

## Analisis Sebaran Dampak Pemanfaatan Air Limbah Rumah Sakit ke Formasi Tertentu: Pendekatan Spasial dan Hidrogeologis terhadap Kualitas Airtanah

Andi Muhammad Faisal <sup>1\*</sup>, Awaluddin Nurmiyanto <sup>2\*</sup>, Maura Anggit <sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

<sup>3</sup> Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, UPN “Veteran” Yogyakarta, Indonesia

\*Corresponding Email: awaluddin.enviro@gmail.com, faisal.enviro@gmail.com

### ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak pemanfaatan air limbah rumah sakit terhadap kualitas airtanah menggunakan data sekunder dan pemodelan visual Modflow. Model ini digunakan untuk memvisualisasikan penyebaran kontaminan dari effluent Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Rumah Sakit X ke dalam tanah, serta mengukur konsentrasi parameter limbah seperti TSS, COD, minyak dan lemak, BOD, ammonia, residual klorin, dan fecal coliform pada berbagai jarak dari titik sumber. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa semua parameter limbah memenuhi baku mutu yang ditetapkan, dengan penurunan konsentrasi yang signifikan sepanjang jarak penyebaran. Konsentrasi TSS hampir mencapai 0 (0,01 mg/L) pada jarak 115-meter dari titik sumber, sementara konsentrasi COD, minyak dan lemak, dan BOD masing-masing turun menjadi 0,25 mg/L, 0,01 mg/L, dan 0,02 mg/L pada jarak yang sama. Selain itu, konsentrasi amonia dan residual klorin hampir tidak terdeteksi pada jarak 115 meter, sementara fecal coliform juga menunjukkan penurunan hingga 0 MPN/100 mL. Berdasarkan hasil ini, pemanfaatan air limbah rumah sakit dengan sistem IPAL yang baru diperkirakan tidak akan memberikan dampak negatif terhadap kualitas airtanah dalam radius tertentu, karena konsentrasi parameter limbah terus menurun seiring bertambahnya jarak penyebaran.

**Kata Kunci:** Air Limbah Rumah Sakit, Pemanfaatan Air Limbah, Sebaran Dampak, Modflow

### ABSTRACT

*This study aims to analyze the impact of hospital wastewater utilization on groundwater quality using secondary data and Modflow visual modeling. This model is used to visualize the spread of contaminants from the effluent of the Wastewater Treatment Plant (IPAL) of Hospital X into the soil, as well as to measure the concentration of wastewater parameters such as TSS, COD, oils and fats, BOD, ammonia, residual chlorine, and fecal coliform at various distances from the source point. The modeling results show that all wastewater parameters meet the established quality standards, with a significant reduction in concentration along the spread distance. The TSS concentration almost reaches 0 (0.01 mg/L) at a distance of 115 meters from the source, while the concentrations of COD, oils and fats, and BOD decrease to 0.25 mg/L, 0.01 mg/L, and 0.02 mg/L at the same distance, respectively. Additionally, ammonia and residual chlorine concentrations are almost undetectable at 115 meters, while fecal coliform also decreases to 0 MPN/100 mL. Based on these results, the utilization of hospital wastewater with the new IPAL system is expected not to have a negative impact on groundwater quality within a certain radius, as the concentration of wastewater parameters continues to decrease with increasing distance from the source.*

**Keywords:** Hospital Wastewater, Impact Distribution, Modflow, Wastewater Utilization

## 1. Introduction

Penggunaan air bersih di rumah sakit mencakup berbagai aktivitas, seperti rawat inap, operasi, laboratorium, hingga administrasi, yang menghasilkan air limbah dengan kandungan bahan kimia berbahaya, antibiotik, disinfektan, dan mikroorganisme patogen (Verlicchi, 2017; Gafil et al., 2022). Limbah ini seringkali mengandung konsentrasi tinggi zat berbahaya seperti ammonia, total nitrogen, dan padatan tersuspensi, serta bahan organik dengan biodegradabilitas rendah (Pérez-Bou et al., 2024). Jika tidak dikelola dengan baik, air limbah rumah sakit berpotensi mencemari perairan penerima, merubah sifat fisikokimia air seperti pH, zat terlarut total, dan kadar nutrien, yang berdampak pada kesehatan manusia dan ekosistem (Drocelle et al., 2023). Terlebih lagi, peningkatan penggunaan disinfektan dan antibiotik selama pandemi COVID-19 semakin memperburuk kontaminasi dengan bakteri resisten, meningkatkan risiko kesehatan global (Banciu et al., 2024).

Dampak buruk dari pembuangan air limbah rumah sakit yang tidak diolah atau diolah secara tidak memadai mencakup penyebaran penyakit menular, resistensi antibiotik, dan potensi toksisitas yang bisa menyebabkan kanker atau gangguan kesehatan lainnya (Ramírez-Coronel et al., 2023; Khan et al., 2024). Sebagian besar rumah sakit di negara berkembang tidak memiliki fasilitas pengolahan limbah yang memadai, memperburuk masalah pencemaran dan meningkatkan risiko kesehatan masyarakat (Khan et al., 2024). Oleh karena itu, penerapan teknologi pengolahan canggih, seperti proses biologis dan oksidasi lanjutan, sangat dibutuhkan untuk mengurangi dampak negatif air limbah rumah sakit dan mencegah kerusakan lingkungan lebih lanjut (Fatimazahra et al., 2023).

Namun, air limbah rumah sakit yang telah diolah menunjukkan potensi untuk mengatasi masalah kelangkaan air, terutama di wilayah dengan ketersediaan air terbatas, sekaligus mendukung pertanian berkelanjutan. Penelitian menunjukkan bahwa air limbah yang diolah dapat memenuhi standar kualitas air untuk irigasi, dengan parameter seperti pH, BOD, dan COD berada dalam batas yang aman (Pourdara et al., 2004). Meski demikian, kekhawatiran tentang keberadaan patogen dan kontaminan kimia yang tersisa dalam air limbah yang diolah perlu ditangani lebih lanjut, karena dapat membahayakan kesehatan tanah dan tanaman dalam jangka panjang (Gholami-Borujeni et al., 2019).

Pengolahan dan pemanfaatan air limbah rumah sakit yang efektif dapat mengurangi beban pada sumber daya air konvensional, membuka peluang untuk pertanian yang lebih berkelanjutan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penggunaan air limbah yang diolah dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman tanpa mempengaruhi perkembahan biji, meskipun diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami dampaknya terhadap kesuburan tanah dan kualitas tanaman (Gholami-Borujeni et al., 2019). Oleh karena itu, solusi pengelolaan limbah rumah sakit yang efisien dan teknologi pengolahan air limbah yang aman sangat penting dalam mencapai tujuan keberlanjutan sumber daya air.

Untuk menilai dampak jangka panjang penggunaan air limbah rumah sakit yang diolah terhadap sumber daya alam, pemodelan sumber daya airtanah dengan teknologi seperti MODFLOW (*Modular Finite-Difference Flow Model*) menjadi alat yang sangat penting. MODFLOW dapat menganalisis pola aliran airtanah, serta memperkirakan dampak limbah yang diolah terhadap akuifer dan kualitas airtanah (Liu et al., 2019). Studi pemodelan di Jamwa Ramgarh, misalnya, menunjukkan bahwa simulasi menggunakan MODFLOW menghasilkan kecocokan yang sangat baik dengan data lapangan, menunjukkan efektivitas model ini dalam menggambarkan kondisi nyata (Morsy, 2023). Dengan menggunakan MODFLOW, pengelola air dapat merencanakan strategi pengelolaan yang lebih baik untuk menjaga kesehatan akuifer dan merencanakan laju penarikan air yang optimal dalam menghadapi tantangan kekurangan air.

## 2. Metode Penelitian

Metode penelitian ini menggunakan data sekunder hasil uji laboratorium kualitas air limbah dan airtanah dari salah satu rumah sakit yang dipilih sebagai objek studi, dimana analisis data ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak pencemaran airtanah akibat perkolasian air limbah rumah sakit.

