

1 **Simulasi Pergerakan Kontaminan Besi dan Mangan Pada Air Tanah di TPA Klotok, Kediri, Jawa**
2 **Timur**

3

4 ***Simulation of the Movement of Iron and Manganese Contaminants in Groundwater at Klotok***
5 ***Landfill, Kediri, East Java***

6

7 **Ahmad Masaro Rahman, S.T., Dasapta Erwin Irawan, Dr., Edi Riawan, Dr., dan Rendy Dwi Kartiko,**
8 **Dr. ***

9 Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No. 10, Coblong,
10 Bandung 40132

11

12 *Corresponding Author: dasaptaerwin@itb.ac.id

13

14 **Abstrak:** Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Klotok merupakan satu-satunya TPA di Kota Kediri
15 dan masih beroperasi. TPA tersebut mampu menampung sampah 140 ton/hari. Masalah lingkungan yang
16 berpotensi terjadi adalah pencemaran kualitas air tanah. Dengan penelitian ini diharapkan bisa mengetahui
17 kondisi hidrogeologi, pola aliran air tanah dan simulasi potensi pergerakan kontaminan khususnya besi dan
18 mangan selama 10 tahun ke depan.

19 Simulasi numerik menggunakan *Visual MODFLOW 3.1* berdasarkan data hidrogeologi, meliputi
20 pengukuran muka air tanah, analisis sampel air tanah, survei geologi meliputi pengamatan morfologi dan
21 litologi dari geolistrik dan *coring*, data klimatologi, dan data pendukung lainnya.

22 Hasil penelitian secara kuantitatif berupa model aliran air tanah, dengan unit hidrostratigrafi berupa akuiklud
23 tersusun atas tuff pasiran serta akuitar berupa batuan beku andesit, dengan masing-masing nilai
24 konduktivitas hidrolis 1×10^{-7} m/s dan 1×10^{-11} m/s. Air tanah diujikan di laboratorium dan terdapat parameter
25 yang melampaui baku mutu dari Permenkes RI No 2 tahun 2023 seperti pH, besi, dan mangan.

26 Kontaminan disimulasikan penyebarannya selama 10 tahun yang menghasilkan penyebaran besi arah
27 horizontal sejauh 538,11 m, sedangkan penyebaran mangan 233,48 m, kontaminan mengarah ke timur
28 laut dengan kedalaman 15 m.

29

30 **Abstract:** *Final Disposal Site (TPA) Klotok is the only TPA in Kediri City that is still operating. The TPA can*
31 *accommodate 140 tons of waste per day. Potential environmental problems that could occur are*
32 *groundwater quality pollution. This study is expected to determine the hydrogeological conditions,*
33 *groundwater flow patterns, and simulation of the potential movement of contaminants, especially iron and*
34 *manganese, over the next 10 years.*

35 *Numerical simulation was carried out using Visual MODFLOW 3.1 based on hydrogeological data, including*
36 *groundwater level measurements, groundwater sample analysis, geological surveys including observations*
37 *of morphology and lithology from geoelectrics and coring, climatological data, and other supporting data.*

38 *The quantitative research results were in the form of a groundwater flow model, with a hydrostratigraphic*
39 *unit consisting of an aquifer composed of sandy tuff and an aquitard consisting of andesitic igneous rock,*

40 *with hydraulic conductivity values of 1×10^{-7} m/s and 1×10^{-11} m/s, respectively. Groundwater was tested in*
41 *the laboratory and there were parameters that exceeded the quality standards from the Ministry of Health*
42 *of the Republic of Indonesia Regulation No. 2 of 2023, such as pH, iron, and manganese.*

43 *The spread of contaminants was simulated for 10 years, resulting in the horizontal spread of iron for*
44 *538.11 meters, while the spread of manganese was 233.48 meters. The contaminants are moving*
45 *northeastward at a depth of 15 meters.*

46 **Keywords:**

47 *Groundwater, Contaminant Hydrogeology, Urban Hydrogeology, Iron and Manganese Contamination, Final*
48 *Waste Disposal Site.*

49

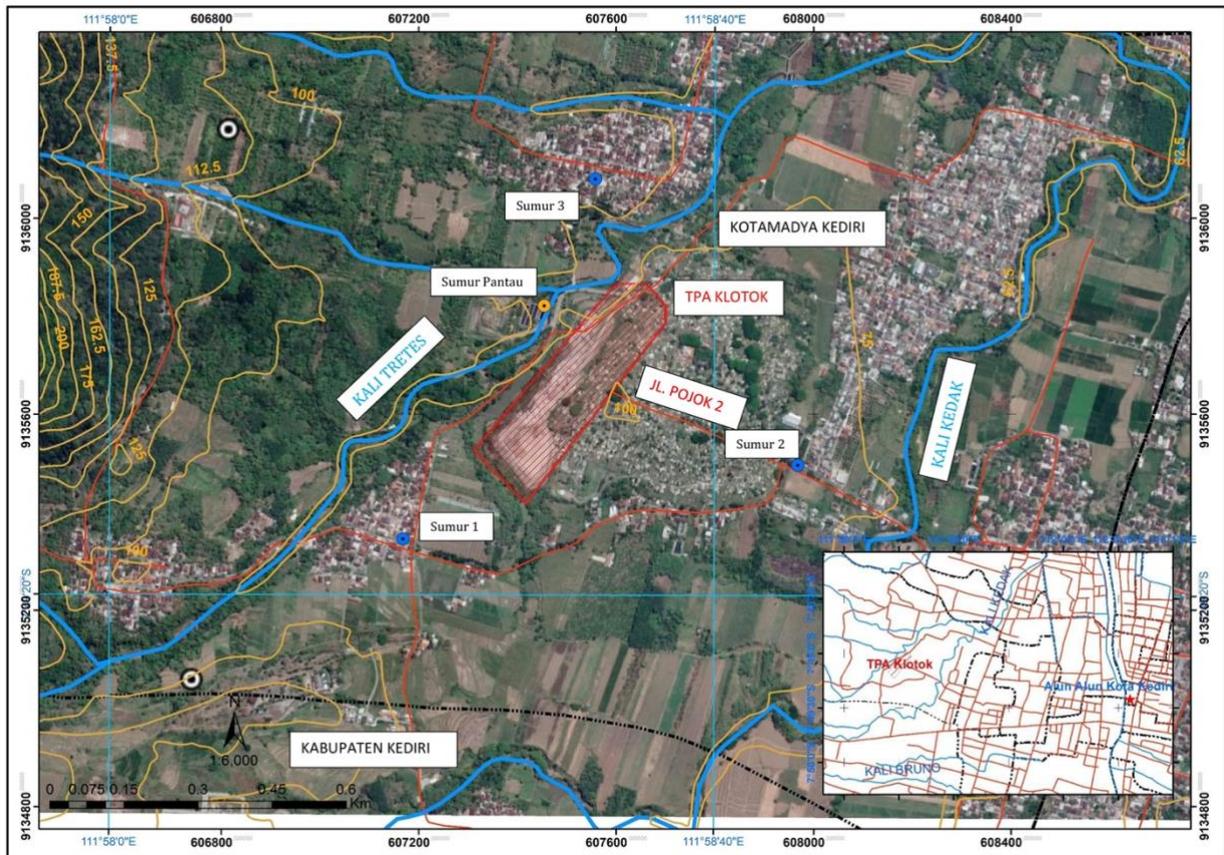
50

51 **1. PENDAHULUAN**

52 **1.1. Latar Belakang**

53
54 TPA Klotok di Kota Kediri, yang menjadi satu-satunya TPA yang masih beroperasi di kota tersebut,
55 memiliki kapasitas penampungan sampah hingga 140 ton per hari. TPA ini sudah mengalami kelebihan
56 beban (*overload*), sehingga dilakukan penimbunan tanah (Rahman, 2023). Situasi ini dapat menyebabkan
57 pencemaran lingkungan, khususnya air tanah. Potensi kontaminasi dari TPA ini menjadi perhatian,
58 mengingat dampaknya yang dapat merusak kualitas air tanah di sekitarnya. Lokasi penelitian dapat dilihat
59 pada Gambar 1.

