selected parameters in models for unsaturated hydraulic parameters</i>	31
Tabel 2.13	Daftar penelitian terdahulu	32
Tabel 3.1	Detail lokasi pengambilan sampel air	39
Tabel 3.2	Detail lokasi geolistrik	42
Tabel 3.3	Parameter input	46
Tabel 3.4	Input parameter HYDRUS-1D optimal.....	49
Tabel 4.1	Pendugaan kondisi bawah permukaan	54
Tabel 4.2	Hasil perhitungan total curah hujan tahunan	56
Tabel 4.3	Rating kedalaman air tanah	59
Tabel 4.4	Rating rata-rata curah hujan tahunan	60
Tabel 4.5	Rating media akuifer	60
Tabel 4.6	Rating tekstur tanah	61
Tabel 4.7	Rating kemiringan lereng	61
Tabel 4.8	Rating pengaruh media vados.....	62
Tabel 4.9	Rating konduktivitas hidraulik	62
Tabel 4.10	Skor untuk kedalaman air tanah dengan <i>weight</i>	63
Tabel 4.11	Skor untuk curah hujan dengan <i>weight</i>	65
Tabel 4.12	Skor untuk media akuifer dengan <i>weight</i>	67
Tabel 4.13	Skor untuk tekstur tanah dengan <i>weight</i>	69
Tabel 4.14	Skor untuk kemiringan lereng dengan <i>weight</i>	71

Tabel 4.15	Skor untuk pengaruh zona vados dengan <i>weight</i>	73
Tabel 4.16	Skor untuk konduktivitas hidraulik dengan <i>weight</i>	75
Tabel 4.17	Hasil perhitungan DRASTIC Indeks	80
Tabel 4.18	Status mutu air sumur berdasarkan baku mutu PP No.82/2001 Kelas 1 dengan metode Indeks Pencemaran	84
Tabel 4.19	Status mutu air sumur berdasarkan baku mutu Permenkes No.492 Tahun 2010 peruntukan air minum dengan metode Indeks Pencemaran	85
Tabel 4.20	Jumlah kebutuhan air dan sifat kimia parameter logam.....	87
Tabel 4.21	Perhitungan analisa risiko kesehatan logam Fe	87
Tabel 4.22	Perhitungan analisa risiko kesehatan logam Al	87
Tabel 4.23	Perhitungan analisa risiko kesehatan logam Mn.....	88
Tabel 4.24	Input parameter Hydrus-1D.....	89
Tabel 4.25	Konsentrasi Fe, Al, dan Mn dari hasil uji USGS	97
Tabel 4.26	Konsentrasi Fe, Al, dan Mn hasil uji kualitas air dan hasil simulasi ..	97
Tabel 4.27	Prosentase simpangan antara hasil uji kualitas air dan hasil simulasi	98
Tabel 4.30	Input parameter Hydrus-1D optimal	99



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Facility release</i>	7
Gambar 2.2	Penyebaran vertikal air tanah.....	10
Gambar 2.3	Akuifer bebas.....	11
Gambar 2.4	Akuifer terkekang.....	11
Gambar 2.5	Akuifer setengah terkekang.....	12
Gambar 2.6	Akuifer menggantung.....	12
Gambar 2.7	Visualisasi metode DRASTIC.....	17
Gambar 2.8	<i>Vadose zone</i>	19
Gambar 2.9	Jalur transpor polutan.....	28
Gambar 3.1	Lokasi studi.....	35
Gambar 3.2	Batas wilayah penelitian.....	36
Gambar 3.3	Lokasi pengambilan sampel.....	38
Gambar 3.4	Pembagian zona berpolutan.....	38
Gambar 3.5	Arah aliran air tanah Kecamatan Tanggulangin.....	39
Gambar 3.6	Lokasi pengambilan sampel.....	40
Gambar 3.7	<i>Hydrus-1D</i>	45
Gambar 3.8	Spesifikasi <i>Hydrus-1D</i>	45
Gambar 3.9	Contoh output <i>profile information Hydrus-1D</i>	46
Gambar 3.10	Contoh output <i>solute transport Hydrus-1D</i>	47
Gambar 4.1	Batas wilayah dan lokasi penelitian.....	52
Gambar 4.2	Lokasi stasiun hujan daerah penelitan.....	56
Gambar 4.3	Hasil impor data DEM.....	58
Gambar 4.4	Penggunaan <i>clip</i> data DEM.....	59
Gambar 4.5	Penggunaan <i>clip</i> data DEM wilayah kajian.....	59
Gambar 4.6	Pembacaan <i>slope</i>	60
Gambar 4.7	Peta zonasi <i>depth to watertable</i>	64
Gambar 4.8	Peta zonasi <i>recharge</i>	66
Gambar 4.9	Peta zonasi <i>aquifer media</i>	68
Gambar 4.10	Peta zonasi <i>soil media</i>	70
Gambar 4.11	Peta zonasi <i>topography</i>	72
Gambar 4.12	Peta zonasi <i>impact of vadose zone</i>	74
Gambar 4.13	Peta zonasi <i>hydraulic conductivity</i>	79

Gambar 4.14	Peta zonasi <i>DRASTIC</i> indeks	81
Gambar 4.15	Hydrus-1D	89
Gambar 4.16	Grafik hasil simulasi pergerakan polutan Mn pada arah horizontal menggunakan <i>Hydrus-1D</i>	90
Gambar 4.17	Posisi <i>Nodes</i>	91
Gambar 4.18	Grafik hasil simulasi pergerakan polutan Al pada arah horizontal menggunakan <i>Hydrus-1D</i>	92
Gambar 4.19	Grafik hasil simulasi pergerakan polutan Fe pada arah horizontal menggunakan <i>Hydrus-1D</i>	93
Gambar 4.20	Grafik <i>run time</i> untuk <i>Peclet number</i>	94
Gambar 4.21	Grafik <i>run time</i> untuk <i>Courant number</i>	95
Gambar 4.22	Pembagian lokasi air sumur dan geolistrik	95



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Peta Hidrogeologi
Lampiran 2	Peta Geologi
Lampiran 3	Data hujan harian Stasiun Porong tahun 1997-2017
Lampiran 4	Data kualitas air sumur Kabupaten Sidoarjo
Lampiran 5	Data uji XRF sampel lumpur
Lampiran 6	Dokumentasi foto pengambilan sampel air
Lampiran 7	Dokumentasi foto uji geolistrik
Lampiran 8	Dokumentasi foto pengambilan sampel lumpur
Lampiran 9	Rencana Jadwal Pengerjaan Tesis



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Laju pertumbuhan kawasan industri di Indonesia yang semakin pesat tidak hanya membawa dampak positif dari segi perekonomian tetapi juga membawa dampak negatif, khususnya pencemaran lingkungan seperti halnya yang terjadi di Kabupaten Sidoarjo.

Pencemaran air tanah yang berasal dari aktivitas manusia bersifat lambat dan merupakan suatu proses berbahaya yang memiliki efek negatif. Pencemaran ini tidak terlihat, memiliki proses yang kompleks, serta efek jangka panjang (Sidibe, 2018). Industri pertambangan dan perminyakan merupakan salah satu industri yang digemari saat ini, namun salah satu akibat dari aktivitas pertambangan itu dapat mempengaruhi lingkungan sekitar, salah satunya adalah penurunan kualitas air (Sidibe, 2018). Salah satu contoh aktivitas industri perminyakan yang berdampak bagi lingkungan adalah semburan lumpur di daerah Sidoarjo akibat aktivitas pengeboran minyak bumi. Fitrianto (2012) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa semburan lumpur yang dimulai pada tanggal 27 Mei 2006 tersebut menghancurkan berbagai macam infrastruktur dan merendam setidaknya 600 ha lahan dan pemukiman. Badan Pemeriksa Keuangan (BPK) Indonesia memperkirakan kerugian yang ditanggung mencapai 32 milyar rupiah.

Untuk melihat risiko dari semburan lumpur tersebut, pembuatan peta kerentanan berdasarkan uji kerentanan air tanah menggunakan metode DRASTIC dan Indeks Pencemaran juga diperlukan untuk memberikan alisa risiko yang tepat. Sidibe (2018) mengungkapkan peta kerentanan dapat digunakan sebagai alat dasar untuk melindungi sumberdaya airtanah. Karena apabila airtanah sudah terkontaminasi, maka akan sulit untuk memperbaiki situasi (Antonino et al., 2015; Mfonka., 2018). Metode DRASTIC merupakan salah satu metode tumpang susun indeks paling populer yang digunakan untuk menilai kerentanan airtanah (Khosravi et al., 2018; Sadeghfam et al., 2016).

Selain metode DRASTIC, metode IP (Indeks Pencemaran) digunakan pada penelitian ini. Metode IP merupakan suatu metode yang digunakan untuk

menentukan tingkat pencemaran relatif terhadap parameter kualitas air yang diizinkan. Metode ini sudah banyak digunakan untuk menilai kondisi kualitas air dan isu lain yang berkaitan (Tiwari et al., 2014; Guntur et al., 2017). Oleh karena itu, mengetahui luas sebaran polutan di suatu wilayah menjadi penting untuk dilakukan untuk meminimalisir risiko yang akan ditanggung. Penentuan luas sebaran polutan dapat dilakukan melalui pemantauan konsentrasi polutan dengan cara pengambilan sampel air di lokasi tertentu yang bergantung pada selang jarak dan waktu pengambilan air, maupun menggunakan model numerik.

Output penelitian ini adalah untuk memberikan gambaran sebaran polutan di kawasan Lumpur Sidoarjo beserta analisa risiko yang akan terjadi di masa yang akan datang berdasarkan uji kerentanan air tanah, yang juga akan didukung dengan pengujian data di lokasi penelitian.

Berikut merupakan daftar penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini diantaranya:

- Guntur, dkk (2017) dengan judul Penelitian Analisis Kualitas Perairan Berdasarkan Metode Indeks Pencemaran di Pesisir Timur Kota Surabaya
- Tiwari, dkk (2015) dengan judul Penelitian Evaluation of Surface Water Quality by Using GIS and Heavy Metal Pollution Index (HPI) Model in a Coal Mining Area, India.
- Sidibe (2018) dengan judul Heavy Metals and Nitrate to Validate Groundwater Sensibility Assessment Based on DRASTIC Models and GIS: Case of The Upper Niger and The Bani Basin in Mali.
- Tangviroon (2017) dengan judul Modelling and Evaluating The Performance Of River Sediment On Immobilizing Arsenic From Hydrothermally Altered Rock In Laboratory Coloumn Experiments With Hydrus-1D.
- Antonov (2018) dengan judul Application of Hydrus-1D for Evaluation of the Vadose Zone Saturation State in Connection With Arsenic Mobilization and Transport in Contaminated River Floodplain-Ogosta Valley Case Study, NW Bulgaria.
- Shang (2016) dengan judul Modelling the Risk of the Salt for Polluting Groundwater Irrigation with Recycled Water and Groundwater Using Hydrus-1D.
- Pal, dkk (2014) dengan judul Application of Hydrus-1D Model for Assessment of Phenol-Soil Adsorption Dynamics.

- Juniawan, dkk (2014) dengan judul Karakteristik Lumpur Lapindo dan Fluktuasi Logam Berat Pb dan Cu Pada Sungai Porong dan Aloo.

- Ridwan, dkk (2016) dengan judul Indikasi Aliran Air Bawah Permukaan ke Lokasi Semburan Lumpur Sidoarjo Berdasarkan Data Penginderaan Jauh Dan Korelasi Geokimia Pada Sistem Vulkanik Kuarter Sekitarnya.

- Purwaningsih, dkk (2013) dengan judul Hydrochemical Study of Groundwater in Sidoarjo Mud Volcano Area, East Java Indonesia.

1.2 Identifikasi Masalah

Fitrianto (2012) menyebutkan bahwa semburan lumpur yang dimulai pada tanggal 27 Mei 2006 tersebut menghancurkan berbagai macam infrastruktur dan merendam setidaknya 600 ha lahan dan pemukiman. Badan Pemeriksa Keuangan (BPK) Indonesia memperkirakan kerugian yang ditanggung mencapai 32 milyar rupiah.

Kerugian tersebut juga disertai dengan ditemukannya kandungan logam yang berada di kawasan Lumpur Sidoarjo. Dalam penelitian yang sama Fitrianto (2012) juga menyebutkan bahwa lumpur sidoarjo yang mencemari sungai porong mengandung material berbahaya seperti hidrokarbon sulfide, Hg (*mercury*), Cd (*cadmium*), Cr (*chromium*), As (*arsenic*), serta phenol yang sudah melewati batas ambang yang diijinkan. Juniawan, dkk. (2013) dalam penelitiannya di sungai porong dan aloo menyebutkan bahwa Lumpur Sidoarjo memiliki salinitas tinggi (40%), kandungan logam berat Pb sebesar 0,19-0,34mg/L. Ridwan, dkk. (2016) membuktikan bahwa nilai rata-rata unsur Pb, Zn, Mn, dan Fe, dalam 86 sampel lumpur sidoarjo yaitu masing-masing sebesar 49,40; 96,29; 653,78 ppm; dan 3,55 %. Hasil *file report* dari USGS yang ditulis oleh Geoffrey et al., (2008) menggunakan metode ICP-MS untuk analisisnya juga menyebutkan bahwa terdapat berbagai macam kandungan logam pada lumpur Sidoarjo tersebut. Berdasarkan hasil penelitian terdahulu maka penelitian ini dibuat mengingat masih adanya warga yang berada di kawasan Lumpur Lapindo yang menggunakan air sumur sebagai penyedia kebutuhan air sehari-hari. Dengan dilakukannya penelitian ini diharapkan dapat diketahui kondisi air sumur yang tersedia masih layak digunakan atau tidak bagi warga yang bermukim di kawasan Lumpur Sidoarjo itu sendiri. Serta agar permasalahan yang timbul dapat ditemukan solusi untuk mengatasinya dengan optimal.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan hasil identifikasi di atas maka dapat dirumuskan masalah yang akan dikaji pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana potensi kerentanan air tanah terhadap polusi di Kabupaten Sidoarjo?
2. Bagaimana kualitas air pada sumur warga yang terletak di Kabupaten Sidoarjo dan analisa risiko kerentanan air tanahnya dengan radius 1,5 kilometer dari tanggul Lumpur Sidoarjo?
3. Bagaimana tingkat kecocokan DRASTIC indeks dengan data pengujian sampel?
4. Bagaimana pola penyebaran polutan pada daerah terdampak dengan menggunakan program Hydrus-1D dengan skema pengaliran adveksi?

1.4 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan pembahasan pada studi ini, maka perlu dibatasi permasalahannya. Adapun batasan dari penulisan ini dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Metode kerentanan yang digunakan mengacu pada *U.S Environmental Protection Agency* (EPA) yaitu metode DRASTIC.
2. Metode yang digunakan untuk menentukan kualitas air adalah metode IP.
3. Metode yang digunakan untuk menghitung pola penyebaran polutan menggunakan Hydrus-1D.
4. Uji kualitas air tanah diambil melalui sampel yang bersumber dari sumur warga
5. Sampel air sumur warga diambil pada bulan basah yaitu pada bulan Januari 2019, dan pengambilan sampel dilakukan sebanyak satu kali.
6. Batas wilayah penelitian sejauh 1,5 km dari tanggul Lumpur Sidoarjo.
7. Hanya membahas mengenai tingkat kerentanan air tanah terhadap polusi.

1.5 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dan manfaat penelitian ini dijelaskan sebagaimana berikut:

1. Mendapatkan potensi kerentanan air tanah terhadap polusi di Kabupaten Sidoarjo.
2. Mendapatkan kualitas air pada sumur warga yang terletak di Kabupaten Sidoarjo dan analisa resiko kerentanan air tanahnya dengan radius 1,5 kilometer dari tanggul Lumpur Sidoarjo.
3. Mendapatkan tingkat kecocokan DRASTIC indeks dengan data pengujian sampel.
4. Mendapatkan pola penyebaran polutan pada daerah terdampak menggunakan program Hydrus-1D dengan skema pengaliran adveksi.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Analisa Risiko

Soemarno (2009, dalam Putra, dkk., 2018) mendefinisikan risiko sebagai suatu kondisi yang timbul karena ketidakpastian dengan seluruh konsekuensi tidak menguntungkan. Menurut Vaughan dan Curtis (1996, dalam Putra, dkk., 2018), istilah risiko didefinisikan sebagai:

1. *Risk is the chance of loss* (risiko merupakan peluang kerugian),
2. *Risk is the possibility of loss* (risiko merupakan kemungkinan kerugian),
3. *Risk is uncertainty* (risiko berupa ketidakpastian),
4. *Risk is the dispersion of actual from expected result* (risiko merupakan penyimpangan kenyataan dari hasil yang diharapkan),
5. *Risk is the probability of any outcome different from the one expected* (risiko merupakan kemungkinan bahwa segala hasil tidak sama dengan yang diharapkan).

Fjield (2007:2), mendefinisikan analisa risiko sebagai suatu proses identifikasi, penilaian, evaluasi, dan alternatif manajemen risiko yang dilakukan untuk memahami konsekuensi yang tidak diinginkan, berdampak negatif terhadap kehidupan manusia, kesehatan, property, atau lingkungan.

Beberapa faktor yang dipertimbangkan dalam tahapan mengidentifikasi suatu risiko menurut Flagan dan Norman (1993, dalam Putra, dkk., 2018) diantaranya:

1. Identifikasi risiko dilakukan dengan melakukan identifikasi terhadap sumber dan jenis risiko.
2. Klasifikasi risiko diartikan sebagai melakukan pertimbangan terhadap jenis risiko dan efeknya terhadap individu maupun organisasi.
3. Analisis risiko didefinisikan sebagai usaha evaluasi antara keterkaitan dengan jenis risiko atau kombinasi risiko dengan melakukan analisa.
4. Memberikan respon terhadap risiko dilakukan dengan pengambilan berbagai keputusan yang menyangkut risiko.
5. Tanggapan terhadap risiko yaitu mempertimbangkan bagaimana risiko harus dikelola.

Soeharto (1997, dalam Putra, dkk., 2018) menyatakan bahwa analisis risiko adalah proses penilaian pengaruh serta kemungkinan yang terjadi dalam pengidentifikasian suatu risiko, dalam proses ini risiko diprioritaskan menurut akibat yang akan ditimbulkan pada tujuan proyek yang ingin dicapai. Masukan pada analisis risiko kualitatif adalah perencanaan dalam manajemen risiko, pengidentifikasi risiko, pengidentifikasi status, tipe proyek, data yang akan diteliti, skala probabilitas, serta pengaruh dan pembuatan asumsi.

Ekosistem air telah dipengaruhi oleh berbagai jenis kontaminasi di seluruh dunia dalam beberapa dekade terakhir. Logam merupakan salah satu polutan yang paling umum telah memperburuk kondisi ekosistem air (Nazeer, 2014).

Ravenscroft et al., (2009 dalam Rasool, et al., 2016) menyebutkan bahwa kehidupan manusia saat ini sangat terpengaruh karena adanya pembuangan limbah ke dalam air. Pertumbuhan populasi yang cepat, dibarengi dengan kegiatan antropogenik seperti bertambahnya industri, urbanisasi, dan pembuangan domestik atau industri, kegiatan pertanian dan buangan tambang telah menyebabkan masalah lingkungan yang serius pada kerusakan air tanah (Kumar, et al., 2017)

Adanya logam berat dalam air yang dikonsumsi yang bersifat toksik di perairan merupakan masalah yang memprihatinkan mengingat dampaknya terhadap hewan, tumbuhan, dan kehidupan manusia. Umumnya logam berat berasal dari alam seperti pengaruh cuaca, erosi, maupun kegiatan gunung api vulkanik. Dan bisa juga berasal antropogenik yaitu kegiatan pertambangan, peleburan, kegiatan industri, dan kegiatan pertanian (Rasool, 2016; Nazeer, 2014).

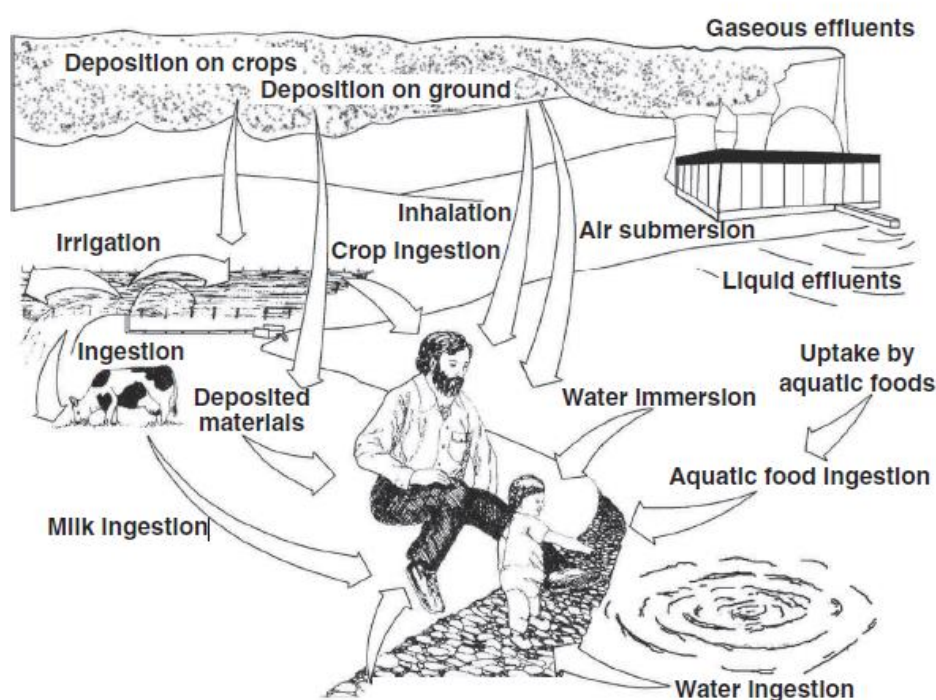
2.1.1 Analisa Risiko Kesehatan

United States Environmental Protection Agency (US-EPA) mendefinisikan analisa risiko kesehatan manusia sebagai suatu proses untuk memperkirakan sifat maupun kemungkinan dampak buruk kesehatan pada manusia yang mungkin terpapar bahan kimia di lingkungan yang terkontaminasi, baik saat ini atau di masa yang akan datang (Giri, 2015).

Menurut Momot dan Synzynys., (2005, dalam Giri., 2015) Untuk melakukan analisa risiko kesehatan terhadap manusia umumnya ada 4 tahapan yang harus dilakukan, yaitu:

1. Identifikasi risiko
2. Penilaian respon terhadap dosis
3. Penilaian terhadap paparan
4. Karakterisasi risiko

Analisa risiko kesehatan manusia merupakan suatu pendekatan yang efektif untuk menentukan risiko kesehatan bagi objek yang terpapar kontaminan. Terpaparnya manusia terhadap logam dapat terjadi melalui tiga jalur utama yaitu konsumsi langsung, inhalasi melalui mulut dan hidung, penyerapan kulit melalui paparan kulit, lalu pencernaan yang dianggap sebagai jalan utama paparan kontaminan kimia untuk air minum (Giri, 2015; US-EPA, 2004). Metode ini sudah banyak digunakan untuk menilai potensi dampak buruk kesehatan bagi masyarakat yang terpapar air yang telah terkontaminasi (Giri, 2015; Kumar, 2017; Rasool, 2016; Nazeer; 2014).



Gambar 2.1 Facility release
Sumber: (Fjeld, 2007:9)

Analisa risiko kesehatan atau Health Risk Assessment (HRI) dihitung berdasarkan estimasi jumlah asupan harian atau Estimated Daily Intake (EDI) dari logam berat yang dikonsumsi berdasarkan perhitungan yang diadopsi dari US Environmental Protection Agency (US-EPA, 2011) dan Shah et al., (2012).

$$EDI = C \times IR \times ED \times \frac{EF}{BW} \times AT \quad (2-1)$$

Dimana:

C : concentration of metals in water ($\mu\text{g/L}$)

IR : water intake rate (2L/hari)

ED : *exposure duration* (diasumsikan 67 tahun)

EF : *exposure frequency* (365 hari/tahun)

BW : *body weight* (72 kg)

AT : *average lifetime* (24,455 hari)

The Target Hazard Quotients (THQs) dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$THQs = \frac{EDI}{RfD} \quad (2-2)$$

Dimana:

RfD : reference dose of a particular metal, untuk Fe, Mn, dan Al berturut-turut adalah 300; 140; 0,0004 µg/kg-day (Rasool et al., 2015) dan (Muhammad et al., 2011).

Apabila nilai THQs < 1 maka terindikasi tidak merugikan kesehatan, namun apabila nilai THQs > 1 maka dapat diasumsikan menyebabkan risiko kesehatan (Kumar, et al., 2017).

2.2 Polusi Air Tanah

Polusi air tanah merupakan degradasi kualitas air tanah yang disebabkan oleh kegiatan manusia. Dewasa ini polusi air tanah dapat disebabkan oleh berbagai macam faktor seperti pertumbuhan penduduk yang sangat cepat, penggunaan pupuk yang berlebihan, sistem pembuangan air kotor yang erat kaitannya dengan hunian, serta kegiatan industry (Aydi, 2018).

Menurut Harvey (2008) sumber polutan air tanah dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu:

1. Point source pollution

Polutan tipe seperti ini berasal dari satu titik sumber yang bisa ditemukan, seperti *septic tank* (single), *landfills* berukuran kecil, lubang sampah kecil, tangki penyimpanan BBM bawah tanah, sumur, atau tumpahan bahan kimia tertentu.

2. Non point source pollution

Polutan tipe ini berasal dari cakupan wilayah yang luas. Bisa berupa sistem atau kesatuan dari polutan tipe tunggal. Yang termasuk dalam kategori ini diantaranya pupuk pestisida, infiltrasi dari sungai, *landfills* yang berukuran besar, bocoran pipa, bocoran saluran pembuangan limbah (sewer) maupun kumpulan dari *septic tank* yang berasal dari pemukiman penduduk.

Polutan air tanah yang digolongkan berdasarkan jenis dibagi menjadi beberapa jenis diantaranya:

1. Alami

Aliran air tanah yang melewati akuifer membawa komponen seperti klorida, magnesium, dan kalsium dengan jumlah yang berlebih. Intrusi air laut juga masuk ke dalam sumber polutan yang alami.

2. Pertanian

Penggunaan pestisida, bahan kimia, atau pupuk yang berlebihan juga mengakibatkan pencemaran air tanah.

3. Industri

Polutan yang bersumber dari industri dapat berupa limbah buangan, polutan dari sistem transportasi, atau tangki penyimpanan bahan kimia/BBM.

4. Pemukiman

5. Pembuangan septic tank, jamban, sumur, dan limpasan permukaan dapat digolongkan menjadi polutan yang berasal dari pemukiman.

2.3 Air Tanah

Air tanah diartikan sebagai air yang menempati rongga-rongga dalam lapisan geologi (Bisri,1988:2). Air tanah merupakan bagian dari siklus hidrologi dan sebagian besarnya berasal dari air permukaan yang meresap ke dalam tanah.

2.3.1 Terjadinya Air Tanah

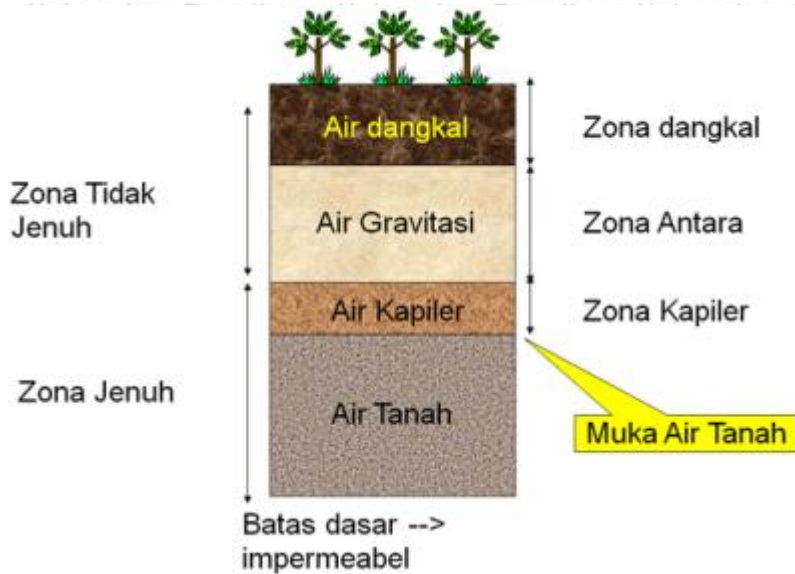
1. Asal air tanah

Air tanah merupakan bagian dari daur hidrologi, sama seperti halnya air permukaan dan air atmosfer. Air tanah dengan jumlah kecil juga dapat berasal dari sumber dapat pula masuk ke dalam daur tersebut (Bisri,1988:3).

2. Penyebaran vertikal air tanah

Pengedaran air tanah secara vertikal di bawah permukaan dibagi menjadi dua yaitu zona jenuh dan tidak jenuh.

Air yang berada dalam zona jenuh dinamakan air tanah. Sedangkan air yang berada pada daerah tidak jenuh disebut air mengambang atau air dangkal (vadose water). Untuk zona tidak jenuh dapat dibagi menjadi beberapa zona yaitu zona dangkal, antara, dan kapiler.



Gambar 2.2 Penyebaran vertikal air tanah
Sumber: (<http://geolistriklombok.blogspot.co.id>)

1. Zona kapiler

Zona kapiler terletak diantara permukaan air tanah sampai ke batas kenaikan kapiler air.

2. Zona antara

Zona antara berada di antara batas bawah zona air dangkal sampai dengan batas atas zona kapiler. Tebal dari zona ini biasanya sangat beragam serta berguna untuk mengalirnya air dari bawah sampai ke muka air tanah (Soemarto,1995:165).

3. Zona air dangkal

Zona air tanah dimulai dari permukaan tanah sampai ke zona perakaran utama (*major root zone*). Tanah di zona air dangkal biasanya dalam keadaan tidak jenuh namun apabila terdapat banyak air di permukaan tanah seperti berasal dari curah hujan dan irigasi.

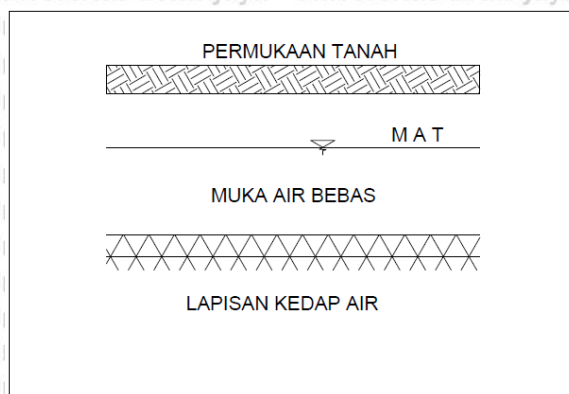
2.3.2 Sifat Batuan yang Mempengaruhi Air Tanah

Formasi geologi yang dapat ditembus air (*permeable*) yang dapat memungkinkan untuk dilalui air disebut akuifer, pasir dan kerikil masuk ke dalam kategori tersebut. Sebaliknya yaitu formasi yang dapat menampung air tapi tidak dapat ditembus air (*impermeable*) dinamakan *aquiclude*, sebagai contoh adalah tufa, dan lempung. *Aquifuge* didefinisikan sebagai formasi kedap air yang tidak mengandung dan melepaskan air, termasuk dalam kategori ini granit dan batuan keras. Sedangkan *aquitards* adalah formasi yang dapat menyimpan air tetapi hanya mampu mengalirkannya dalam jumlah yang sedikit.

Bagian batuan yang tidak terisi oleh bagian butirnya akan diisi oleh airtanah. Ruang tersebut dinamakan rongga-rongga atau bias disebut pori-pori. Berdasarkan lapisan geologi dan harga kelulusan (K), akuifer dapat dibedakan menjadi 4 macam (Bisri, 1988:5) yaitu:

1. Akuifer bebas (*unconfined aquifer*)

Merupakan suatu akuifer dimana muka air tanah merupakan bidang batas sebelah atas dari pada daerah jenuh air. Akuifer ini disebut juga *phreatic aquifer/non artesian aquifer/free aquifer*.

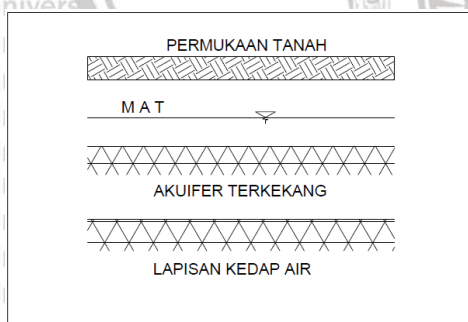


Gambar 2.3 Akuifer bebas

Sumber : (Bisri, 1988:5)

2. Akuifer terkekang (*confined aquifer*)

Akuifer terkekang merupakan suatu akuifer dimana air tanah terletak dibawah lapisan kedap air (*impermeable*) dan mempunyai tekanan yang lebih besar daripada tekanan atmosfer. Akuifer ini disebut juga pressure aquifer.