## 2.1 Sumber dan Jenis Data

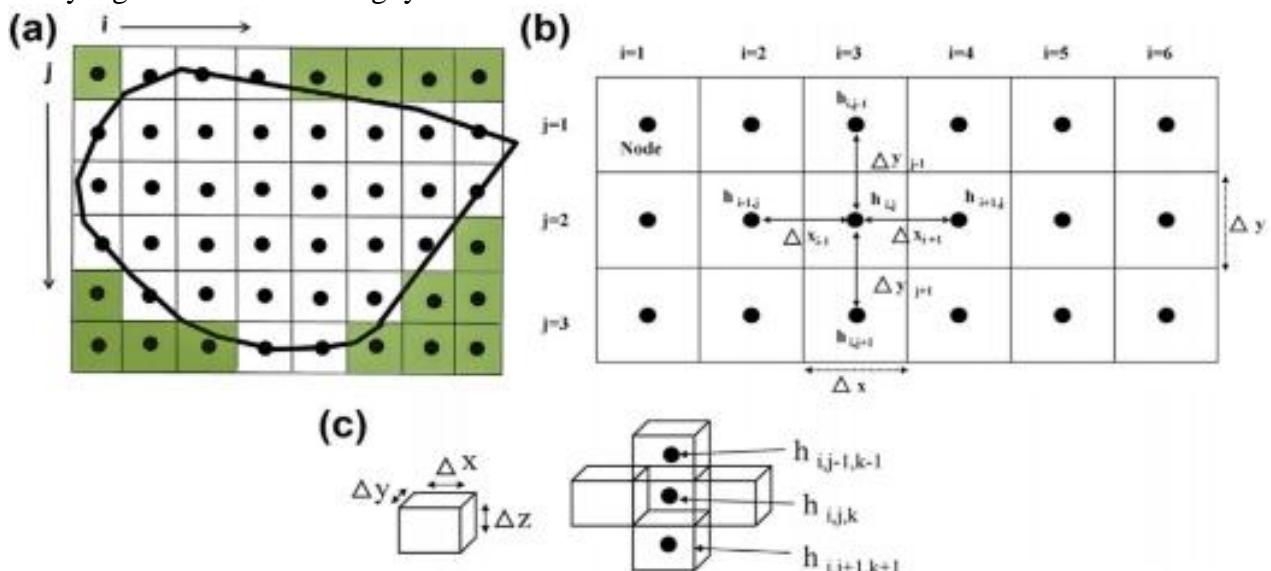
Data yang digunakan adalah data sekunder berupa rencana pengembangan IPAL dan data hasil uji laboratorium berupa kualitas air limbah, kualitas airtanah, dan pengukuran kondisi tanah yang berasal dari salah satu rumah sakit di Kota Bogor.

## 2.2 Analisis dan Kompilasi Data

Data yang telah dikumpulkan dilakukan analisis deskriptif dari berbagai data sekunder termasuk data meteorologis dari Badan Pusat Statistik (BPS). Analisis dan kompilasi data tersebut akan digunakan sebagai input data dalam melakukan pemodelan visual mudflow.

## 2.3 Pemodelan Visual Modflow

Pemodelan Visual MODFLOW menggunakan metode perhitungan *finite difference*, yang melibatkan indeks  $i$ ,  $j$ , dan  $k$  untuk mewakili kolom, baris, dan lapisan dalam ruang 3D (lihat Gambar 1.). Jarak antar node di sepanjang baris diwakili oleh  $\Delta x$ , spasi sepanjang kolom diwakili oleh  $\Delta y$ , dan spasi antar lapisan ditentukan oleh  $\Delta z$ . Pada Gambar 1. (a), yang disajikan dalam bentuk 2D, node berada di tengah sel atau blok finite difference, yang menggambarkan nilai head pada blok tersebut ( $i$  mewakili kolom dan  $j$  mewakili baris). Garis hitam yang melingkari area menunjukkan batas domain masalah, sementara sel di luar batas tersebut adalah sel yang tidak aktif. Gambar 1. (b) menunjukkan kelompok lima node dalam format 2D, dengan node pusat berada di posisi  $(i, j)$ . Gambar 1.(c) menunjukkan model dalam format 3D, di mana  $\Delta z$  mewakili jarak vertikal antar node dan  $k$  adalah indeks vertikal. Pada gambar ini, node pusat  $(i, j, k)$  dipengaruhi oleh nilai dari tujuh node yang berada di sekelilingnya.



**Gambar 1.** Grid dan Notasi *Finite Difference*

(Sumber: Anderson et al, 2015)

Bentuk persamaan *Finite Difference* dituliskan dengan Persamaan 1. Dari persamaan diferensial yang mewakili aliran airtanah 3D untuk kondisi heterogen dan anisotropy (Anderson dkk, 2015):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm W = Ss \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Dimana,

$K_x, K_y, K_z$  = Konduktivitas hidrolik pada arah

$x, y, z (LT^{-1})$  = Tinggi muka airtanah (L)

$W$  = Flux dengan menghitung faktor penambah,  
contoh: pemompaan atau penambahan dari sumber lain ( $L^3T^{-1}$ )

$Ss$  = Specific storage ( $LT^{-1}$ )

$x, y, z$  = Arah koordinat

$t$  = Waktu (T)

Tahapan pemodelan Visual MODFLOW dimulai dengan pembuatan model konseptual hidrogeologi, yang mencakup interpretasi geologi, hidrologi, dan keseimbangan air untuk menggambarkan sistem airtanah dan membantu mengurangi ketidakpastian dalam aliran airtanah serta transportasi kontaminan (Torres, 2020). Model ini memperlihatkan struktur tiga dimensi yang menggambarkan perlapisan litologi daerah penelitian. Kondisi batas model ditentukan berdasarkan kondisi alam, seperti pegunungan, lapisan stratigrafi, dan sungai, yang mempengaruhi infiltrasinya, dengan curah hujan sebagai sumber utama (Xie dkk, 2020). Selama kalibrasi, konduktivitas hidrolik dan recharge airtanah disesuaikan untuk mencocokkan hasil simulasi dengan data lapangan menggunakan metode Root Mean Square Error (RMSE), sehingga model yang tervalidasi dapat digunakan untuk memprediksi pola aliran airtanah dan penyebaran kontaminan (Tahershamsi, 2018). Dalam melakukan pemodelan airtanah, digunakan beberapa asumsi sebagai berikut:

1. Parameter akuifer yang digunakan selama pemodelan bernilai konstan,
2. Kondisi batas (*boundaries*) yang digunakan dalam pemodelan yakni recharge yaitu data curah hujan dan evapotranspirasi,
3. Nilai konduktivitas hidrolik (K) dianggap homogen yaitu K<sub>x</sub> dan K<sub>z</sub> adalah sama,
4. Nilai koefisien dispersi yaitu D<sub>x</sub> dan D<sub>y</sub> diambil dari literatur,
5. Nilai *Specific storage* (S<sub>s</sub>) dan *specific yield* (s<sub>y</sub>) diambil dari literatur,
6. Kondisi airtanah yang digunakan yaitu tidak tertekan dan dalam keadaan tunak (*steady state*),
7. Dimensi arah aliran airtanah secara horizontal lebih dominan daripada arah vertikal,
8. Terdapat tiga lapisan batuan yang digunakan dalam pemodelan yaitu batu pasir tufan, pasir, dan batu andesit,
9. Karena adanya keterbatasan data yang digunakan, untuk memodelkan aliran airtanah beserta plume pencemaran, maka aliran airtanah pada rekahan batuan dianggap sama dengan aliran airtanah pada media berpori.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Curah Hujan

Gambaran umum curah hujan sangat dipengaruhi oleh keadaan iklim, keadaan geografi, dan perputaran/pertemuan arus udara. Dalam angka waktu terakhir terlihat hujan bervariasi. Data curah hujan beragam menurut bulan dan letak stasiun pengamat, umumnya curah hujan yang terjadi cukup tinggi dan sangat dipengaruhi oleh angin musiman. Data curah hujan 10 (sepuluh) tahun terakhir ditampilkan pada Tabel 1. dibawah ini.