60



61

62

Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

63

64 **1.2. Tinjauan Pustaka**

65

66 **1.2.1. Geologi dan Hidrogeologi**

67

68 Daerah penelitian termasuk dalam peta geologi lembar Madiun skala 1:100.000, daerah penelitian
69 masuk dalam Morfologi Pawonsewu (Qp) yang tersusun oleh batuan breksi gunungapi berkeping
70 andesit piroksen, tuf aglomerat dan lava andesit piroksen, dan morfologi ini menempati pada bagian
71 timur dari Pegunungan Wilis (Hartono et al., 1992).

72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103

Batuan yang terbentuk tersusun dari piroklastika dan lava andesit piroklastik yang berselang seling. struktur yang terbentuk dipengaruhi aliran laharik, sama dengan pola aliran sungai yang cenderung mengarah ke timur laut (Widiatmoko et al., 2022).

Pelaksanaan survei geolistrik bertujuan sebagai data pembanding untuk membantu visualisasikan kondisi batuan yang terdapat di bawah permukaan, prinsip pelaksanaan survei adalah menginjeksikan arus listrik melalui elektroda arus dan mengukur responnya (tegangan) pada elektroda potensial dalam suatu susunan tertentu. Selanjutnya dari hasil survei pengukuran geolistrik dianalisis secara deskriptif dengan tabel kisaran nilai resistivitas material bumi dalam buku teks (Telford et al., 1990).

Menurut peta produktivitas akuifer yang bersumber dari Pusdatin KESDM, lokasi penelitian memiliki sistem akuifer antar butir dan celahan, dengan produktivitas akuifer bertipe sedang, keterusan rendah hingga sedang, dengan debit < 5 Liter/detik, dengan deskripsi batuan dengan ukuran butir lanau hingga kerikil. Karena keterbatasan data, umumnya nilai-nilai porositas, permeabilitas, dan konduktivitas hidrolik merujuk ke buku teks (Freeze & Cherry, 1979).

Daerah penelitian termasuk ke dalam Peta Cekungan Air Tanah Jawa Timur, tepatnya adalah CAT Brantas, dengan aliran yang mengalir dari barat – timur. Pada CAT ini terdapat sungai utama yaitu Sungai Brantas, sungai ini melintasi salah satunya Kota Kediri, dan bermuara di pantai utara pulau Jawa, tepatnya di daerah Surabaya.

1.2.2. Curah Hujan

Pengetahuan akan curah hujan yang terdapat di lokasi penelitian dapat membantu memahami, menganalisis pembentukan kontaminan yang dapat mencemari air tanah. Hal ini karena air hujan yang melewati tumpukan sampah dan melarutkan zat-zat yang selanjutnya mengalir masuk ke tubuh air tanah. Curah hujan diperoleh dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Stasiun Klimatologi Karangploso Malang, berikut adalah rata-rata curah hujan 10 tahun terakhir (2013 - 2022) dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Rata-rata Curah Hujan Daerah Penelitian Tahun 2013 - 2022 (BMKG, 2023)

Bulan	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Rerata
Jan	510	266	302	344	343	290	312	391	535	291	358.4
Feb	349	222	344	369	256	429	461	261	360	302	335.3
Mar	240	141	370	197	239	347	316	385	591	291	311.7
Apr	278	215	176	256	253	135	283	198	224	316	233.4
Mei	222	90	49	161	48	13	6	379	109	118	119.5
Jun	332	58	21	147	36	2	0	57	152	133	93.8
Jul	134	6	0	72	7	7	0	42	1	21	29
Agu	0	2	3	1	0	0	0	12	0	103	12.1
Sep	0	0	0	161	10	6	0	9	99	18	30.3
Okt	81	0	12	136	2	0	0	60	2	307	60
Nov	301	220	154	302	225	67	23	220	271	584	236.7
Des	335	290	275	245	558	113	270	344	193	218	284.1

1.2.3. Fenomena Transportasi Massa, Kontaminasi, dan Pemodelannya

Salah satu mekanisme kontaminasi adalah berasal dari aktivitas manusia (antropogenik) (Notodarmojo, 2024). Daerah penelitian merupakan kontaminasi yang berasal dari tempat atau kegiatan yang dirancang untuk mengolah atau membuang zat atau substansi, contohnya adalah tempat pembuangan akhir.

Proses kontaminasi di bawah permukaan berada dalam kondisi dinamis, berinteraksi dengan tanah dan batuan sampai terjadi keseimbangan. Dalam upaya memahami proses transport massa air dan kontaminan ada beberapa fenomena yang terjadi, yaitu: adveksi, difusi, dispersi hidrolis, dan retardasi (Putranto & Kuswoyo, 2008).

Pemodelan numerik menggunakan aplikasi Visual Modflow mempunyai sistem kerja dengan model perhitungan numerik berdasarkan metode perbedaan hingga (*Finite Difference*), dengan menetapkan nilai parameter hidrogeologi menjadi titik dalam suatu domain. *Finite Difference* merupakan penjabaran dari persamaan Laplace dengan didasari konsep blok tiga dimensi (Anderson et al., 2022). Secara sederhana komponen yang diamati pada konsep air tanah yaitu adanya perbedaan *head hydraulic* yang digunakan untuk mencari arah dan kecepatan aliran berdasarkan Hukum Darcy.

1.3. Tujuan Penelitian

128 Penelitian ini mempunyai tujuan utama untuk memahami dan mengidentifikasi arah aliran air tanah di
 129 daerah sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Klotok Kota Kediri. Tujuan ini penting karena
 130 pemahaman yang mendalam tentang arah aliran air bisa membantu dalam memahami bagaimana dan
 131 ke mana kontaminan bergerak di bawah permukaan tanah. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk
 132 memahami dan memetakan pola pergerakan kontaminan di daerah yang sama, yang dapat memberikan
 133 gambaran tentang area mana yang paling berisiko terkontaminasi. Akhirnya, penelitian ini bertujuan untuk
 134 memperkirakan laju pergerakan kontaminan pada air tanah untuk sepuluh tahun ke depan. Hal ini dapat
 135 memberikan informasi penting kepada pihak berwenang dan masyarakat tentang potensi dampak jangka
 136 panjang dari kontaminasi ini, sehingga mereka dapat merencanakan dan menerapkan tindakan mitigasi
 137 yang tepat.