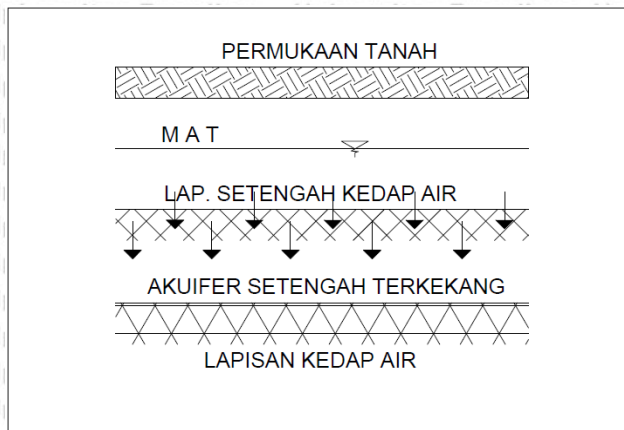


Gambar 2.4 Akuifer terkekang

Sumber : (Bisri, 1988:6)

Akuifer bocor atau akuifer setengah terkekang

Merupakan suatu akuifer yang sepenuhnya jenuh air dengan bagian atas dibatasi oleh lapisan setengah kedap air dan bagian bawah terletak pada suatu dasar yang kedap air.

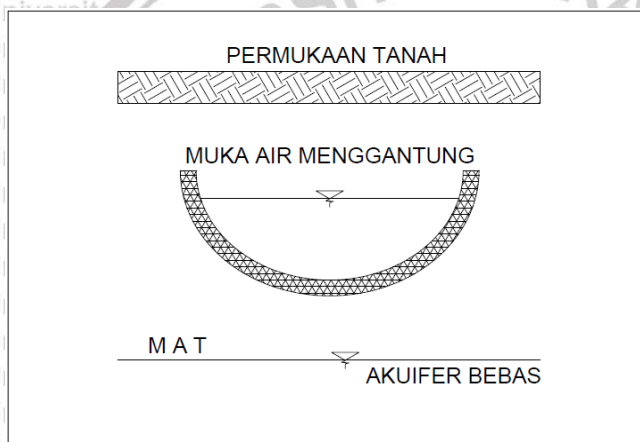


Gambar 2.5 Akuifer setengah terkekang

Sumber : (Bisri, 1988:6)

Akuifer menggantung (perched aquifer)

Yaitu akuifer yang mempunyai massa air tanah terpisah dari air tanah induk oleh suatu lapisan yang relative kedap air yang begitu luas dan terletak diatas daerah jenuh air.



Gambar 2.6 Akuifer menggantung

Sumber : (Bisri, 1988:7)

2.4 Pendugaan Geolistrik

Pendugaan geolistrik merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengetahui kondisi lapisan geologi bawah permukaan. Metode ini memanfaatkan sifat-sifat aliran listrik yang berada didalam bumi. Metode lain yang bisa digunakan yaitu metode seismik dan metode magnetik.

2.4.1 Metode Geolistrik Resistivitas

Metode ini bertujuan untuk mengetahui keadaan geologi bawah permukaan dengan menggunakan tahanan jenis batuan. Metode ini juga digunakan untuk mengetahui ada tidaknya air tanah dan eksploitasi mineral. Prinsip kerja metode ini yaitu dengan mengalirkan

arus ke bawah permukaan bumi sehingga akan diperoleh beda potensial. Dengan demikian akan didapatkan informasi tahanan jenis batuan bawah permukaan (Anonymous, 2013). Suatu arus dengan rapat arus I dialirkan kedalam bumi maka arus yang melalui suatu elemen luasan A dapat ditulis dalam persamaan dibawah ini yang berdasarkan hukum ohm:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2-4)$$

Maka akan diperoleh persamaan:

$$\rho = \frac{\Delta V A}{I l} \quad (2-5)$$

Dimana,

ΔV : Beda potensial (volt)

I : Kuat arus yang melalui medium (ampere)

ρ : Hambatan jenis bumi (ohm meter)

A : Luasan suatu elemen (m^2)

l : Panjang suatu elemen (m)

R : Resistivitas (volt/ampere)

2.4.2 Faktor Geometri

Apabila pada permukaan bumi diinjeksikan dua titik arus yang berlawanan pada suatu jarak tertentu, maka kedua titik akan saling mempengaruhi. Bila diantara arus dipasang elektroda potensial, maka beda potensial yang terukur pada elektroda potensial ditentukan oleh besarnya harga arus yang ditentukan.

$$\rho(\Omega m) = K \Delta V / I \quad (2-6)$$

Dalam metode Schlumberger menggunakan $\frac{1}{2}$ kali total bentang, maka harga dari K yaitu:

$$K = \pi(a^2 - b^2)/2b \quad (2-7)$$

Dimana,

K : Faktor geometri (meter)

ρ : Hambatan jenis bumi (ohm meter)

I : Arus listrik yang diinjeksikan (ampere)

V : Beda potensial antara dua elektroda (volt)

2.4.3 Konsep Tahanan Jenis Semu

Dengan asumsi bahwa bumi mempunyai sifat homogen isotropis, tahanan jenis yang terukur merupakan tahanan jenis yang sebenarnya dan tidak tergantung pada spasi elektroda. Pada kenyataannya bumi terdiri dari atas lapisan dengan tahanan jenis yang berbeda-beda sehingga yang terukur merupakan pengaruh dari lapisan-lapisan tersebut, maka harga tahanan jenis yang terukur bukan merupakan harga tahanan jenis satu lapisan saja. Hal ini terutama untuk spasi elektroda yang lebar.

Untuk kasus yang tidak homogen, bumi diasumsikan berlapis-lapis dengan masing-masing lapisan memiliki harga tahanan jenis dari suatu medium fiktif homogen yang ekuivalen dengan medium berlapis yang ditinjau.

2.4.4 Paket Program IPI2WIN

Paket program IP2WIN merupakan salah satu program yang didesain untuk menganalisis data hasil pengukuran geolistrik pada profil tunggal secara otomatis atau semi otomatis untuk mendapatkan kesalahan (*error*) yang paling kecil.

Program IPI2WIN memiliki serangkaian pemakaian sebagai berikut:

1. Input data

Data input yang diperlukan dalam program ini adalah data panjang elektroda arus per tiga ($AB/3$) dan tahanan jenis semu (ρ_a).

2. Eksekusi program

Eksekusi program dapat dilakukan secara otomatis atau semi otomatis.

3. Output program

4. Output dari program ini berupa jumlah lapisan, tahanan jenis sebenarnya, ketebalan dan kedalaman lapisan.

2.5 Kerentanan Air Tanah

Kerentanan air tanah adalah kemampuan dari sistem air tanah yang tergantung dari tingkat sensitifitas sistem tersebut terhadap alam dan terhadap aktivitas manusia. Kerentanan air tanah menurut Harter (2001, dalam Putranto, dkk., 2016) adalah ukuran sejauh mana airtanah mampu bertahan terhadap polusi atau kontaminan pada permukaan tanah hingga

mencapai muka air tanah atau lapisan akuifer. Hampir semua sumber air tanah memiliki tingkat kerentanan terhadap pencemaran / polusi yang bervariasi.

Menurut Vrba (1994, dalam Kazakis 2015), kerentanan air tanah terhadap polusi dapat dikelompokkan kedalam 2 (dua) tipe, yaitu:

1. Kerentanan akibat faktor alam (intrinsic/ natural factor)
Adalah kerentanan yang disebabkan oleh faktor hidrogeologi dari suatu daerah.
2. Kerentanan spesifik (kombinasi)
Adalah kerentanan yang disebabkan oleh perubahan tata guna lahan dari suatu daerah akibat dari perkembangan aktivitas manusia.

2.5.1 Metode DRASTIC

DRASTIC adalah suatu sistem yang dikembangkan oleh U.S Environmental Protection Agency (US-EPA) pada tahun 1980 untuk memetakan kerentanan suatu akuifer yang terkena polusi menurut kondisi hidrogeologi yang mempengaruhi pergerakan air dari permukaan menuju akuifer pada suatu daerah (Aller et al., 1987). Konsep penilaian kontaminasi air tanah yaitu membagi wilayah geografis menjadi zona-zona dalam hal kerentanannya terhadap polusi, kemudian tindakan perlindungan air tanah yang efektif akan dilakukan pada daerah tersebut (Zghibi et al., 2016).

Metode DRASTIC dipilih karena beberapa alasan (Mfonka et al, 2018), diantaranya:

1. Metode ini merupakan metode yang simpel dan menggunakan beberapa parameter yang berasal dari lingkungan, yang berfungsi mengontrol proses kontaminasi yang berasal dari akuifer.
 2. Banyaknya lapisan parameter data input yang akan membatasi kesalahan parameter tunggal pada hasil akhir.
 3. Tersedianya informasi yang telah ada secara sistematis di instansi-instansi terkait.
- Metode ini cukup dapat dipercaya dalam menghitung besarnya kerentanan polutan terhadap lokasi tertentu karena banyaknya parameter yang digunakan. Metode ini juga telah mendapatkan pengakuan dari US-EPA (Aller et.al., 1987).

Kekurangan metode DRASTIC diantaranya adalah:

1. Subjektivitas terkait dengan penentuan skala peringkat dan koefisien pembobotan untuk model.
2. Membutuhkan input parameter yang cukup banyak.

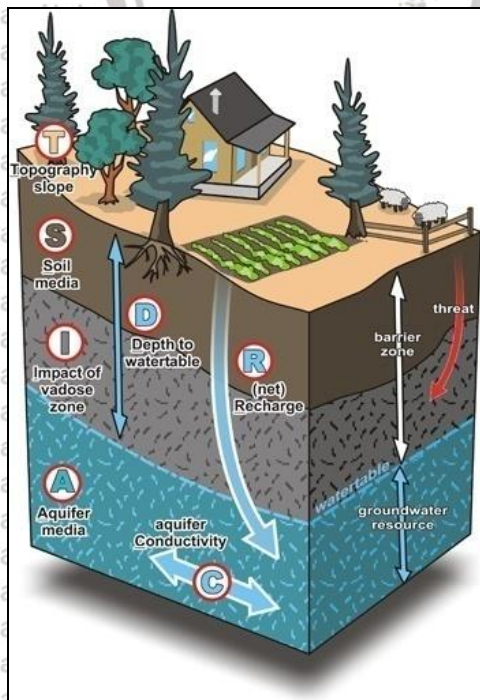
3. DRASTIC merupakan alat evaluasi dan tidak dirancang untuk memberikan jawaban mutlak.

Metode ini mengasumsikan bahwa (Kihumba et al., 2017):

1. Bahan pencemar masuk pada permukaan tanah;
2. Bahan pencemar tersiram air hujan masuk ke dalam air tanah;
3. Bahan tercemar terbawa mobilitas air;
4. Daerah yang dievaluasi dengan menggunakan DRASTIC lebih besar dari 50 ha.

DRASTIC merupakan akronim dari 7 faktor hidrogeologi yang mempengaruhi kerentanan air tanah. Tujuh parameter DRASTIC tersebut adalah:

1. Depth to watertable
2. Recharge
3. Aquifer media
4. Soil media
5. Topography (slope)
6. Impact of the vadose zone media
7. Conductivity (hydraulic) of the aquifer



Gambar 2.7 Visualisasi metode DRASTIC

Sumber: www.sfu.ca/personal/dallen/Visualization/DRASTIC/drastic_page.html, diakses 17 November 2018)

2.5.2 Parameter DRASTIC

Metode DRASTIC mempertimbangkan faktor-faktor hidrogeologi seperti yang diuraikan dibawah ini:

1. *Depth to watertable/* kedalaman air tanah (D)

Depth to watertable adalah jarak airtanah dari permukaan tanah dengan permukaan di bawah tanah. Kedalaman muka air tanah berdampak pada tingkat interaksi antara perkolasi kontaminan (udara, mineral, air) dan material sub-surface, bergantung pada derajat, luasan, atenuasi fisikokimia dan proses degradasi (Rahman, 2008). Semakin dangkal kedalaman air, maka semakin rentan aquifer untuk terkena polutan. Sumber data untuk parameter ini bisa didapatkan dari data sumur pengujian akuifer atau laporan hidrogeologi.

2. *Recharge/curah hujan (R)*

Sumber yang utama untuk pengisian kembali adalah presipitasi yang melalui permukaan tanah dan kemudian terjadi infiltrasi sehingga mencapai air tanah. Net Recharge adalah total kuantitas per unit area, dalam inci per tahun, yang mencapai permukaan air di bawah tanah (*groundwater table*). Air hujan berkaitan dengan banyaknya air yang dapat melarutkan dan mengangkut bahan pencemaran (polutan). Curah hujan ini kemungkinan mengandung polutan yang dapat menembus masuk secara vertikal menuju muka air tanah ataupun secara horizontal pada media akuifernya. Semakin besar curah hujan maka semakin besar pula potensi polusi air tanahnya. Sumber data untuk parameter recharge didapatkan dari data curah hujan dari badan klimatologi.

3. *Aquifer media/jenis akuifer (A)*

Media akuifer merupakan batuan terkonsolidasi ataupun tidak terkonsolidasi yang berperilaku sebagai penyimpan air. Semakin besar ukuran butiran batuan yang ada di dalam akuifer dan semakin banyak retakannya, maka semakin tinggi kemampuan permeabilitasnya sehingga semakin besar pula kemungkinannya untuk terkena polusi. Menurut Todd (1980), batuan yang dapat berfungsi sebagai lapisan pembawa air terbaik adalah pasir, kerakal, dan kerikil. Sedangkan 90% dari akuifer terdiri atas batuan tidak terkonsolidasi, terutama kerikil dan pasir.

Jika ditinjau dari permeabilitas batuanya, lapisan pembawa air dapat digolongkan menjadi tiga kelompok, yaitu:

- Lapisan *permeable* (serap air) seperti kerikil, kerakal, dan pasir
- Lapisan semi permeable (semi menyerap air), seperti pasir argullasis

c. Lapisan kedap air, seperti batuan kristalin, tanah liat

Sumber data untuk parameter ini biasanya diperoleh dari laporan hidrogeologi dan geologi yang dipublikasikan.

4. *Soil media/Jenis Tanah (S)*

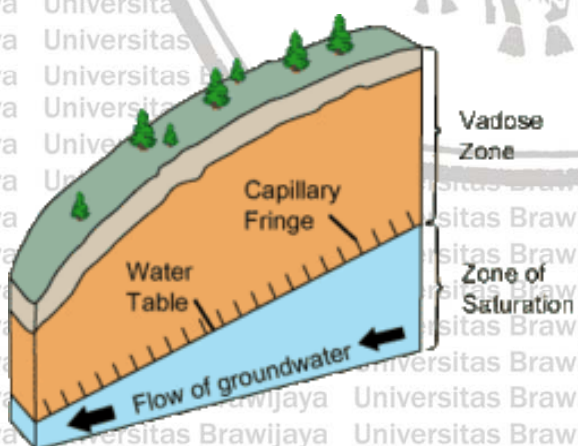
Merupakan zona pelapukan teratas di bumi. Tanah memiliki pengaruh yang signifikan terhadap jumlah air hujan yang dapat terinfiltrasi ke dalam tanah. Sumber data untuk parameter ini diperoleh dari laporan survei tanah yang dipublikasikan.

5. *Topography/kemiringan permukaan tanah (T)*

Topografi merupakan kemiringan dari permukaan lahan. Kemiringan lahan merupakan faktor kunci yang menentukan jumlah limpasan permukaan dan akibatnya, daerah dengan kemiringan rendah/landai cenderung menahan air untuk jangka waktu yang lebih lama. Sedangkan area dengan kemiringan yang lebih curam, memiliki nilai *runoff* yang lebih besar dan nilai infiltrasi lebih kecil sehingga kemungkinan polutan untuk bermigrasi lebih sedikit daripada daerah dengan kemiringan landai. Sumber data untuk parameter ini dapat diperoleh dari peta topografi yang dipublikasikan badan pemerintah.

6. *Impact of the vadose zone media/dampak zona tak jenuh (I)*

Vadose zone (*unsaturated zone*) merupakan zona tidak jenuh yang berada diatas muka air tanah. Tekstur pada zona ini menentukan waktu tempuh dari pencemar untuk melaluinya pada akuifer permukaan. Rating pada zona tidak jenuh umumnya sama dengan media akuifer.



Gambar 2.8 *Vadose zone*

Sumber: (<https://en.wikipedia.org>, diakses 17 November 2018)

7. *Hydraulic conductivity of the aquifer/ Konduktivitas Hidraulik (C)*
 Konduktivitas hidraulik/ koefisien kelulusan air (K) mengacu pada laju dimana air mengalir secara horizontal dalam suatu akuifer, semakin tinggi nilai konduktivitas hidrauliknya maka semakin tinggi risiko kerentanannya. Nilai konduktivitas hidraulik bisa di dapatkan dari tabel ukuran butir material akuifer berikut:

Tabel 2.1 Nilai konduktivitas hidraulik (K) pada berbagai jenis batuan (Morris & Johnson 1967, menurut Todd, 1980)

Macam batuan	K (m/hari)	K (m/dt)
Kerikil halus	150	0,001736111
Kerikil menengah	270	0,003125
Kerikil kasar	450	0,005208333
Pasir kasar	45	0,000520833
Pasir menengah	12	0,000138889
Pasir halus	2,5	2,89352E-05
Batupasir menengah	3,1	3,58796E-05
Batupasir halus	0,2	2,31481E-06
Silt	0,08	9,25926E-07
Lempung	0,0002	2,31481E-09
Batu gamping	0,94	1,08796E-05
Solomit	0,001	1,15741E-08
Sekis	0,2	2,31481E-06
Batu sabak	0,00008	9,25926E-10
Tuffa	0,2	2,31481E-06
Basalt	0,01	1,15741E-07
Gabbro lapuk	0,7	8,10185E-06
Granit lapuk	0,4	1,62037E-05

Sumber: Todd (1980)

2.5.3 Pengolahan data

Tiap parameter DRASTIC telah ditetapkan nilai pemberatnya yaitu antara 1-5. Jika parameter menimbulkan dampak yang cukup besar maka parameter yang bersangkutan mempunyai nilai weight 5, dan bila menimbulkan dampak yang kecil maka akan memiliki nilai weight 1. Nilai pemberat dari masing-masing parameter seperti tampak dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.2 Weight of DRASTIC Parameters

Parameter	DRASTIC weights
Depth to watertable(Dw)	5
Recharge(Rw)	4
Aquifer media (Aw)	3
Soil media (Sw)	2
Topography (Tw)	1
Impact of the vadose zone media (Iw)	5
Conductivity (hydraulic) of the aquifer (Cw)	3

Sumber: Aller et al. (1987:19)

Masing-masing parameter DRASTIC dibagi berdasarkan nilai range (tingkatan) atau berbagai tipe media yang berpengaruh dalam potensi polusi yang akan terjadi. Tiap range parameter telah ditetapkan suatu nilai bobot (rating) yang berkisar antara 1-10. Semakin besar nilainya, menandakan jenis dari parameter DRASTIC tersebut semakin berpotensi menyebabkan polusi. Jenis parameter dengan nilai rating 8, 9, dan 10 memiliki nilai kerentanan yang sangat tinggi untuk menyebabkan potensi polusi. Kisaran range dan rating dari masing-masing parameter DRASTIC seperti pada Tabel 2.3 sampai Tabel 2.9 dibawah ini.

Tabel 2.3 Rating of Depth to watertable

Interval kedalaman muka air tanah (m)	Bobot (Rating/Dr)
0-1,5	10
1,5-4,6	9
4,6-9,5	7
9,5-15,2	5
15,2-22,9	3
22,9-30,5	2
>30,5	1

Sumber: Aller et al. (1987:19)

Tabel 2.4 Rating of recharge

Interval curah hujan (mm)	Bobot (Rating) Rr
0-750	1
750-1250	3
1250-1750	6
1750-2000	8
2000-2750	9
>2750	10

Sumber: Aller et al. (1987:21)

Tabel 2.5 Rating of aquifer media

Jenis media akuifer	Bobot (Rating) Ar
Serpih massif/besar	1
Batuan beku/malihan	3
Lapukan batuan beku/malihan	4
Sungai es	5
Endapan batu pasir, gamping, dan rangkaian serpih	6
Batu pasir massif	6
Batu gamping massif	6
Pasir dan kerikil	8
Basalt	9
Batu gamping karst	10

Sumber: Aller et al. (1987:22)

Tabel 2.6 Rating of soil media

Tekstur tanah	Bobot rating (Sr)
Kerikil	10
Pasir	9
Agregat/perkerutan lempung	7
Lumpur pasir	6
Lumpur	5
Lumpur lanauan	4
Lumpur lempung	3
Non agregat lempung	1

Sumber: Aller et al. (1987:22)

Tabel 2.7 Rating of topography

Kemiringan lereng (% slope)	Bobot rating (Tr)
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
18+	1

Sumber: Aller et al. (1987:23)

Tabel 2.8 *Rating of impact vadose zone*

Jenis zona tak jenuh vados	Bobot rating (Ir)
Lanau/lempung	1
Serpil	3
Batuan malihan/batuan beku	4
batu gamping	6
Batu pasir	6
Lapisan batu gamping, batu pasir, dan serpil	6
Pasir dan kerikil tercampur lumpur dan lempung	6
Pasir dan kerikil	8
Basalt	9
Batu gamping karst	10

Sumber: Aller et al. (1987:24)

Tabel 2.9 *Rating of hydraulic conductivity*

Interval konduktivitas hidraulik (m/hari)	Bobot rating (Cr)
0-0,864	1
0,864-2,59	2
2,59-6,048	4
6,048-8,64	6
8,64-17,58	8
>17,58	10

Sumber: Aller et al. (1987:40)

Perhitungan DRASTIC index menggunakan rumus seperti dibawah

ini:

(2-8)

$$Dr \cdot Dw + Rr \cdot Rw + Ar \cdot Aw + Sr \cdot Sw + Tr \cdot Tw + Ir \cdot Iw + Cr \cdot Cw$$

Keterangan:

Dr : Depth to watertable rating Tr : Topography rating

Dw : Depth to watertable weight Tw : Topography weight

Rr : Recharge rating Ir : Impact of the vadose zone media rating

Rw : Recharge weight Iw : Impact of the vadose zone media weight

Ar : Aquifer media rating Cr : Conductivity (hydraulic) of the aquifer rating

Aw : Aquifer media weight Cw : Conductivity (hydraulic) of the aquifer weight

Sr : Soil media rating Sw : Soil media weight

Dari hasil penjumlahan indeks potensial pencemaran akan didapatkan nilai DRASTIC index yang menggambarkan tingkat kerentanan air tanah di suatu daerah. Setelah nilai DRASTIC indeks didapatkan, pengidentifikasian area yang rentan terhadap pencemaran

dibandingkan area yang lain bisa dilakukan. Semakin tinggi nilai DRASTIC indeks, semakin besar kerentanan suatu area untuk terkena polusi (Aller et al., 1987:20). Secara keseluruhan, DRASTIC Indeks mempunyai nilai skor paling rendah 23 dan paling tinggi 230. Menurut Alassane (2004 dalam Mfonka, 2018) nilai ekstrim jarang sekali terjadi, nilai yang dihasilkan biasanya berkisar antara 50 dan 200. Peta kerentanan airtanah hanya digunakan sebagai alat pengevaluasi dan tidak dibuat untuk menjelaskan unit-unit dari suatu pencemaran.

Tabel 2.10 Kriteria tingkat pencemaran

Tingkat kerentanan	Indeks DRASTIC	Sifat
Rendah	1-100	Hanya dapat tercemar oleh polutan tertentu yang dibuang secara terus-menerus
Sedang	101-140	Dapat tercemar oleh polutan yang dibuang secara terus-menerus
Tinggi	141-180	Dapat tercemar oleh semua polutan, kecuali yang memerlukan daya serap tinggi dan mudah berubah dalam berbagai skenario
Sangat tinggi	>180	Dapat tercemar oleh semua polutan dalam waktu relatif singkat dan dalam berbagai skenario

Sumber: Putranto, 2016

Peta kerentanan airtanah dapat digunakan oleh para perencana dan para pengembang untuk mengkategorikan suatu area berdasarkan tingkat kerentanannya. Sehingga untuk kedepannya dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan dalam hal penggunaan sumber daya air dalam suatu area. Peta kerentanan airtanah dapat digunakan sebagai petunjuk untuk menentukan lokasi/ daerah industri yang berpotensi menyebabkan polusi dimasa yang akan datang sehingga dampak-dampak perkembangan potensi suatu daerah utamanya yang berhubungan dengan keberadaan sumber daya air dapat diperkecil.

Daerah yang memiliki nilai indeks yang tinggi termasuk dalam daerah yang sangat rentan untuk terkena polusi air tanah. Sedangkan daerah yang memiliki nilai indeks rendah juga berpotensi terkena polusi air tanah, namun tingkat kerentanan lebih rendah dibandingkan daerah yang memiliki skor tinggi.

2.6 Metode Indeks Pencemaran

Metode Indeks Pencemaran atau *Pollution Index* diusulkan oleh Sumimoto dan Nemerow (1970) dari Universitas Texas, AS. Metode ini digunakan untuk menentukan tingkat pencemaran relatif terhadap parameter kualitas air yang diizinkan.

$$IP_j = \sqrt{\frac{(C_i/L_{ij})^2_M + (C_i/L_{ij})^2_R}{2}} \quad (2-7)$$

Dimana :

IP_j : Indeks pencemaran bagi peruntukan j

C_i : Konsentrasi parameter kualitas air i

L_{ij} : Konsentrasi parameter kualitas air i yang tercantum dalam baku peruntukan air j

M : Maksimum

R : Rerata

Tabel 2.11 Kategori kelas *Index Pollution*

Nilai PI _j	Keterangan
$0 \leq PI_j \leq 1,0$	Memenuhi baku mutu (kondisi baik)
$1,0 < PI_j \leq 5,0$	Cemar ringan
$5,0 \leq PI_j \leq 10$	Cemar sedang
$PI_j > 10$	Cemar berat

Sumber: Lampiran II Kepmen LH No. 11 Tahun 2003 dalam Guntur., dkk (2017)

Metode Indeks Pencemaran dipilih karena beberapa alasan dibawah ini:

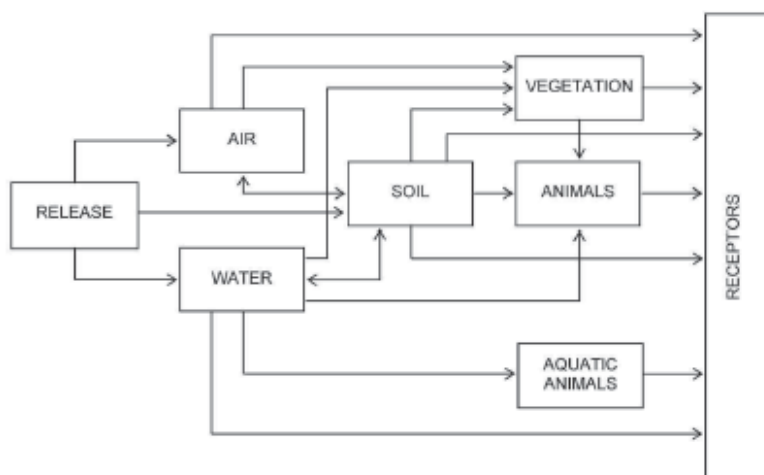
1. Pengambilan sampel dilakukan minimal 1x.
2. Biaya yang dikeluarkan relatif lebih kecil.
3. Tingkat akurasi cukup baik.

Guntur, dkk (2017) dalam penelitiannya di pesisir timur Kota Surabaya yang bertujuan menganalisa kondisi perairan di kawasan tersebut menunjukkan bahwa indeks pencemarannya berada pada kondisi tercemar ringan. Sampel yang dikumpulkan sebanyak 10 buah dan parameter yang dianalisa diantaranya yaitu salinitas, pH, DO, suhu, TSS, kecerahan, amoniak, nitrat, dan BOD.

Tiwari, dkk (2015) dalam penelitiannya yang berada di daerah tambang batubara India menyebutkan bahwa nilai indeks polutan logamnya berada di konsentrasi 100 dengan konsentrasi polutan Fe berada diatas batas standar yang ditetapkan oleh WHO (2006) dan standar air minum India (BIS 2003) yaitu lebih dari 300 µg/L. Konsentrasi lebih tinggi berada di musim kemarau, dengan parameter yang dianalisis diantaranya Zn, Ni, Mn, As, Se, Al, Ba, Cu, dan Cr.

2.7 Transpor Polutan

Air tanah merupakan jalur penting untuk paparan manusia terhadap kontaminan lingkungan. Sumber utama pencemaran air tanah adalah tangki penyimpanan di bawah tanah, tumpahan permukaan, aktivitas pertanian, penampungan permukaan, dan lahan pembuangan tangki septik. Air tanah yang terkontaminasi dapat bermigrasi ke sumur atau singkapan menjadi sungai dan danau. (Fjeld, 2007).



Gambar 2.9 Jalur transpor polutan
Sumber: (Fjeld, 2007:82)

Masalah transportasi kontaminan bawah permukaan pada dasarnya terdiri dari dua komponen. Salah satunya adalah menentukan kecepatan dan arah aliran air, serta menentukan bagaimana kontaminan bermigrasi mengingat kecepatan air tanah dan kondisi geokimia yang ada (Fjeld, 2007).

Berbagai macam kondisi geologi, geokimia, dan proses biologis dapat menghasilkan fraktur pada batu dan regolith. Patahan ini dapat memiliki efek penting pada aliran air tanah dan kontaminan yang dibawa. Fraktur dianggap penting untuk aliran air tanah dan transportasi bergantung pada karakteristik fraktur dan pembentukan bawah permukaan. Sebagai contoh fraktur pada batuan yang sebagian besar tidak tembus cahaya seperti granit, cenderung akan memberikan jalan yang signifikan bagi pergerakan air tanah dan kontaminan yang larut di dalamnya. Sebaliknya fraktur di tanah berpasir cenderung memberikan efek yang kurang signifikan pada aliran air tanah dan transpor kontaminan (Fjeld, 2007).

Bentuk senyawa kimia merupakan hasil dari proses tersebut yang bergantung pada sifat tanah dan senyawa itu sendiri. Hal tersebut juga juga dapat menentukan risiko pencemaran akuifer dengan menginfiltirasi zat terlarut melalui profil tanah, baik itu jenuh

maupun tidak jenuh. Pergerakan zat terlarut akan berlanjut di akuifer yang diatur oleh proses yang sama namun dengan skala yang berbeda (Bourazanis et al., 2017)

Trakal et al., (2012, dalam Aghili, dkk., 2018) menyebutkan berbagai macam model matematika dengan berbagai tingkat kompleksitas dan dimensional telah dikembangkan selama beberapa dekade terakhir untuk menggambarkan pola aliran air dan transpor logam pada zona tak jenuh.