**Tabel 1.** Curah Hujan 10 (Sepuluh) Tahun Terakhir

Sumber: Badan Pusat Statistik, 2023

No	Bulan/Tahun	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	Januari	510,0	702,0	250,0	422,0	130,0	190,0	309,0	399,8	304,3	107,0
2	Februari	406,0	366,0	350,8	610,0	526,0	364,0	297,0	525,4	486,8	150,0
3	Maret	290,0	303,0	374,3	644,0	349,0	119,0	260,0	705,3	233,0	113,0
4	April	216,0	504,0	205,7	546,0	284,0	357,0	671,0	478,5	505,1	317,0
5	Mei	399,0	297,0	204,6	330,0	319,0	296,0	358,0	422,5	510,3	229,0
6	Juni	62,0	87,0	90,2	373,0	410,0	260,0	138,0	246,2	311,1	464,0
7	Juli	360,0	349,0	1,6	298,0	401,0	68,0	51,0	186,3	115,6	358,0
8	Agustus	379,0	538,0	112,4	312,0	179,0	77,0	170,0	89,1	399,5	385,0
9	September	385,0	22,0	79,8	439,0	619,0	173,0	152,0	333,7	317,3	354,0
10	Oktober	394,0	180,0	110,6	398,0	331,0	488,0	382,0	583,7	566,5	492,0
11	November	187,0	673,0	854,9	343,0	207,0	383,0	330,0	189,5	183,6	321,0
12	Desember	408,0	209,5	579,7	117,0	181,0	302,0	540,0	149,7	279,1	224,0
<b>Min (1 tahun)</b>		62,0	22,0	1,6	117,0	130,0	68,0	51,0	89,1	115,6	107,0
<b>Max (1 tahun)</b>		510,0	702,0	854,9	644,0	619,0	488,0	671,0	705,3	566,5	492,0
<b>Rata-rata (1 tahun)</b>		333,0	352,5	267,9	402,7	328,0	256,4	304,8	359,1	351,0	292,8

Hari hujan adalah hari dimana terjadi hujan dengan curah hujan minimum 1 mm. Jumlah hari hujan Kota Bogor dihitung setiap bulannya untuk mengetahui berapa curah hujan dalam satuan mm/hari. Berikut merupakan data jumlah hari hujan Kota Bogor yang dilihat dalam 10 (sepuluh) tahun terakhir.

### 3.2 Debit Air Limbah yang Dimanfaatkan

Debit air limbah yang dihasilkan menggunakan pendekatan sekunder terkait jumlah air limbah yang diolah dalam IPAL berdasarkan neraca air pengelolaan air. Debit air limbah yang dimanfaatkan sebesar 80,60 m<sup>3</sup>/hari yang akan dimanfaatkan untuk penyiraman tanaman yang berada di sekitar lokasi penelitian.

### 3.3 Mutu Air Limbah

Mutu air limbah digunakan sebagai kadar maksimum yang akan dimodelkan dalam pemodelan visual Modflow. Mutu air limbah ditetapkan mengacu pada baku mutu yang paling ketat antara Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Lampiran VI Baku Mutu Air Nasional Kelas IV serta Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik yang ditampilkan pada Tabel 2. berikut.

**Tabel 2.** Mutu Air Limbah yang akan Dimanfaatkan

No	Parameter	Satuan	Baku Mutu
<b>A</b>	<b>Parameter Fisika</b>		
1	Residu Tersuspensi (TSS)	mg/L	30**
<b>B</b>	<b>Parameter Kimia</b>		
1	pH	-	6 – 9
2	BOD <sub>5</sub>	mg/L	12*
3	COD	mg/L	80*
4	Amoniak (sebagai N)	mg/L	0,5*
5	Minyak & Lemak	mg/L	5**
6	Residual Klorin***	mg/L	1***
<b>C</b>	<b>Parameter Mikrobiologi</b>		
1	Fecal Coliform	MPN/100 mL	2000*

Ket:

\*) PP No. 22 Tahun 2021 Lampiran VI Baku Mutu Air Nasional

\*\*) Permen LHK No. P.68/2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik

\*\*\*) Parameter Tambahan

### 3.4 Kualitas Airtanah

Data kualitas airtanah akan digunakan sebagai input dalam MODFLOW untuk analisis dan simulasi transportasi polutan dan pergerakan zat terlarut dalam aliran airtanah. Data kualitas airtanah meliputi 2 (dua) titik yaitu *upstream* dan *downstream* pada Tahun 2023 meliputi parameter fisika, kimia, dan mikrobiologi. Baku mutu kualitas airtanah mengacu pada Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan. Adapun hasil uji laboratorium kualitas airtanah dapat dilihat pada Tabel 3. dibawah ini.

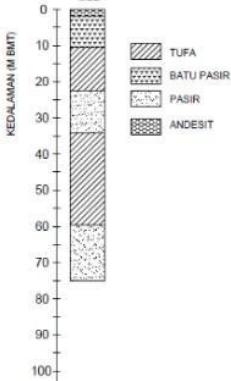
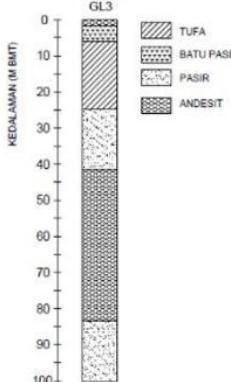
**Tabel 3.** Kualitas Airtanah  
Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2023

No	Parameter	Satuan	Hasil Uji		Baku Mutu
			Upstream	Downstream	
<b>A</b>	<b>Fisika</b>				
1	Suhu	°C	24,0	24,5	Dev 3
2	Residu terlarut (TDS)	mg/L	202	138	< 300
3	Kekeruhan	NTU	1,52	<0,010	< 3
4	Warna	TCU	22,3	19,2	10
5	Bau	-	Tidak Berbau	Tidak Berbau	Tidak Berbau
<b>B</b>	<b>Kimia</b>				
1	pH	-	7,05	7,10	6,5 – 8,5
2	Nitrat (NO <sub>3</sub> -N) terlarut	mg/L	1,26	1,09	20
3	Nitrit (NO <sub>2</sub> -N) terlarut	mg/L	0,048	0,013	3
4	Kromium Heksavalen (Cr <sup>6+</sup> )	mg/L	0,004	< 0,001	0,01
5	Besi (Fe)	mg/L	< 0,001	< 0,001	0,2
6	Mangan (Mn)	mg/L	< 0,001	0,013	0,1
<b>C</b>	<b>Mikrobiologi</b>				
2	Total Coliform	CFU/100 mL	0	0	0
3	E. Coli	CFU/100 mL	0	0	0

### 3.5 Karakteristik Akuifer

Data terkait akuifer bebas tidak dilakukan pengukuran langsung, sehingga dilakukan pendekatan pada penelitian sebelumnya. Berdasarkan penelitian (Pangestu, 2018), akuifer bebas didominasi oleh pasir, Batas atas lapisan tersebut dapat ditemui pada kedalaman kisaran antara 12 – 20 meter bmt. Lapisan ketebalan akuifer berkisar 11,52 – 16,64 meter. Nilai konduktivitas hidrolik pada akuifer bebas bernilai 2,5 m/hari, seperti terlihat pada Table 4.