138

139

140 2. BAHAN DAN METODE

141

142 Untuk melaksanakan penelitian ini, kami menggunakan berbagai bahan dan alat yang penting. Tujuan
 143 utamanya adalah untuk mengumpulkan data yang relevan, kemudian memprosesnya, dan akhirnya
 144 menganalisis hasilnya untuk mencapai kesimpulan yang valid dan dapat diandalkan. Detail lebih lanjut
 145 tentang bahan dan alat yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.

146

147

Tabel 2. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini

148

Peralatan	Kegunaan
Mesin bor <i>coring</i>	Mengamati sampel batuan yang ada di lokasi penelitian. Spesifikasi: <ul style="list-style-type: none"> • Kedalaman Pengeboran: hingga 10 meter • Head Auger: 10, 20, 30, 50 cm • Sistem connecting: pin/drat • Motor Penggerak: Motor bensin 9 HP • Rasio Gearbox: 1:30.
Geolistrik	Memberikan gambaran lintasan batuan penyusun daerah penelitian dari pembacaan perbedaan nilai resistivitas. Spesifikasi dari alat geolistrik (resistivity) jenis MAE X612EM: <ul style="list-style-type: none"> - Jumlah elektroda: 48 - Catu daya: Baterai 12V eksternal, disarankan > 100 Ah - Konsumsi daya rata-rata: 2,5A, puncak 50A - Kondisi pengoperasian lingkungan: -20/90 ° C - Resolusi: 24 bit - Tampilan: LCD layar sentuh terintegrasi 12.2" - Sistem operasi: Windows 10

	<ul style="list-style-type: none"> - Port: LAN, USB - Perekaman data: SSD internal, drive pena eksternal USB - Format data: TSV, CSV, DAT - Dimensi: 51 x 39 x 23 cm. Berat: 12 Kg
Jerigen 3 Liter	Mengambil sampel air sumur di daerah lokasi penelitian.
GPS	<p>Mengetahui koordinat lokasi masing-masing saat pengambilan sampel.</p> <p>Spesifikasi Garmin eTrex 10:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dimensi: 128,5 x 88 x 20,4 mm - Berat: 215 gr - Bahan casing: Plastik - Ukuran layar: 2,2" - Tipe layar: Monokrom, disempurnakan untuk kemudahan baca dalam kondisi pencahayaan apapun - Sistem operasi: Windows CE 6.0 - Memori: Built-in MLC flash, 8GB flash, 256MB RAM - Slot MMC/MicroSD: Mendukung SDHC - Baterai: Dua baterai AA, bisa bertahan selama 25 jam
Kamera	Dokumentasi dari setiap kegiatan yang dilakukan.
Meteran	Melakukan pengukuran panjang lintasan geolistrik, pengukuran ketinggian muka air tanah, pengukuran ketebalan lapisan batuan hasil <i>coring</i> .
Buku lapangan dan bolpen tinta permanen	Mencatat seluruh hasil temuan di lapangan

149

150

151 Penelitian ini menggunakan berbagai data, baik dari pengambilan langsung di lapangan maupun
152 referensi dari data sekunder. Pengumpulan data dilakukan pada periode Oktober 2022 hingga November
153 2023. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 2. Selain itu, informasi mengenai data dan jenis
154 data dapat dilihat pada Tabel 3.

155



156
157
158
159
160
161

Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Tabel 3. Tabulasi Data dan Sumber Data

No	Data	Jenis Data	Sumber
1	Data geolistrik 1 dan 2 dimensi	Primer	Pengujian langsung di lapangan 1 Dimensi = 8 titik 2 Dimensi = 20 lintasan
2	Data Pengeboran (Coring)	Primer	Pengukuran langsung di lapangan dengan jumlah 16 titik.
3	Data Tinggi Muka Air Tanah	Primer	Pengukuran langsung di lapangan dengan jumlah 3 titik sumur.
4	Data Kualitas Air Tanah	Primer	Pengukuran langsung di lapangan dan Pengujian Laboratorium Dinas Kesehatan, dengan jumlah 3 titik sumur.
5	Data Air Lindi Yang Terbentuk	Primer	Pengukuran langsung di lapangan yang mewakili musim hujan dan musim kemarau.
6	Data Klimatologi	Sekunder	Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Stasiun Klimatologi Karangploso Malang.
7	Peta Geologi	Sekunder	Peta Geologi Regional Lembar Madiun Skala 1:100.000.
8	Peta Hidrogeologi	Sekunder	Pusat Data Kementerian ESDM
9	Peta Cekungan Air Tanah	Sekunder	Peta Cekungan Air Tanah Provinsi Jawa Timur, Pusat Data Kementerian ESDM.
10	Data Konduktivitas Hidrolik	Sekunder	Rujukan utama: Freeze dan Cheery (1979).

No	Data	Jenis Data	Sumber
11	Perbandingan dengan TPA Lainnya	Sekunder	Berbagai rujukan dari dalam dan luar negeri.

162
163 Pengambilan sampel air tanah dilakukan pada bulan Mei 2023. Sampel air diambil dari sumur warga
164 yang berada di sekitar lokasi penelitian (Gambar 3). Sampel tersebut kemudian dianalisis di laboratorium
165 Dinas Kesehatan Kota Kediri. Hasil analisis sampel air tanah kemudian dianalisis berdasarkan Permenkes
166 RI No 2 Tahun 2023 (Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan Parameter Air untuk Keperluan Higiene
167 dan Sanitasi).

168
169 Pemodelan air tanah dalam penelitian ini dilakukan menggunakan aplikasi Visual ModFlow 3.1,
170 berdasarkan data hidrogeologi yang sudah tersedia. Visual ModFlow merupakan aplikasi yang digunakan
171 untuk simulasi aliran air tanah dan transportasi kontaminan.

172
173 Pada awal proses, data dasar seperti pengukuran level air tanah, analisis sampel air tanah, survei
174 geologi yang melibatkan observasi morfologi dan litologi dari pengeboran geoelektrik dan inti, data
175 klimatologi, dan data pendukung lainnya digunakan untuk menentukan kondisi awal model.

176
177 Setelah itu, model aliran air tanah dibuat dalam bentuk kuantitatif dengan menggambarkan unit
178 hidrostratigrafi yang ada di lapangan beserta nilai properti hidroliknya. Selanjutnya, simulasi kontaminan
179 besi dan mangan dilakukan untuk menentukan jangkauan distribusi selama 10 tahun ke depan.

180
181 **3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

182
183 **3.1 Satuan Batuan Penyusun Daerah Penelitian**

184
185 Pemahaman tentang jenis batuan yang terdapat di daerah penelitian dapat diperoleh melalui
186 serangkaian analisis data. Data yang dianalisis ini meliputi hasil pengeboran, pengukuran geolistrik, dan
187 juga referensi dari penelitian-penelitian yang relevan dengan topik ini. Dengan mempertimbangkan ketiga
188 sumber data tersebut, dapat ditarik kesimpulan deskriptif tentang batuan penyusun di daerah penelitian
189 adalah batuan vulkanik. Secara stratigrafis dari bawah ke atas, batuan penyusun tersebut adalah tuff
190 pasiran, yang kemudian diikuti oleh andesit, dan di atasnya adalah pasir tufan. Setiap lapisan batuan ini
191 memiliki karakteristik dan peranan yang unik dalam struktur geologi daerah penelitian.