Brusseau., (1994, dalam Bourazanis., 2017) menyebutkan bahwa Chemical fate dan transpor melalui tanah merupakan suatu proses kompleks yang melibatkan empat proses utama, yaitu:

- Adveksi: mengacu pada perpindahan zat terlarut dengan air yang mengalir
- Dispersi: mewakili penyebaran zat terlarut pada lingkup daerah yang diperkirakan
- Interfase perpindahan masa: yang berarti penyerapan, volatilisasi
- Reaksi: degradasi atau produksi kimia, fisik, atau mikro biologi

2.7.1 Water flow

Fluks air disimulasikan menggunakan paket perangkat lunak Hydrus-1D (Simunek et al., 2008), yang secara numerik dapat memecahkan persamaan Richards - satu dimensi untuk variably-saturated soil moisture flow:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K \left[\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right] \right\} \quad (2-10)$$

Dimana:

t: waktu

z: vertical coordinate

h: water pressure head

θ : soil volumetric water content

k: konduktivitas hidraulik

Sifat hidraulik tanah tak jenuh dalam kode HYDRUS dijelaskan dengan persamaan bentuk tertutup yang menyerupai Van Genuchten (1980) yang menggunakan model distribusi ukuran butiran statistik dari Mualem (1976) untuk memperoleh prediksi persamaan untuk

fungsi konduktivitas hidraulik tak jenuh dalam parameter retensi air tanah. Berikut merupakan persamaan Van Genuchten (1980):

$$\theta(h) = \begin{cases} \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|]^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2-11)$$

Dengan Mualem's condition (Mualem, 1976)

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad n > 1 \quad (2-12)$$

Dimana:

h_s : air-entry value

θ_s : kadar air jenuh

θ_r : kadar air residual

α : parameter α in soil water retention function

n : parameter n in soil water retention function

m : parameter empiris

S_e : soil effective saturation (0 pada $\theta = \theta_r$) sampai (1 pada $\theta = \theta_s$)

Persamaan untuk unsaturated hydraulic conductivity function $K(S_e)$:

$$K(S_e) = K_s S_e^\tau \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (2-13)$$

(S_e) effective saturation dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2-14)$$

Dimana:

K_s : saturated hydraulic conductivity

τ : tortuosity parameter, diasumsikan $\tau = 0,5$

(Mualem, 1976)

Tabel 2.12 *Default initial estimates of selected parameters in models for unsaturated hydraulic function (after Carsel and Parrish, 1988) – water retention*

Jenis tanah	θ_r	θ_s	α l/cm	n	K_s cm/d
Pasir	0,045	0,43	0,145	2,68	712,80
Pasir berlempung	0,057	0,41	0,124	2,28	350,16
Lempung berpasir	0,065	0,41	0,075	1,89	106,08
Lempung	0,078	0,43	0,036	1,56	24,96
lanau	0,034	0,46	0,016	1,37	6,00
Silt loam/lumpur	0,067	0,45	0,020	1,41	10,80
lempung	0,100	0,39	0,059	1,48	31,44
Lempung tanah liat berpasir	0,095	0,41	0,019	1,31	6,24
Lempung tanah liat	0,089	0,43	0,010	1,23	1,68
Silty clay loam/lempung tanah liat berlumpur	0,100	0,38	0,027	1,23	2,88
Tanah liat berpasir	0,070	0,36	0,005	1,09	0,48
Silty clay/tanah liat berlumpur	0,068	0,38	0,008	1,09	4,80

Sumber: Carsel and Parrish (1988)

2.7.2 Transpor Kontaminan

Tujuan dilakukannya analisis transpor pada suatu lingkungan adalah untuk memperkirakan konsentrasi kontaminan di suatu kompartemen. Untuk beberapa masalah seperti tempat bekas tambang, fasilitas industri yang sedang beroperasi, konsentrasi pencemarnya dapat ditentukan dengan pengukuran langsung di lokasi. Meskipun hal tersebut dapat dilakukan, namun hasil yang didapatkan hanya untuk kondisi terkini ataupun lampau sehingga dianggap tidak cukup luas untuk melakukan evaluasi risiko. Analisa risiko dihitung harus berdasarkan prediksi yang mengacu pada model transpor lingkungan. Tujuan spesifik perhitungan ditentukan oleh titik akhir pengukuran dan penilaian untuk masalah (Fjeld, 2007).

Perhitungan transpor satu dimensi adveksi untuk semi-tak hingga menggunakan persamaan berikut (Fjeld, 2007:85):

$$C(x, t) = \frac{S_0}{Q} h \left(t - \frac{x}{u} \right) \exp \left(-k \frac{x}{u} \right) \quad (2-15)$$

Dimana:

S_0 : emission rate (g/s)

Q : water flux (cm/day)

k : *degradation rate(/s)*

x : *distance in direction (cm)*

u : *fluid velocity (cm/h)*

Berbagai macam penelitian mengenai transpor polutan sudah banyak dilakukan, diantaranya adalah:

Sidibe (2018) dalam penelitiannya menggunakan konsentrasi nitrat untuk melakukan validasi terhadap peta kerentanan DRASTIC di Nigeria, yang juga berfungsi sebagai indikator pencemaran. Konsentrasi tertinggi dari nitrat sesuai dengan peta kerentanan dengan level tinggi/rentan. Namun hasil kajian menunjukkan bahwa kontaminasi nitrat tidak berkaitan langsung dengan kegiatan pertambangan. Parameter logam berat juga digunakan mengingat lokasi kajian merupakan lokasi pertambangan dan industri. Timah (Pb), cadmium (Cd), sianida (Cn), kromium (Cr), dan arsen (As) merupakan parameter yang digunakan. Hasil penelitian menunjukkan kondisi saat ini berada di level yang lebih tinggi dibandingkan standar internasional (WHO) yang diijinkan.

Jirka et al., (2006 dalam Farahani, dkk., 2014) – simulasi dari transport ion-ion utama seperti logam berat pada soil column. Masipin (2016) investigasi pemodelan dari senyawa tracer pada tanah agrikultur.

Dikarenakan kondisi geologis di Hokkaido, Jepang batuan sering mengalami perubahan hidrotermal yang mengakibatkan batuan tersebut mengandung unsur-unsur berbahaya yang terus meningkat, diantaranya adalah arsen. Simulasi pergerakan air dan transport kontaminan melewati pori tanah tidak jenuh menggunakan Hydrus-1D untuk menginvestigasi performa sedimen sungai dalam immobilisasi arsen dari batuan yang terbentuk dari hydrothermal altered rock. Hasil penelitian menunjukkan sedimen sungai dinilai efektif mengurangi peluruhan arsen dari hydrothermal altered rock (Tangviroon, 2017).

Antonov (2018) dalam penelitiannya melakukan evaluasi terhadap vadose zone yang berada di Ogosta valley downstream yang telah cukup lama terdampak arsenik dan polutan logam lainnya, dikarenakan kegiatan pertambangan yang sudah terjadi selama beberapa dekade menyebabkan kondisi tanah yang cukup tercemar. Hydrus-1D digunakan untuk mengetahui pergerakan arsenic didalam tanah dengan beberapa macam skenario. Hasil penelitian menunjukkan endapan dari banjir bah di beberapa tempat mengandung arsenik. Sementara di lokasi lain, kondisi anoksik temporal diperkirakan muncul dari dataran sungai Ogosta sehingga berpotensi mengarah pada pengurangan arsenik dan mobilisasinya.

Shang (2016) memodelkan transpor garam yang banyak digunakan untuk irigasi air daur ulang yang ada di Beijing. Hydrus-1D digunakan untuk mensimulasikan pergerakan air tanah dan transport garam. Hasil evaluasi menunjukkan nilai risiko antara penggunaan air tanah dan air daur ulang untuk irigasi memiliki selisih nilai yang kecil. Hal ini menunjukkan bahwa baik air tanah dan air daur ulang aman untuk kegunaan irigasi. Dengan catatan mempertimbangkan struktur vadose zone yang ada.

2.7.3 Hydrus-1D

Hydrus-1D merupakan suatu model elemen hingga untuk mensimulasikan gerakan air, panas, dan zat terlarut dalam suatu media jenuh yang bervariasi. (Kanzari, 2018).

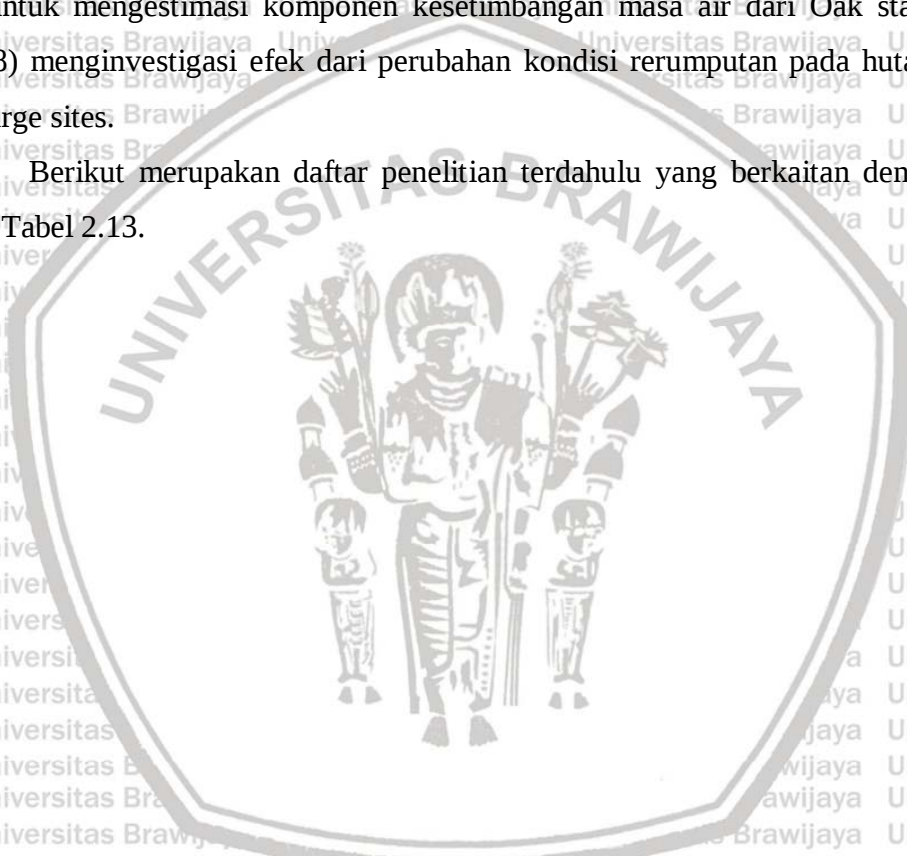
Hydrus-1D merupakan model yang telah banyak digunakan untuk mensimulasikan transpor air dan polutan dalam media berpori yang jenuh, model ini digunakan baik untuk riset maupun manajemen irigasi dengan kualitas air yang buruk. Hydrus-1D secara luas dianggap sebagai alat yang andal untuk menganalisis aliran air dan berbagai zat terlarut di bawah permukaan (Liu et al, 2013; Anlauf, 2018).

Hydrus 1D merupakan paket pemodelan untuk mensimulasikan pergerakan air, panas, dan zat terlarut dalam media satu dimensi yang bervariasi. Software ini terdiri dari program komputer HYDRUS dan grafis interaktif HYDRUS-1D yang berbasis antarmuka pengguna. Program numerik HYDRUS memecahkan persamaan Richard untuk aliran air jenuh yang bervariasi dan persamaan tipe adveksi-dispersi untuk transport panas dan zat terlarut. Persamaan aliran tersebut juga dapat mempertimbangkan aliran tipe porositas ganda dimana satu fraksi dari kandungan air bergerak dan fraksi lainnya tidak bergerak, atau aliran tipe permeabilitas ganda yang melibatkan dua bagian yang bergerak, dimana satu bagian mewakili matriks dan satu pori-pori besar. Persamaan untuk transpor panas mempertimbangkan transportasi konduksi dan konveksi pada aliran air. Uap dan transportasi energi juga dapat dipertimbangkan dalam hal ini. Persamaan transport zat terlarut termasuk alam ketentuan adveksi-dispersi dalam fase cair, juga sebagai difusi dalam fase gas. Persamaan transpor juga termasuk dalam ketentuan reaksi yang tidak setimbang dan tidak linear antara fase padat dan cair, kesetimbangan linier reaksi antara fase cair dan gas, reaksi kimia zero order, dan dua reaksi degradasi tingkat pertama; satu yang independen dari zat terlarut lainnya, dan yang menyediakan ketersambungan antara zat terlarut yang terlibat dalam reaksi peluruhan orde pertama. Selain itu, fisik tidak setimbang transport zat terlarut dapat dipertanggungjawabkan dengan mengasumsikan dua bagian, formulasi tipe porositas ganda yang mempartisi fase cair ke daerah bergerak dan tidak bergerak. Secara efektif, persamaan transport polutan mencakup

ketentuan kinetik tambahan/detasemen zat terlarut ke fase padat, maka dengan demikian dapat digunakan untuk mensimulasikan transport virus, koloid, ataupun bakteri (Simunek et al., 2009).

Chotpantra et al., (2011 dalam Pal, dkk., 2014) menggunakan CXTFIT dan HYDRUS-1D model untuk memprediksi perpindahan kontaminan logam berat dalam tanah menggunakan estimasi hydrodynamic dan parameter adsorption isotherm. Saquing et al., (2012 dalam Pal, dkk., 2014) mengaplikasikan HYDRUS-1D untuk mensimulasikan bentuk kimia roses perpindahan fenol menggunakan Degraded Newsprint Coloumn Waste (DNP) pada lingkungan aerobik. Nobert et al., (2010 dalam Farahani 2014) menggunakan HYDRUS-1D untuk mengestimasi komponen kesetimbangan masa air dari Oak stand. Adane et al., (2018) menginvestigasi efek dari perubahan kondisi rerumputan pada hutan yang berada di recharge sites.

Berikut merupakan daftar penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini pada Tabel 2.13.



Tabel 2.13 Daftar penelitian terdahulu

No	Peneliti	Judul	Lokasi	Perbedaan metode	Hasil
1	Guntur, dkk (2017)	Penelitian Analisis Kualitas Perairan Berdasarkan Metode Indeks Pencemaran di Pesisir Timur Kota Surabaya	Surabaya	Indeks pencemaran	Nilai ip ringan
2	Tiwari, dkk (2015)	Evaluation of Surface Water Quality by Using GIS and Heavy Metal Pollution Index (HPI) Model in a Coal Mining Area, India.	India	Indeks pencemaran	Konsentrasi Fe diatas standar BIS 2003
3	Sidibe (2018)	Heavy Metals and Nitrate to Validate Groundwater Sensibility Assessment Based on DRASTIC Models and GIS: Case of The Upper Niger and The Bani Basin in Mali.	Nigeria	DRASTIC dan GIS	Konsentrasi nitrat sesuai dengan peta kerentanan
4	Tangviroon (2017)	Modelling And Evaluating The Performance Of River Sediment On Immobilizing Arsenic From Hydrothermally Altered Rock In Laboratory Coloumn Experiments With Hydrus-1D.	Hokkaido, Jepang	Hydrus-1D	Sedimen dinilai efektif mengurangi peluruhan arsenik
5	Antonov (2018)	Application of Hydrus-1D for Evaluation of The Vadose Zone Saturation State in Connection With Arsenic Mobilization and Transport in Contaminated River	Bulgaria	Hydrus-1D	Endapan dari banjir bah di beberapa tempat mengandung arsenik

		Floodplain-Ogosta Valley Case Study, NW Bulgaria.			
6	Shang (2016)	Modelling The Risk of the Salt for Polluting Groundwater Irrigation with Recycled Water and Groundwater Using Hydrus-1D	Beijing	Hydrus-1D	Air tanah dan air daur ulang aman untuk kegiatan irigasi.
7	Pal, dkk (2014)	Application of Hydrus-1D Model for Assessment of Phenol-Soil Adsorption Dynamics	West bengal, India	Hydrus-1D dan CXTFIT	Prediksi perpindahan kontaminan logam dalam tanah
8	Juniawan, dkk (2014)	Karakteristik Lumpur Lapindo dan Fluktuasi Logam Berat Pb dan Cu Pada Sungai Porong dan Aloo	Sidoarjo	Uji lab	Salinitas tinggi, kandungan Pb tertinggi di sungai porong dan Cu di sungai aloo
9	Ridwan, dkk (2012)	Indikasi Aliran Air Bawah Permukaan Ke Lokasi Semburan Lumpur Sidoarjo Berdasarkan Data Penginderaan Jauh Dan Korelasi Geokimia Pada Sistem Vulkanik Kuarter Sekitarnya.	Sidoarjo	Uji lab	Terdapat berbagai macam unsur dalam sampel lumpur yang diambil dari 86 sampel.
10	Purwaningsih, dkk (2013)	Hydrochemical Study of Groundwater in Sidoarjo Mud Volcano Area, East Java Indonesia	Sidoarjo	GIS	Zona berpolutan tinggi berada di dalam tanggul, zona berpolutan menengah berada di luar tanggul



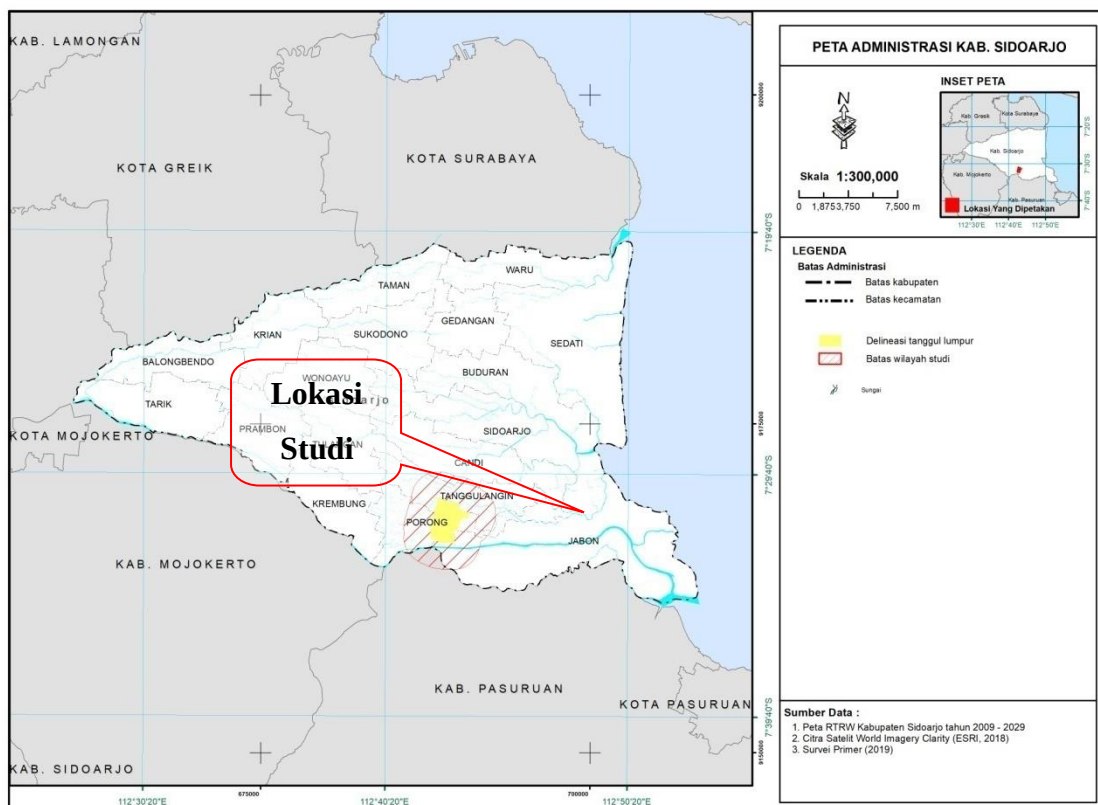
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Deskripsi Daerah Penelitian

3.1.1 Lokasi Daerah Studi

Lokasi lumpur Sidoarjo secara administratif berada di Dusun Balongnongo Desa Renokonengo, Kecamatan Porong dengan jarak sekitar 12 km sebelah selatan Kabupaten Sidoarjo dengan luas lahan penampungan lumpur sekitar 640 hektar. Topografi lokasi lumpur Sidoarjo berupa dataran delta dengan ketinggian antara 0 sampai dengan 25 m. Berikut lokasi studi ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Lokasi Studi
Sumber : Hasil analisa

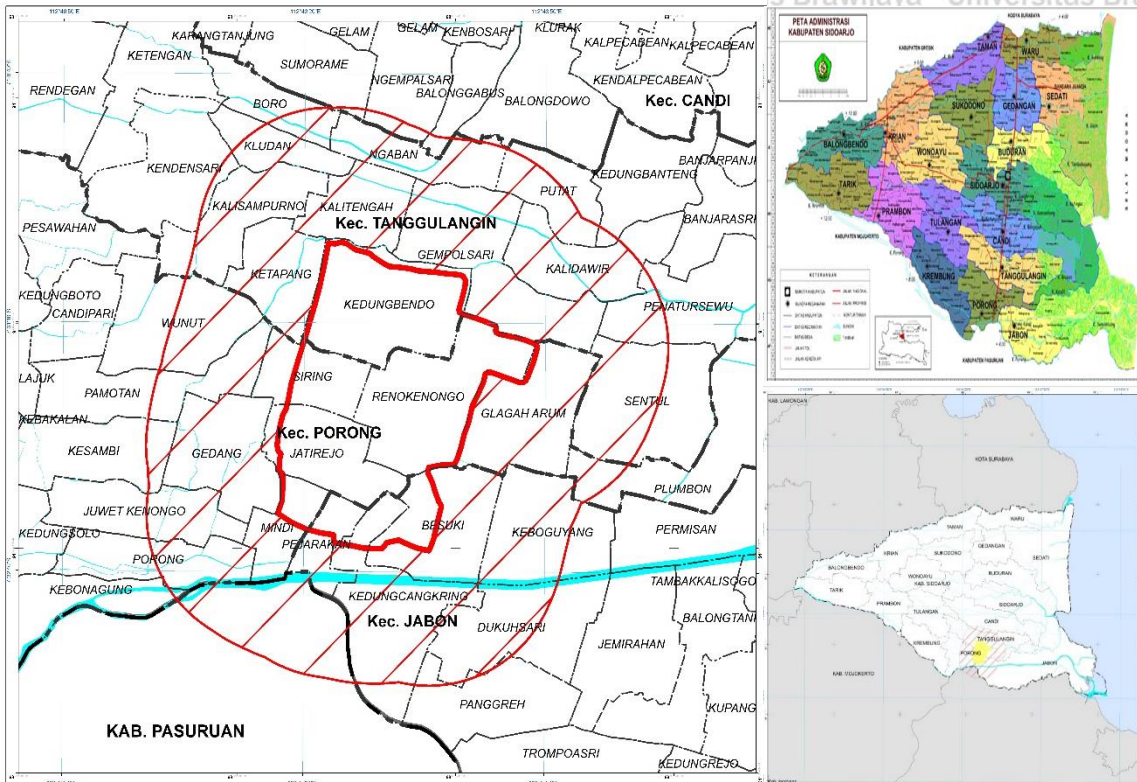
3.1.2 Batas Wilayah Penelitian

Batas wilayah ini dibuat dengan memperhatikan kendala-kendala seperti berikut:

1. Tingkat ketersediaan informasi/data primer dan sekunder
2. Tingkat ketersediaan alat-alat penelitian

3. Keterbatasan waktu dan dana

Berdasarkan hal diatas, maka batas wilayah penelitian ditentukan melalui suatu cakupan dari batasan tersebut diatas. Dengan batas wilayah sejauh 1,5 km dari tanggul Lumpur Sidoarjo, dengan cakupan 3 kecamatan yang berada di Sidoarjo yaitu Kecamatan Tanggulangin, Kecamatan Porong, dan Kecamatan Jabon.



Gambar 3.2 Batas wilayah penelitian
Sumber: Hasil analisa

3.1.3 Geologi Daerah Penelitian

Berdasarkan peta geologi lembar Surabaya dan Sapulu yang dikeluarkan Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi dan peta hidrogeologi lembar Kediri disebutkan bahwa batuan penyusun lokasi kajian merupakan endapan alluvial endapan sungai yang umumnya tersusun dari bahan-bahan berbutir halus (lempung, lanau, dengan selingan pasir). Dengan tingkat kelulusan sedang hingga rendah. Beberapa kilometer di selatan porong didominasi endapan gunung api Kuarter dalam sebaran yang luas, yang sampai saat ini masih aktif.

3.1.4 Kandungan lumpur Sidoarjo

Suprpto, dkk. (tidak diketahui) dalam penelitiannya terhadap endapan lumpur sidoarjo mengungkapkan kemungkinan adanya pengaruh larutan hidrotermal yang ikut keluar bercampur dengan lumpur. Sehingga ditemui unsur-unsur logam yang umum dijumpai pada larutan hidrotermal diantaranya Cu, Pb, Zn, Mn, Fe, Cd, As, Au, Ag, Hg, Se.

- Sebaran unsur Ag memiliki rata-rata cukup tinggi, tertinggi 2 ppm. Nilai semakin tinggi mendekati pusat semburan
- Unsur As berada dibawah rata-rata kandungan As pada batu lempung. Nilai meninggi mendekati pusat semburan
- Unsur Au relatif lebih tinggi dibanding rata-rata pada umumnya di batu lempung. Sebaran Au di pusat semburan bernilai rendah
- Unsur Cd memiliki rata-rata relatif tinggi. Nilai cenderung tinggi mendekati pusat semburan
- Unsur Fe memiliki rata-rata relatif rendah.
- Unsur Hg memiliki rata-rata relatif tinggi pada pusat semburan
- Unsur Mn memiliki rata-rata relatif rendah
- Unsur Sb memiliki rata-rata cukup tinggi dibanding rata-rata pada batu lempung
- Unsur Se memiliki rata-rata cukup tinggi di daerah yang jauh dari pusat semburan
- Unsur Zn memiliki rata-rata relatif rendah

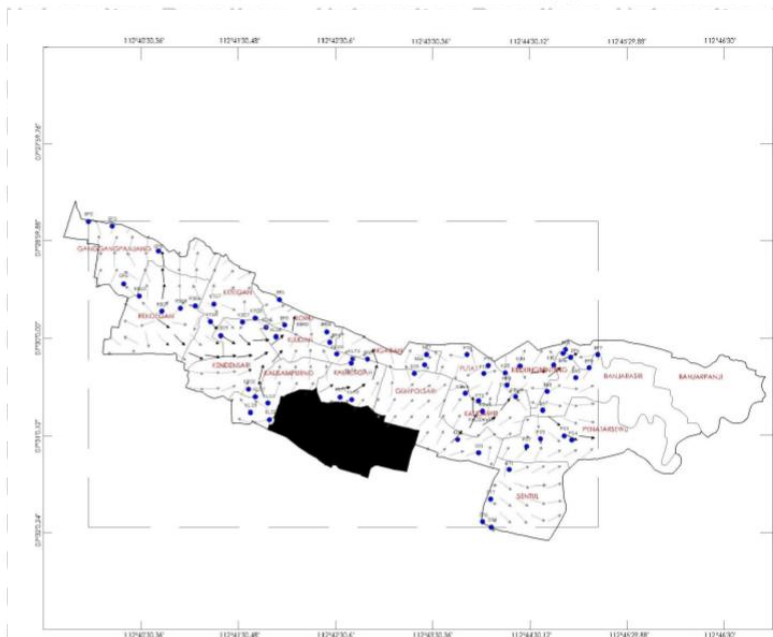
Juniawan, dkk. (2013) dalam penelitiannya di sungai porong dan aloo menyebutkan bahwa lumpur Sidoarjo memiliki salinitas tinggi (40%), kandungan logam berat Pb sebesar 0,19-0,34mg/L, tertinggi berada di sungai porong, kandungan Cu sebesar 0,19-0,85 mg/L, terletak di sungai aloo.

Fitrianto, dkk. (2012) dalam penelitiannya yang terletak di kawasan lumpur sidoarjo menyebutkan bahwa lumpur sidoarjo yang mencemari sungai porong mengandung material berbahaya seperti hidrokarbon sulfide, Hg (*mercury*), Cd (*cadmium*), Cr (*chromium*), As (*arsenic*), serta phenol yang sudah melewati batas ambang yang diijinkan.

Ridwan, dkk. (2016) membuktikan bahwa nilairata-rata unsur Pb, Zn, dan Mn, Fe, dalam 86 sampel lumpur sidoarjo yaitu masing-masing sebesar 49,40; 96,29; 653,78 ppm; dan 3,55 %.

Dengan perincian sebagai berikut:

- Anisa (2018) dalam penelitiannya membuktikan bahwa pola aliran di Kecamatan Tanggulangin mengarah kearah utara dan timur menjauhi genangan Lumpur Sidoarjo.



Gambar 3.5 Arah aliran air tanah Kecamatan Tanggulangin.
Sumber : Anisa., (2018)

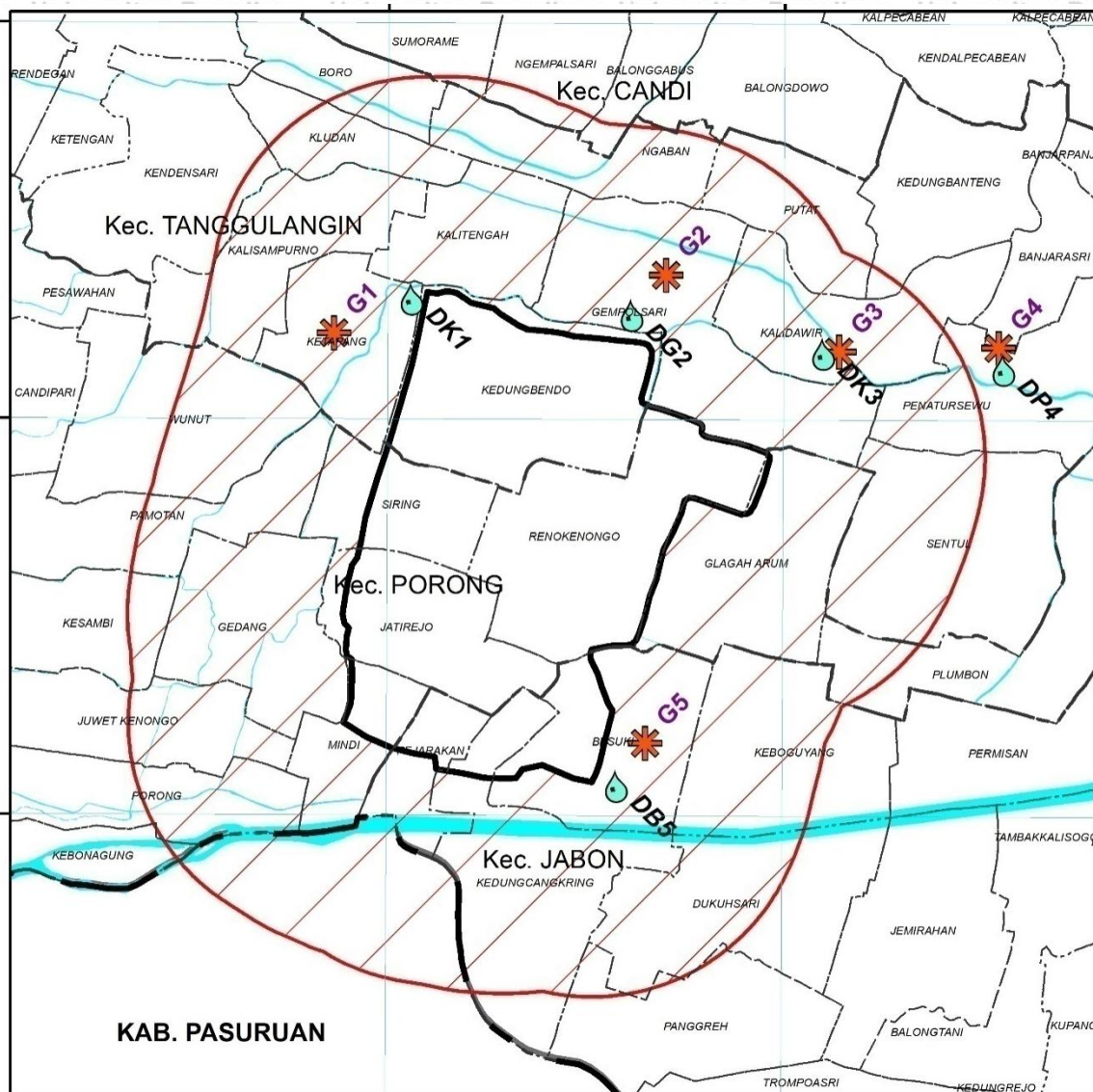
Berdasarkan kedua hasil penelitian terdahulu tersebut maka diambil lokasi untuk pengambilan sampel air sumur warga seperti tampak pada Gambar 3.6. Untuk pengambilan sampel air sumur warga sendiri dilakukan pada bulan basah yaitu musim penghujan di bulan Januari 2019. Untuk pengambilan sampel dilakukan satu kali. Pengambilan sampel air ini nantinya akan digunakan sebagai input untuk analisa kualitas air yang perhitungannya menggunakan metode Indeks Pencemaran. Koordinat lokasi sumur yang diperoleh dari sumur dangkal penduduk akan digunakan untuk memetakan lokasi sumur.

Tabel 3.1 Detail lokasi pengambilan sampel air

No. Sumur	Lokasi	Kode titik	Tanggal survei	Koordinat		Elevasi	Kedalaman sumur
				S	E		
1	Desa Ketapang	DK1	13 Januari 2019	07°30'42,7"	112°42'25,4"	31 m	4,5 m
2	Desa Gempolsari	DG2	13 Januari 2019	07°30'46,2"	112°43'15,4"	14 m	2,5 m
3	Desa Kalidawir	DK3	13 Januari 2019	07°30'54,9"	112°43'59,0"	15 m	4,5 m
4	Desa Penatarsewu	DP4	13 Januari 2019	07°30'58,4"	112°44'40,0"	11 m	3 m
5	Desa Besuki	DB5	13 Januari 2019	07°32'33,3"	112°43'12,3"	10 m	3,5 m

Sumber : Hasil analisa

Pengambilan sampel air data primer diambil di dua kecamatan yaitu Kecamatan Porong, dan Kecamatan Tanggulangin, dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.6 Lokasi pengambilan sampel.

Sumber : Hasil analisa

Contoh air tanah yang diperoleh dari hasil survei sumur penduduk di beberapa titik pengambilan digunakan untuk mengetahui kandungan DO, TDS, TSS, Fe, Mn, dan Al.