**Tabel 4.** Litologi Batuan Akuifer Bebas di Wilayah Studi

Titik	Akuifer Bebas (mbmt)			Litologi
	Atas	Bawah	Ketebalan	
1	22,49	34,01	11,52	 <p>GL2</p> <p>KEDALAMAN (M BMT)</p> <p>Legend: Tufa (diagonal lines), Batu Pasir (horizontal lines), Pasir (cross-hatch), Andesit (solid dark grey).</p>
2	24,76	41,4	16,64	 <p>GL3</p> <p>KEDALAMAN (M BMT)</p> <p>Legend: Tufa (diagonal lines), Batu Pasir (horizontal lines), Pasir (cross-hatch), Andesit (solid dark grey).</p>

### 3.6 Arah Aliran Tanah

Pergerakan airtanah dapat diketahui dengan pola garis aliran airtanah. Garis aliran (flownet) adalah suatu garis sepanjang mana butir-butir air akan bergerak dari bagian hulu ke bagian hilir melalui media tanah yang tembus air (permeable). Data koordinat pengukuran muka airtanah pada sumur di wilayah studi dan elevasi permukaan tanah diolah menjadi peta flownet menggunakan software Arcmap 10.8.

**Tabel 5.** Data Hasil Pengukuran Muka Airtanah pada Sumur Warga di Wilayah Studi

No	Sumur	Elevasi (mdpl)	H1 (m)	H2 (m)	$\Delta H$ (m)	MAT (mdpl)
1	S01	225	0,60	31,45	30,85	205
2	S02	229	0,60	38,32	37,72	209
3	S03	219	0,50	24,34	23,84	203
4	S04	216	1,00	24,25	23,25	204
5	S05	232	0,60	42,95	42,35	212
6	S06	228	1,00	35,12	34,12	209

Keterangan:

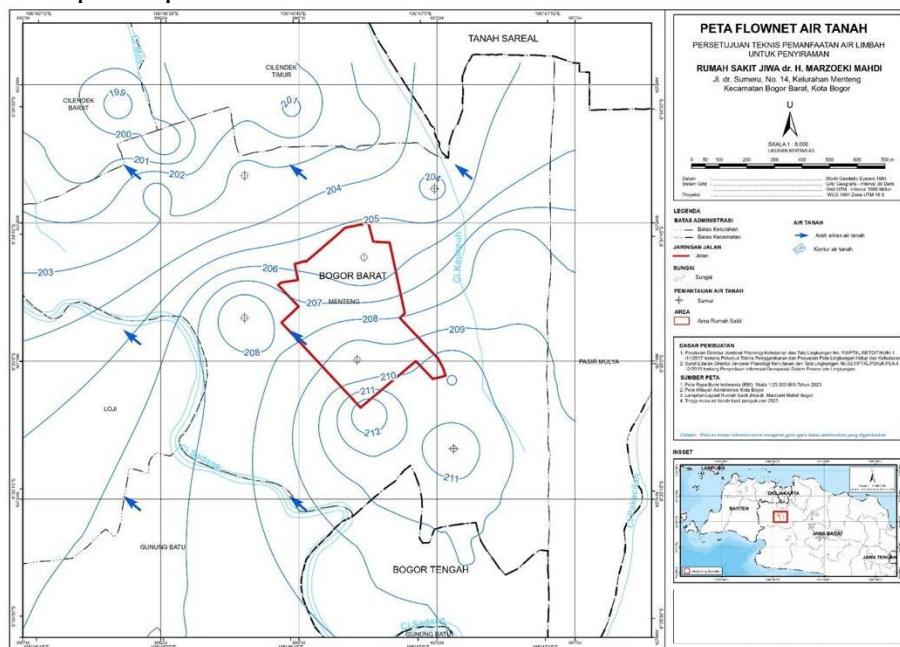
H1 : Ketinggian bibir sumur dari permukaan tanah (m)

H2 : Kedalaman air sumur dari bibir sumur

$\Delta H$  : Kedalaman muka airtanah (m)

MAT : Ketinggian muka airtanah (Elevasi -  $\Delta H$ )

Berdasarkan peta *flownet*, dapat diketahui bahwa arah aliran airtanah di wilayah studi mengalir dari tenggara menuju ke arah barat laut lokasi rumah sakit. Adapun peta flownet airtanah di lokasi studi ditampilkan pada Gambar 2. dibawah ini.



**Gambar 2.** Peta Flownet Airtanah di Lokasi Wilayah Studi

### 3.7 Kondisi Tanah

#### 3.7.1 Sifat Fisika Tanah

Hasil pengujian laboratorium terkait sifat fisika tanah kemudian dibandingkan dengan ambang kritis sesuai dengan Peraturan Pemerintah Nomor 150 Tahun 2000 tentang Pengendalian Kerusakan Tanah. Adapun data kondisi tanah berdasarkan hasil pengujian laboratorium ditampilkan pada Tabel 6. dibawah ini.

**Tabel 6.** Kondisi Tanah (Sifat Fisika Tanah)

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2023

No	Parameter	Ambang Kritis (PP 150/2000)	Pengujian pada Lahan Kontrol	Pengujian pada Lahan Pemanfaatan
1	Ketebalan solum	< 20 cm	> 140 cm	> 140 cm
2	Kebatuan permukaan	> 40%	-	-
3	Komposisi fraksi			
a.	Koloid	< 18%	16%	24%
b.	Pasir kuarsitik	> 80%	25%	38%
4	Berat isi	> 1,4 g/cm <sup>3</sup>	1,15 g/cm <sup>3</sup>	0,97 g/cm <sup>3</sup>
5	Porositas	< 30%; > 70%	56,60%	62,26%
6	Derajat pelulusan air	< 0,7 cm/jam; > 8,0 cm/jam	1,66 cm/jam	1,74 cm/jam
7	pH H <sub>2</sub> O (1 : 2,5)	< 4,5; > 8,5	6,5	7,0
8	Daya hantar listrik (DHL)	> 4,0 mS/cm	-	-
9	Redoks	< 200 mV	-	-
10	Jumlah mikroba	< 10 <sup>2</sup> cfu/g tanah	-	-

**a) Jenis Tanah**

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, jenis tanah di lokasi studi adalah latosol dengan *ordo* atau *soil taxonomy inceptisol*. Ciri-ciri tanah inceptisol yaitu memiliki tekstur tanah yang beragam (dari pasir hingga liat), fragmen batu kecil, dan material organik yang belum terurai dengan baik.

**b) Permeabilitas Tanah**

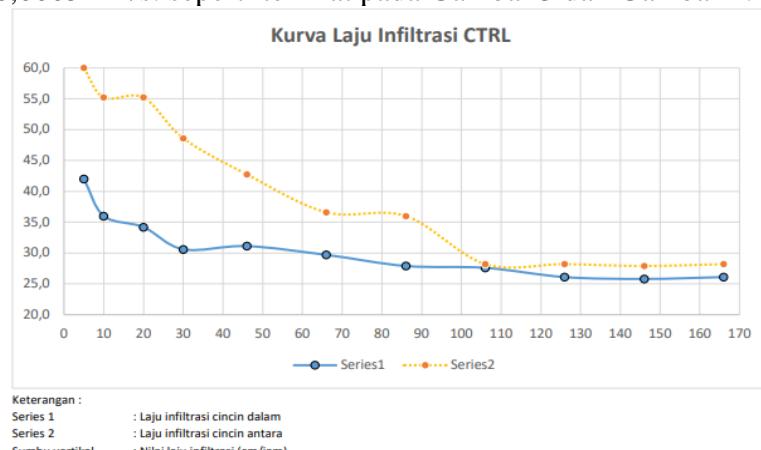
Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 150 Tahun 2000 tentang Pengendalian Kerusakan Tanah, ambang kritis porositas total adalah kurang dari 30% atau lebih dari 70%. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan di lokasi studi, porositas total tanah sebesar 56,60% dan 62,26%, sehingga tanah di lokasi studi tidak masuk ke dalam ambang kritis dan masih tergolong baik.