192
193 Pasir tufa vulkanik adalah jenis batuan yang ditemukan di area studi. Ditandai dengan asalnya dari
194 aktivitas vulkanik, memiliki tekstur pasir. Porositas, atau ukuran ruang kosong dalam batu di mana air atau
195 cairan lain dapat disimpan, adalah sedang hingga rendah. Ini menyiratkan bahwa batu tersebut tidak
196 menampung banyak cairan, yang mempengaruhi kapasitasnya sebagai reservoir air tanah.

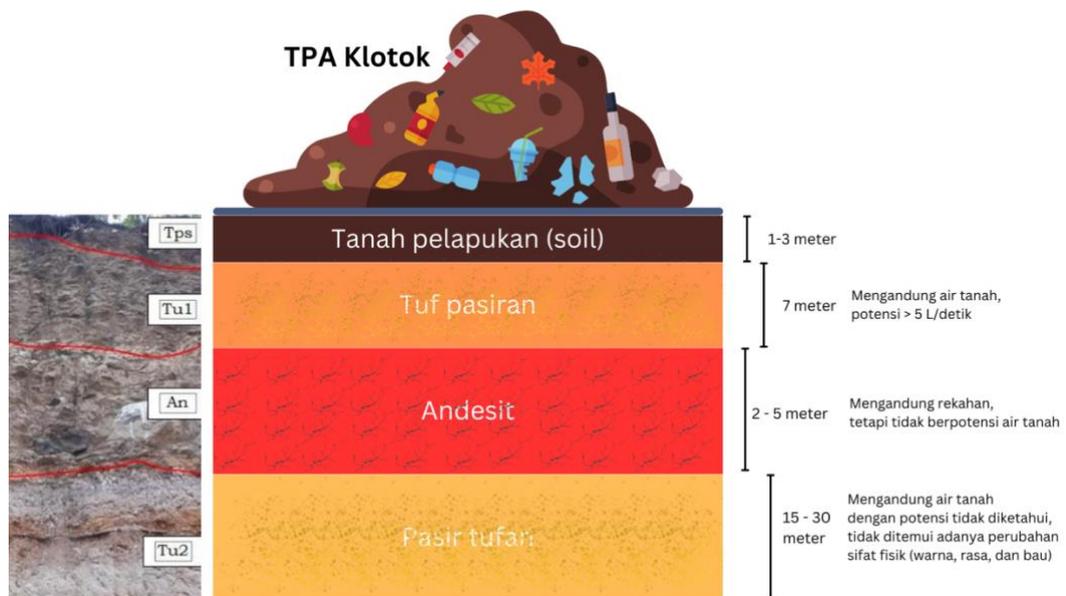
197

198 Lava andesit vulkanik digambarkan sebagai lapisan yang permeabel dengan permeabilitas rendah
199 karena kurangnya retakan dalam batu, yang membatasi aliran fluida melaluinya. Hal ini membuatnya
200 kurang cocok sebagai reservoir air tanah. Permeabilitas rendah lapisan andesit berarti bahwa air dan
201 fluida lain bergerak lambat melalui batu, membuatnya kurang mungkin berkontribusi secara signifikan
202 terhadap aliran air tanah. Selain itu, kurangnya retakan lebih lanjut mengurangi potensi untuk
203 penyimpanan dan pergerakan fluida. Meskipun permeabel, struktur dan karakteristik lapisan andesit
204 membatasi kemampuannya untuk menyimpan dan mengalirkan air tanah secara efisien.

205
206 Lapisan pasir tufaseus, yang berada di permukaan, ditandai dengan porositasnya yang moderat
207 hingga tinggi, membentuk akuifer dangkal yang baik untuk permukiman di sekitarnya. Namun, akuifer ini
208 rentan terhadap kontaminasi dari permukaan tanah.

209
210 Sebagai hasilnya, sangat penting untuk memantau lapisan ini dengan cermat untuk memastikan
211 kualitas air tanah yang disuplainya. Pengujian rutin untuk kontaminan potensial, terutama di daerah dekat
212 sumber potensial kontaminasi seperti tempat pembuangan limbah, sangat penting. Selain itu, langkah-
213 langkah perlindungan seperti pengelolaan limbah yang tepat dan regulasi aktivitas yang mungkin
214 memperkenalkan kontaminan ke lingkungan dapat membantu menjaga kualitas air di akuifer dangkal ini.
215 Penting untuk dicatat bahwa setelah terkontaminasi, membersihkan akuifer ini bisa sulit dan mahal. Jadi,
216 pencegahan adalah kunci untuk menjaga kesehatan dan kesejahteraan komunitas yang mengandalkan
217 akuifer lapisan pasir tuf ini (Widiatmoko et al., 2022).

218
219
220



221
222
223 **Gambar 3.** Diagram skematik kondisi geologi
224

225 3.2 Analisis Data Kualitas Air Tanah

226
 227 Dalam penelitian ini, kami telah melakukan serangkaian pengujian laboratorium untuk menentukan
 228 kualitas air tanah di lokasi penelitian yang telah ditentukan. Hasil pengujian ini, yang diuraikan dalam
 229 Tabel 4 di bawah ini, memberikan gambaran mendalam tentang kondisi air tanah saat ini dan membantu
 230 kita memahami lebih baik tentang kualitas sumber daya air tanah yang penting ini.

231
 232
 233

Tabel 4. Hasil Uji Laboratorium Kualitas Air Tanah

No	Parameter	Baku Mutu (⁴)	Sumur Pantau (¹)	Sumur 1 (²)	Sumur 2 (²)	Sumur 3 (²)
A	Kualitas Air Tanah					
1	TSS (mg/L)	t.d	67,5	t.t	t.t	t.t
2	pH	6.5 – 8.5	6,8 – 6,9	6,43	6,48	6,25
3	Suhu °C (³)	Suhu udara ±		33,1	32,9	32,9
3	Total Dissolve Solid (TDS) mg/L (³)	< 300		176	185	208
4	Besi (Fe) mg/L	0.2	2,285	0,15	0,22	0,24
5	Mangan (Mn) mg/L	0.1	1,25	0,06	0,01	0,18
8	Krom Heksavalen (Cr 6+) mg/L	0.01	< 0,0002	t.t	t.t	t.t
9	Nitrat (NO ₃ -N) mg/L	20	1,112	8,5	1,4	5,9
10	Nitrit (NO ₂ -N) mg/L	3	0,014	0,11	0,1	0,09
11	Kesadahan (CaCO ₃) mg/L	500	200	200	250	240
12	Tembaga (Cu) mg/L	t.d	0,04	t.t	t.t	t.t
13	Seng (Zn) mg/L	15	0,05	t.t	t.t	t.t
14	Timbal (Pb) mg/L	0.05	< 0,05	t.t	t.t	t.t
15	Nikel (Ni) mg/L	t.d	0,12	t.t	t.t	t.t
16	Kobalt (Co) mg/L	t.d	0,05	t.t	t.t	t.t
17	Sianida (Cn) mg/L	0.1	0,019	< 0,01	< 0,01	< 0,01
18	Sulfida (H ₂ S) mg/L	t.d	0,15	t.t	t.t	t.t
19	Fluorida (F) mg/L	t.d	< 0,02	t.t	t.t	t.t