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian meliputi:

- Water quality checker Horiba U50*, mengecek kondisi parameter fisik kualitas air sumur milik penduduk.
- Total Suspended Soil Analyzer*, digunakan untuk mendapatkan nilai total padatan tersuspensi pada sampel air.
- GPS digunakan untuk mendapatkan titik koordinat lokasi sampling.
- Water sampler* kapasitas 2,2 liter, digunakan untuk mengambil sampel air yang berasal dari sumur warga untuk dipindahkan ke dalam botol sampel.

e. *Ice box* digunakan sebagai tempat untuk tempat penyimpanan sampel air agar kondisinya tetap terjaga dan tidak terpengaruh sinar matahari.

f. Untuk parameter Fe, Mn, dan Al dianalisa menggunakan metode spektrum fotometri AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*)

g. Kamera digital digunakan untuk mendokumentasikan kegiatan survei di lapangan.

h. Botol sampel 250 ml, digunakan sebagai wadah sampel air.

i. Form data lapangan, digunakan untuk mencatat hal-hal terkait hasil pengamatan di lapangan.

j. Es batu.

5. Data litologi log

Pendugaan lapisan tanah didapatkan menggunakan metode geolistrik dengan konfigurasi *Schlumberger* yang dilakukan di lokasi kajian. Titik pengujian geolistrik dilakukan di lima lokasi yang tersebar di dua kecamatan yaitu Kecamatan Porong dan Kecamatan Tanggulangin. Pemilihan lokasi pendugaan lapisan tanah disesuaikan dengan pengambilan sampel air penduduk tampak pada Gambar 3.6. Peralatan yang digunakan dalam penelitian meliputi:

- a. Geolistrik
- b. Kabel rol kecil
- c. Elektroda stainless
- d. *Accu*
- e. Meteran 50 m
- f. Martil/palu
- g. GPS
- h. *Handy talky*
- i. Kamera digital
- j. Form data lapangan



Tabel 3.2 Detail lokasi geolistrik

No. Sumur	Lokasi	Kode titik	Tanggal survei	Koordinat		Elevasi	Kedalaman sumur
				S	E		
1	Desa Ketapang	DK1	13 Januari 2019	07°30'42,7"	112 ° 42'25,4"	31 m	4,5 m
2	Desa Gempolsari	DG2	13 Januari 2019	07 ° 30'46,2"	112 ° 43'15,4"	14 m	2,5 m
3	Desa Kalidawir	DK3	13 Januari 2019	07 ° 30'54,9"	112 ° 43'59,0"	15 m	4,5 m
4	Desa Penatarsewu	DP4	13 Januari 2019	07 ° 30'58,4"	112 ° 44'40,0"	11 m	3 m
5	Desa Besuki	DB5	13 Januari 2019	07 ° 32'33,3"	112 ° 43'12,3"	10 m	3,5 m

Sumber : hasil analisa

Paket program IP2WIN merupakan program yang digunakan untuk menganalisis data hasil pengukuran geolistrik pada kajian ini. IP2WIN didesain untuk menganalisis data hasil pengukuran geolistrik profil tunggal secara otomatis atau semi otomatis untuk mendapatkan kesalahan (error) yang paling kecil. Dengan pemakaian diawali input data berupa panjang elektroda dan tahanan jenis semu, dilanjutkan dengan eksekusi program. Kemudian output perhitungan berupa jumlah lapisan, tahanan jenis sebenarnya, ketebalan dan kedalaman lapisan. Data hasil interpretasi geolistrik ini nantinya akan digunakan sebagai input untuk perhitungan metode DRASTIC dan sebagai input software HYDRUS-1D yang digunakan untuk memetakan transpor polutan skema pengaliran adveksi.

6. Sampel lumpur Sidoarjo.

Sampel lumpur yang diambil dari dalam tanggul Lumpur Sidoarjo diuji menggunakan uji XRF untuk mengetahui kandungan yang ada di dalamnya. Hal ini dilakukan untuk melakukan justifikasi bahwa parameter pencemar yang berada dalam air sumur warga Kabupaten Sidoarjo merupakan bagian dari kandungan parameter pencemar yang berasal dari Lumpur Sidoarjo. Dalam hal ini adalah Fe, Mn, dan Al. Hasil uji XRF digunakan sebagai input konsentrasi pada simulasi HYDRUS-1D.

7. Referensi yang berkaitan dengan studi ini.

3.3 Metode Analisis Data

Data primer dan data sekunder seperti yang disebutkan diatas dianalisa menggunakan metode DRASTIC dan IP. Pada metode DRASTIC 7 faktor pemberat yang bersesuaian dengan 7 macam faktor geologi akan diberikan nilai 1 hingga 10 untuk masing-masing parameter yang bergantung pada kondisi lokal daerah kajian. DRASTIC indeks dihitung menggunakan rumus;

$$Dr \cdot Dw + Rr \cdot Rw + Ar \cdot Aw + Sr \cdot Sw + Tr \cdot Tw + Ir \cdot Iw + Cr \cdot Cw = \text{DRASTIC Indeks}$$

Dimana:

Dr : Depth to watertable rating Tr : Topography rating

Dw : Depth to watertable weight Tw : Topography weight

Rr : Recharge rating Ir : Impact of the vadose zone media rating

Rw : Recharge weight Iw : Impact of the vadose zone media weight

Ar : Aquifer media rating Cr : Conductivity (hydraulic) of the aquifer rating

Aw : Aquifer media weight Cw : Conductivity (hydraulic) of the aquifer weight

Sr : Soil media rating Sw : Soil media weight

Dari nilai rating akan didapatkan hasil evaluasi potensi kerentanan air tanah terhadap pencemaran. Nilai untuk masing-masing parameter ditampilkan pada Tabel 2.4 s/d Tabel 2.10 dan nilai faktor pemberat (w) pada Tabel 2.3

Analisis data dengan perhitungan matematis digunakan dalam menghitung status mutu air dengan metode Indeks Pencemaran. Data parameter kualitas air dari hasil pengamatan lapangan dan laboratorium yang berupa parameter kimia dibandingkan terhadap baku mutu air yang telah ditetapkan. Baku mutu yang digunakan berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air dan Peraturan Menteri Kesehatan no.492 Tahun 2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum. Nilai Indeks Pencemaran dihitung menggunakan rumus:

$$IP_j = \sqrt{\frac{(C_i/L_{ij})^2_M + (C_i/L_{ij})^2_R}{2}}$$

Dimana :

IP_j : Indeks pencemaran bagi peruntukan j

C_i : Konsentrasi parameter kualitas air i

L_{ij} : Konsentrasi parameter kualitas air i yang tercantum dalam baku peruntukan air j

M : Maksimum

R : Rerata

3.3.1 Transpor Polutan

Pembuatan peta transport polutan didasarkan pada nilai kontaminan pencemar Fe, Mn, dan Al yang diambil dari sumur penduduk. Pemilihan jenis polutan didasarkan pada kajian literatur yang berkaitan dengan lumpur sidoarjo.

Program Hydrus-1D secara numerik menyelesaikan persamaan adveksi-dispersi berdasarkan solusi dari persamaan diferensial parsial *Richards*, yang menggambarkan aliran air dalam media berpori jenuh. Persamaan *Richards* dapat diwakili secara komprehensif menggunakan model *Van Genuchten-Mualem*. Untuk menyelesaikan persamaan ini dibutuhkan data fungsi nonlinier, yaitu fungsi retensi air tanah dan fungsi konduktivitas hidraulik. Parameter hidraulik yang dimaksud adalah *residual* (θ_r) dan *saturated water content* (θ_s), α dan n , yang merupakan konstanta empiris yang akan mendefinisikan bentuk kurva dan nilai konduktivitas hidraulik jenuh (K_s). Perhitungan transpor satu dimensi adveksi untuk semi-tak hingga menggunakan persamaan berikut (Fjeld, 2007:85):

$$C(x, t) = \frac{S_o}{Q} h \left(t - \frac{x}{u} \right) \exp \left(-k \frac{x}{u} \right)$$

Dimana :

C : concentration of solute water (mg/L)

S_o : emission rate(g/s)

h : simbol matematika untuk *La Place equation*

t : elapsed time (day)

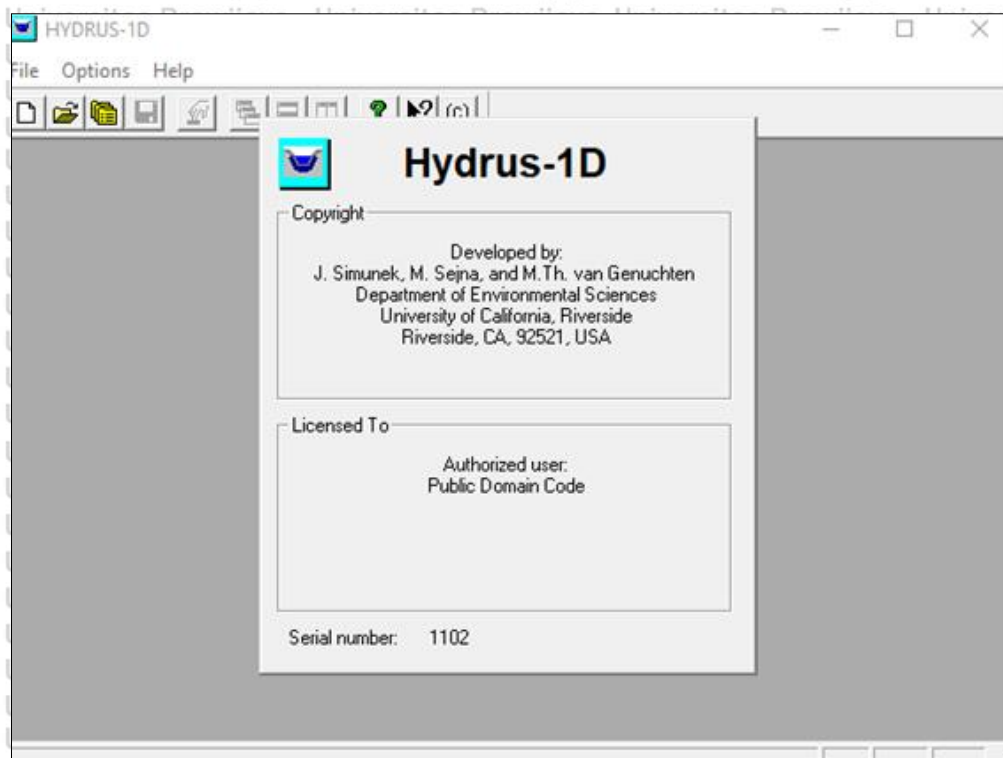
Q : water flux (cm/day)

k : degradation rate

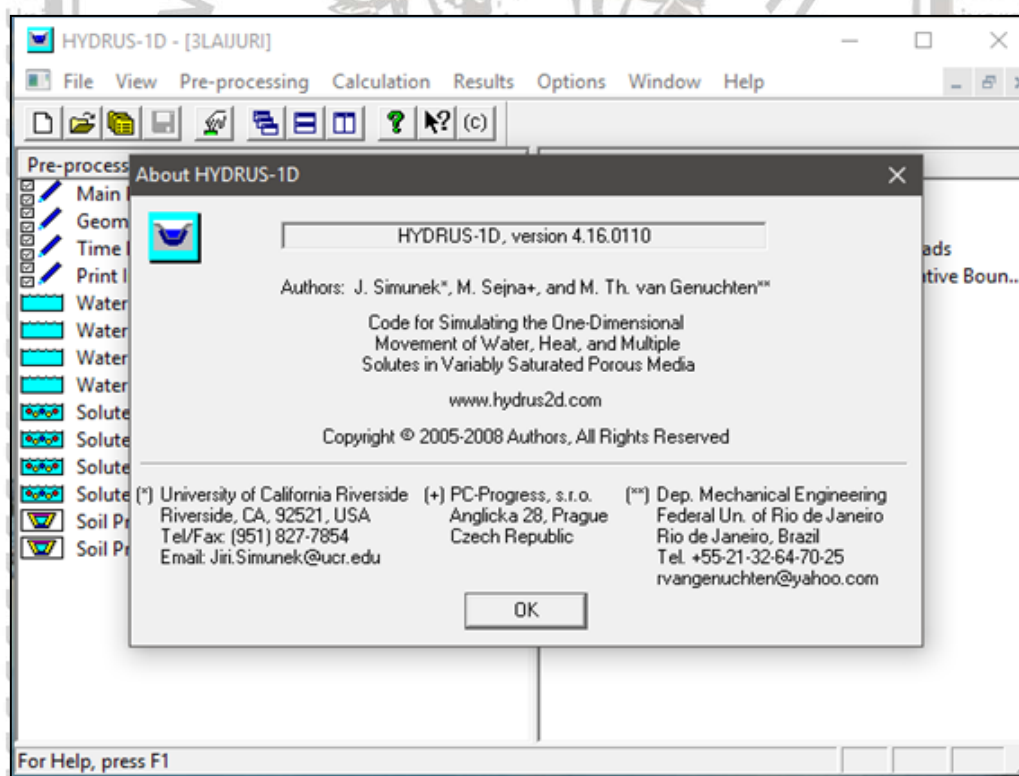
x : distance in direction (cm)

u : fluid velocity (cm/h)

Berikut merupakan tampilan program Hydrus-1D yang akan digunakan dalam kajian:



Gambar 3.7 Hydrus-1D.
Sumber : Hydrus-1D



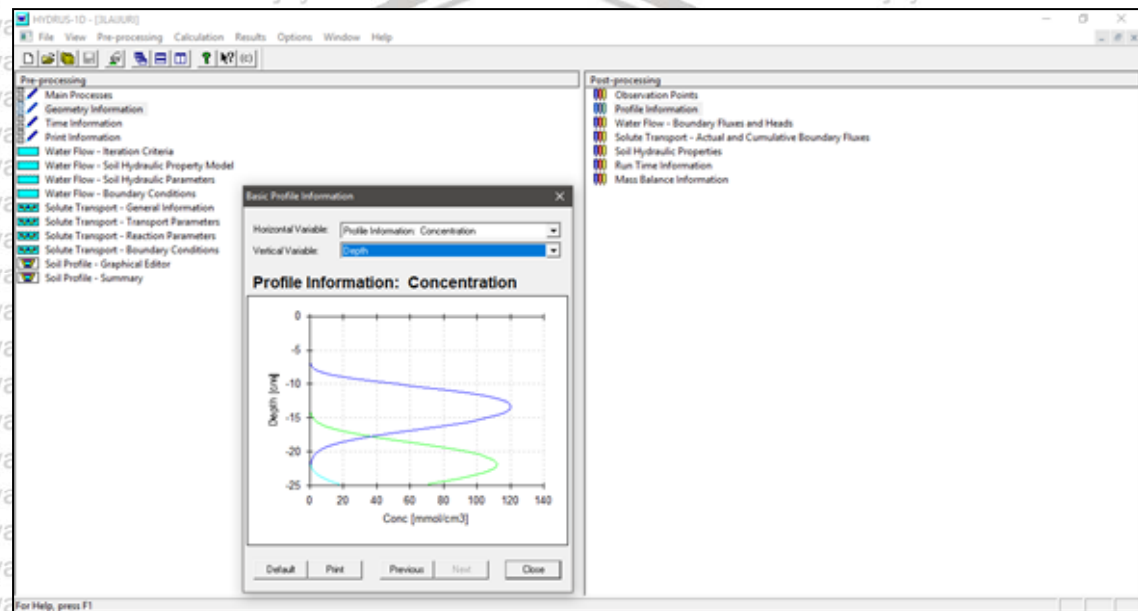
Gambar 3.8 Spesifikasi Hydrus-1D.
Sumber : Hydrus 1D

Parameter yang akan di input yang untuk menjalankan program Hydrus-1D diantaranya adalah:

Tabel 3.3 Parameter input

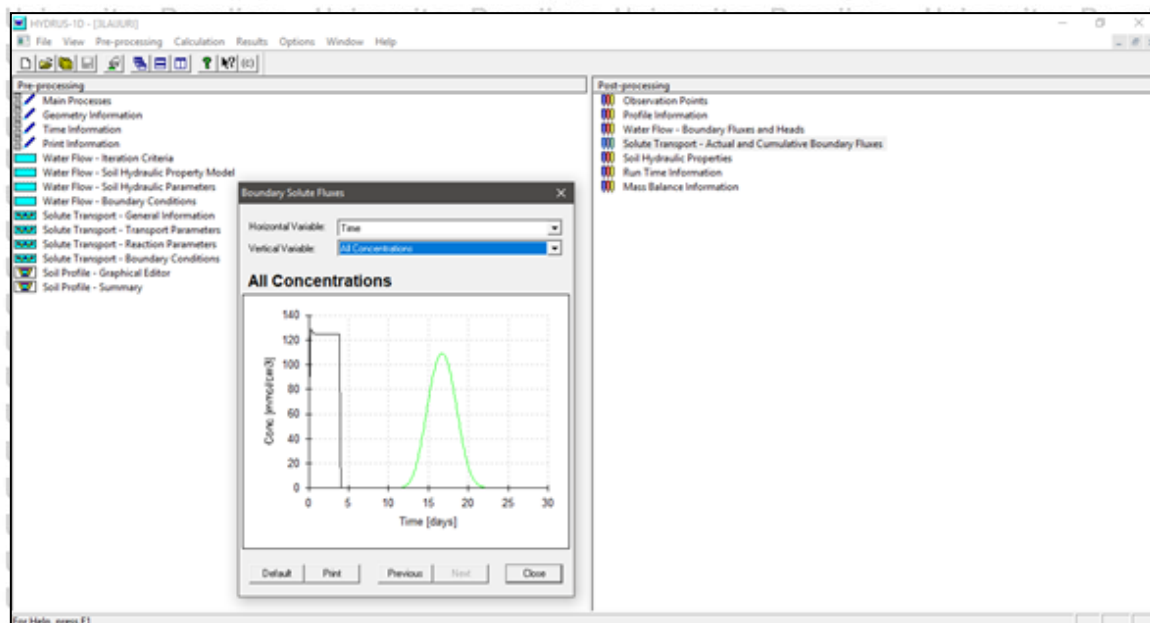
Parameter	Nilai
<i>Saturated hydraulic conductivity</i>	K_s (cm h ⁻¹)
<i>Residual soil water content</i>	θ_r
<i>Saturated soil water content</i>	θ_s
<i>Parameter α in soil water retention</i>	
<i>Parameter n in soil water retention</i>	
<i>Bulk density</i>	B_d (g cm ⁻³)
<i>Solution</i>	C (g L ⁻¹)

Sumber : Masipan (2016)



Gambar 3.9 Contoh Output profile information Hydrus-1D.

Sumber : Hydrus-1D



Gambar 3.10 Contoh Output solute transport Hydrus-1D.
Sumber : Hydrus-1D

Selanjutnya yaitu pembuatan analisa resiko terhadap keberadaan polutan yang dikaji pada penelitian ini. Analisa risiko kesehatan atau *Health Risk Assessment* (HRI) dihitung berdasarkan estimasi jumlah asupan harian atau *Estimated Daily Intake* (EDI) dari logam berat yang dikonsumsi berdasarkan perhitungan yang diadopsi dari *US Environmental Protection Agency*:

$$EDI = C \times IR \times ED \times \frac{EF}{BW} \times AT$$

Dimana:

C: concentration of metals in water (µg/L)

IR: water intake rate (2L/hari)

ED: exposure duration (diasumsikan 67 tahun)

EF: exposure frequency (365 hari/tahun)

BW: body weight (72 kg)

AT: average lifetime (24,455 hari)

The *Target Hazard Quotients* (THQs) dihitung menggunakan persamaan:

$$THQs = \frac{EDI}{RfD}$$

Dimana:

RfD : *reference dose of a particular metal*, untuk Fe, Mn, dan Al masing-masing $3,60E+01$; $3,00E+02$; $1,40E+02$; $1E-3\mu\text{g/kg-day}$ (Rasool et al., 2015) dan (Muhammad et al., 2011).

Apabila nilai THQs < 1 maka terindikasi tidak merugikan kesehatan, namun apabila nilai THQs > 1 maka dapat diasumsikan menyebabkan risiko kesehatan. Hasil analisa metode DRASTIC nantinya akan dibandingkan dengan hasil analisa dari hasil uji kualitas air menggunakan metode indeks pencemaran. Hasil metode DRASTIC yang menggambarkan kondisi internal dan hasil uji indeks pencemaran yang menggambarkan kondisi eksternal atau spesifik diharapkan dapat selaras dan tidak bertolak belakang. Selanjutnya hasil uji tersebut akan didukung menggunakan hasil simulasi dari program HYDRUS-1D yang nantinya akan memberikan justifikasi terhadap hasil pengukuran di lapangan. Analisa risiko sebagai tahap terakhir dari penelitian ini akan memberikan gambaran risiko kesehatan yang dapat terjadi setelah sekitar 13 tahun sumur warga terpapar Lumpur Sidoarjo itu sendiri.

Berikut merupakan parameter input HYDRUS-1D yang bisa dipenuhi dalam kajian ini dan parameter-parameter lainnya yang belum bisa dimasukkan sebagai input simulasi, diantaranya:



Tabel 3.4 Input parameter HYDRUS-1D optimal

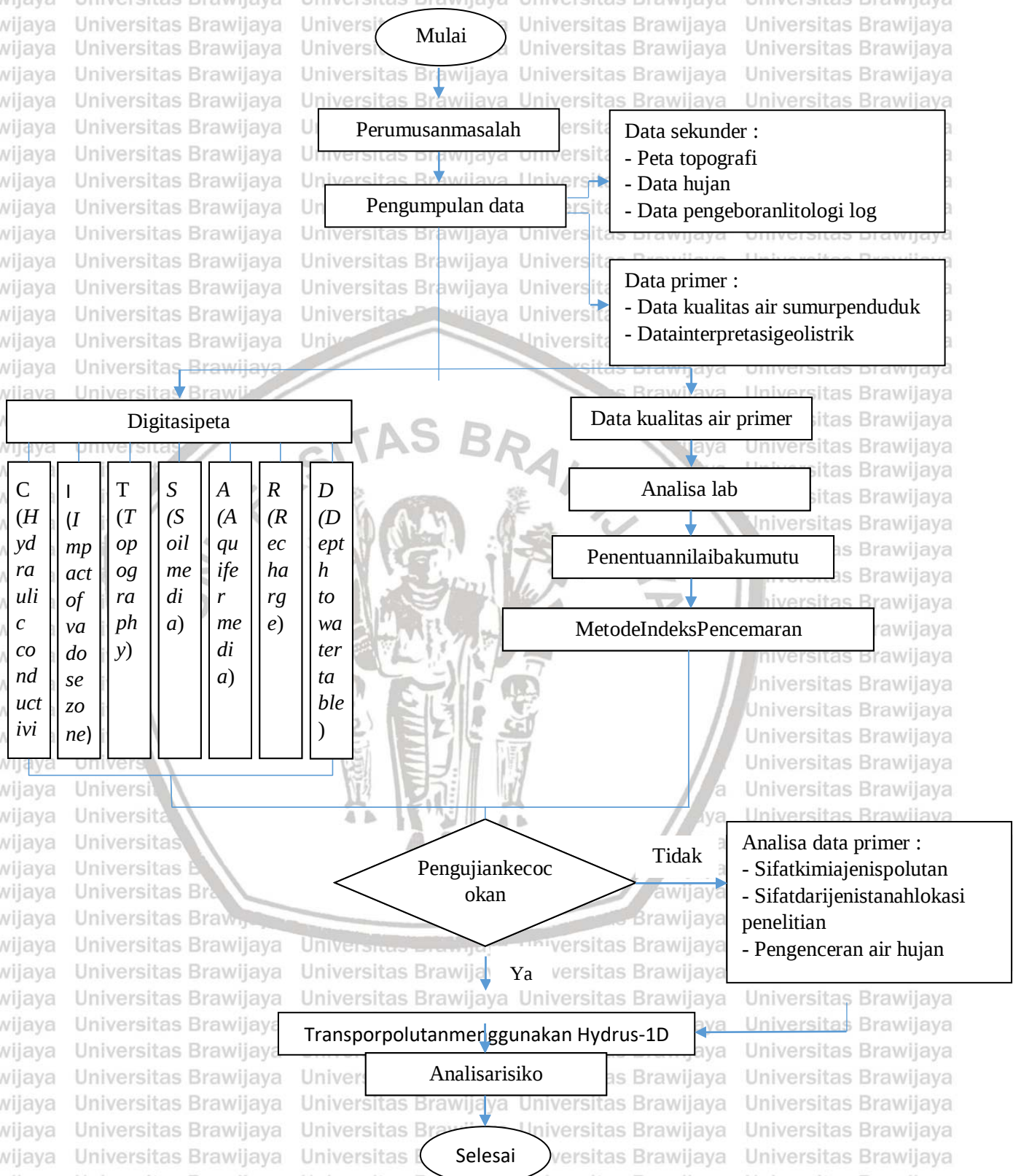
No	Parameter	Di input	Belum	Keterangan
1	<i>Saturated hydraulic conductivity (Ks)</i>	●		Konduktivitas (aliran) air pada tanah dalam kondisi jenuh
2	<i>Residual soil water content (θ_r)</i>	●		Volume air sisa yang terperangkap pada tanah setelah proses pengeluaran air dalam tanah
3	<i>Saturated soil water content (θ_s)</i>	●		Volume air yang dapat ditahan oleh tanah pada kondisi jenuh
4	<i>Parameter α in soil water retention</i>	●		Kebalikan dari nilai indeks udara yang masuk, atau disebut juga tekanan gelembung (<i>bubbling pressure</i>)
5	<i>Parameter n in soil water retention</i>	●		Indeks dari ukuran distribusi pori-pori pada tanah
6	<i>Bulk density</i>	●		Berat dari tanah yang sudah dikeringkan dibagi dengan total volume tanah tersebut
7	<i>Solution</i>	●		Larutan yang mengandung sejumlah polutan atau elemen lain yang menjadi objek penelitian
8	<i>Dispersion</i>		●	Nilai yang mewakili penyebaran zat terlarut pada lingkup daerah yang diperkirakan
9	<i>Frac=1</i>		●	Polutan bereaksi/ tidak sama sekali dengan lingkungan sekitar
10	<i>Thlm = 0</i>		●	Ada/ tidaknya partikel (bakteri, jamur) yang mempengaruhi polutan
11	<i>Kd</i>		●	Koefisien <i>adsorbtion isotherm</i>
12	<i>Nu</i>		●	Koefisien Langmuir
13	<i>Beta</i>		●	Koefisien Freundlinch
14	<i>Henry</i>		●	Konstanta yang menunjukkan kesetimbangan fase cair dan gas dari satu elemen yang sama
15	<i>Sink water</i>		●	Kecepatan bereaksi dalam bentuk air
16	<i>Sink solid</i>		●	Kecepatan bereaksi dalam bentuk padatan
17	<i>Sink gas</i>		●	Kecepatan bereaksi dalam bentuk gas
18	<i>Alpha</i>		●	Kecepatan reaksi absorpsi dalam kondisi tidak setimbang

Sumber : Hasil analisa

Untuk cara pengerjaan tesis dapat dilihat pada bagan alir yang ditunjukkan pada

Gambar 3.11.





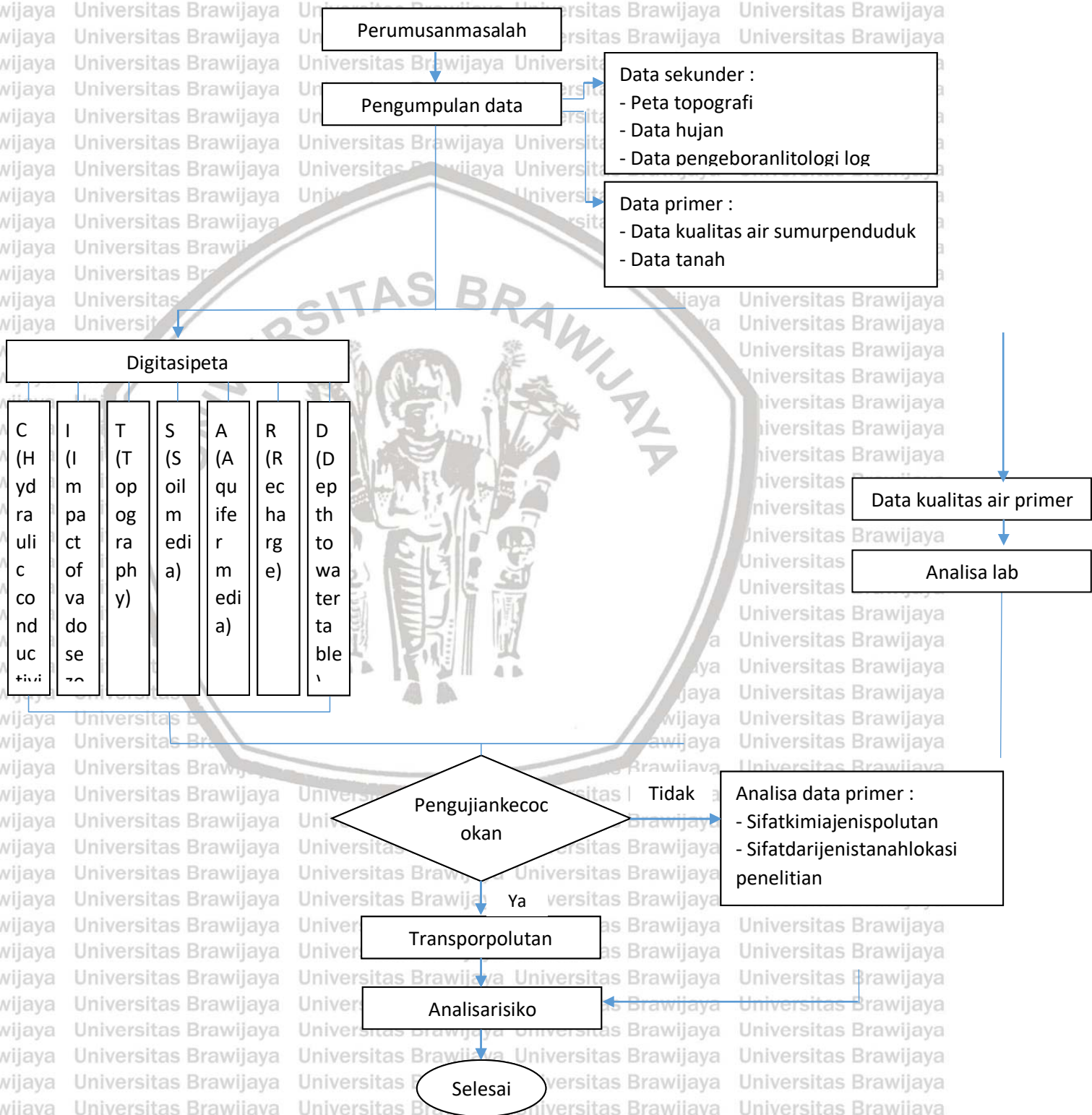
Gambar 3.11 Diagram alirpenelitian





Halaman ini sengaja dikosongkan

PLAN B





BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

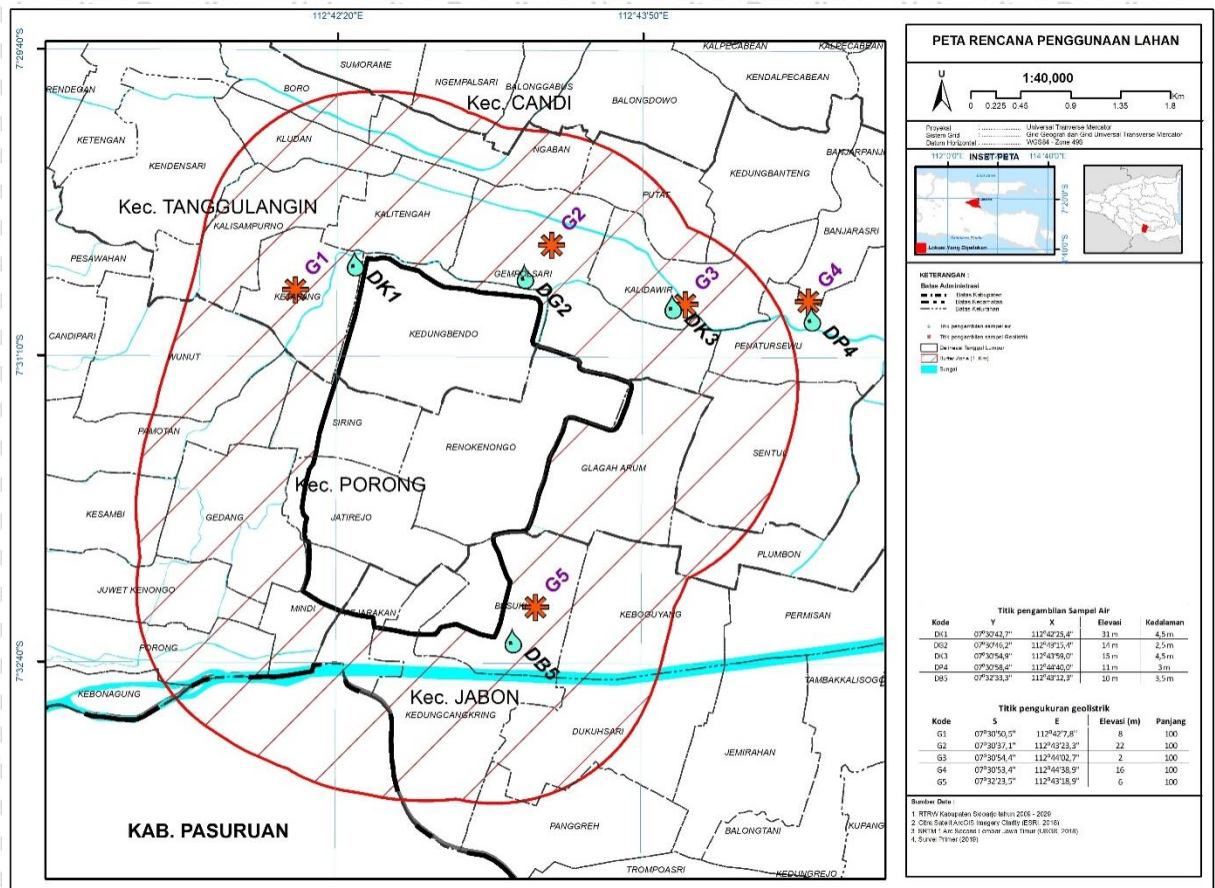
4.1 Kondisi Kawasan Lumpur Sidoarjo

Lokasi Lumpur Sidoarjo secara administratif berada di Dusun Balongnongo Desa Renokonengo, Kecamatan Porong dengan terletak pada kurang lebih 12 km sebelah selatan Kabupaten Sidoarjo dengan luas lahan penampungan lumpur sekitar 640 hektar. Topografi lokasi penelitian berupa dataran delta dengan ketinggian antara 0 sampai dengan 25 m.