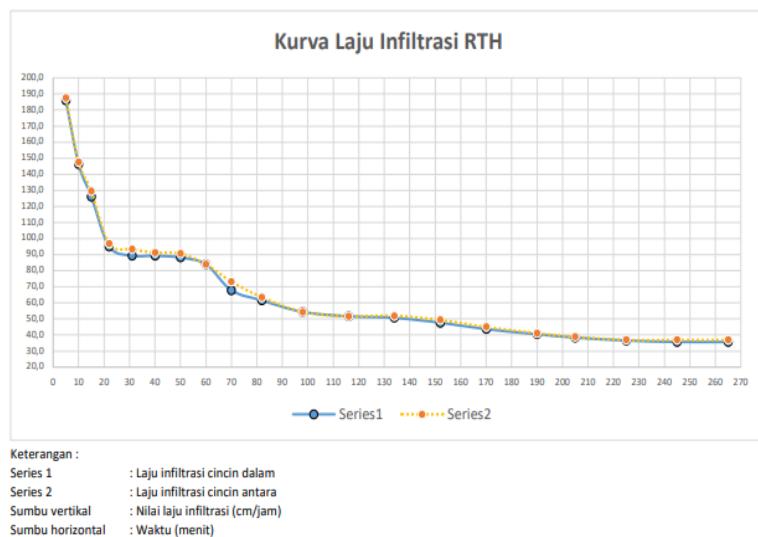
**c) Tekstur Tanah**

Pengujian tanah telah dilakukan pada dua titik di lokasi studi yang mewakili rona lingkungan awal untuk lahan kontrol dan lahan yang akan digunakan untuk penyiraman. Pada lahan kontrol, tekstur tanah tersusun atas 25% pasir, 16% debu, dan 59% klei. Sedangkan pada lahan yang akan digunakan untuk penyiraman, tekstur tanah tersusun atas 38% pasir, 24% debu, dan 38% klei.

**d) Kecepatan dan Kapasitas Infiltrasi**

Berdasarkan hasil pengujian tanah, pada lahan kontrol, kecepatan infiltrasi tanah berada pada rentang 25,8 – 60 cm/jam atau 0,00007 – 0,00017 m/s, sedangkan pada lahan yang akan digunakan untuk penyiraman, kecepatan infiltrasi berada pada rentang 35,7 – 187,5 cm/jam atau 0,00010 – 0,00052 m/s. seperti terlihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.

**Gambar 3.** Grafik Laju Infiltrasi Lahan Kontrol

**Gambar 4.** Grafik Laju Infiltrasi Lahan Pemanfaatan

Kapasitas infiltrasi dapat diketahui ketika kecepatan infiltrasi berada pada kondisi konstan atau stabil, sehingga kapasitas infiltrasi pada lahan kontrol adalah sebesar 26,1 cm/jam atau 0,00007 m/s dan kapasitas infiltrasi pada lahan yang akan digunakan untuk penyiraman adalah sebesar 35,7 cm/jam atau 0,00010 m/s.

### 3.7.2 Sifat Kimia Tanah

Pengujian sifat kimia tanah dilakukan pada 2 (dua) titik di lokasi studi, dimana kedua titik tersebut mewakili lahan kontrol dan lahan yang akan digunakan untuk penyiraman (lahan pemanfaatan). Parameter yang diuji meliputi pH, C organik, N total, P2O5 tersedia, kation dapat tukar, kapasitas tukar kation, kejenuhan basa, kandungan Pb, Cd, Cu, Zn, serta minyak lemak pada tanah. Adapan data kondisi sifat kimia tanah berdasarkan hasil pengujian laboratorium ditampilkan pada Tabel 7. dibawah ini.

**Tabel 7.** Kondisi Tanah (Sifat Kimia Tanah)

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2023

No	Parameter		Satuan	Pengujian pada Lahan Kontrol	Pengujian pada Lahan Pemanfaatan
1	pH	H <sub>2</sub> O	-	6,50	7,00
		KCl	-	5,00	4,90
2	C Organik		%	1,19	1,14
3	N-Total		%	0,13	0,13
4	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Tersedia		mg/kg	38,61	103,27
5	Kation Dapat Tukar	K <sup>+</sup>	cmol(+)/kg	0,19	0,32
		Na <sup>+</sup>	cmol(+)/kg	0,29	0,37
		Ca <sup>2+</sup>	cmol(+)/kg	8,36	9,70
		Mg <sup>2+</sup>	cmol(+)/kg	1,17	1,62
6	Kapasitas Tukar Kation		cmol(+)/kg	15,05	20,77
7	Kejenuhan Basa		%	67,00	58,00
8	Tekstur 3 Fraksi	Pasir	%	25,00	38,00
		Debu	%	16,00	24,00
		Klei	%	59,00	38,00
9	Timbal (Pb)		mg/kg	30,72	31,19
10	Kadmium (Cd)		mg/kg	ttd	ttd
11	Tembaga (Cu)		mg/kg	50,06	61,22
12	Seng (Zn)		mg/kg	159,28	254,14
13	Minyak/Lemak		%	0,05	0,04

Berdasarkan data di atas, terdapat perbedaan kualitas airtanah antara lahan kontrol dan lahan pemanfaatan. pH pada lahan kontrol dan pemanfaatan sedikit berbeda, dengan pH H<sub>2</sub>O di lahan

pemanfaatan (7,00) sedikit lebih tinggi daripada lahan kontrol (6,50), yang menunjukkan perbedaan kondisi keasaman. Kadar unsur hara seperti  $P_2O_5$  tersedia lebih tinggi di lahan pemanfaatan (103,27 mg/kg) dibandingkan lahan kontrol (38,61 mg/kg), yang mencerminkan perbedaan penggunaan pupuk atau bahan organik. Selain itu, kapasitas tukar kation (CTK) juga lebih tinggi di lahan pemanfaatan (20,77 cmol(+)/kg), yang mengindikasikan kemampuan tanah untuk mempertahankan nutrisi lebih baik. Pada sisi lain, kandungan logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), tembaga (Cu), dan seng (Zn) sedikit lebih tinggi pada lahan pemanfaatan, dengan tembaga dan seng menunjukkan peningkatan signifikan, yang mungkin menandakan adanya potensi kontaminasi logam berat akibat aktivitas pemanfaatan lahan. Perubahan tekstur tanah, di mana persentase pasir meningkat di lahan pemanfaatan (38%) dan persentase clay menurun (38%), menunjukkan pergeseran struktur tanah yang dapat mempengaruhi daya serap air dan kualitas lingkungan sekitar.

### 3.8 Sebaran Dampak

Dosis air limbah untuk penyiraman sebesar  $220,9 \text{ m}^3/\text{Ha}/\text{hari}$  atau  $22,09 \text{ L}/\text{m}^2/\text{hari}$ . Apabila penyiraman dilakukan dengan dosis air limbah tersebut, maka dibutuhkan area sebesar  $3.649 \text{ m}^2$  yang akan disiram.

Parameter utama yang diperlukan dalam pemodelan adalah data sumur dangkal yang ada di wilayah studi seperti lokasi sumur dan ketinggian muka airtanah. Parameter yang digunakan sebagai karakteristik hidraulik akuifer pada perangkat Visual Modflow yaitu conductivity, storage, dan initial head. Nilai masing-masing variabel storage yang dimasukkan ke perangkat Visual Modflow dapat dibaca pada tabel berikut:

**Tabel 8.** Data Variabel Storage Batuan

No	Parameter	Jenis batuan		
		Batu Pasir	Pasir	Andesit
1	Konduktivitas Hidrolik (m/s)	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^2$	$1 \times 10^{-8}$
2	Porositas Efektif (%)	11	25	5
3	Total Porositas (%)	11	40	10
4	Specific Storage (1/m)	$3,9 \times 10^{-5}$	$3,1 \times 10^{-4}$	$2,1 \times 10^{-6}$
5	Specific Yields (%)	27	27	5
6	Koefisien Dispersi vertikal		0,1	
7	Koefisien Dispersi horisontal		1	
8	Koefisien Difusi ( $\text{m}^2/\text{hari}$ )		$1,7 \times 10^{-4}$	
9	Tebal lapisan (m)	30	15	60

Terdapat 8 variabel yang merupakan *boundary conditions* pada program Modflow yaitu *constant head, river, stream, general head, drain, wall, recharge, and evapotranspiration*. Pada kajian ini yang digunakan adalah river, recharge, dan evapotranspiration.