No	Parameter	Baku Mutu (4)	Sumur Pantau (1)	Sumur 1 (2)	Sumur 2 (2)	Sumur 3 (2)
20	Klor Bebas (Cl ₂) mg/L	t.d	< 0,004	t.t	t.t	t.t
21	Amoniak bebas (NH ₃ N) mg/L	t.d	2,5	t.t	t.t	t.t
22	BOD mg/L	t.d	561,5	550	540	530
23	COD mg/L	t.d	1328	1300	1310	1300
24	Detergen mg/L	0,05	0,315	t.t	t.t	t.t
25	Phenol mg/L	t.d	< 0,019	t.t	t.t	t.t
26	Minyak dan Lemak mg/L	t.d	< 1,05	t.t	t.t	t.t
27	Arsen (As) mg/L	0,05	0,0175	t.t	t.t	t.t
28	Selenium (Se) mg/L	0,01	1,713	t.t	t.t	t.t
29	Stano (Sn) mg/L	t.d	1,91	t.t	t.t	t.t
30	Total Coliform	t.d	140.000 / 100 ml			
B	Ketinggian Muka Air Tanah (mdpl)			90,7	86,1	84,4

234

235

236

237

238

239

240

241

242

243

244

245

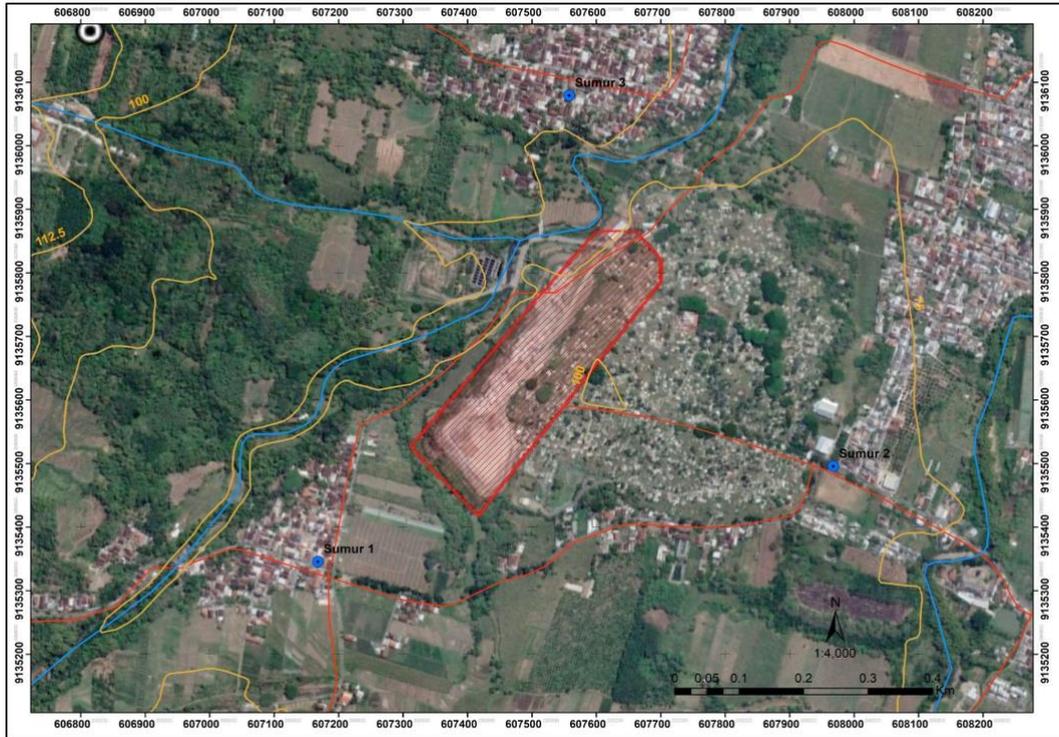
246

247

Keterangan: t.t (tidak terdeteksi), t.d (tidak diatur), t.u (tidak diukur), mdpl (meter di atas permukaan laut).

3.3. Pemodelan Arah Aliran Air Tanah

Pemodelan arah aliran air tanah di lokasi penelitian kita telah divisualisasikan dengan menggunakan koordinat batas X: 607000 - 608000, dan Y: 9135100 - 9136200. Dari hasil interpretasi yang telah dilakukan terhadap kondisi bawah permukaan lokasi penelitian, kita dapat melihat bahwa terdapat empat lapisan batuan yang berbeda. Pertama adalah lapisan tanah dan sampah, yang terletak paling atas. Kemudian, di bawahnya terdapat lapisan tuff pasiran yang berfungsi sebagai akuiklud, atau lapisan batuan yang tidak dapat dilewati oleh air. Selanjutnya, ada lapisan andesit yang berfungsi sebagai akuitar, atau lapisan batuan yang dapat menyimpan dan mengalirkan air. Lapisan terdalam yang kita temui adalah pasir tuff, yang merupakan lapisan batuan terakhir di lokasi penelitian ini.



Gambar 4. Peta Titik Lokasi Pengambilan Sampel Air Tanah

248
 249
 250
 251
 252
 253
 254
 255
 256
 257
 258
 259
 260
 261
 262
 263
 264
 265
 266
 267
 268
 269
 270
 271
 272

Proses validasi data merupakan aspek penting dalam penelitian ini. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil pemodelan dengan kondisi yang berkembang di daerah penelitian. Metode ini memungkinkan kita untuk melihat sejauh mana hasil pemodelan mampu merepresentasikan kondisi sebenarnya di lapangan.

Data hasil pengukuran ketinggian muka air tanah ini digunakan sebagai bagian dari proses validasi ini. Hasil pemodelan kemudian dibandingkan dengan data pengukuran ini. Hasilnya adalah grafik *scatter plot* yang memperlihatkan koefisien korelasi sebesar 26,25% antara dua set data tersebut. Nilai ini, meski tidak sempurna, memberikan beberapa bukti bahwa model yang telah dikembangkan ini memiliki tingkat ketepatan tertentu. Nilai estimasi standar eror untuk model ini adalah 0,677 meter. Ini menunjukkan tingkat variasi yang diharapkan antara hasil pemodelan dan pengukuran sebenarnya.

Dari hasil pemodelan, terdapat beberapa temuan penting. Pertama, lapisan pertama, yang terdiri dari tanah, menunjukkan kondisi yang kering. Tidak ada aliran air tanah yang dapat ditemukan di dalam lapisan ini. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan ini mungkin tidak berperan penting dalam sistem aliran air tanah di daerah penelitian.

Sementara itu, lapisan kedua, yang terdiri dari tuff pasiran, menunjukkan pola yang berbeda. Di lapisan ini, terbentuk pola aliran air tanah yang cukup jelas. Pola ini relatif mengarah dari barat daya ke timur laut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Temuan ini mungkin memiliki implikasi penting untuk memahami sistem aliran air tanah di daerah ini.