Berdasarkan peta hidrogeologi, lokasi penelitian yang berada di Kecamatan Tanggulangin, Kecamatan Porong, dan Kecamatan Jabon termasuk dalam kelompok akuifer produktif tinggi dengan penyebaran luas.

4.1.1 Penentuan Batas Daerah Studi

Batas daerah yang digunakan untuk daerah studi adalah batas perimeter yang ditarik dari titik tengah tanggul Lumpur Sidoarjo sejauh 1,5 km. Dalam radius 1,5 km mencakupi 3 kecamatan yang berada di Sidoarjo yaitu Kecamatan Tanggulangin, Kecamatan Porong, dan Kecamatan Jabon.



Gambar 4.1 Batas wilayah dan lokasi penelitian
Sumber: Hasil analisa

4.2 Pengolahan Data Geolistrik

4.2.1 Perhitungan Tahanan Jenis Sebenarnya

Deskripsi tentang keadaan bawah permukaan atau persebaran batuan secara vertikal daerah studi dapat diperoleh dari data pengukuran dan analisa geolistrik. Berdasarkan deskripsi dari hasil pengukuran dan analisa geolistrik akan dapat diketahui litologi batuan penyusun, letak dan persebarannya. Analisa geolistrik dilakukan dengan mengukur tahanan jenis lapisan batuan dengan konfigurasi Schlumberger. Pengukuran dilakukan ada 5 lokasi atau titik duga yang dirancang berdasarkan hasil penelitian terdahulu yaitu Purwaningsih & Notosiswoyo (2013) dan Anisa (2018). Jarak titik geolistrik 1 atau (G1) sejauh 3,758 m dari hulu dan 4,752 m dari hilir. G2 sejauh 5,282 m dari hulu dan 3,958 m dari hilir. G3 sejauh 5,821 m dari hulu dan 3,309 m dari hilir. G4 sejauh 6,762 m dari hulu dan 3,589 m dari hilir. Dan titik geolistrik terakhir G5 sejauh 3,425 m dari hulu dan 2,985 m dari hilir. Pengukuran tersebut akan menghasilkan data beda potensial dan arus dari masing-masing elektroda. Kemudian dari data beda potensial dapat dicari hambatan jenis semu dan sebenarnya.

Hasil pengukuran beda potensial selanjutnya akan diolah dengan menggunakan program IP2WIN. Program IP2WIN akan menampilkan hasil analisis berupa kurva hubungan antara tahanan jenis semu dengan panjang elektroda arus per dua. Keunggulan dari software ini adalah dapat digunakan untuk semua konfigurasi elektroda, data topografi dapat sekaligus digambarkan, mempunyai keakuratan pemrosesan data yang tinggi, dapat menampilkan hasil inversi berupa jumlah lapisan yang terdeteksi, kedalaman lapisan dan ketebalan tiap lapisan dan nilai rho tiap lapisan.

Dengan memasukkan parameter input kedalam program IP2WIN kemudian melakukan analisis akan didapatkan output berupa:

1. Jumlah lapisan (N)
2. Nilai tahanan jenis lapisan (ρ)
3. Tebal lapisan (h)
4. Kedalaman lapisan (d)
5. Altitude (Alt)/ ketinggian elevasi lapangan

Hasil analisa tahanan jenis untuk masing-masing titik pengukuran dengan menggunakan program IPI2WIN, dapat dilihat pada lampiran.

4.3 Interpretasi Lapisan Bawah Tanah

Berdasarkan data yang didapatkan dari lapangan, nilai resistivitas hasil pengolahan dan interpretasi data resistivitas pada 5 titik pengukuran dengan menggunakan program IP2WIN, maka didapatkan deskripsi susunan lapisan bawah permukaan. Deskripsi susunan bawah permukaan dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Hasil interpretasi ini nantinya akan digunakan untuk analisa kerentanan DRASTIC indeks dan sebagai input simulasi program Hydrus-1D untuk simulasi transpor polutan skema adveksi.

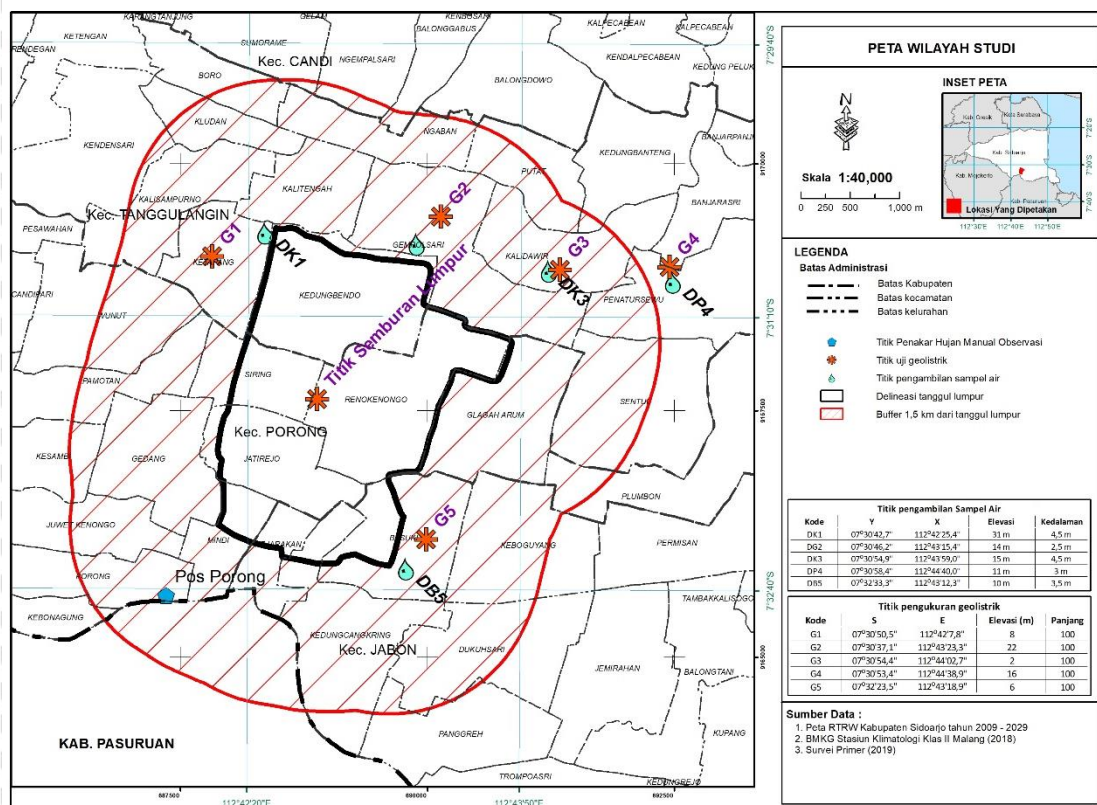
Tabel 4.1 Pendugaan kondisi bawah permukaan

No	Kecamatan	Kedalaman (m)	Resistivitas (Ω m)	Jenis Tanah	Warna
1	Ketapang	0 - 1,69	18,22	lempung	
		1,69 - 3,62	19,79	lempung	
		3,62 - 6,23	12,88	lempung	
		6,23 - 15,81	0,85	lumpur	
		15,81 - 41,75	16,92	lempung	
		41,75 - ~	0,07	lumpur	
2	Gempolsari	0 - 1,23	5,54	lempung	
		1,23 - 3,29	16,21	lempung	
		3,29 - 6,16	10,35	lempung	
		6,16 - 15,44	1,05	lumpur	
		15,44 - 41,60	28,28	lempung	
		41,60 - ~	0,57	lumpur	
3	Kalidawir	0 - 1,59	9,68	lempung	
		1,59 - 3,56	13,64	lempung	
		3,56 - 6,44	8,45	lempung	
		6,44 - 20,48	0,88	lumpur	
		20,48 - 41,84	1,41	lempung	
		41,84 - ~	0,25	lumpur	
4	Penatarsewu	0 - 1,84	6,72	lempung	
		1,84 - 4,09	5,13	lempung	
		4,09 - 8,25	2,68	lempung	
		8,25 - 20,63	1,61	lempung	
		20,63 - 39,86	0,81	lumpur	
		39,86 - ~	20,28	lanau	
5	Besuki	0 - 0,93	10,78	lempung	
		0,93 - 2,84	2,53	lempung	
		2,84 - 6,89	4,38	lempung	
		6,89 - 16,58	1,3	lempung	
		16,58 - 39,89	0,54	lumpur	
		39,89 - ~	1,26	lempung	

Sumber: Hasil analisa

4.4 Analisa Hidrologi

Lokasi lumpur Sidoarjo secara administratif terdapat di Kecamatan Porong, sehingga diambil stasiun hujan yang berada di daerah porong yaitu Stasiun porong. Data hujan yang digunakan dari stasiun pencatat dengan panjang data 20 tahun yaitu 1997-2017. Adapun letak stasiun hujan di lokasi kajian tampak pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Lokasi stasiun hujan daerah kajian
Sumber: Hasil analisa

Rata-rata curah hujan tahunan dapat dihitung berdasarkan stasiun pengamatan dan parameter luas daerah tinjauan dimana untuk daerah tinjauan dengan luas $< 500 \text{ km}^2$ atau sekitar 40 km^2 yang memiliki stasiun pengamatan berjumlah satu menggunakan hujan titik. Dengan data curah hujan dari stasiun porong yang diketahui rata-rata curah hujan tahunannya sebagai berikut:

Tabel 4.2 Hasil perhitungan total curah hujan tahunan

Tahun	Curah hujan tahunan
	Sta. Porong
1997	1.058
1998	2.166
1999	1.645
2000	1.980
2001	1.417
2002	1.053
2003	1.781
2004	1.595
2005	2.136
2006	1.278
2007	1.088
2008	1.416
2009	1.253
2010	2.397
2011	1.462
2012	1.126
2013	2.005
2014	1.907
2015	1.431
2016	2.282
2017	1.788
Total	34.266
Rata-rata	1.713

Sumber: Hasil analisa

Setelah dikumpulkan data curah hujan selama 20 tahun, maka dapat ditentukan besarnya nilai hujan tahunan di Stasiun hujan Porong yaitu sebesar 34.266 mm dengan rata-rata hujan tahunan sebesar 1.713 mm.

4.5 Interpretasi Peta Jenis Tanah

Berdasarkan peta jenis tanah diketahui bahwa jenis tanah di Kecamatan Tanggulangin, Kecamatan Porong, dan Kecamatan Jabon merupakan tanah alluvial. Berikut merupakan ciri-ciri tanah Alluvial:

1. Berwarna keabu-abuan sampai kecoklatan.
2. Tekstur tanah berupa liat atau liat berpasir dengan kandungan pasir kurang dari 50 %.
3. Bahan induknya berasal dari bahan alluvial dan kolumial dari berbagai macam asal.

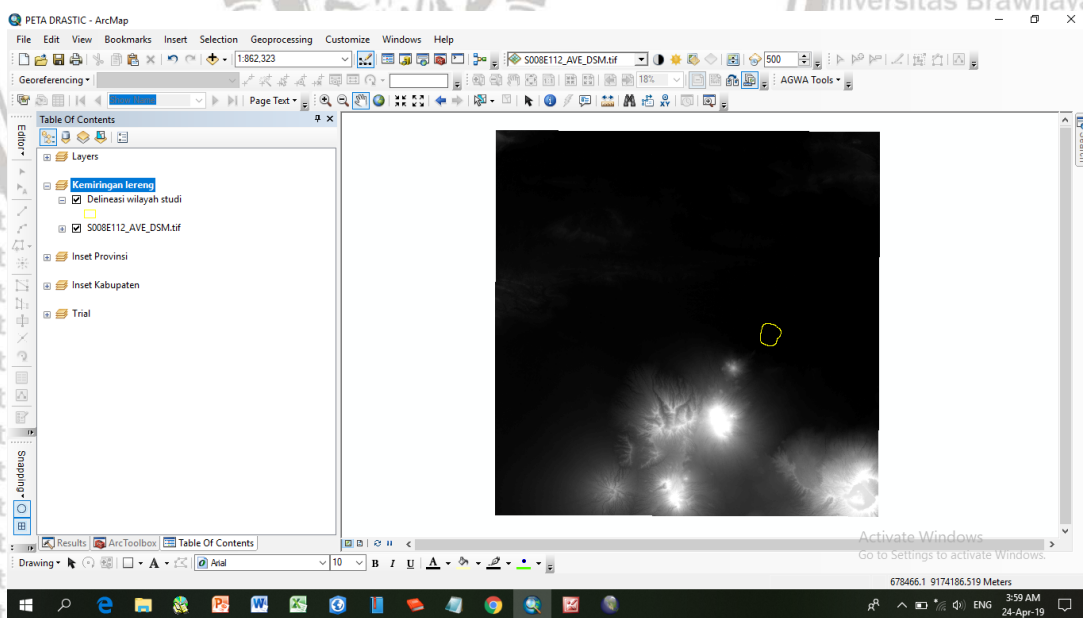
4. Permeabilitas umumnya lambat atau drainasenya rata-rata sedang dan cukup peka terhadap gejala erosi.

Dari ciri-ciri yang dijelaskan diatas dan didukung hasil geolistrik yang dilakukan di awal kajian maka tekstur tanah yang ada di Kecamatan Tanggulangin, Kecamatan Porong dan Jabon berupa lumpur atau lanau. Interpretasi jenis tanah ini nantinya akan digunakan sebagai input DRASTIC indeks dan input simulasi HYDRUS-1D.

4.6 Penentuan Kemiringan Lereng

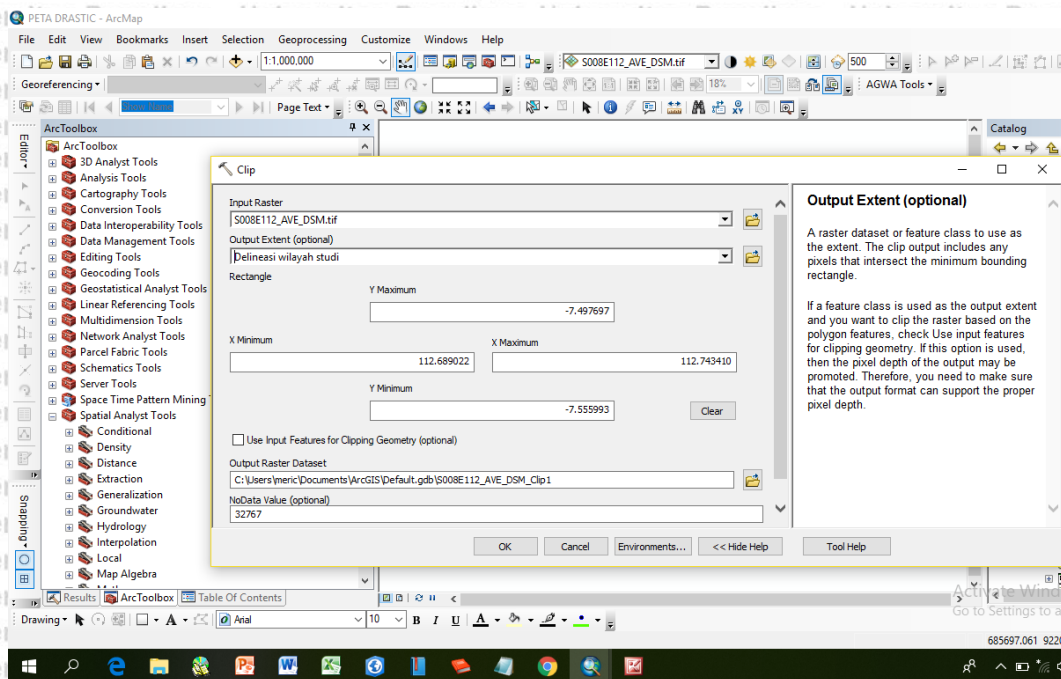
Penggambaran peta kelas kemiringan lereng pada lokasi penelitian dilakukan menggunakan *Arc Map 10* dikarenakan tidak tersedianya data pada daerah studi. Peta kelas kemiringan lereng di wilayah studi diambil berdasarkan data *Digital Elevation Model* (DEM) nasional yang memiliki akurasi atau kesalahan maksimum horizontal maupun vertikal 8,5 m yang dikeluarkan oleh BIG. Data DEM adalah data digital yang menggambarkan geometri dari bentuk permukaan bumi atau bagiannya yang terdiri dari himpunan titik-titik koordinat hasil sampling dari permukaan. Proses pembuatan peta kelas kemiringan lereng sebagai berikut:

1. Impor data DEM dan batas wilayah studi.

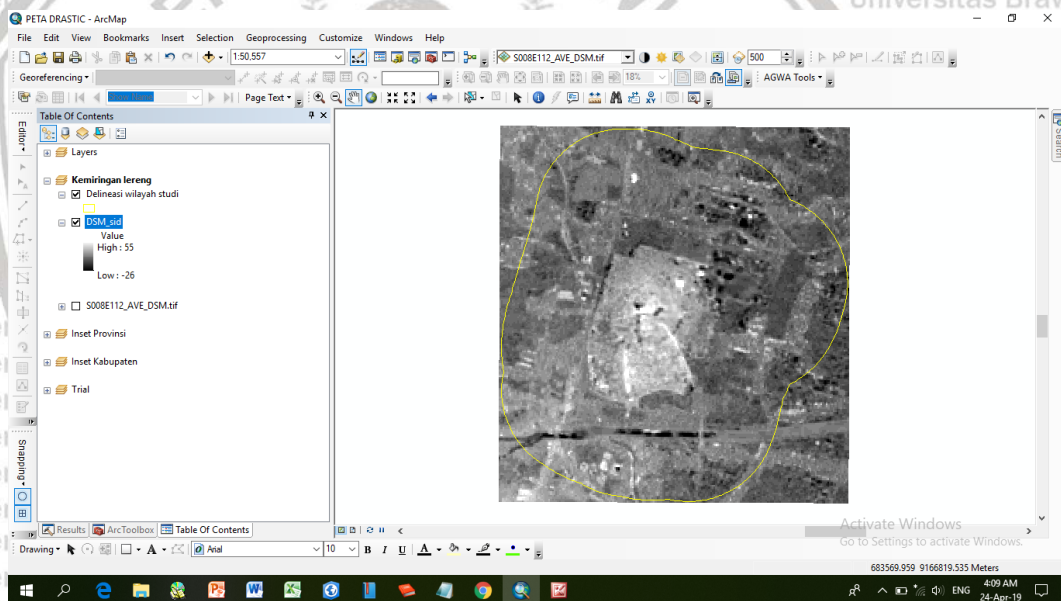


Gambar 4.3 Hasil impor data DEM

2. *Clip* data DEM menjadi seluas wilayah studi dengan menggunakan raster *Clip* (karena DEM termasuk data raster).

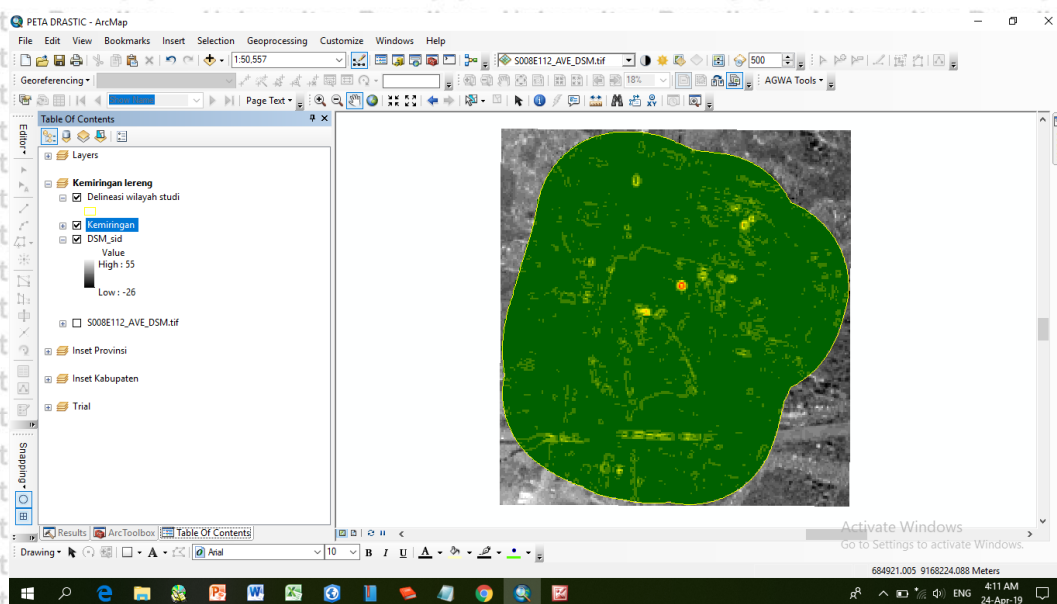


Gambar 4.4 Penggunaan *clip* data DEM



Gambar 4.5 Penggunaan *clip* data DEM wilayah kajian

3. Gunakan *toolbox Slope* untuk menghasilkan peta kemiringan lereng



Gambar 4.5 Pembacaan slope

Hasil analisa menunjukkan topografi Kecamatan Porong, Jabon, dan Tanggulangin berupa dataran delta yang memiliki kemiringan lereng sebesar 0-2%.

4.7 Analisis Parameter DRASTIC Indeks

4.7.1 Penentuan Rating Parameter DRASTIC

Berdasarkan hasil pengolahan data, didapatkan hasil rating tiap-tiap parameter DRASTIC indeks sebagai berikut:

1. *Depth to watertable* (Kedalaman air tanah)

Tabel 4.3 Rating kedalaman air tanah

No	Nama desa	Kedalaman muka air tanah (meter)	Bobot rating (Dr)
1	Ketapang	1	10
2	Gempolsari	1,5	9
3	Kalidawir	2	9
4	Penatarsewu	2	9
5	Besuki	1,5	9

Sumber: Hasil analisa

Kedalaman muka air tanah mencerminkan tebal lapisan tanah/batuan diatas muka air tanah. Semakin tipis lapisan ini maka akan semakin rendah kemampuannya untuk menyerap bahan pencemar. Atau semakin dekat jarak kedalaman air tanah dari permukaan maka akan

semakin besar pula potensi polusi yang terjadi. Penetapan bobot (*rating*) ini didasarkan pada Tabel 2.3.

2. *Recharge* (rata-rata curah hujan tahunan)

Tabel 4.4 Rating rata-rata curah hujan tahunan

Titik	Curah hujan (mm)	Bobot rating (Rr)
1	1713	6
2	1713	6
3	1713	6
4	1713	6
5	1713	6

Sumber: Hasil analisa

Semakin tinggi nilai curah hujannya semakin luas pula sebaran polusi airtanahnya. Pernyataan ini benar hanya terbatas jika jumlah curah hujan yang ada sangat besar sehingga mampu mencairkan polutannya (bahan pencemar). Curah hujan yang digunakan ini mewakili jumlah air yang masuk ke dalam tanah dan mencapai muka airtanah.

3. *Aquifer media* (media akuifer)

Tabel 4.5 Rating media akuifer

Titik	Jenis media akuifer	Bobot rating (Ar)
1	Lapukan batuan beku/malihan	4
2	Lapukan batuan beku/malihan	4
3	Lapukan batuan beku/malihan	4
4	Lapukan batuan beku/malihan	4
5	Lapukan batuan beku/malihan	4

Sumber: Hasil analisa

Jenis akuifer berperan dalam mengontrol pergerakan bahan pencemar didalam lapisan jenuh air. Hal ini dipengaruhi oleh tekstur dan komposisi mineral lapisan akuifer.

Semakin besar ukuran butir dan semakin banyaknya retakan dalam jenis akuifer, semakin tinggi pula permeabilitas dan potensi polusi pada akuifernya. Sedangkan semakin kecil

ukuran butirannya maka bobot rating yang diberikan akan semakin besar, hal ini berarti semakin rendah nilai permeabilitas dan potensi polusi yang akan terjadi.

4. *Soil media* (tekstur tanah)

Tabel 4.6 Rating tekstur tanah

Titik	Tekstur tanah	Bobot rating (Sr)
1	Lumpur lempung	3
2	Lumpur lempung	3
3	Lumpur lempung	3
4	Lumpur lempung	3
5	Lumpur lempung	3

Sumber: Hasil analisa

Tekstur tanah adalah jenis tanah (*soil*) yang dapat berpengaruh terhadap penyerapan bahan pencemar. Semakin halus tekstur tanahnya, semakin kecil penyusutan lempungnya maka potensi polusinya semakin rendah.

5. *Topography* (kemiringan lereng)

Tabel 4.7 Rating kemiringan lereng

Titik	Interval kemiringan lereng (%)	Bobot rating (Tr)
1	1,538	10
2	0,991	10
3	0,819	10
4	0	10
5	0,540	10

Sumber: Hasil analisa

Kemiringan lereng berkaitan dengan kemampuan air hujan untuk dapat meresap ke dalam tanah. Semakin landai lereng maka akan semakin banyak air yang dapat meresap ke dalam tanah sehingga kemampuan pengangkutan bahan tercemar ke dalam tanah juga akan semakin tinggi.

6. *Impact of Vadose Zone (pengaruh zona vados)*

Tabel 4.8 Rating pengaruh media vados

Titik	Jenis media aquifer	Bobot rating (Ir)
1	Lanau/lempung	1
2	Lanau/lempung	1
3	Lanau/lempung	1
4	Lanau/lempung	1
5	Lanau/lempung	1

Sumber: Hasil analisa

Zona vadose disebut juga dengan zona tak jenuh dan keberadaannya diatas muka air tanah (*water table*) sehingga untuk jenis zona tak jenuh ini diasumsikan seperti jenis batuan yang bertindak sebagai akuifer tetapi dengan pemberian skala dan pembobotan yang berbeda. Zona tak jenuh dengan perpindahan yang lebih lambat memiliki potensi polusi yang lebih rendah.

7. *Conductivity hydraulic of aquifer (konduktivitas hidraulik)*

Tabel 4.9 Rating konduktivitas hidraulik

Titik	Konduktivitas hidraulik (m/hari)	Bobot rating (Cr)
1	0,0002	1
2	0,0002	1
3	0,0002	1
4	0,0002	1
5	0,0002	1

Sumber: Hasil analisa

Konduktivitas hidraulik berkaitan dengan kecepatan aliran air tanah untuk memperluas pencemaran didalam akuifer. Jika nilai koefisien kelulusan airnya (K) tinggi akan menyebabkan tingginya potensi pencemaran.

4.7.2 Penentuan Bobot Parameter DRASTIC

1. *Depth to watertable (kedalaman air tanah)*

Semakin dekat jarak kedalaman airtanah dari permukaan semakin besar pula potensi polusi yang terjadi. Daerah lokasi kajian menunjukkan kedalaman muka air tanah yang

cukup dangkal yaitu sekitar 1 sampai 2 meter, hal ini menunjukkan kedalaman muka air tanah menjadi faktor yang dominan untuk penentuan kerentanan air tanah.

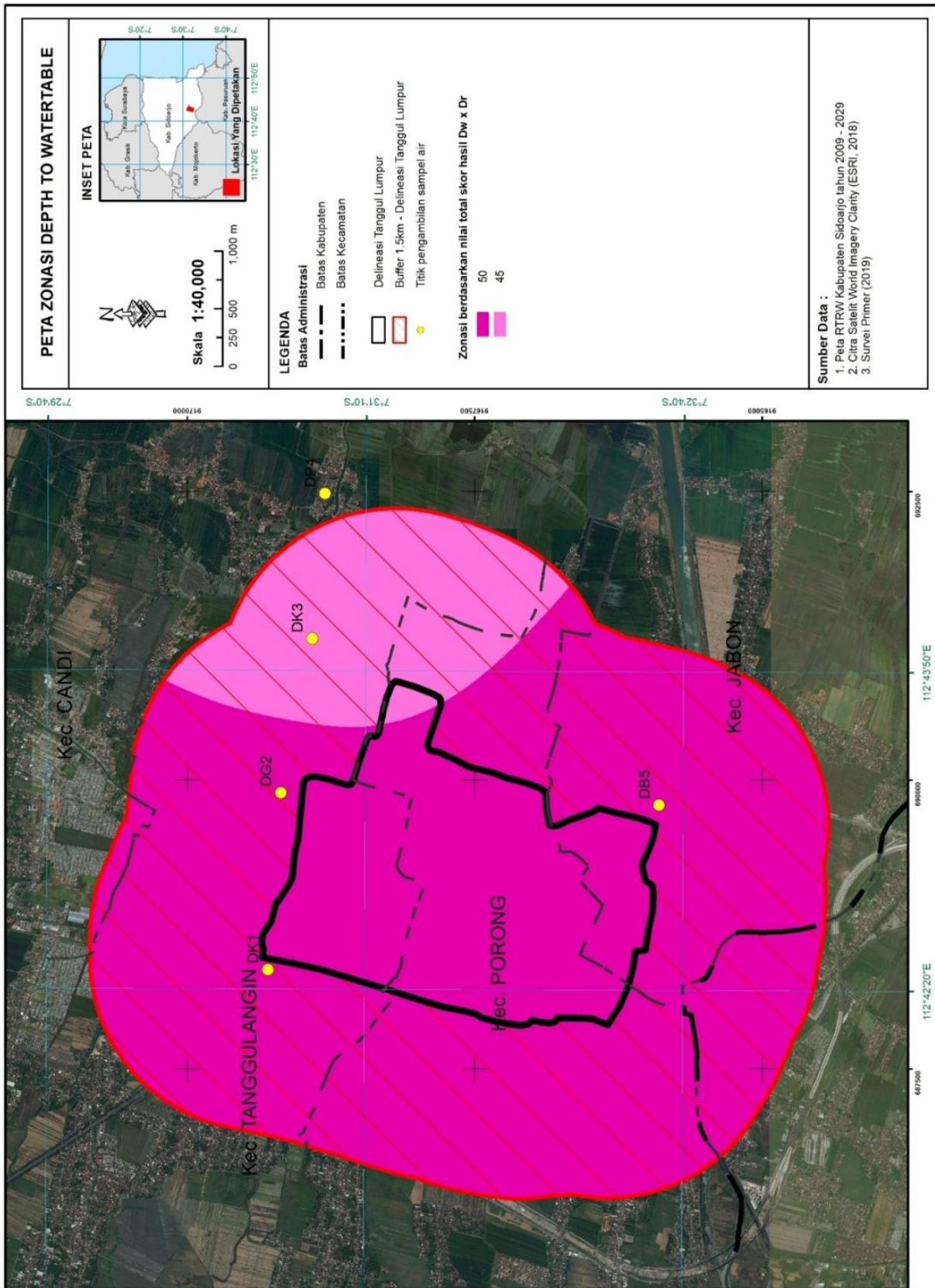
Tabel 4.10 Skor untuk kedalaman air tanah dengan *weight*

Titik	Kedalaman muka air tanah (meter)	Bobot rating (Dr)	Weight (Dw)	Skor (DwDr)
1	1	10	5	50
2	1,5	9	5	45
3	2	9	5	45
4	2	9	5	45
5	1,5	9	5	45

Sumber: Hasil analisa

Pembuatan peta zonasi *depth to watertable* atau kedalaman air tanah terbagi menjadi dua zonasi yaitu zonasi dengan nilai 50 dan zonasi dengan nilai 45. Hal ini dikarenakan perbedaan kedalaman muka air tanah di lokasi kajian yang juga terbagi menjadi dua kategori. Interval yang pertama yaitu 0-1,5 m yang terletak di titik DK3 dan empat titik lainnya termasuk dalam kelompok interval yang kedua yaitu 1,5-4,6 m.