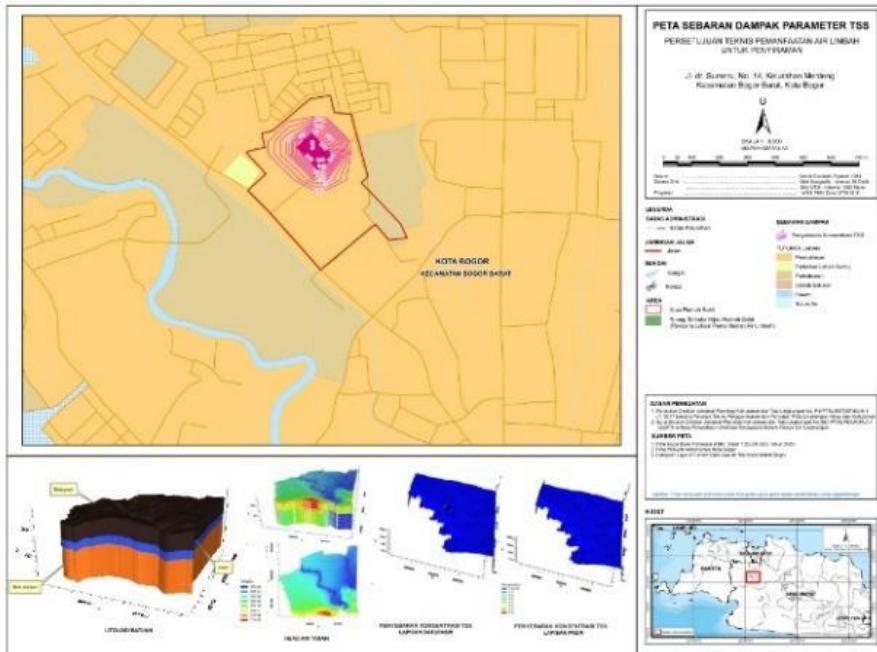
- Evapotranspirasi diasumsikan bergantung pada kedalaman muka airtanah dengan laju maksimum pada saat muka airtanah berada pada permukaan dan secara bertahap akan menurun, sehingga pada Modflow ditetapkan sebagai ketinggian vegetasi ditambah 1 m. Adapun nilai evapotranspirasi wilayah studi sebesar 1.494 mm/tahun.
- *Recharge*, dihitung berdasarkan 3 jenis yaitu berasal dari curah hujan, run-off atau air limpasan dan evapotranspirasi. Adapun nilai recharge di wilayah studi dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Curah hujan} &= 3.533 \text{ mm/tahun} \\
 \text{Run off} &= 1.060 \text{ mm/tahun} \\
 \text{Evapotranspirasi} &= 1.494 \text{ mm/tahun} \\
 \text{Recharge} &= 3.533 - 1.060 - 1.494 = 979 \text{ mm/tahun}
 \end{aligned}$$

- River atau sungai yang dimodelkan pada Modflow terletak sebelah Utara dan Selatan daerah penelitian dan memiliki konduktivitas hidraulik pada dasar sungai yang digunakan sebesar 0,5 m/hari.

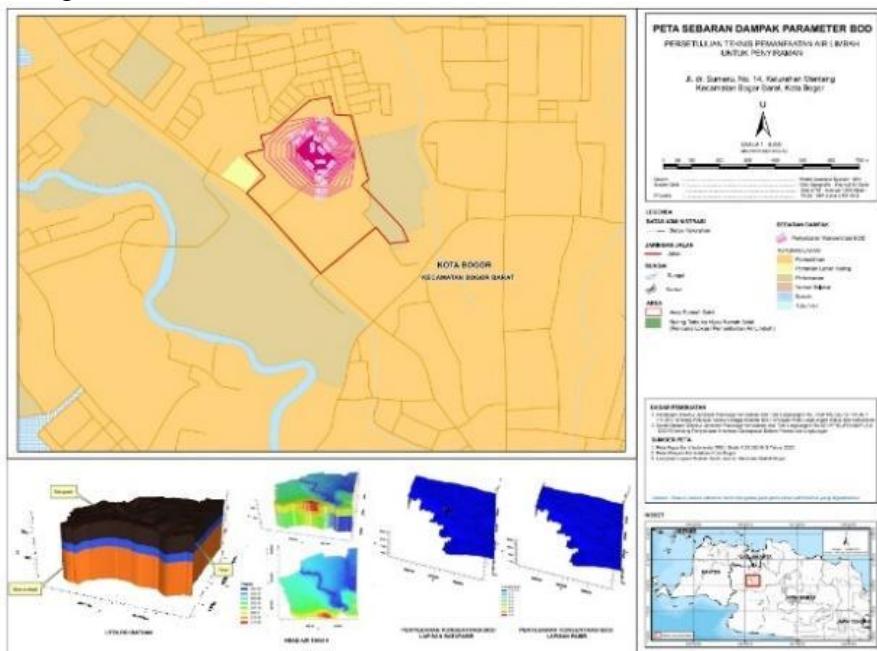
Berdasarkan hasil model penyebaran masing-masing konsentrasi parameter yang dapat diketahui bahwa jarak penyebaran selama 30 hari pemanfaatan air limbah untuk penyiraman

mencapai jarak 115 m (jarak ke pemukiman terdekat) ke arah barat laut dari area sumber penyiraman. Berikut hasil pemodelan penyebaran dan jarak penyebaran masing-masing parameter:



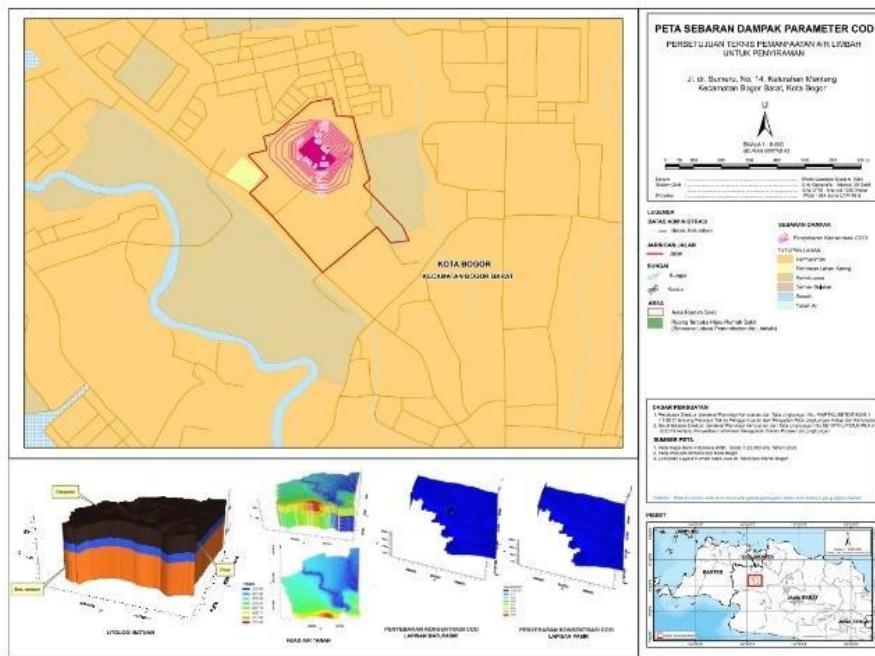
**Gambar 5.** Sebaran Dampak Konsentrasi TSS

Berdasarkan Gambar 5. diatas, hasil simulasi nilai konsentrasi TSS berdasarkan jarak penyebaran konsentrasi TSS dalam tanah, nilai TSS hampir mendekati 0 pada jarak 115-meter dari titik sumber (0,01 mg/L).