273

274 3.4. Pemodelan Aliran Kontaminan Besi

275

276 Hasil dari simulasi yang dilakukan selama dua dekade, yakni sejak tahun 2013, membuktikan bahwa
277 kontaminan berupa besi telah menyebar ke jarak yang cukup jauh, mencapai 538,11 meter dari titik
278 sumbernya. Dalam penelitian ini, terdapat beberapa klasifikasi jarak berdasarkan kandungan kontaminan
279 besi. Untuk kandungan kontaminan yang lebih dari 0,2 mg/L, kontaminan besi ini menyebar hingga jarak
280 454 meter. Kemudian, untuk kandungan kontaminan besi sebesar 0,2 hingga 0,15 mg/L, jarak
281 penyebarannya adalah 80,11 meter. Diikuti dengan penyebaran kontaminan besi dengan kandungan 0,15
282 hingga 0,1 mg/L yang mencapai jarak 32,04 meter. Sementara itu, untuk kandungan kontaminan besi
283 sebesar 0,1 hingga 0,05 mg/L, jarak penyebarannya adalah 31,97 meter. Selain itu, hasil simulasi juga
284 menunjukkan bahwa penyebaran kontaminan secara vertikal selama 20 tahun mencapai kedalaman 15
285 meter, seperti yang terlihat pada Gambar 6.

286

287 3.5. Pemodelan Aliran Kontaminan Mangan

288

289 Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan selama rentang waktu 20 tahun, dimulai dari tahun 2013,
290 ditemukan bahwa kontaminan mangan telah tersebar sejauh 233,48 meter dari titik sumber asal. Dalam
291 penelitian ini, kontaminan tersebut dikelompokkan berdasarkan jarak penyebarannya. Untuk kontaminan
292 dengan kandungan lebih dari 0,1 mg/L, jarak penyebarannya adalah 25,64 meter dari titik sumber.

293

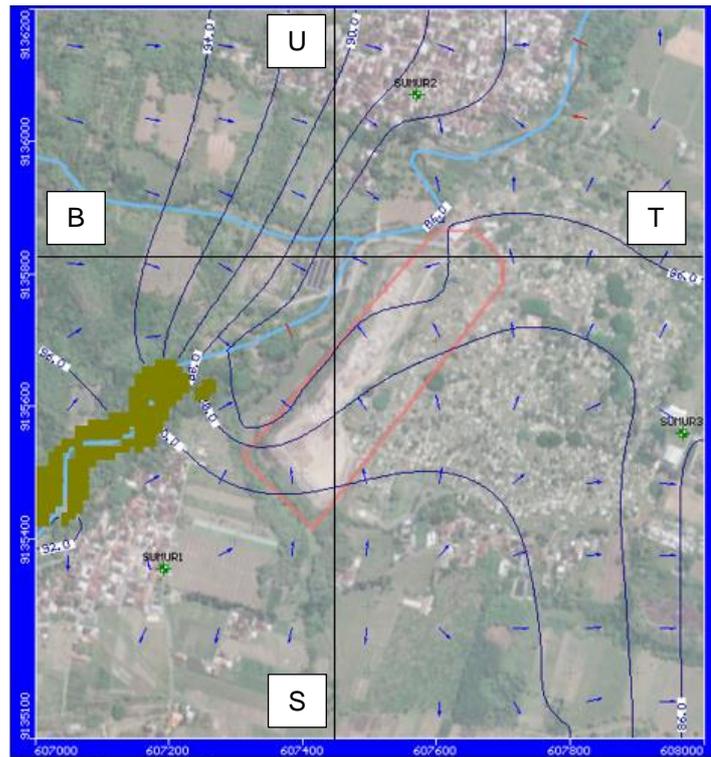
294 Sementara itu, untuk kontaminan mangan dengan kandungan antara 0,1 - 0,05 mg/L, jarak
295 penyebarannya mencapai 42,42 meter. Kemudian, kontaminan mangan dengan kandungan antara 0,05
296 - 0,025 mg/L menyebar sejauh 68,88 meter. Terakhir, kontaminan mangan dengan kandungan antara
297 0,025 - 0,0125 mg/L dapat tersebar hingga jarak 96,54 meter dari titik sumber.

298

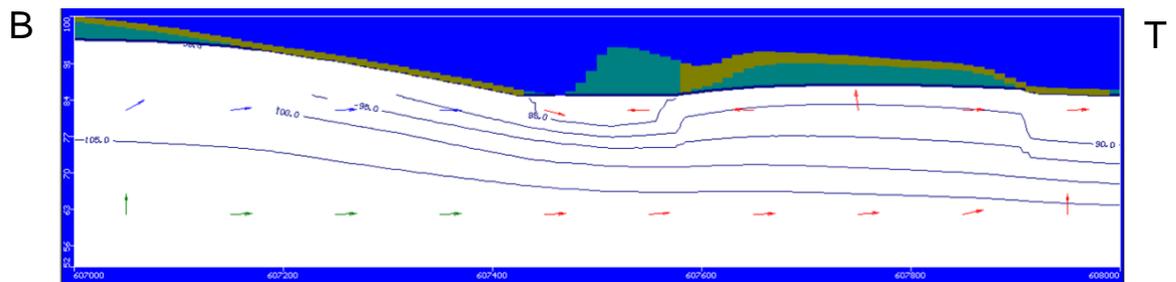
299 Selain itu, hasil simulasi juga menunjukkan bahwa penyebaran kontaminan mangan secara vertikal
300 selama 20 tahun mencapai kedalaman 15 meter. Untuk lebih memahami persebaran kontaminan tersebut,
301 visualisasi persebaran kontaminan telah dibuat untuk hari ke-1, hari ke-365 (setelah 1 tahun), hari ke-
302 3650 (setelah 10 tahun), dan hari ke-7300 (setelah 20 tahun) atau tahun 2033 yang ditunjukkan dalam
303 Gambar 7.