Gambar 4.7 Peta zonasi *depth to watertable*

Sumber: Hasil analisa

2. *Recharge* (rata-rata curah hujan tahunan)

Semakin tinggi nilai curah hujannya semakin besar pula polusi airtanahnya. Pernyataan ini benar hanya terbatas jika jumlah curah hujan yang ada sangat besar sehingga mampu mencairkan polutannya (bahan pencemar). Curah hujan yang digunakan ini mewakili jumlah air yang masuk ke dalam tanah dan mencapai muka airtanah.

Tabel 4.11 Skor untuk curah hujan dengan *weight*

Titik	Curah hujan (mm)	Bobot rating (Rr)	Weight (Rw)	Skor (RwRr)
1	1713	6	4	24
2	1713	6	4	24
3	1713	6	4	24
4	1713	6	4	24
5	1713	6	4	24

Sumber: Hasil analisa

Peta zonasi *recharge* terbagi menjadi satu variasi saja yaitu dengan skor 24 dikarenakan penggunaan satu stasiun hujan yaitu stasiun hujan porong sehingga memiliki nilai rata-rata curah hujan yang sama yaitu 1.713 mm. Penggunaan satu stasiun hujan sendiri dimungkinkan untuk dilakukan karena luas daerah kajian kurang dari 500 km², lebih tepatnya berkisar di 40 km² maka perhitungan menggunakan analisa hujan titik.



3. *Aquifer media*(media akuifer)

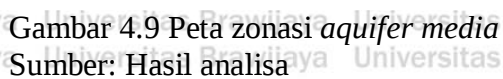
Semakin besar ukuran butir dan semakin banyaknya retakan dalam jenis akuifer, semakin tinggi pula permeabilitas dan potensi polusi pada akuifernya. Nilai bobot 4 diberikan karena jenis batuan yang ada berasal dari lapukan batuan beku atau malihan. Lapukan batuan beku/malihan memiliki nilai bobot relatif lebih kecil dibandingkan batu gamping karst yang memiliki bobot 10.

Tabel 4.12 Skor untuk media akuifer dengan *weight*

Titik	Jenis media akuifer	Bobot rating (Ar)	Weight (Aw)	Skor (AwAr)
1	Lapukan batuan beku/malihan	4	3	12
2	Lapukan batuan beku/malihan	4	3	12
3	Lapukan batuan beku/malihan	4	3	12
4	Lapukan batuan beku/malihan	4	3	12
5	Lapukan batuan beku/malihan	4	3	12

Sumber: Hasil analisa

Pembuatan peta zonasi *aquifer media* dibuat dengan satu variasi yaitu dengan skor 12 karena berdasarkan hasil uji geolistrik yang dilakukan di lima titik kajian yang tersebar di dalam buffer didapatkan hasil yang sama yaitu jenis tanah berupa lempung. Dan media akuifer pembentuknya yaitu lapukan batuan beku atau malihan.



4. *Soil media* (tekstur tanah)

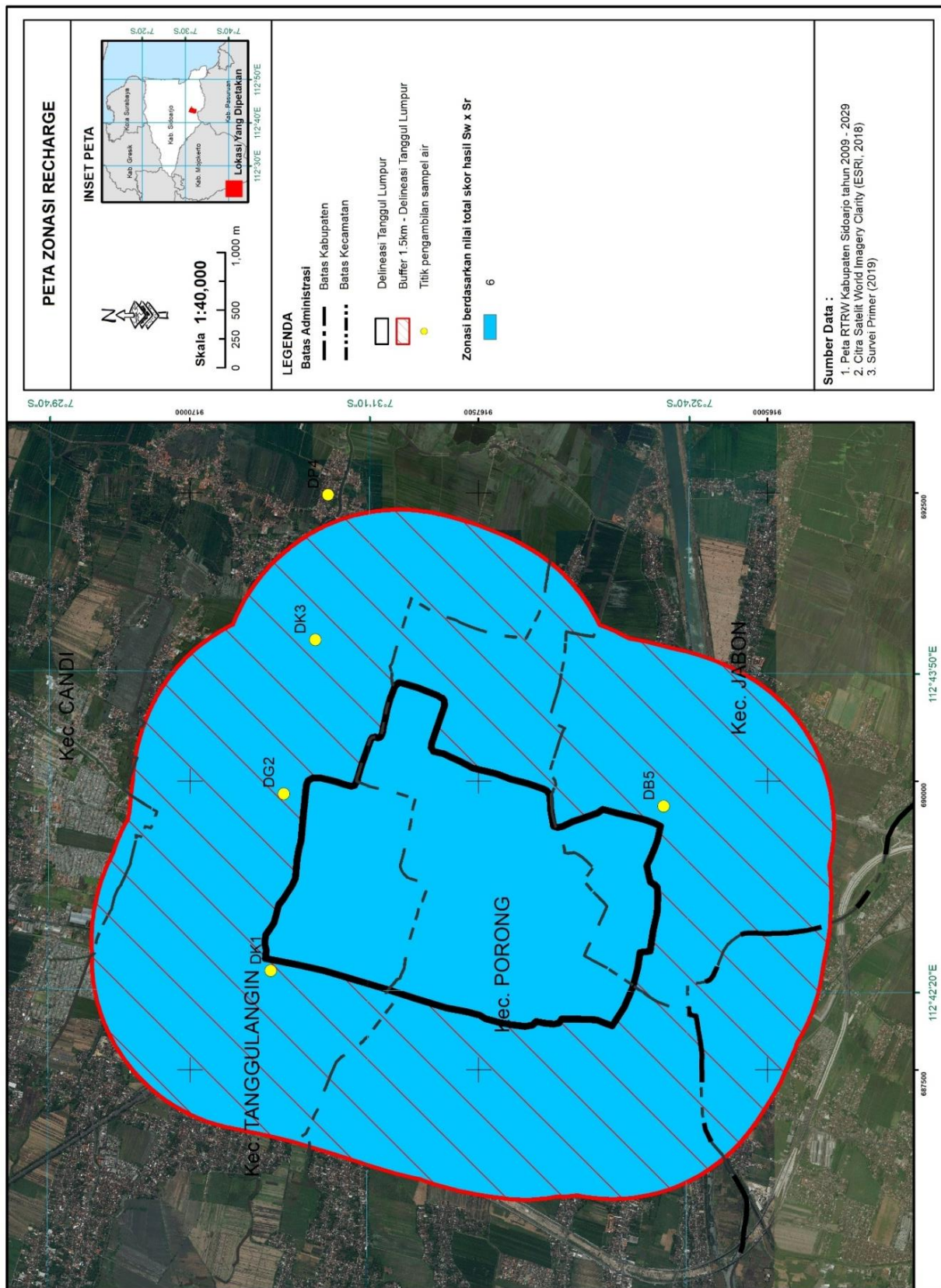
Semakin halus tekstur tanah yang ada, semakin kecil penyusutan lempungnya maka potensi terjadinya polusi akan semakin rendah. Lumpur lempung memiliki bobot cukup rendah karena sifatnya yang kedap air, maka potensi terjadinya polusi juga semakin rendah apabila dibandingkan dengan bobot rating tertinggi 10 dengan tekstur tanah pasir.

Tabel 4.13 Skor untuk tekstur tanah dengan *weight*

Titik	Tekstur tanah	Bobot rating (Sr)	Weight (Sw)	Skor (SwSr)
1	Lumpur lempung	3	2	6
2	Lumpur lempung	3	2	6
3	Lumpur lempung	3	2	6
4	Lumpur lempung	3	2	6
5	Lumpur lempung	3	2	6

Sumber: Hasil analisa

Pembuatan peta zonasi soil media dibuat hanya satu variasi yaitu dengan skor 6, karena berdasarkan hasil uji geolistrik yang sudah dilakukan di lima tempat yang tersebar di dalam lokasi kajian menunjukkan hasil yang sama yaitu jenis tananya berupa lumpur dan lempung. Sehingga peta yang tampak pada Gambar 4.9 hanya menampilkan 1 warna saja.



Gambar 4.10 Peta zonasi soil media

Sumber: Hasil analisa

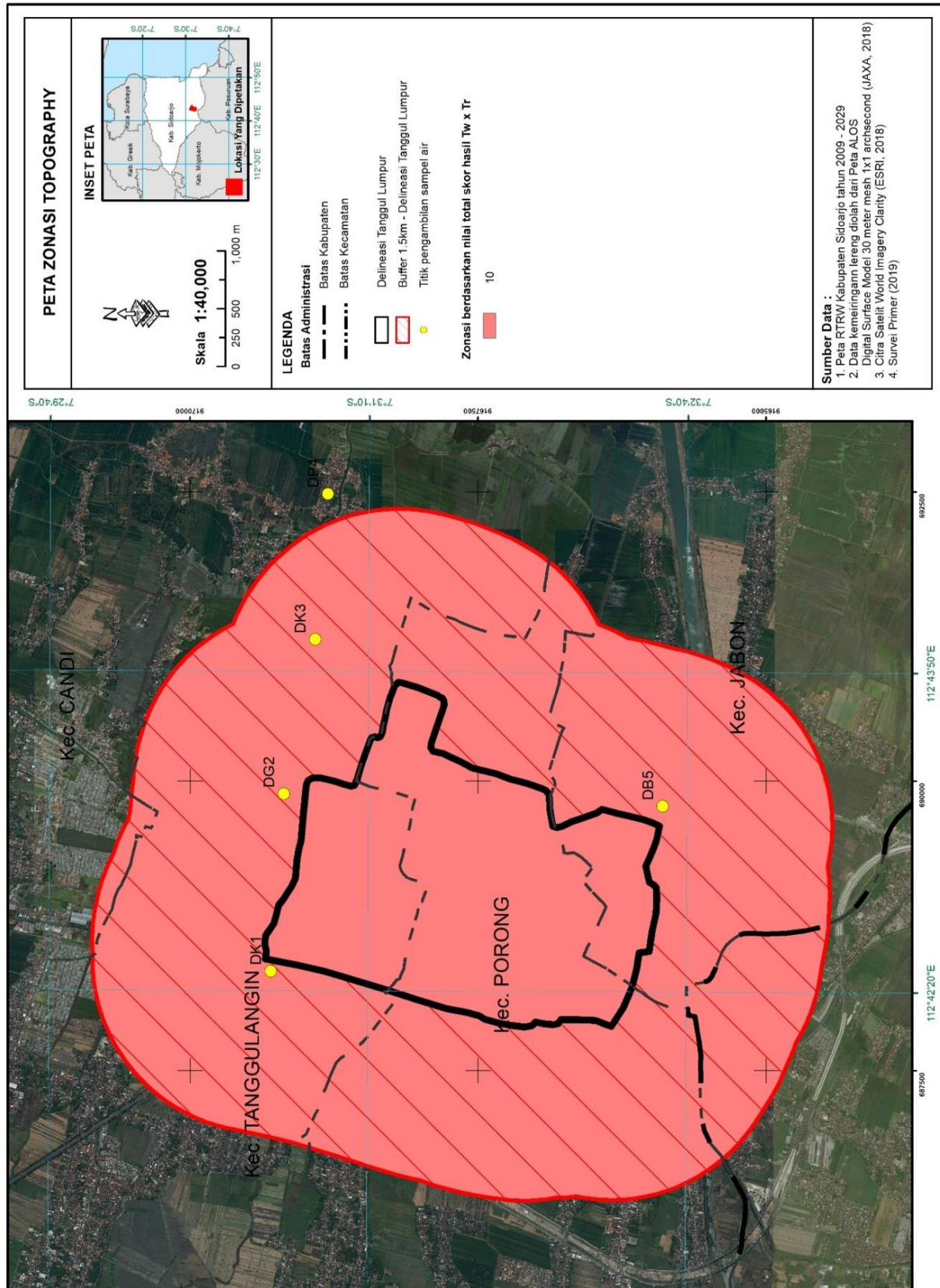
5. *Topography* (kemiringan lereng)

Slope yang curam memiliki tingkat potensi polusi yang lebih rendah karena mempermudah terjadinya limpasan daripada masuknya polutan ke dalam airtanah. Hasil perhitungan menunjukkan *slope* di daerah kajian cukup landai dengan kemiringan berkisar antara 0-1,5% pada kelima titik duga. Kemiringan lereng tersebut termasuk dalam bobot 10, termasuk kategori tinggi dikarenakan *slope* dengan kemiringan landai cenderung akan berpotensi menyebabkan banyaknya polutan yang masuk ke dalam tanah. Sehingga hanya ditampilkan 1 macam variasi untuk peta zonasi kemiringan lereng dengan nilai skor 10 seperti tampak pada Gambar 4.10.

Tabel 4.14 Skor untuk kemiringan lereng dengan *weight*

Titik	Interval kemiringan lereng (%)	Bobot rating (Tr)	Weight (Tw)	Skor (TwTr)
1	1,538	10	1	10
2	0,991	10	1	10
3	0,819	10	1	10
4	0	10	1	10
5	0,540	10	1	10

Sumber: Hasil analisa

Gambar 4.11 Peta zonasi *topography*

Sumber: Hasil analisa

6. *Impact of vadose zone (pengaruh zona vados)*

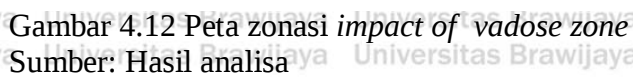
Zona tak jenuh dengan perpindahan yang lebih lambat memiliki potensi polusi yang lebih rendah. Bobot rating 1 diberikan untuk kategori lanau/lempung berdasarkan hasil uji geolistrik yang dilakukan di awal kajian. Bobot dengan nilai 1 diberikan karena memiliki laju perpindahan yang paling lambat diantara kategori jenis media akuifer yang lain. Sedangkan batu gamping karst dengan bobot rating 10 memiliki laju perpindahan potensi polusi paling besar.

Tabel 4.15 Skor untuk pengaruh zona vados dengan *weight*

Titik	Jenis media akuifer	Bobot rating (Ir)	Weight (Iw)	Skor (IwIr)
1	Lanau/lempung	1	5	5
2	Lanau/lempung	1	5	5
3	Lanau/lempung	1	5	5
4	Lanau/lempung	1	5	5
5	Lanau/lempung	1	5	5

Sumber: Hasil analisa





7. *Hydraulic conductivity (konduktivitas hidraulik)*

Jika nilai koefisien kelulusan airnya (K) tinggi akan menyebabkan tingginya potensi pencemaran. Nilai konduktivitas hidraulik untuk lempung adalah 0,0002 m/ hari. Hal ini menunjukkan bahwa lempung memiliki nilai kelulusan air yang rendah, yang juga berarti potensi kerentanan yang terjadi akan sangat kecil apabila dibandingkan dengan kerikil kasar dengan nilai K 450 m/hari. Nilai skor yang diberikan pada pembuatan peta zonasi ini adalah 3 sesuai dengan perhitungan Tabel 4.18.

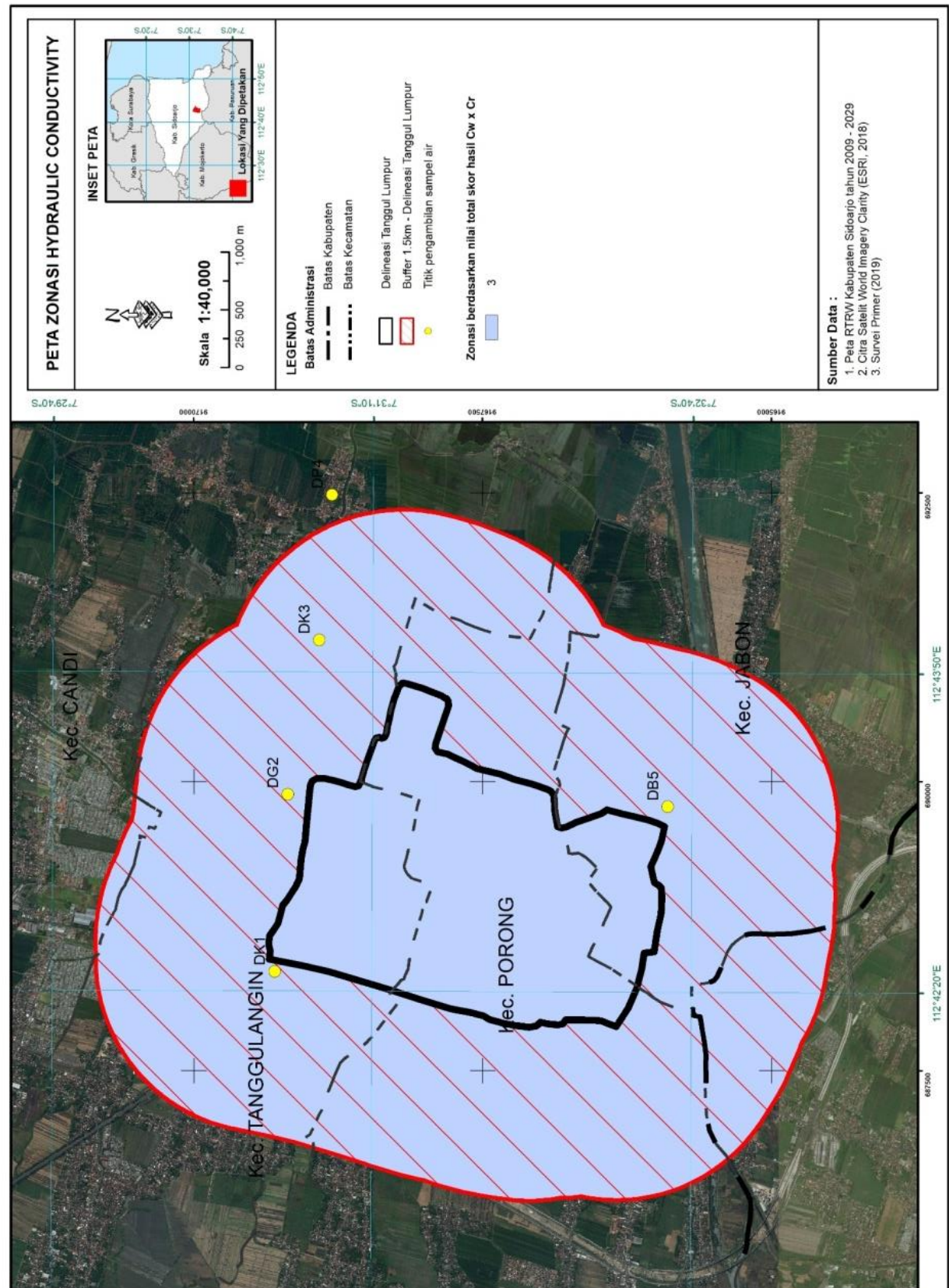
Tabel 4.16 Skor untuk konduktivitas hidraulik dengan *weight*

Titik	Konduktivitas hidraulik (m/hari)	Bobot rating (Cr)	Weight (Dw)	Skor (DwDr)
1	0,0002	1	3	3
2	0,0002	1	3	3
3	0,0002	1	3	3
4	0,0002	1	3	3
5	0,0002	1	3	3

Sumber: Hasil analisa





Gambar 4.13 Peta zonasi *hydraulic conductivity*

Sumber: Hasil analisa

4.7.3 Perhitungan DRASTIC index

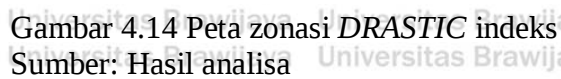
Setelah didapatkan nilai skor pada masing-masing parameter DRASTIC, maka selanjutnya dilakukan perhitngan DRASTIC Index dengan menggunakan rumus $DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw = \text{Drastic Indeks}$, maka:

Tabel 4.17 Hasil perhitungan DRASTIC Indeks

No	Nama Kecamatan	Nama desa	Kode titik	Dw Dr	Rw Rr	Aw Ar	Sw Sr	Tw Tr	Iw Ir	Cw Cr	DRASTIC Index
1	Tanggulangin	Ketapang	DK1	50	24	12	6	10	5	3	110
2	Tanggulangin	Gempolsari	DG2	50	24	12	6	10	5	3	110
3	Tanggulangin	Kalidawir	DK3	45	24	12	6	10	5	3	105
4	Tanggulangin	Penatarsewu	DP4	45	24	12	6	10	5	3	105
5	Jabon	Besuki	DB5	50	24	12	6	10	5	3	110

Sumber: Hasil analisa

Langkah terakhir dari analisa metode DRASTIC yaitu pembuatan peta zonasi penggubangan dari tujuh parameter yang telah dijabarkan diatas. Berdasarkan hasil perhitungan Tabel 4.19 maka pembagian dibagi menjadi dua zonasi yaitu dengan skor 105 dan 110. Kedua skor tersebut masuk ke dalam kategori tingkat kerentanan sedang dengan interval 101-140. Berdasarkan Putranto (2016) DRASTIC dengan tingkat kerentanan sedang memiliki sifat dapat tercemar oleh polutan yang dibuang secara terus menerus.



Dari hasil perhitungan DRASTIC Indeks diperoleh tingkat kerentanan air tanah termasuk kategori sedang terhadap polusi di lokasi Lumpur Sidoarjo (Skor 105-110). Jika dilihat pada Tabel 4.18 seluruh daerah kajian memiliki tingkat kerentanan sedang. Jika dilihat dari parameterinya, tingginya tingkat kerentanan airtanah terhadap polusi disebabkan oleh faktor kedalaman airtanah yang relatif lebih dekat ke permukaan tanah memungkinkan air yang meresap lebih cepat.

Menurut konsep konservasi, semakin banyak air yang masuk ke tanah semakin baik pula kondisi tanah daerah tersebut dalam artian lebih gembur dan menyimpan airtanah lebih banyak. Sedangkan menurut konsep metode DRASTIC ini, semakin sedikit air yang masuk ke dalam tanah semakin kecil pula peluang polutan sampai ke airtanah, sehingga sebisa mungkin menghindari masuknya polutan. Hasil analisa metode DRASTIC ini nantinya akan dibandingkan dengan hasil analisa indeks pencemaran yang dilakukan di lokasi kajian. Dimana analisa DRASTIC menggambarkan kondisi intrinsik lokasi kajian dan indeks pencemaran menggambarkan faktor ekstrinsik dari lokasi kajian. Semakin tinggi nilai kerentanan suatu daerah maka akan semakin mempengaruhi nilai risiko kesehatannya, karena daerah tersebut lebih berisiko untuk tercemar berbagai macam polutan yang mungkin bisa terekspos oleh manusia yang hidup di kawasan tersebut. Baik melalui inhalasi, oral, maupun sentuhan.

4.8 Analisis Parameter Indeks Pencemaran

Metode Indeks Pencemaran atau *Pollution Index* diusulkan oleh Sumimoto dan Nemerow (1970) dari Universitas Texas, AS. Metode ini digunakan untuk menentukan tingkat pencemaran relatif terhadap parameter kualitas air yang diizinkan. Untuk hasil perhitungan status mutu air dengan metode indeks pencemaran dapat dilihat pada Tabel 4.19 sampai dengan Tabel. 2.28. Dari data primer yang diperoleh akan diambil nilai rata-rata dari masing-masing parameter yang diuji. Nilai dari parameter tersebut akan dicari perbandingan antara nilai konsentrasi parameter kualitas air dengan konsentrasi baku mutu air. Perhitungan indeks pencemaran menggunakan rumus (2-7) sebagai berikut:

$$IP_j = \sqrt{\frac{(c_i/L_{ij})^2_M + (c_i/L_{ij})^2_R}{2}}$$

Berikut ini contoh perhitungan indeks pencemaran untuk parameter TDS pada sumur DK1 dengan baku mutu Permenkes No.492 Tahun 2010:

- a. Dari data primer diperoleh nilai $C_i = 1810 \text{ mg/l}$.
- b. Kadar TDS maksimum sesuai baku mutu Permenkes No.492 Tahun 2010 adalah 500 mg/l .
- c. Cari nilai $C_i/L_{jx} = 1810/500 = 3,620$
- d. Hasil perhitungan menunjukkan nilai $C_i/L_{jx} > 1$ maka perlu dicari nilai C_i/L_{jx} baru. Namun apabila nilai $C_i/L_{jx} < 1$ maka tidak perlu melakukan perhitungan untuk C_i/L_{jx} baru.
- e. $(C_i/L_{jx}) \text{ baru} = 1,0 + 5 \cdot \log (C_i/L_{jx})$ hasil perhitungan
 $= 3,794$

Sedangkan untuk nilai baku L_{jx} yang memiliki rentang mengambil contoh untuk parameter pH sebagai berikut:

- a. Untuk $C_i/L_{jx} < L_{jx \text{ rata-rata}}$

$$C_i/L_{jx \text{ baru}} = \frac{(C_i - L_{jx \text{ rata-rata}})}{((L_{jx}) \text{ min}) - ((L_{jx}) \text{ rata-rata})}$$

$$= 67,2 - 7,5 / 6,5 - 7,5$$

$$= 0,78$$

Dibawah ini merupakan rekap hasil perhitungan indeks pencemaran untuk sumur DK1 sampai DB5 untuk baku mutu PP No. 82 Tahun 2001.

Tabel 4.18 Status mutu air sumur berdasarkan baku mutu PP No. 82/2001 Kelas 1 dengan metode Indeks Pencemaran

No.	Keterangan	Parameter	Baku mutu	Nilai Ci	Ci/Ljx	Ci/Ljx baru	Keterangan
1	Sumur DK1	Suhu	-	29,10	-	-	
2		DO	6	3,36	0,560	-	
3		TSS	50	0	0	-	
4	Sumur DG2	Suhu	-	29,95	-	-	
5		DO	6	2,49	0,415	-	
6		TSS	50	0	0	-	
7	Sumur DK3	Suhu	-	30,84	-	-	
8		DO	6	3,38	0,563	-	
9		TSS	50	0	0	-	
10	Sumur DP4	Suhu	-	31,88	-	-	
11		DO	6	5,11	0,852	-	
12		TSS	50	0	0	-	
13	Sumur DB5	Suhu	-	29,71	-	-	
14		DO	6	2,89	0,482	-	
15		TSS	50	0	0	-	
					(Ci/Lix)R	0,287	
					(Ci/Lix)M	0,852	Memenuhi baku mutu
					IPx	0,876	$0 \leq P_{ij} \leq 1,0$

Sumber: Hasil analisa

Tabel 4.19 Status mutu air sumur berdasarkan baku mutu Permenkes No.492 Tahun 2010 peruntukan air minum dengan metode Indeks Pencemaran

No.	Keterangan	Parameter	Baku mutu	Nilai Ci	Ci/Ljx	Ci/Ljx baru	Keterangan
1	Sumur DK1	pH	6,5-8,5	6,72	0,78	0,78	
2		TDS	500	1810	3,620	3,794	
3		Mn	0,4	1,524	3,810	3,810	
4		Fe	0,3	0,044	0,147	0,147	
5		Al	0,2	0,290	1,45	1,807	
6	Sumur DG2	pH	6,5-8,5	7,26	0,24	0,24	
7		TDS	500	1570	3,14	3,485	
8		Mn	0,4	1,952	4,880	4,880	
9		Fe	0,3	0,056	0,187	0,187	
10		Al	0,2	0,247	1,235	1,458	
11	Sumur DK3	pH	6,5-8,5	7,08	0,42	0,420	
12		TDS	500	1270	2,54	3,024	
13		Mn	0,4	1,190	2,975	2,975	
14		Fe	0,3	0,033	0,110	0,110	
15		Al	0,2	0,221	1,105	1,217	
16	Sumur DP4	pH	6,5-8,5	7,2	0,3	0,300	
17		TDS	500	7780	15,560	6,960	
18		Mn	0,4	0,714	1,785	1,785	
19		Fe	0,3	0,009	0,030	0,030	
20		Al	0,2	0,178	0,890	0,747	
21	Sumur DB5	pH	6,5-8,5	7,16	0,34	0,340	
22		TDS	500	826	1,652	2,090	
23		Mn	0,4	0,8570	2,1425	2,143	
24		Fe	0,3	0,0190	0,063	0,063	
25		Al	0,2	0,1290	0,645	0,048	
					(Ci/Lix)R	1,714	
					(Ci/Lix)M	6,960	Cemar sedang
					PIx	5,068	5,0 ≤ Pij ≤ 10

Sumber: Hasil analisa

Berdasarkan hasil perhitungan indeks pencemaran mutu air sumur yang berada di lokasi kajian dibagi menjadi 2 kelas yaitu memenuhi baku mutu, dan cemar sedang. Baku mutu yang digunakan adalah PP No. 82 Tahun 2001 kelas 1 dan Permenkes No. 492 Tahun 2010 tentang kualitas air minum. Perhitungan status mutu air yang mengacu pada PP No. 82 Tahun 2001 kelas 1 menunjukkan hasil memenuhi baku mutu dan cemar ringan untuk acuan baku mutu Permenkes No. 492 Tahun 2010.

Hal ini menunjukkan keterkaitan yang cukup baik antara tingkat kerentanan air tanah dan hasil uji kualitas air, mengingat hasil kerentanan air tanah dengan tingkatan DRASTIC Indeks sedang. Maka dapat disimpulkan bahwa hasil perhitungan kualitas air menggunakan

Indeks Pencemaran (IP) mendukung hasil perhitungan tingkat kerentanan air tanah menggunakan metode DRASTIC.

4.9 Analisa Risiko Kesehatan

Analisa risiko kesehatan dihitung menggunakan rumus dibawah ini (losin Gergen et al., 2012):

$$THQ = \frac{EF \times ED \times DIM}{RfD \times W \times T}$$

Dimana:

EF : *exposure frequency* (365hari/tahun)

ED : *exposure duration* (13 tahun, perkiraan lama terpapar lumpur)

DIM : *daily metal ingestion* (mg/L/day)

C : *concentration* (mg/L)

IR : *water intake rate* (L/day)

RfD : *oral reference dose* (mg/L/day)

RfD Fe : 0,3 mg/L/day

RfD Mn : 0,14 mg/L/day

RfD Al : 1 mg/L/day

W : *average body weight* (asumsi 72 kg)

T : *average exposure time* (asumsi 365 x 70 = 25550)

Data jumlah konsumsi air minum warga yang terletak di lokasi penelitian di dua kecamatan yaitu Kecamatan Jabon dan Kecamatan Tanggulangin didapatkan dari hasil wawancara secara langsung lokasi kajian yang dilakukan bersamaan dengan uji kualitas air, diasumsikan bersumber dari air sumur warga tampak pada Tabel 4.22.

Sampel air diambil dari 4 lokasi yang berada di Kecamatan Tanggulangin yaitu Desa Ketapang, Desa Gempolsari Desa Kalidawir, Desa Penatarsewu dan 1 desa yang berada di Kecamatan Jabon yaitu Desa Besuki.

Tabel 4.20 Jumlah kebutuhan air dan sifat kimia parameter logam

No. Sumur	Kode titik	Kebutuhan air minum (L)	Kebutuhan Air (L/hr)	Jml anggota keluarga	Kebutuhan /orang/hr	Sifat kimia (ppm) (mg/L)		
						Fe	Al	Mn
1	DK1	30	6	5	1,20	0,044	0,29	1,524
2	DG2	30	5	4	1,25	0,056	0,247	1,952
3	DK3	30	5	6	0,83	0,033	0,221	1,19
4	DP4	180	20	6	3,33	0,009	0,178	0,714
5	DB5	3	0,6	2	0,30	0,019	0,129	0,857

Sumber: Hasil analisa

Hasil perhitungan analisa risiko kesehatan terhadap logam Fe di lokasi penelitian berada dibawah nilai 1 sesuai pada Tabel 4.22. Hal ini menunjukkan bahwa air yang dikonsumsi maupun digunakan oleh warga yang sampel airnya digunakan dalam penelitian berada pada kondisi tidak merugikan kesehatan karena memiliki nilai THQ <1. Namun apabila nilai THQ nya > 1 maka dianggap menimbulkan risiko kesehatan.

Tabel 4.21 Perhitungan analisa risiko kesehatan logam Fe

No. Sumur	Kode Titik	C	IR	ED	EF	RfD	W	T	THQ
1	DK1	0,044	1,20	15	365	0,3	72	25550	0,0005238
2	DG2	0,056	1,25	15	365	0,3	72	25550	0,0006944
3	DK3	0,033	0,83	15	365	0,3	72	25550	0,0002728
4	DP4	0,009	3,33	15	365	0,3	72	25550	0,0002976
5	DB5	0,019	0,30	15	365	0,3	72	25550	0,0000565

Sumber: Hasil analisa

Perhitungan analisa risiko kesehatan juga dilakukan terhadap logam Al di lokasi penelitian yang sama. Hasil perhitungan menunjukkan nilai THQ dibawah nilai 1 sesuai pada Tabel 4.23. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa sampel air yang digunakan tidak terindikasi merugikan kesehatan.