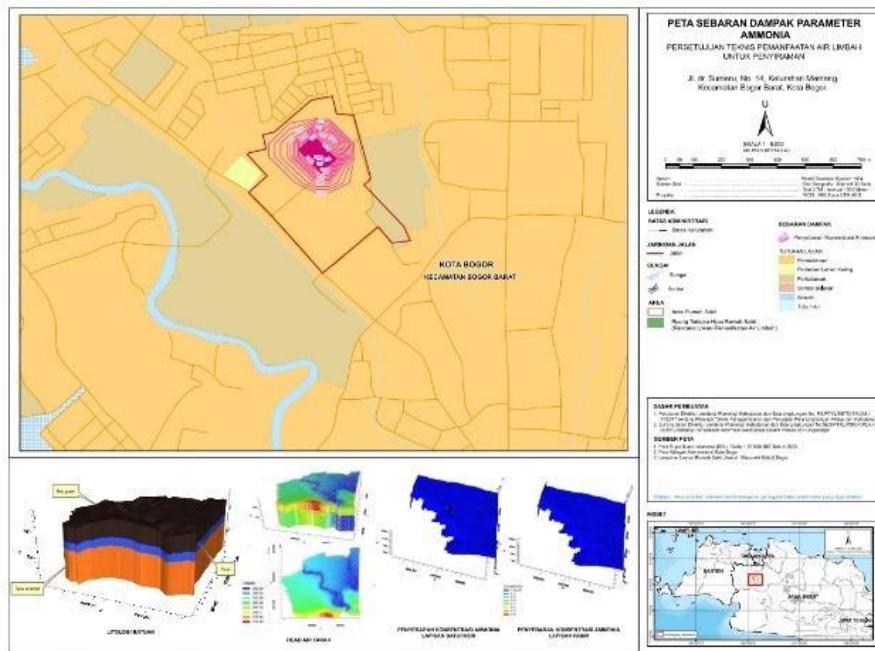
**Gambar 6.** Sebaran Dampak Konsentrasi BOD

Berdasarkan Gambar 6. diatas jarak penyebaran konsentrasi BOD dalam tanah, terjadi penurunan konsentrasi BOD yang semula 0,54 mg/L di titik sumber menjadi 0,02 mg/L pada jarak 115-meter dari titik sumber.



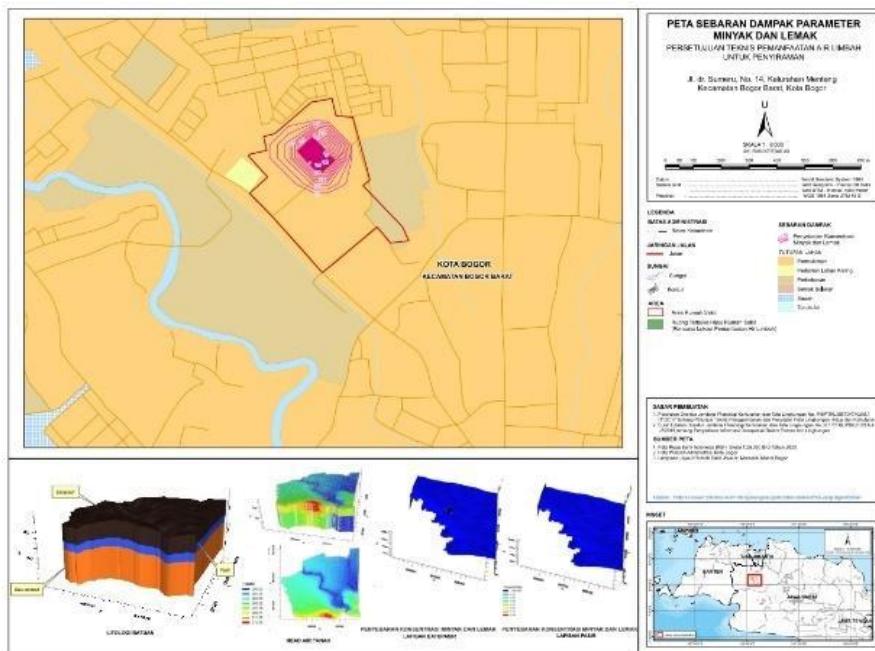
**Gambar 7. Sebaran Dampak Konsentrasi COD**

Berdasarkan Gambar 7. diatas konsentrasi COD dalam tanah mengalami penurunan, yang semula 6,53 mg/L di titik sumber menjadi 0,25 mg/L pada jarak 115 meter dari titik sumber.



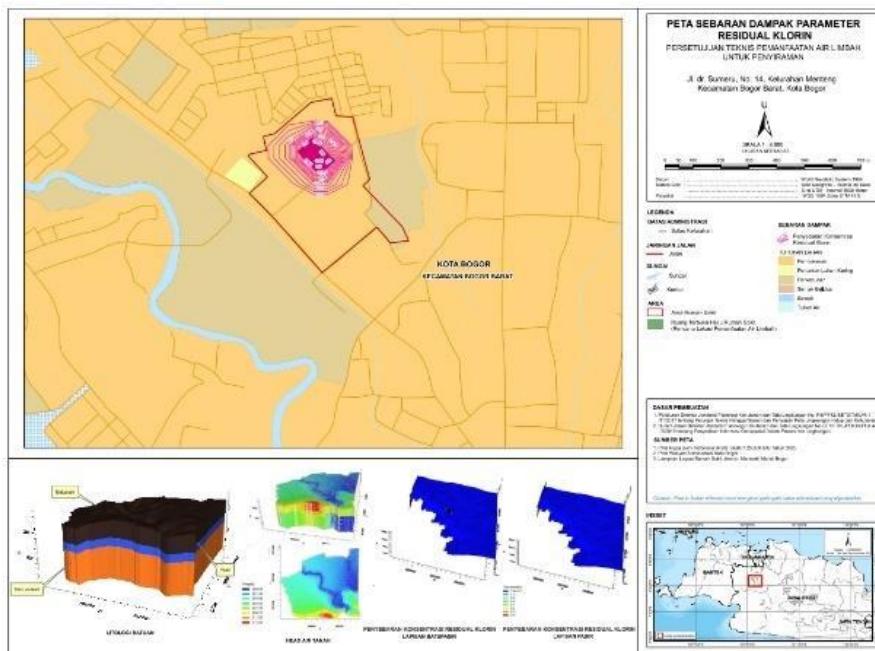
**Gambar 8. Sebaran Dampak Konsentrasi Amoniak**

Berdasarkan Gambar 8. diatas konsentrasi amoniak dalam tanah mengalami penurunan sepanjang bertambahnya jarak, yang semula 0,21 mg/L di titik sumber menjadi 0,00 mg/L pada jarak 115-meter dari titik sumber.



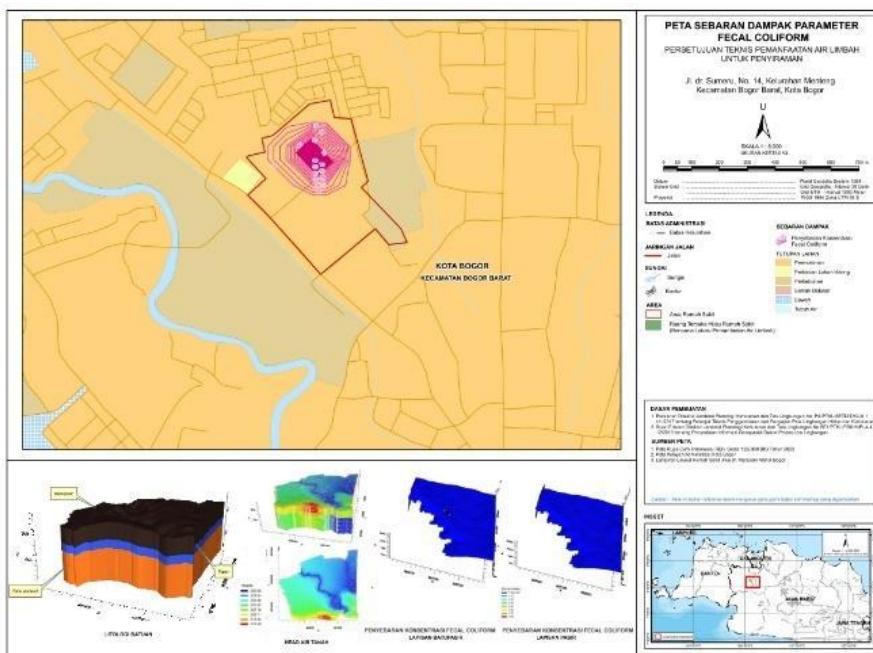
**Gambar 9.** Sebaran Dampak Konsentrasi Minyak dan Lemak

Berdasarkan Gambar 9., konsentrasi minyak dan lemak dalam tanah, nilai minyak dan lemak mengalami penurunan yang semula 0,15 mg/L di titik sumber menjadi 0,01 mg/L pada jarak 115 meter dari titik sumber.