304

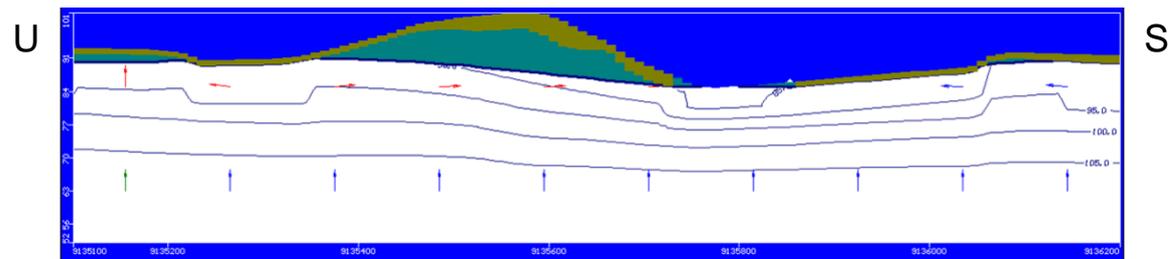
305



306



307



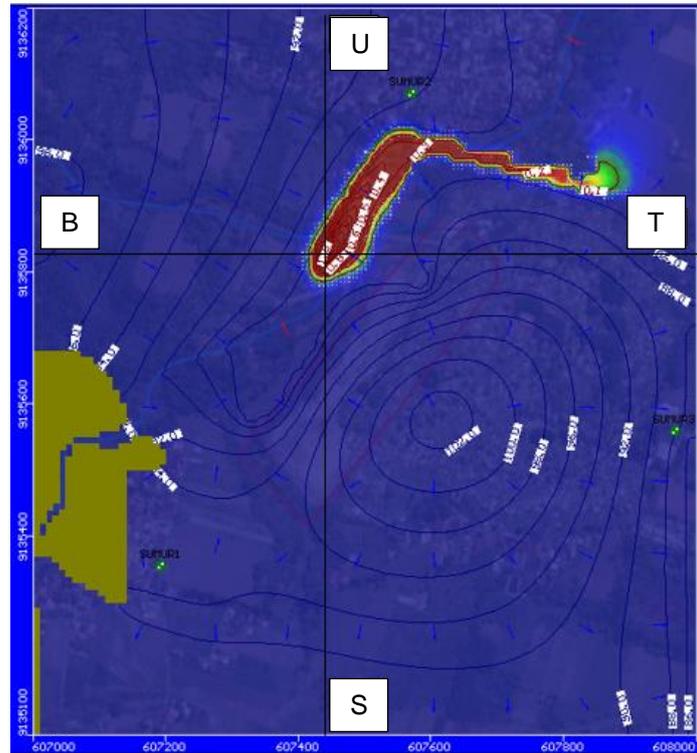
308

309

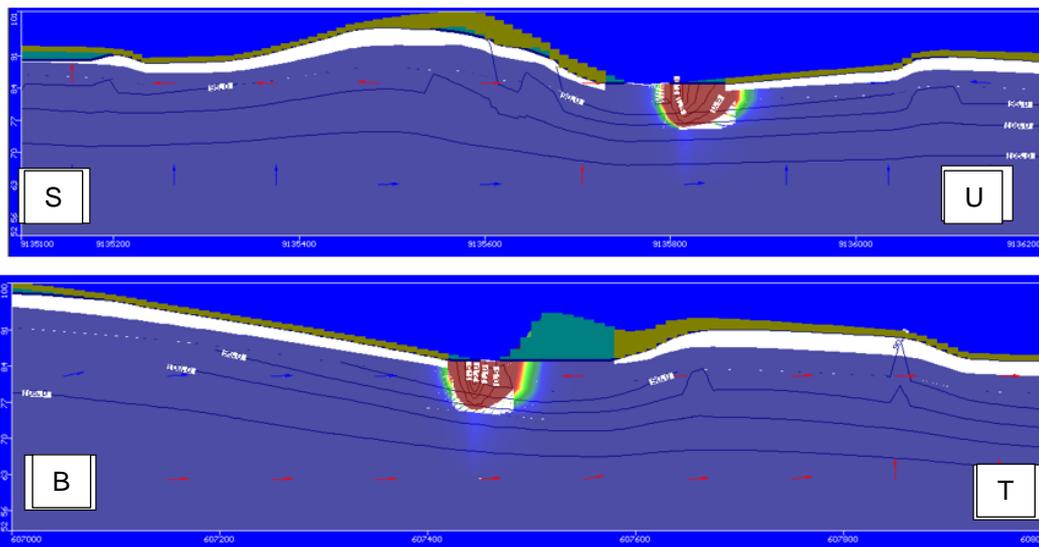
310

Gambar 5. Arah Aliran Air Tanah di Daerah Penelitian

311
312
313



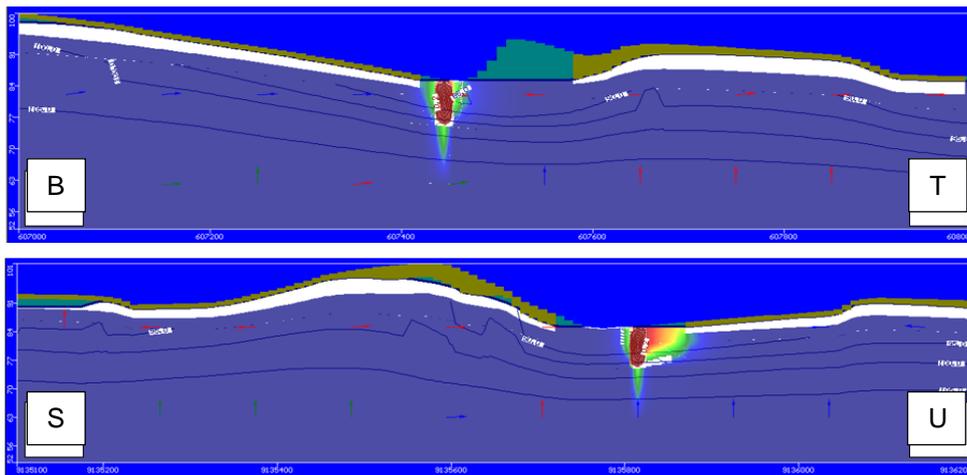
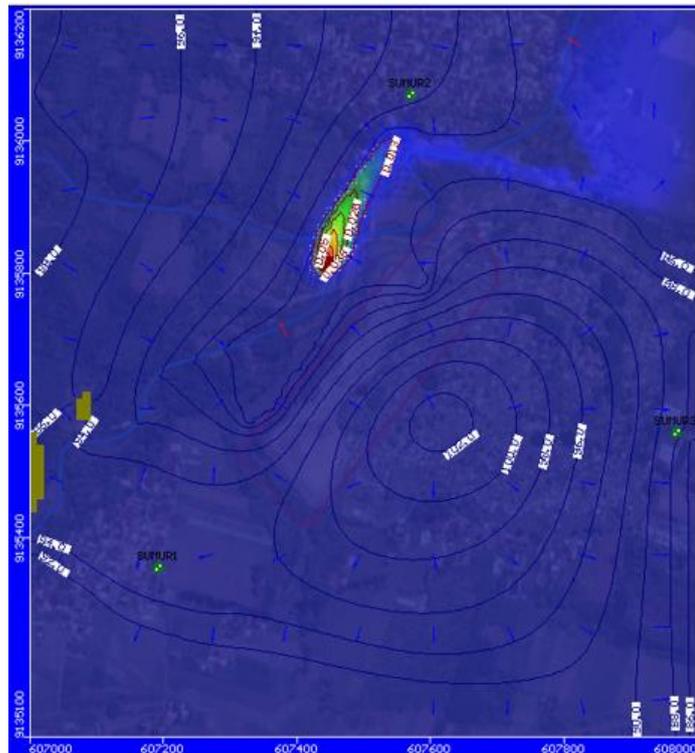
314



315
316
317
318

Gambar 6 Visualisasi Persebaran Kontaminan Besi Hingga Tahun 2033

319



320

321

322

323

324

4. KONTAMINASI BESI DAN MANGAN DI INDONESIA

325

326

327

328

329

330

331

332

Pencemaran besi dan mangan di tempat pembuangan limbah di Indonesia telah menjadi subjek kekhawatiran karena dampak potensialnya terhadap air tanah. Kedua pencemaran tersebut bisa hadir dari sumber alam, seperti tanah dan batu, dan aktivitas manusia, seperti limbah industri (Rusydi et al., 2021). Selain itu, penggunaan bakteri pengoksidasi besi dan mangan untuk menghilangkan kontaminasi kombo besi - mangan - arsen dalam air tanah, menekankan kebutuhan untuk strategi remediasi yang efektif (Katsoyiannis & Zouboulis, 2006).