Tabel 4.22 Perhitungan analisa risiko kesehatan logam Al

No. Sumur	Kode Titik	C	IR	ED	EF	RfD	W	T	THQ
1	DK1	1,524	1,20	15	365	0,14	72	25550	0,0388776
2	DG2	1,952	1,25	15	365	0,14	72	25550	0,0518707
3	DK3	1,19	0,83	15	365	0,14	72	25550	0,0210813
4	DP4	0,714	3,33	15	365	0,14	72	25550	0,0505952
5	DB5	0,857	0,30	15	365	0,14	72	25550	0,0054656

Sumber: Hasil analisa

Perhitungan analisa risiko kesehatan yang terakhir dilakukan adalah untuk logam Mn. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.24. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa air digunakan warga tidak terindikasi merugikan kesehatan.

Tabel 4.23 Perhitungan analisa risiko kesehatan logam Mn

No. Sumur	Kode Titik	C	IR	ED	EF	RfD	W	T	THQ
1	DK1	0,29	1,20	15	365	1	72	25550	0,0010357
2	DG2	0,247	1,25	15	365	1	72	25550	0,0009189
3	DK3	0,221	0,83	15	365	1	72	25550	0,0005481
4	DP4	0,178	3,33	15	365	1	72	25550	0,0017659
5	DB5	0,129	0,30	15	365	1	72	25550	0,0001152

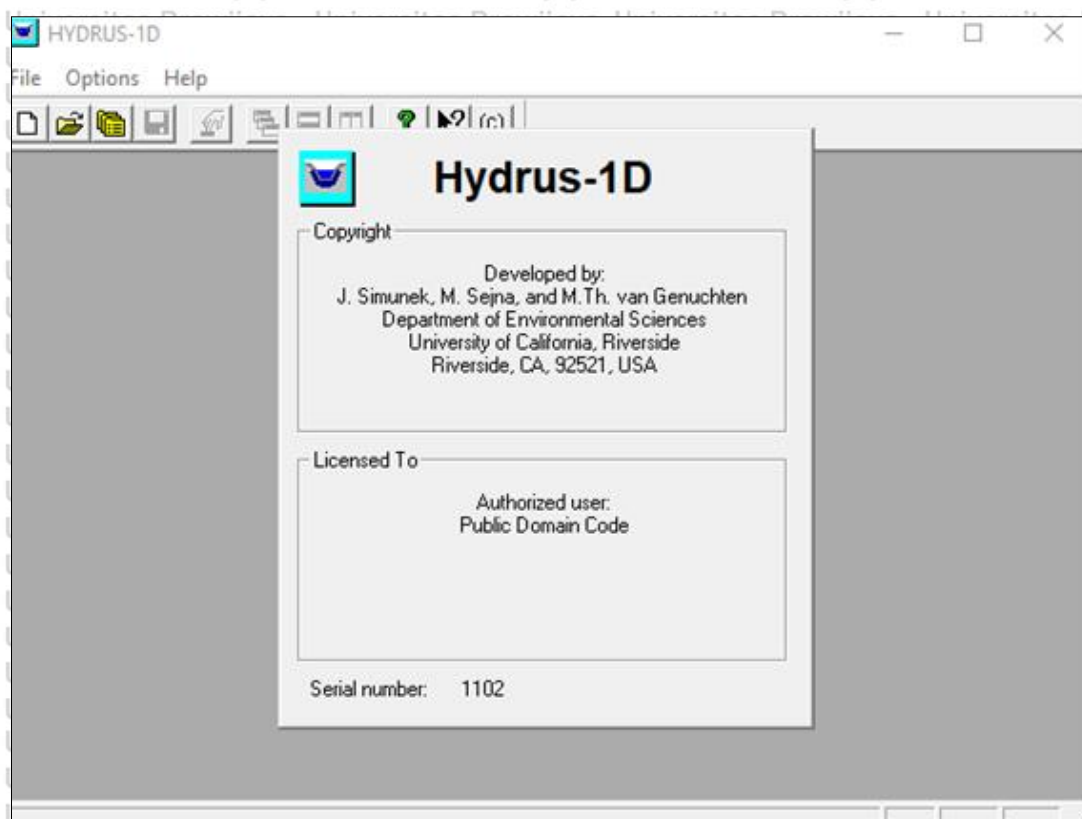
Sumber: Hasil analisa

Berdasarkan hasil perhitungan analisa risiko kesehatan untuk tiga parameter logam terpilih yaitu Fe, Al, dan Mn ketiganya menunjukkan hasil yang sama yaitu nilai THQ < 1 yang berarti bahwa kandungan logam yang berada di sumur penduduk tidak terindikasi merugikan kesehatan. Apabila nilai THQ > 1 risiko kesehatan yang mungkin terjadi apabila terus-menerus terpapar logam Fe dapat mengakibatkan beberapa penyakit diantaranya sirosis dan gagal jantung. Paparan logam Al yang terjadi terus-menerus dalam jumlah yang besar dapat menimbulkan penyakit degeneratif syaraf seperti Alzheimer, serta paparan logam Mn dikhawatirkan dapat menimbulkan gangguan penyerapan besi dalam tubuh.

Maka dapat disimpulkan bahwa kondisi air sumur warga yang sampai saat ini masih digunakan berada di kondisi memenuhi baku mutu menurut PP No. 82 Tahun 2001 dan cemar sedang menurut Permenkes No. 492 Tahun 2010 dari segi penentuan mutu air dan tidak terindikasi merugikan kesehatan meski telah terpapar selama kurang lebih 13 tahun.

4.10 Transpor Polutan

Pembuatan peta transport polutan didasarkan pada nilai kontaminan pencemar Fe, Mn, dan Al yang diambil dari sumur penduduk. Pemilihan jenis polutan didasarkan pada kajian literatur yang berkaitan dengan lumpur sidoarjo menggunakan persamaan adveksi. Program yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan ini adalah Program Hydrus-1D.



Gambar 4.15 Hydrus-1D.

Sumber : Hydrus-1D

Parameter input yang digunakan untuk menjalankan program Hydrus-1D menggunakan persamaan model *Van Genuchten-Mualem* untuk tanah jenis lempung dan konsentrasi yang diambil adalah konsentrasi yang berada dari dalam tanggul Lumpur Sidoarjo:

Tabel 4.24 Input parameter Hydrus-1D

Parameter	Nilai	Satuan
Saturated hydraulic conductivity	24,96	Ks (cm day ⁻¹)
Residual soil water content	0,078	θ_r
Saturated soil water content	0,43	θ_s
Parameter α in soil water retention	0,036	l/cm
Parameter n in soil water retention	1,56	
Bulk density	1,25	Bd (g cm ⁻³)
Solution	Mn $5,3 \times 10^{-5}$ Al $1,28 \times 10^{-5}$ Fe $1,52 \times 10^{-4}$	C (mol L ⁻¹)

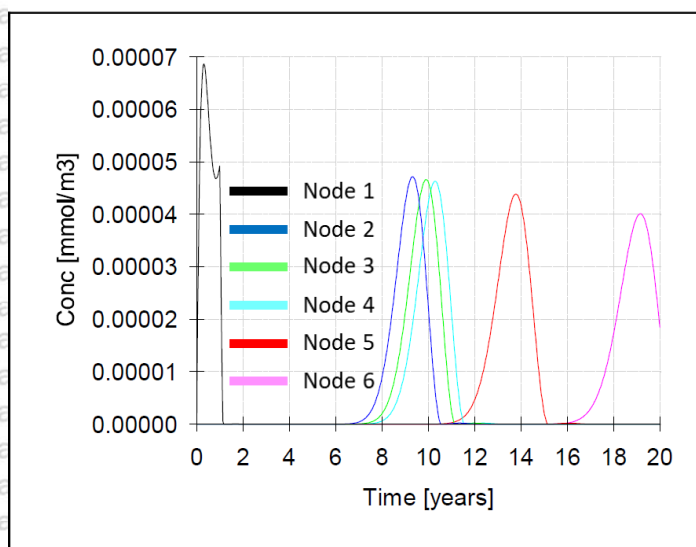
Sumber: Hasil analisa

Nilai dari parameter *saturated hydraulic conductivity*, *residual soil water content*, *saturated soil water content*, parameter α dan n dalam *soil water retention* diambil dari Tabel 2.12 *water retention* dari *after Carsel dan Parrish, 1998*. Nilai *bulk density* didapatkan dari

halaman web soilgrids.com untuk daerah sidoarjo. Sedangkan konsentrasi logam terpilih seperti pada Tabel 4.26 yang digunakan diambil dari pusat semburan yang berada di tengah tanggul Lumpur Sidoarjo yang diuji menggunakan uji XRF yang juga akan dilampirkan.

Gambar 4.3 dibawah merupakan grafik yang diperoleh dari hasil simulasi program Hydrus-1D. Program ini dapat mensimulasikan laju polutan dalam bidang vertikal (ke dalam permukaan tanah) maupun horizontal (sebaran ke segala arah). Pada umumnya program ini digunakan untuk mensimulasikan pergerakan polutan secara vertikal ke bawah tanah, namun dengan modifikasi pada bagian *boundary conditions* maka program ini dapat mensimulasikan pergerakan polutan bidang horizontal ke segala arah. Untuk mendapatkan simulasi pergerakan simulasi pergerakan polutan di bidang horizontal tersebut, maka *boundary conditions* untuk *Upper Boundary Condition* dan *Lower Boundary Condition* dibuat sama yaitu dalam kondisi *Constant Pressure Head*. Kemudian kondisi *pressure head* pada semua titik diubah nilainya menjadi 0 di segala arah, sehingga meniadakan efek *pressure head* tersebut. Dengan menggunakan parameter-parameter tersebut, maka pergerakan polutan pada arah sumbu x atau horizontal dapat disimulasikan menggunakan program Hydrus-1D seperti yang telah dijelaskan Jirka Simunek.

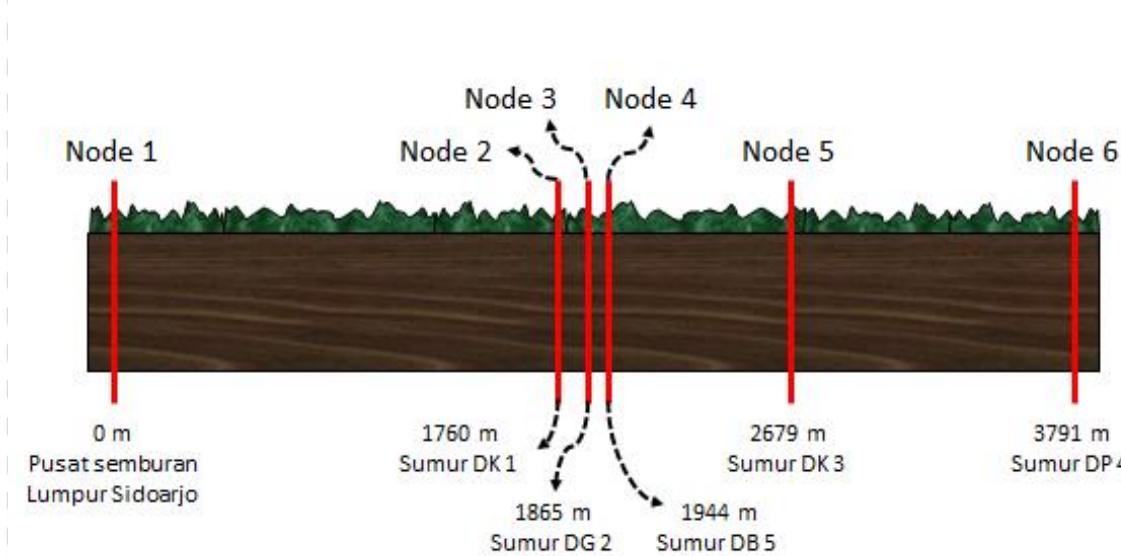
Observation Nodes: Concentration - 1



Gambar 4.16 Grafik hasil simulasi pergerakan polutan Mn pada arah horizontal menggunakan *Hydrus-1D*
Sumber : *Hydrus-1D*

Grafik diatas merupakan hasil simulasi pergerakan polutan Mn pada sumbu x atau horizontal dengan peregrakan ke segala arah. Grafik diatas dibagi menjadi 6 *Node* yang berbeda, yaitu *Node 1*, *Node 2*, *Node 3*, *Node 4*, *Node 5*, dan *Node 6*.

Posisi *Node* seperti tampak pada Gambar 4.16 dibuat sedemikian rupa untuk mewakili jarak dari masing-masing sumur yang diambil sampel airnya untuk mengetahui status mutu air sumur tersebut dan pusat semburan Lumpur Sidoarjo yang berada di dalam lokasi kajian penelitian. *Node* 1 menunjukkan pusat semburan dari Lumpur Sidoarjo, sehingga *node* 1 memiliki jarak 0 meter dari pusat Lumpur Sidoarjo. *Node* 2 adalah sumur DK1 yang memiliki jarak 1.760 meter dari pusat Lumpur Sidoarjo, hal yang sama juga berlaku untuk *Node* 3 yang menggambarkan posisi sumur DG2 yang terletak sejauh 1.865 meter dari pusat semburan. Lalu secara berurutan yakni *Node* 4, *Node* 5, dan *Node* 6 yang merupakan sumur DB5, sumur DK3, dan sumur DP4 yang berjarak 1.944 meter, 2.679 meter, dan 3.791 meter dari pusat semburan Lumpur Sidoarjo.

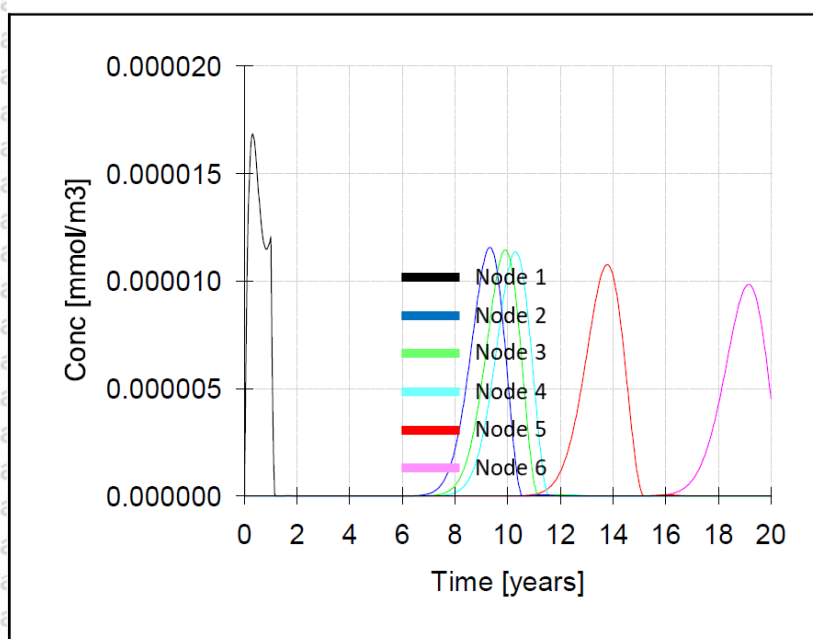


Gambar 4.17 Posisi *Nodes*
Sumber: Hasil analisa

Pergerakan dari polutan Mn dapat dilihat dari Gambar 4.15. Berdasarkan grafik dapat dilihat bahwa konsentrasi Mn fluktuatif pada pusat lumpur Sidoarjo dan mulai stabil pada konsentrasi $5.3 \times 10^{-5} \text{ mmol/m}^3$. Kemudian secara perlahan polutan Mn bergerak dan mencapai *node* 2 pada tahun ke 7 yang merupakan sumur DK1 yang berjarak 1760 meter. Memasuki tahun ke-9 polutan Mn mencapai konsentrasi $4.8 \times 10^{-5} \text{ mmol/m}^3$ kemudian perlahan turun pada tahun berikutnya. Pada *node* 3 dan *node* 4 yang relatif dekat dengan *node* 5 menunjukkan waktu sampai polutan yang hampir sama, yaitu pada 7,5 dan 8 tahun secara berurutan. Lalu konsentrasi Mn akan fluktuatif dan menurun di tahun-tahun berikutnya. Konsentrasi tertinggi pada kedua node tersebut secara berurutan adalah 4.75×10^{-5} dan $4.7 \times 10^{-5} \text{ mmol/cm}^3$. *Node* 5 yang merupakan sumur DK3 yang berjarak 2.679 meter dari pusat lumpur sidoarjo mulai dimasuki polutan Mn pada tahun ke 11. Dan yang terakhir

polutan mencapai *node* 6 yang berjarak 3.791 meter pada tahun ke 16 dan terus menaikkan konsentrasinya hingga ke tahun 19,5 pada konsentrasi 4.0×10^{-5} mmol/cm³ dan perlahan turun. Selain itu, jika diperhatikan pada tiap *node*, semakin jauh *node* dari pusat Lumpur Sidoarjo maka konsentrasi maksimum Mn akan perlahan menurun. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh cakupan sebaran yang lebih luas pada *node* yang berjarak lebih jauh dari pusat semburan Lumpur Sidoarjo, sehingga mengakibatkan konsentrasi Mn yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan pusat Lumpur Sidoarjo.

Observation Nodes: Concentration - 2

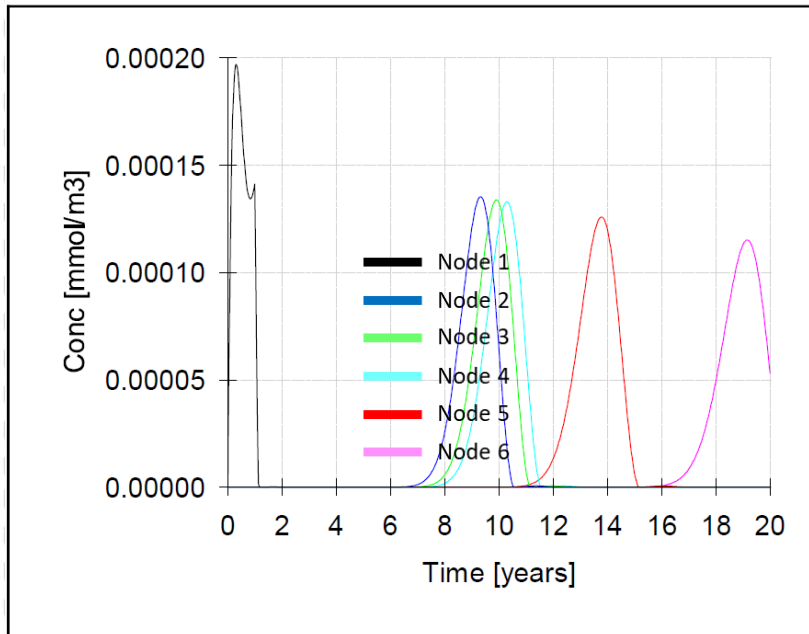


Gambar 4.18 Grafik hasil simulasi pergerakan polutan Al pada arah horizontal menggunakan *Hydrus-1D*
Sumber: *Hydrus-1D*

Pergerakan dari polutan Al dapat dilihat dari Gambar 4.17. Berdasarkan grafik dapat dilihat bahwa konsentrasi Mn fluktuatif pada pusat Lumpur Sidoarjo dan maksimal pada konsentrasi 1.28×10^{-5} mmol/m³. Kemudian secara perlahan polutan Al bergerak dan mencapai *node* 2 pada tahun ke 7 yang merupakan sumur DK1 yang berjarak 1.760 meter. Memasuki tahun ke-9 polutan Al mencapai konsentrasi maksimal pada 1.2×10^{-5} mmol/m³ kemudian menurun pada tahun berikutnya. Pada *node* 3 dan *node* 4 yang relatif dekat dengan *node* 5 menunjukkan waktu sampai polutan yang hampir sama, yaitu pada 7,5 dan 8 tahun secara berurutan. Lalu konsentrasi Al akan maksimal pada 1.18×10^{-5} mmol/m³ dan 1.15×10^{-5} mmol/m³ secara berurutan dan menurun pada tahun-tahun berikutnya. *Node* 5 yang merupakan sumur DK3 yang berjarak 2.679 meter dari pusat lumpur sidoarjo mulai dimasuki polutan Al pada tahun ke 11. Dan yang terakhir polutan

mencapai *node* 6 yang berjarak 3.791 meter setelah tahun ke 16 dan terus menaikkan konsentrasinya hingga ke tahun 19,5 setelah pertama kali terpapar.

Observation Nodes: Concentration - 3



Gambar 4.19 Grafik hasil simulasi pergerakan polutan Fe pada arah horizontal menggunakan *Hydrus-1D*

Sumber : *Hydrus-1D*

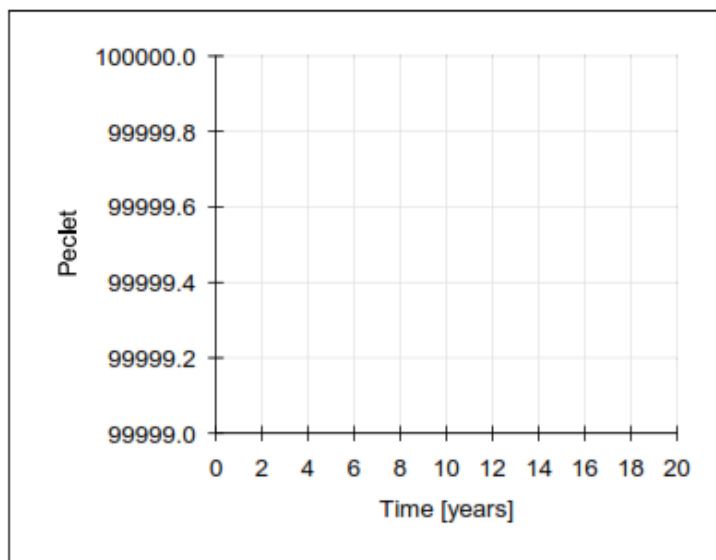
Pergerakan dari polutan Fe dapat dilihat dari Gambar 4.18 diatas. Berdasarkan grafik dapat dilihat bahwa konsentrasi Fe dimulai dengan fluktuatif pada pusat lumpur Sidoarjo dan maksimum pada konsentrasi 1.52×10^{-4} mmol/m³. Secara perlahan polutan bergerak dan mencapai *node* 2 yang merupakan sumur DK1 yang berjarak 1.760 meter setelah pemaparan tahun ke-6. Pada *node* 3 dan *node* 4 yang relatif dekat dengan *node* 5 menunjukkan waktu sampai polutan yang hampir sama, yaitu pada 7 dan 8 tahun. Kemudian konsentrasi Fe terus meningkat dan menjadi stabil di tahun-tahun berikutnya pada konsentrasi 1.4×10^{-4} mmol/cm³ dan 1.38×10^{-4} mmol/cm³ secara berurutan. *Node* 5 yang merupakan sumur DK3 yang berjarak 2.679 meter dari pusat lumpur sidoarjo mulai terpapar polutan Fe setelah tahun ke 10. *Node* 6 yang berjarak 3.791 meter mulai terpapar pada tahun ke 16.

Sebagai langkah terakhir dilakukannya suatu simulasi, dibutuhkan kalibrasi terhadap alat yang digunakan. Dalam hal ini alat yang dimaksud adalah software *Hydrus-1D* yang berfungsi sebagai alat bantu untuk melakukan pembacaan transpor polutan terhadap parameter logam terpilih. Hasil simulasi dinyatakan benar apabila salah satu dari dua parameter kontrol memiliki nilai dibawah 2, Maka berdasarkan gambar 4. 19 dan Gambar

4.20 yaitu grafik untuk nilai *Peclet* dan *Courant number* yang merupakan *output* dari *Run Time Information* Hydrus-1D, hasil simulasi persebaran polutan dengan skema pengaliran adveksi dinyatakan memenuhi syarat. *Peclet number* diartikan sebagai diskretisasi berdasarkan ruang lingkup sebaran dimana nilai ini dapat menunjukkan mekanisme transportasi yang dominan pada suatu simulasi. Nilai ini merupakan perbandingan antara adveksi dan dispersi. Semakin tinggi nilai *peclet* maka semakin dominan mekanisme adveksinya, sedangkan apabila semakin rendah nilai *peclet* maka semakin dominan mekanisme dispersinya. Nilai *peclet number* pada kajian ini tidak terdeteksi dikarenakan kurangnya parameter input seperti yang sudah dijelaskan pada Tabel 3.4 dan faktor yang paling berpengaruh adalah tidak adanya nilai parameter dispersi.

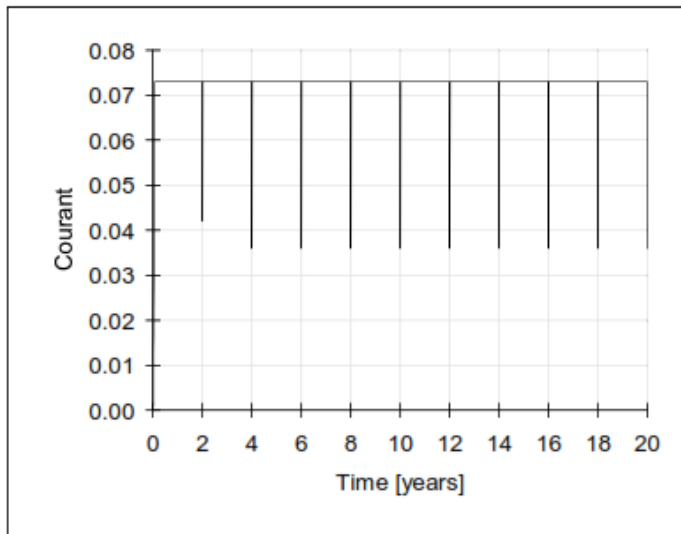
Courant number adalah diskretisasi berdasarkan waktu simulasi. Nilai yang diperbolehkan pada simulasi HYDRUS-1D adalah lebih kecil daripada 2, hal ini menunjukkan kestabilan hasil simulasi dari waktu ke waktu. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai *courant number* hasil kajian sebesar 0,074. Dengan demikian hasil dianggap memenuhi syarat karena nilainya berada dibawah 2.

Run-Time Information: Time vs. Peclet

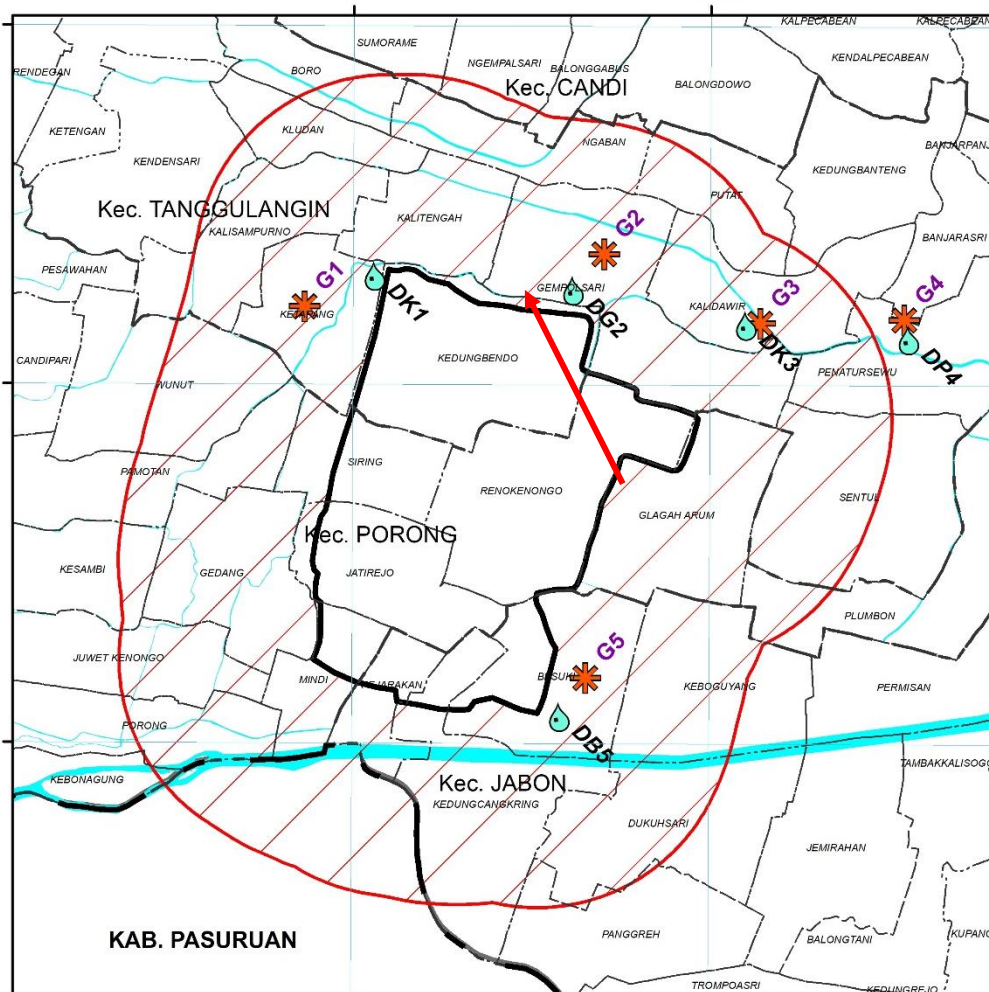


Gambar 4.20 Grafik *run time* untuk *Peclet number*
Sumber: Hydrus-1D

Run-Time Information: Time vs. Courant



Gambar 4.21 Grafik run time untuk Courant number
Sumber: Hydrus-1D



Gambar 4.22 Pembagian lokasi air sumur dan geolistrik
Sumber: Hasil analisa

Berdasarkan hasil simulasi transpor polutan dengan skema pengaliran adveksi menggunakan software Hydrus-1D, konsentrasi logam C1 atau Mn dengan konsentrasi awal $5.3 \times 10^{-5} \text{ mmol/cm}^3$ memerlukan waktu ± 8 tahun untuk mencapai titik sumur DK1 yang terletak 1760,6 m dari pusat semburan Lumpur Sidoarjo. Logam C2 atau Al dengan konsentrasi awal $1.28 \times 10^{-5} \text{ mmol/cm}^3$ memerlukan waktu ± 8 tahun untuk mencapai sumur DK1 dan C3 atau logam Fe membutuhkan waktu ± 8 tahun untuk mencapai lokasi sumur yang sama.

Hasil akhir penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi air sumur lebih kecil daripada konsentrasi hasil simulasi Hydrus-1D dengan panjang simulasi 20 tahun. Ada beberapa faktor yang mungkin melatarbelakangi rendahnya konsentrasi air sumur dibandingkan konsentrasi Lumpur Sidoarjo. Berdasarkan tinjauan metode DRASTIC yaitu jenis tanah yang ada di zona vados, dimana lempung ini membuat jalannya polutan terhambat untuk sampai di lokasi sumur yang ditentukan. Proses pengenceran air hujan juga bisa terjadi mengingat cukup tingginya curah hujan tahunan rata-rata yaitu sebesar 1713. Faktor selanjutnya yang berpengaruh yaitu diambilnya sampel air sumur warga di lokasi penelitian diambil pada bulan basah yaitu Januari 2019. Minimnya input parameter Hydrus-1D juga menjadi salah satu faktor paling berpengaruh terhadap hasil simulasi di lokasi penelitian. Faktor-faktor yang dimaksud antara lain nilai *Frac*, *Thlm*, *Nu*, *Beta*, *Henry* dan reaksi-reaksi yang mungkin akan terjadi apabila hasil simulasi tidak dalam kondisi setimbang atau *equilibrium*.

4.11 Kalibrasi Model Persebaran

Verifikasi hasil simulasi Hydrus-1D dilakukan dengan cara membandingkan hasil uji kualitas pada daerah semburan lumpur lapindo dengan hasil yang diperoleh dari simulasi Hydrus-1D. Parameter yang dibandingkan adalah konsentrasi Mn, Al, dan Fe hasil uji kualitas air dengan konsentrasi hasil simulasi Hydrus 1-D. Perlu diperhatikan bahwa simulasi Hydrus-1D dilakukan dengan hanya menggunakan skema pengaliran adveksi. Skema dispersi, interfase perpindahan masa, dan reaksi tidak di perhitungkan dalam simulasi dalam studi ini, sehingga kemungkinan simpangan hasil sangat besar antara hasil uji kualitas air dengan hasil simulasi.

Data yang digunakan untuk simulasi adalah data uji XRF dari sampel lumpur lapindo yang sudah di konversi 2 kali. Konversi pertama adalah konversi dari persen ke ppm dan konversi kedua adalah konversi untuk mengetahui konsentrasi polutan yang ada pada fasa air pada lumpurnya. Pada umumnya lumpur terbentuk dari 2 fasa berbeda, yakni fasa padatan

dan fasa air. Polutan yang dapat termobilisasi diasumsikan hanyalah polutan pada fasa air, sedangkan polutan pada fasa padatnya stabil dalam bentuk padatnya. Dalam studi ini, hasil XRF yang didapat merupakan total konsentrasi polutan yang ada pada fasa padatan dan fasa air, sehingga diperlukan data pembanding untuk mengetahui konsentrasi sebenarnya yang ada pada fasa air.

Data pembanding yang digunakan untuk melakukan konversi adalah data yang didapat dari studi kandungan lumpur Lapindo yang dilakukan oleh USGS (Geoffrey et al., 2008). Dari studi tersebut diketahui konsentrasi dari polutan Fe, Mn, Al seperti pada Tabel 4.27 dibawah ini.

Tabel 4.25 Konsentrasi Fe, Al, dan Mn dari hasil uji USGS.

Pada fasa air

Mn:	0.517 ppm
Al:	0.284 ppm
Fe:	1.21 ppm

Pada fasa padatan

Mn:	915 ppm
Al:	81700 ppm
Fe:	49000 ppm

Dari hasil uji USGS tersebut maka akan didapat konsentrasi hasil simulasi seperti pada Tabel 4.28. Nilai tersebut diperoleh dengan cara metode prorata dengan hasil dari USGS. Nantinya hasil ini akan digunakan sebagai acuan dasar untuk simulasi Hydrus-1D.

Tabel 4.26 Konsentrasi Fe, Al, dan Mn hasil uji kualitas air dan hasil simulasi Hydrus-1D.

No. Node	Kode Titik	Concentration (ppm)			Simulation results (ppm)		
		Fe	Al	Mn	Fe	Al	Mn
2	DK1	0,044	0,29	1,524	7,99	0,32	2,64
3	DG2	0,056	0,247	1,952	7,82	0,32	2,61
4	DB5	0,019	0,129	0,857	7,71	0,31	2,58
5	DK3	0,033	0,221	1,19	7,26	0,30	2,36
6	DP4	0,009	0,178	0,714	6,70	0,27	2,20

Sumber : Hasil perhitungan

Berdasarkan Tabel 4.28, data diatas menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang sangat jauh antara hasil simulasi Hydrus-1D dan hasil uji kualitas sumur air yang ada di daerah semburan lumpur lapindo. Untuk melihat persentase simpangan antara hasil uji kualitas air dan simulasi Hydrus-1D, maka perlu menggunakan rumus dibawah ini.

$$\% \text{ Simpangan} = \frac{\text{Hasil simulasi (ppm)}}{\text{Hasil uji kualitas air (ppm)}} \times 100\%$$

Dengan menggunakan rumus tersebut maka didapat hasil seperti yang ada pada Tabel

4.27.

Tabel 4.27 Prosentase simpangan antara hasil uji kualitas air dan hasil simulasi Hydrus-1D.

No. Sumur	Kode Titik	%Simpangan		
		Fe	Al	Mn
1	DK1	18148%	112%	173%
2	DG2	13960%	129%	134%
3	DK3	40557%	241%	301%
4	DP4	21998%	138%	199%
5	DB5	74453%	152%	308%
	Rerata	33823%	154%	223%

Sumber : Hasil analisa

Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi Hydrus-1D sangat jauh menyimpang dengan hasil uji kualitas air. Hal ini sesuai dengan hipotesa awal yang menyebutkan bahwa akan ada simpangan antara hasil simulasi Hydrus-1D dan hasil uji kualitas air. Hal ini diakibatkan karena pada studi ini skema yang digunakan untuk mensimulasikan transpor polutan hanyalah skema adveksi. Untuk mendapatkan hasil model yang lebih baik, maka perlu dilakukan juga simulasi dengan memperhitungkan skema adveksi, dispersi, interfase perpindahan masa, reaksi, dan nilai degradasi dari setiap logam sehingga akan didapat model persebaran yang mendekati hasil uji kualitas air di lapangan dan dengan prosentase simpangan yang kecil. Berikut merupakan parameter input HYDRUS-1D yang sudah dipenuhi dan belum dimasukkan dalam input simulasi yang dilakukan dalam kajian ini:

Tabel 4.30 Input parameter HYDRUS-1D optimal

No	Parameter	Di input	Belum	Keterangan
1	<i>Saturated hydraulic conductivity (Ks)</i>	●		Konduktivitas (aliran) air pada tanah dalam kondisi jenuh
2	<i>Residual soil water content (θ_r)</i>	●		Volume air sisa yang terperangkap pada tanah setelah proses pengeluaran air dalam tanah
3	<i>Saturated soil water content (θ_s)</i>	●		Volume air yang dapat ditahan oleh tanah pada kondisi jenuh
4	<i>Parameter α in soil water retention</i>	●		Kebalikan dari nilai indeks udara yang masuk, atau disebut juga tekanan gelembung (<i>bubbling pressure</i>)
5	<i>Parameter n in soil water retention</i>	●		Indeks dari ukuran distribusi pori-pori pada tanah
6	<i>Bulk density</i>	●		Berat dari tanah yang sudah dikeringkan dibagi dengan total volume tanah tersebut
7	<i>Solution</i>	●		Larutan yang mengandung sejumlah polutan atau elemen lain yang menjadi objek penelitian
8	<i>Dispersion</i>		●	Nilai yang mewakili penyebaran zat terlarut pada lingkup daerah yang diperkirakan
9	<i>Frac=1</i>		●	Polutan bereaksi/ tidak sama sekali dengan lingkungan sekitar
10	<i>Thlm = 0</i>		●	Ada/ tidaknya partikel (bakteri, jamur) yang mempengaruhi polutan
11	<i>Kd</i>		●	Koefisien <i>adsorbtion isotherm</i>
12	<i>Nu</i>		●	Koefisien Langmuir
13	<i>Beta</i>		●	Koefisien Freundlinch
14	<i>Henry</i>	●		Konstanta yang menunjukkan kesetimbangan fase cair dan gas dari satu elemen yang sama
15	<i>Sink water</i>		●	Kecepatan bereaksi dalam bentuk air
16	<i>Sink solid</i>		●	Kecepatan bereaksi dalam bentuk padatan
17	<i>Sink gas</i>		●	Kecepatan bereaksi dalam bentuk gas
18	<i>Alpha</i>		●	Kecepatan reaksi absorpsi dalam kondisi tidak setimbang

Sumber : Hasil analisa

Hasil deviasi antara HYDRUS-1D dengan kondisi sebenarnya di lapangan juga sebaiknya dilakukan apabila terdapat ketersediaan data historis terkait konsentrasi logam di daerah kajian. Dengan demikian maka hasil simulasi dari tahun ke tahun yang digambarkan oleh HYDRUS-1D dapat dibandingkan dengan pergerakan polutan di daerah kajian.

Berdasarkan keseluruhan hasil kajian maka dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi HYDRUS-1D, indeks pencemaran dan DRASTIC saling berkaitan. Sebagai contoh perhitungan dapat dilihat pada hasil simulasi HYDRUS-1D pada tahun ke-13 maka didapatkan hasil konsentrasi masing-masing pada node 5 atau sumur DK3 yaitu untuk logam Mn (*concentration* 1) sebesar $0,000025 \text{ mmol/m}^3$, Al (*concentration* 2) sebesar $0,0000075 \text{ mmol/m}^3$, dan konsentrasi Fe (*concentration* 31) $0,000125 \text{ mmol/m}^3$. Apabila ketiganya dikonversikan ke nilai ppm maka akan berubah menjadi:

- Mn : $0,000025 \times 54,94 \times 1000 = 1,3735 \text{ ppm}$
- Al : $0,0000075 \times 26,98 \times 1000 = 0,2023 \text{ ppm}$
- Fe : $0,000125 \times 55,84 \times 1000 = 6,98 \text{ ppm}$

Apabila nilai tersebut dimasukkan sebagai input untuk perhitungan nilai indeks pencemaran sesuai PP No. 82 Tahun 2001 maka hasilnya memenuhi baku mutu, sehingga dianggap sesuai dengan hasil HYDRUS-1D. Kemudian untuk Permenkes No. 492 Tahun 2010 hasilnya menjadi cemar sedang, sehingga hasil HYDRUS-1D dianggap tidak sesuai dengan hasil IP, hal ini dikarenakan nilai konsentrasi Fe yang sangat tinggi pada hasil simulasi dibandingkan hasil analisa air sumurnya. Untuk kesesuaian dengan metode DRASTIC didapatkan nilai kerentanan untuk sumur DK3 lebih rentan dibandingkan sumur yang lainnya, hal ini menunjukkan bahwa nilainya sesuai dengan nilai IP, dimana IP yang sesuai dengan hasil simulasi HYDRUS menunjukkan ketiga hasil analisa ini berkaitan satu sama lain.

Namun demikian perlu dilakukan studi lanjutan terkait pola penyebaran polutan menggunakan Hydrus-1D di lokasi kajian dikarenakan hasil simulasi Hydrus-1D yang dianggap tidak bisa diterima karena keterbatasan kalibrasi pada kajian yang menyebabkan nilai deviasi antara model dan kondisi di lapangan jauh berbeda. Hal ini disebabkan karena minimnya parameter input simulasi seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Sehingga tidak disarankan untuk dijadikan pedoman pengambilan keputusan bagi instansi terkait.

4.12 Rekomendasi

Rekomendasi yang dianjurkan untuk daerah dengan tingkat kerentanan sedang adalah pengaturan atau sosialisasi penggunaan air sumur lebih ditekankan untuk kegiatan

rumah tangga, bukan untuk kebutuhan air minum. Ataupun disarankan untuk melakukan *treatment* terlebih dahulu sebelum air sumur digunakan sebelum digunakan sebagai pemenuhan kebutuhan air minum.

Dari pendekatan-pendekatan yang dijelaskan pada subbab pembahasan diatas rekomendasi yang dianjurkan adalah pembuatan saluran PDAM untuk meminimalisir penggunaan air sumur untuk memenuhi kebutuhan air dalam jangka panjang bagi penduduk yang berada di lokasi terdampak Lumpur Sidoarjo.





Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa metode DRASTIC, Indeks Pencemaran, simulasi transpor polutan skema pengaliran adveksi menggunakan HYDRUS-1D, dan perhitungan analisa risiko kesehatan di lokasi Lumpur Sidoarjo dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan perhitungan DRASTIC Index diperoleh tingkat kerentanan air tanah sedang terhadap polusi di kawasan Lumpur Sidoarjo (skor 105-110). Sesuai dengan tabel nilai tingkat kerentanan DRASTIC Indeks, angka tersebut termasuk dalam kategori sedang.
2. Hasil uji kualitas air sumur warga yang berada pada perimeter 1,5 kilometer dari tanggul Lumpur Sidoarjo yang dihitung menggunakan Indeks Pencemaran menunjukkan dua kesimpulan, yaitu memenuhi baku mutu dan cemar sedang. Perhitungan didasarkan pada baku mutu PP No. 82 Tahun 2001 Kelas 1 dan Permenkes No. 492 Tahun 2010 untuk kebutuhan air minum. Berdasarkan hasil perhitungan analisa risiko kesehatan kelima sampel yang diambil dari 5 desa yang berada di Kecamatan Tanggulangin dan Kecamatan Jabon, air sumur warga pada kecamatan tersebut memiliki nilai $THQ < 1$. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi air berada pada kondisi tidak merugikan kesehatan.
3. Potensi kerentanan air tanah yang dihitung berdasarkan DRASTIC Indeks memiliki jawaban yang selaras dengan perhitungan mutu air yang menggunakan metode Indeks Pencemaran. Hal ini menunjukkan bahwa hasil uji kualitas air memperkuat hasil uji kerentanan air tanah yang dilakukan di awal penelitian.
4. Pola penyebaran polutan pada daerah terdampak Lumpur Sidoarjo berdasarkan simulasi program Hydrus-1D dengan skema pengaliran adveksi untuk logam C1 atau Mn membutuhkan waktu ± 8 tahun untuk mencapai sumur DK1 yang terletak 1760,6 meter dari pusat semburan Lumpur Sidoarjo menggunakan asumsi

bahwa arah persebaran pollutan kesegala arah memiliki kecepatan yang sama. Hal yang sama juga berlaku untuk logam C2 atau Al dan logam C3 atau Fe. Hasil uji kualitas air juga menunjukkan bahwa konsentrasi air sumur jauh lebih kecil daripada konsentrasi hasil simulasi Hydrus-1D dengan panjang simulasi 20 tahun. Hal ini bisa terjadi dikarenakan beberapa faktor, diantaranya yaitu jenis tanah yang ada di zona vados, proses pengenceran air hujan, pengambilan sampel air yang dilakukan pada bulan basah, serta minimnya input untuk simulasi skema pengaliran adveksi menggunakan program Hydrus-1D.

5.2 Saran

1. Skema pengaliran adveksi-dispersi atau dua dimensi dapat digunakan pada penelitian selanjutnya dengan tujuan untuk mengetahui transpor polutan yang mengacu pada sumbu-y.
2. Dianjurkan untuk menggunakan lebih banyak data primer DRASTIC sehingga didapatkan data lapangan yang lebih sesuai dengan kondisi di lapangan.
3. Dianjurkan untuk memperbanyak jumlah pengambilan sampel air dari satu titik, sehingga hasil pengujian untuk Indeks Pencemaran dan analisa risikonya akan lebih representatif.
4. Program Hydrus-1D disarankan untuk penggunaan skema pengaliran adveksi-dispersi. Parameter-parameter input Hydrus-1D seperti α , β , juga sebaiknya menggunakan hasil laboratorium karena akan menambah keakuratan hasil simulasi. Reaksi yang terjadi antar elemen juga diperhitungkan untuk hasil akhir yang lebih mendekati kondisi di lapangan.
5. Penggunaan Hydrus 2D dan 3D disarankan untuk pembacaan lebih akurat terkait skema pengaliran adveksi.
6. Data input penetrasi Lumpur Sidoarjo sebaiknya digunakan untuk simulasi selanjutnya karena akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap hasil akhir simulasi Hydrus-1D.
7. Metode dan data yang ada dalam tesis ini dapat digunakan sebagai referensi atau bahan evaluasi bagi instansi terkait dalam upaya untuk menjaga kualitas air tanah, sehingga dapat mencegah terjadinya polusi air tanah yang lebih parah.

DAFTAR PUSTAKA

- Adane, Z.A., Nasta, P., Zlotnik, V., Wedin, D., 2018. Impact of grassland conversion to forest on groundwater recharge in the Nebraska sand hills. *Journal of Hydrology: Regional studies* 15, 171-183, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.01.001>
- Aghilli, S., Vaezihir, A., Hosseinzadeh., 2018. Distribution and Modelling Of Heavy Metal Pollution In The Sediment And Water Mediums Of Pakhir River, At The Downstream Of Sungun Mine Tailing Dump, Iran. *Environmental Earth Science*, 77:128, DOI 10.1007/s12665-018-7283-z. Springer-Verlag:Jerman.
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. 1985. *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeological Settings*, EPA.
- Anisa, D.R., 2018. Pemetaan Pola Aliran Dan Indeks Kualitas Air Tanah Di Kecamatan Tanggulangin Kabupaten Sidoarjo Sebagai Dampak Keberadaan Lumpur Sidoarjo. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Anlauf, R., Schaefer, J., Kajitvichyanukul., 2018. Coupling HYDRUS-1D with ArcGIS to Estimate Pesticide Accumulation and Leaching Risk On a Regional Basis. *Journal of Environmental Management* 217, 980-990, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.099>.
- Antonino, P., Gioacchino, C., Rocco, F., 2015. Groundwater Nitrate Risk Assessment Using Intrinsic Vulnerability Methods: A Comparative Study of Environmental Impact by Intensive Farming in Mediterranean Region of Silicy, Italy. *j. Geochem. Explor.* 156, 89-100, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.05.002>.
- Antonov, D., Nakamura, K., Kotsev, T., Stoyanova, V., Kretschmar, R., 2018. Application of hydrus-1D for evaluation of the vadose zone saturation state in connection with arsenic mobilization and transport in contaminated river floodplain-ogosta valley case study, NW Bulgaria. *Section Hydrogeology, Engineering Geology and Geotechnics*, <http://doi.org/10.5593/sgem2018/1.2>.
- Aydi, A., 2018. Evaluation of Groundwater Vulnerability to Pollution Using A GIS-Based Multi-Criteria Decision Analysis. *Groundwater for Sustainable Development*. 7, 204-211, <http://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.06.003>.

- Bisri, Mohammad. 1988. *Aliran Air Tanah (Edisi Pertama)*. Malang: Himpunan Mahasiswa Pengairan kerjasama dengan Bagian Penerbitan Jurusan Pengairan Fakultas Teknik Unibraw Malang.
- Bourazanis, G., Psychogiou, M., Nikolau, N., 2017. Chloride Transport Parameters Prediction for A Clay-Loam Soil Coloumn. *Bull Environ Contam Toxicol*. 98, 378-384, DOI 10.1007/s00128-016-1867-7. Springer: Science New York
- Carsel, R.F., & R.S. Parrish. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristic. *Water resour. Res.* 24:755-769
- Farahani, M., Behbahaninia, A., 2014. Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Adsorption On Tehran Oil Refinery Contaminated Soil and Its Modelling. *International journal of biosciences* 5 no. 6, 34-40 2014. ISSN: 2220-6655.
- Fitrianto, A., 2012. Shrimp Farmers' Innovation in Coping with The Disaster (A Case Study in Sidoarjo Mud Volcano Disaster Toward Shrimp Farmers' Responses). *Economics and Finance*. 4, 168-176, DOI: 10.1016/S2212-5671(12)00332-2.
- Fjeld, R.A., Eisenberg, N.A., Compton, K.L., 2007. *Quantitative Environmental Risk Analysis for Human Health*. Wiley-Interscience.
- Gergen, Iosif., Harmanescu, M., 2012. Application of Principal Component Analysis in The Pollution Assessment with Heavy Metals of Vegetable Food Chain in The Old Mining Areas. *Chemistry Central Journal*. 6, 156.
- Giri, S., Singh, A.K., 2015. Human health risk assessment via drinking water pathway due to metal contamination in the groundwater of Subarnarekha River Basin, India. *Environ Monit Assess*. 187, 63. DOI 10.1007/s10661-015-4265-4.
- Godfrey, P.S., Halcrow, S.W. & Patners Ltd. 1996. *Control of Risk, A Guide to the Systematic Management of Risk from Construction*. Westminster London: Contruction Industry Reseach and Information Association (CIRIA).
- Guntur, G., Yanuar, A.T., Sari, S.H.J., Kurniawan, A., 2017. Analisis Kualitas Perairan Berdasarkan Metode Indeks Pencemaran di Pesisir Timur Kota Surabaya. *Depik* Vol. 6, Number 1, Page 81-89, DOI: 10.13170/depik.6.1.5709.
- Hadi, S., 2006. Penilaian Kerentanan Air tanah Tak Tertekan Terhadap Pencemaran Di Daerah Bandung Dan Sekitarnya Dengan Metode DRASTIC. *Buletin Geologi Tata Lingkungan* Vol 16 No. 2, Bandung.

- Harvey, J.K. (2008.) Pollution Sources: Point and Nonpoint. www.epa.gov
<https://en.wikipedia.org>, diakses (17 November 2018)
https://sfu.ca/personal/dallen/Visualization/DRASTIC/drastring_page.html, diakses (17 November 2018)
- Juniawan, A., Rumhayati, B., Ismuyanto, B., 2013. Karakteristik Lumpur Lapindo dan Fluktuasi Logam Berat Pb dan Cu Pada Sungai Porong dan Aloo. *Jurnal Sains dan Terapan Kimia*, Vol.7 No. 1, 50-59
- Kanzari, S., Nouna, B.B., Mariem, S.B., Rezig, M., 2018. Hydrus-1d Model Calibration and Validation in Various Field Conditions for Simulating Water Flow and Salts Transport in A Semi-Arid Region of Tunisia. *Sustainable Environment Research* 28, 350-356, <http://dx.doi.org/10.1016/j.serj.2018.10.001>.
- Kazakis, N., Voudouris, K., 2015. Groundwater Vulnerability and Pollution Risk Assessment of Porous Aquifers to Nitrate: Modifying The DRASTIC Method Using Quantitative Parameters. *Journal of Hydrology*. 525, 13-15, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.035>.
- Kihumba, A.M., Vanclooster, M., Longo, J.N., 2017. Assessing Groundwater Vulnerability in The Kinshasha Region, DR Congo, Using A Calibrated DRASTIC Model. *Journal of African Earth Sciences*. 126, 13-22, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.11.025>.
- Khosravi, K., Sartaj, M., Tsai, F.T.C., Singh, V.P., Kazakis, N., Melesse, A.M., Prakash, I., Bui, D.T., Pham, B.T., 2018. A Comparison Study of DRASTIC Method With Various Objective Methods for Groundwater Vulnerability Assessment. *Science of The Total Environment*. 642, 1032-1049, <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.130>.
- Kumar, M., Ramanathan, A.L., Tripathi, R., Farswan, S., Kumar, D., Bhattacharya, B., 2017. A Study of Trace Element Contamination Using Multivariate Statistical Techniques and Health Risk Assessment in Groundwater of Chhaprola Industrial Area, Gautam Buddha Nagar, Uttar Pradesh, India. *Chemosphere*. 166, 135-145, <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.086>.
- Liu, X., Sun, S., Peng, J., & Simunek, J., 2013. Evaluation of Historical Nitrate Sources in Groundwater and Impact of Current Irrigation Practices On Groundwater Quality.

- Hydrological Science Journal. 58:1, 198-212, DOI: 10.1080/02626667.2012.745937
- Masipan, T., Chotpantarat, S., Boonkaewwan, S., 2016. Experimental and Modelling Investigations of Tracer Transport in Variably Saturated Agricultural Soil of Thailand: Coloumn Study. Sustainable environment Research 26, 97-101, <http://dx.doi.org/10.1016/j.serj.2016.04.005>.
- Mfonka, Z., Ngoupayou, J.R.N., Ndjigui, P.D., Kpoumie, A., Zammouri, M., Ngouh, A.N., Mouncherou, O.F., Rakotondrabe, F., Rasolomanana, E.H., 2018. A GIS-Based DRASTIC and GOD Models for Assessing Alterites Aquifer of Three Experimental Watersheds in Fouban (Western-Cameroon). Groundwater for Sustainable Development. 7, 250-26, <http://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.06.006>.
- Mualem, Y., 1976. A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. Water Resour. Res. 12, 513-522, <http://dx.doi.org/10.1029/WR012i003p00513>.
- Muhammad, S., Shah, M.T., Khan, S., 2011. Health Risk Assessment of Heavy Metals and Their Source Apportionment in Drinking Water of Kohistan Region Northern Pakistan. Microchem. J. 98, 334-343.
- Nazeer, S., Hashmi, M.Z., Malik, R.N., 2014. Heavy Metals Distribution, Risk Assessment And Water Quality Characterization by Water Quality Index of The River Soan, Pakistan. Ecological indicators 43, 262-270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.03.010>.
- Pal, S., Mukherjee, S., Ghosh, S., 2014. Application of Hydrus-1D Model for Assessment of Phenol-Soil Adsorption Dynamics. Environ Sci Pollut Res. 21, 5249-5261, DOI 10.1007/s11356-013-2467-2. Springer: Verlag Berlin.
- Purwaningsih, E., Notosiswoyo, S., 2013. Hydrochemical Study of Groundwater in Sidoarjo Mud Volcano Area, East Java Indonesia. International Symposium On Earth Science and Technology. 234-241, DOI: 10.1016/j.proeps.2013.01.032. CINEST 2012
- Putra, K.A., Norken, I.N., Harmayanti, K.D., 2018. Analisis Risiko Pada Rencana Pemanfaatan Mata Air Metaum di Desa Marga Kabupaten Tabanan. Jurnal Spektran Vol. 6, No. 1 Januari 2018, e-ISSN: 2302-2590.

- Putranto, T.T., Widiarso, D.A., Yuslihanu, F., 2016. Studi Kerentanan Air Tanah Terhadap Kontaminan Menggunakan Metode Drastic di Kota Pekalongan. *Teknik*, 37, 1. P-ISSN 0852-1697.
- Rahman, A., 2008. A GIS Based DRASTIC Model for Assessing Groundwater Vulnerability in Shallow Aquifer in Aligarh, India. *Appl. Geogr.* 28, 32-53
- Rasool, A., Xiao, T., Farooqi, A., Shafeeqe, M., Masood, S., Ali, S., Fahad, S., Nasim, W., 2016. Arsenic and Heavy Metal Contaminations in The Tube Well Water Of Punjab, Pakistan And Risk Assessment: A Case Study. *Ecological Engineering*, 95, 90-100, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoloeng.2016.06.034>
- Ridwan, P., Abdurrohman, M.J., Ghifary, A.P., 2016. Indikasi Aliran Air Bawah Permukaan Ke Lokasi Semburan Lumpur Sidoarjo Berdasarkan Data Penginderaan Jauh Dan Korelasi Geokimia Pada Sistem Vulkanik Kuarter Sekitarnya. *Proceeding Seminar Nasional Kebumihan ke-9*. Universitas Padjajaran.
- Sadeghfam, S., Hassanzadeh, Y., Nadiri, A.A., Zarghami, M., 2016. Localization of Groundwater Vulnerability Assessment Using Catastrophe Theory. *Water Resour. Manag.* 30, 4585-4601
- Shah, M.T., Begum, S., Khan, S., Thariq, S., 2012. Health Risk Assessment Via Surface Water and Sub-Surface Water Consumption in The Mafic and Ultramafic Terrain, Mohammed Agency, northern Pakistan. *J. Geochem. Explor.* 118, 60-67.
- Shang, F., Ren, S., Yang, P., Li, C., Xue, Y., Huang, L., 2016. Modelling The Risk of the Salt for Polluting Groundwater Irrigation with Recycled Water and Groundwater Using Hydrus-1D. *Water Soil Pollut.* 227-189, DOI 10.1007/s11270-016-2875-2. Springer: Switzerland.
- Sidibe, A.M., Xueyu, L., 2018. Heavy Metals and Nitrate to Validate Groundwater Susceptibility Assessment Based on DRASTIC Models and GIS: Case of The Upper Niger and The Bani Basin in Mali. *Journal of Earth Science*. 147, 199-210, <http://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.06.019>.
- Simunek J., van Genuchten M.T., Sejna M. 2009. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One Dimensional Movement of Water, Heat, And Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Golden. CO: International Ground Water Modelling Center, Colorado School of Mines

- Soeharto, I. 1997. Manajemen Proyek. Jakarta: Erlangga
- Soemarto, C.D. (1995). Hidrologi Teknik. Edisi ke-2. Jakarta: Penerbit Erlangga
- Tangviroon, P., Igarashi, T., 2017. Modelling And Evaluating The Performance Of River Sediment On Immobilizing Arsenic From Hydrothermally Altered Rock In Laboratory Coloumn Experiments With Hydrus-1D. Water Air Soil Pollut, 228-465, <http://doi.org/10.1007/s11270-017-3630-z>. Springer Nature
- Tiwari, A.K., Maio, M.D., Singh, P.K., Mahato, M.K., 2015. Evaluation of Surface Water Quality by Using GIS And Heavy Metal Pollution Index (HPI) Model In A Coal Mining Area, India. Bull Environ Contam Toxicol. 95, 304-310, DOI 10.1007/s00128-015-1558-9. Springer Science: New York.
- US-EPA, 2011. Exposure Factors Handbook. United States Environmental Protection Agency. Washington DC (EPA/600/R-095/052F)
- USEPA (US Environmental Protection Agency), 2004. Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment) Final. EPA/540/R/00/005 OSWER 9285.7-02EP PB99-963312. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, Washington DC.
- Van Genuchten, M.T., 1980. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44(5), 892-898, <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.
- Vaughan, E. J. & Elliott, C. M. 1996. Fundamentals of Risk and Insurance.
- Zhigbi, A., Merzougui, A., Chenini, I., Ergaieg, K., Zouhri, L., Tarhouni, J., 2016. Groundwater Vulnerability Analysis of Tunisian Coastal Aquifer: An Application of DRASTIC Index Method in GIS Environment. Jurnal Internasional. Groundw. Sustain. Dev. 2, 169-181

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Peta Hidrogeologi
Lampiran 2	Peta Geologi
Lampiran 3	Data hujan harian Stasiun Porong tahun 1997-2017
Lampiran 4	Data kualitas air sumur Kabupaten Sidoarjo
Lampiran 5	Data uji XRF sampel lumpur
Lampiran 6	Dokumentasi fot opengambilan sampel air
Lampiran 7	Dokumentasi foto uji geolistrik
Lampiran 8	Dokumentasi foto pengambilan sampel lumpur
Lampiran 9	Rencana Jadwal Pengerjaan Tesis





LAMPIRAN 1
Peta Hidrogeologi

LAMPIRAN 2

Peta Geologi



LAMPIRAN 3

Data Hujan Harian Stasiun Poron



Data hujan harian Stasiun Porong tahun 1997-2017

Tahun	Bulan												Curah hujantahunan
	Januari	Februari	Maret	April	Mei	Juni	Juli	Agustus	September	Oktober	November	Desember	Sta. Porong
1997	199	235	99	202	119	23	0	0	0	0	0	181	1058
1998	327	406	511	275	36	296	130	0	4	0	0	181	2166
1999	402	0	408	369	0	0	0	0	0	0	229	237	1645
2000	376	433	414	133	0	0	0	0	0	454	111	59	1980
2001	281	191	369	140	35	0	0	0	0	55	181	165,5	1417,5
2002	421	187,5	199	116	37	0	0	0	0	0	5	88	1053,5
2003	335	287	209	8,5	267	0	0	0	0	25	376	274	1781,5
2004	271	276	556	57	199	19	14	0	0	0	77	126	1595
2005	469	203	324	223	16	208	31	0	0	32	163	467	2136
2006	235	395	198	167	138	0	0	0	0	0	0	145	1278
2007	64	263	225	98	68	21	74	0	0	10	35	230	1088
2008	241	295	170	53	38	25	74	0	0	7	238	275	1416
2009	246	307	313	75	130	85	0	0	0	0	50	47	1253
2010	469	320	176	387	140	111	59	7	73	196	140	319	2397
2011	105	239	254	255	112	0	0	0	0	4	267	226	1462
2012	370	263	114	93	33	89	0	0	0	0	6	158,5	1126,5
2013	254	290,5	352	104	159	290	53	0	0	0	273	230	2005,5
2014	313	505	315	161	118	98	42	0	0	0	8	347	1907
2015	270	254	294	204	128	7	0	0	0	0	0	274	1431
2016	233	374	293	228	179	145	127	44	75	180	114	290	2282
2017	331	274	204	264	0	1	18	0	9	15	374	298	1788
Total													34266,5



LAMPIRAN 4
Data kualitas air sumur Kabupaten Sidoarjo



LAMPIRAN 5
Data uji XRF sampel lumpur



LAMPIRAN 6

Dokumentasi foto pengambilan sampel air







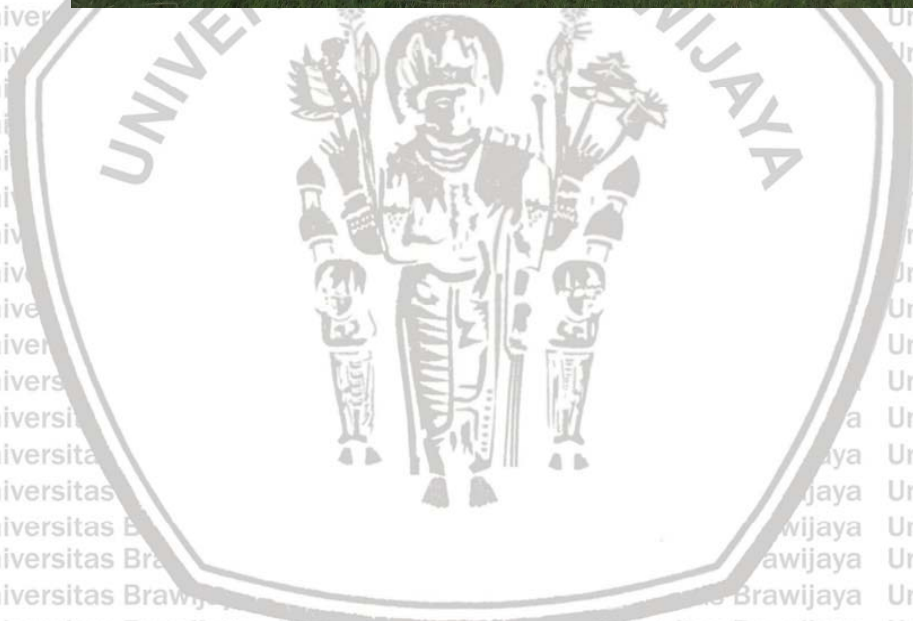


LAMPIRAN 7

Dokumentasi foto uji geolistrik









LAMPIRAN 8

Dokumentasi foto pengambilan sampel lumpur



LAMPIRAN 9

Rencana Jadwal Pengerjaan Tesis