333 Selanjutnya, evaluasi tren konsentrasi besi dan mangan di air tanah dangkal di Kota Jakarta menyoroti
334 tingkat dan perubahan dalam kontaminan ini sepanjang waktu. Fokus juga diberikan pada perancangan
335 sistem pengurangan besi dan mangan skala kecil untuk air sumur bor, yang menekankan pentingnya
336 implementasi sistem pengobatan guna mengatasi masalah pencemaran (Julieta Parrangan et al., 2023;
337 Siwila et al., 2017).

338
339 Studi-studi ini secara kolektif menekankan pentingnya menangani kontaminasi besi dan mangan di
340 situs pembuangan limbah di Indonesia, terutama dalam menjaga kualitas air tanah dan kesehatan
341 masyarakat. Penelitian menunjukkan pentingnya memahami dan meredam dampak kontaminasi besi dan
342 mangan di tempat pembuangan limbah di Indonesia, terutama dalam menjaga kualitas air tanah dan
343 kesehatan masyarakat. Pengelolaan tempat pembuangan akhir di Indonesia adalah masalah yang
344 memiliki banyak aspek yang membutuhkan pendekatan komprehensif, termasuk adopsi paradigma baru
345 dalam pengelolaan limbah, keterlibatan masyarakat, dan pengembangan peraturan khusus untuk
346 berbagai jenis limbah.

347

348 **5. KESIMPULAN**

349 TPA Klotok terletak di atas tiga lapisan batuan berumur Kuarter, dengan urutan dari yang tertua ke
350 yang termuda: tuf pasir, batuan beku andesit, dan pasir tufan. Lapisan tuf pasir berfungsi sebagai
351 akuifer, yaitu lapisan yang dapat menyimpan dan mengalirkan air tanah, sementara batuan beku andesit
352 berfungsi sebagai akuiklud, yaitu lapisan yang tidak dapat dilewati oleh air tanah. Ternyata, dalam
353 beberapa sumur pantau, kandungan besi dan mangan melebihi baku mutu yang ditentukan. Kandungan
354 besi dalam air dapat mencapai 2,285 mg/l, sedangkan kandungan mangan dapat mencapai 1,25 mg/l.

355 Penelitian menunjukkan bahwa kedua unsur tersebut berasal dari kontaminasi air lindi yang berasal
356 dari TPA Klotok. Selain itu, pola aliran air tanah di daerah ini bergerak dari barat daya ke timur laut.
357 Berdasarkan hasil simulasi, kontaminan besi dapat menyebar sejauh 538,11 m dari sumber dalam kurun
358 waktu 10 tahun. Sementara itu, kontaminan mangan dapat menyebar sejauh 233,48 m dalam kurun waktu
359 yang sama, dengan kedalaman hingga 15 m.

360 **Ucapan Terima Kasih**

361 Tim Penulis mengucapkan terima kasih kepada ITB yang telah memfasilitasi kegiatan ini melalui
362 PPMI 2023. Tim juga mengucapkan terima kasih kepada CV Geotama Multi Resource, Dinas Penanaman
363 Modal dan Pelayanan Terpadu Satu Pintu Kota Kediri, Dinas Lingkungan Hidup Kebersihan dan
364 Pertamanan Kota Kediri, dan Dinas Kesehatan Kota Kediri yang telah memberikan akses data.

365

366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405

Ketersediaan data

Data dapat diunduh pada tautan berikut

<https://drive.google.com/drive/folders/1PTXkRIWbY99OFAP-VG4ALMwJvpQxMJJG?usp=sharing>.

Daftar Pustaka

- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2022). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. Elsevier. https://agualabs.edublogs.org/files/2022/02/Applied-Groundwater-Modeling-Second-Edition-Simulation-of-Flow-and-Advective-Transport-by-Mary-P.-Anderson-William-W.-Woessner-Randall-J.-Hunt-z-lib.org_.pdf
- BMKG. (2023). *Laporan Klimatologi 2020-2023*. Stasiun Klimatologi Karangploso Malang, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall. https://books.google.co.id/books/about/Groundwater.html?id=feVOAAAAMAAJ&redir_esc=y
- Hartono, U., Baharuddin, B., & Brata, K. (1992). *Peta Geologi Regional Lembar Madiun, Jawa 1508-2 Skala 1:100.000* [Map]. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. https://sih3.dpuair.jatimprov.go.id/main/sih3_detail/3424
- Julieta Parrangan, A. M., Wijayanti, Y., Soekotjo, E., & Sasongko, N. A. (2023). Evaluation of Trends for Iron and Manganese Concentrations in Shallow Groundwater, Jakarta City. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1169/1/012019>
- Katsoyiannis, I. A., & Zouboulis, A. I. (2006). Use of Iron- And Manganese-Oxidizing Bacteria for the Combined Removal of Iron, Manganese and Arsenic From Contaminated Groundwater. *Water Quality Research Journal*. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2006.014>
- Notodarmojo, S. (2024). Pencemaran Tanah dan Air Tanah. In *Perpustakaan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat*. <https://pu.go.id/pustaka/biblio/pencemaran-tanah-air-tanah/74K2J>
- Putranto, T. T., & Kuswoyo, B. (2008). Zona Kerentanan Air Tanah Terhadap Kontaminan dengan Metode DRASTIC. *TEKNIK*, 29(2), 110–119. <https://doi.org/10.14710/teknik.v29i2.1937>
- Rahman, H. (2023). Identifikasi Persebaran Air Lindi Di Tpa Klotok Kota Kediri Dengan Menggunakan Metode Resistivitas. Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. <https://repository.its.ac.id/104130/#:~:text=TPA%20Klotok%20II%20Kediri%20merupakan%20TPA%20yang%20sudah,timbunan%20sampah.%20Dilakukan%20Metode%20Resistivitas%20se banyak%205%20lintasan.>
- Rusydi, A. F., Onodera, S. I., Saito, M., Ioka, S., Maria, R., Ridwansyah, I., & Delinom, R. M. (2021). Vulnerability of Groundwater to Iron and Manganese Contamination in the Coastal Alluvial Plain of a Developing Indonesian City. *Sn Applied Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04385-y>
-

406 Siwila, S., Chota, C., Yambani, K., Sampa, D., Siangalichi, A., Ndawa, N., & Tambwe, G. (2017). Design
407 of a Small Scale Iron and Manganese Removal System for Copperbelt University's Borehole
408 Water. *Journal of Environmental Geology*. <https://doi.org/10.4172/2591-7641.1000007>
409 Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
410 https://books.google.co.id/books/about/Applied_Geophysics.html?id=Q8ogAwAAQBAJ&redir_esc=y
411 c=y
412 Widiatmoko, F. R., Fanani, Y., Jone, Y., Talaohu, S., Irwanto, M. A., Suryawan, I. W. K., Sari, M. M., &
413 Putri, R. H. K. (2022). Petrologi dan Estimasi Sumber Daya Batuan Tanah Urug pada Wilayah
414 Eksplorasi di Daerah Tarokan, Kabupaten Kediri, Jawa Timur. *1.*, *7(2)*, 33–44.
415 <https://doi.org/10.33579/krvtk.v7i2.3160>
416
417