**Gambar 10.** Sebaran Dampak Konsentrasi Residual Klorin

Berdasarkan Gambar 10. diatas residual klorin dalam tanah, nilai residual klorin hampir mendekati 0 pada jarak 115 meter dari titik sumber (0,05 mg/L).



**Gambar 11.** Sebaran Dampak Konsentrasi Fecal Coliform

Berdasarkan Gambar 11. fecal coliform dalam tanah mengalami penurunan sepanjang bertambahnya jarak, yang semula 1 MPN/100 mL di titik sumber tetap bernilai 0 MPN/100 mL pada jarak 115-meter dari titik sumber.

### 3.9 Potensi dan Manfaat Pemanfaatan Air Limbah Rumah Sakit

Berdasarkan hasil simulasi pada sub bab 3.8 Sebaran Dampak, air limbah rumah sakit yang dimanfaatkan terhadap airtanah menunjukkan bahwa semua parameter masih memenuhi standar baku mutu yang berlaku. Simulasi sebaran dampak tersebut, membuka potensi pemanfaatan air limbah secara lebih luas, bukan hanya untuk penyiraman tanaman, namun dapat juga dimanfaatkan sebagai *recharge* sumur resapan dan pemanfaatan lainnya terhadap formasi tertentu (airtanah).

Beberapa aspek yang perlu diperhatikan dalam pemanfaatan air limbah sehingga dapat diterapkan meliputi: kapasitas dan teknologi pengolahan yang sesuai, kualitas air limbah yang sesuai dengan standar baku mutu, kondisi rona kualitas airtanah yang masih memenuhi, serta karakteristik formasi akuifer yang menerima limbah. Apabila semua aspek tersebut terpenuhi, maka pemanfaatan air limbah rumah sakit terhadap formasi tertentu dapat dilakukan.

Pemanfaatan air limbah rumah sakit terhadap formasi tertentu, dapat menjadi solusi strategis untuk mengurangi pembuangan air limbah ke badan air permukaan (sungai), sehingga dapat mengurangi beban pencemaran air sungai serta debit yang berlebihan untuk mengurangi potensi banjir. Pemanfaatan ini juga mengoptimalkan efisiensi penggunaan air bersih yang mendukung nilai ekologis (*ecological value*) melalui konsep pengelolaan air berkelanjutan. Selain aspek teknis, pemanfaatan air limbah ini juga dapat sebagai bentuk penghematan biaya (apabila penggunaan air bersih berbayar) melalui konsep *Circular Economy*, dimana air limbah yang telah diolah dapat menjadi sumberdaya yang dapat dimanfaatkan kembali.

### 3.10 Risiko dan Mitigasi Pemanfaatan Air Limbah Rumah Sakit

Risiko utama pemanfaatan air limbah rumah sakit yaitu terkait kualitas air limbah yang dimanfaatkan, semakin baik kualitas air limbahnya, maka akan mengurangi risiko kontaminasi terhadap lingkungan. Selain itu, perlu diperhatikan risiko kondisi lingkungan sekitar seperti kondisi curah hujan, kualitas airtanah, serta beban pencemaran sekitar (seperti pencemaran dari rumah tangga, industri, dll.). Dalam proses jangka panjang, pemanfaatan air limbah dapat menyebabkan akumulasi bahan kimia dan mikroorganisme tertentu. Berdasarkan uraian risiko tersebut, terdapat beberapa mitigasi yang dapat dilakukan yaitu:

1. Pengelolaan Kualitas Air Limbah

a) Teknologi IPAL

Penggunaan teknologi IPAL yang sesuai atau lebih maju (*advanced*), sehingga kualitas air limbah yang dihasilkan dapat mencegah kontaminasi jangka panjang. Penerapan konsep pengolahan air limbah menjadi air bersih sangat direkomendasikan, selain mengurangi beban pencemaran juga meningkatkan pemanfaatan air kembali (*recycling*) seperti untuk *flushing toilet*.

b) Pengetatan Baku Mutu

Dalam kondisi tertentu, apabila kualitas airtanah mencapai tingkat kritis atau hasil pemodelan menunjukkan dampak yang melebihi baku mutu, maka pengetatan standar baku mutu harus dilakukan. Pengetatan ini ditujukan untuk mengurangi beban pencemaran terhadap airtanah.

2. Pemantauan (*Monitoring*)

a) Kondisi IPAL

Pemantauan terhadap kondisi IPAL secara berkala, untuk mencegah terjadinya kebocoran ataupun kerusakan pada sistem IPAL yang dapat menyebabkan kontaminasi.

b) Kualitas Olahan IPAL (*Outlet*)

Pemantauan *outlet* IPAL secara berkala, dimana penggunaan *online monitoring* sangat direkomendasikan guna memantau kualitas air limbah secara *real time*, sehingga tindakan korektif dapat segera dilakukan apabila tidak memenuhi baku mutu.

c) Kualitas Airtanah

Pemantauan pada titik pantau airtanah, sesuai dengan hasil sebaran dampak yang mengindikasikan arah aliran airtanah. Titik pantau tersebut berfungsi sebagai indikator spasial, apakah sebaran air limbah mencemari kondisi sekitar atau tidak.

3. Sumber Daya Manusia

a) Tim Pengelolaan Lingkungan

Menyediakan tim pengelolaan lingkungan khususnya dalam bidang pengoperasian IPAL dan pengendalian pencemaran air.

b) Pelatihan dan Sertifikasi Personil

Melakukan pelatihan dan sertifikasi dilakukan untuk memastikan bahwa tim pengelola lingkungan memiliki kompetensi sesuai dengan keperluan pengoperasian IPAL dan pengendalian pencemaran air.

4. Tanggap Darurat

a) Sistem *Backup* IPAL

Sistem cadangan IPAL bertujuan untuk mencegah apabila kualitas air limbah hasil olahan tidak memenuhi target baku mutu. Penggunaan sistem ini berhubungan erat dengan pemantauan *real time*, sehingga apabila tidak memenuhi baku mutu, maka dapat dilakukan tindakan penanganan.

b) Tindakan Darurat

Menyediakan prosedur darurat seperti penanganan pencemaran, kebocoran, maupun tindakan *shutdown* sementara, *bypass* ke sistem penampungan sementara, atau dikembalikan ke sistem pengolahan (*reintegration*).

c) Tim Tanggap Darurat

Menyediakan tim tanggap darurat serta simulasi kedaruratan secara berkala.

5. Koordinasi Eksternal (Pendekatan Institusi dan Sosial)

a) Koordinasi dengan Stakeholder

Melakukan koordinasi terhadap instansi teknis terkait maupun perangkat pemerintah setempat, khususnya apabila terjadi pencemaran terhadap lingkungan, khususnya sumur masyarakat

b) Layanan Aduan Masyarakat

Menyediakan sistem layanan aduan bagi masyarakat untuk melaporkan jika terdapat indikasi pencemaran.

#### 4. Kesimpulan

Dari hasil simulasi nilai konsentrasi TSS berdasarkan jarak penyebaran konsentrasi TSS dalam tanah, nilai TSS hampir mendekati 0 pada jarak 115-meter dari titik sumber (0,01 mg/L). Konsentrasi COD dalam tanah mengalami penurunan, yang semula 6,53 mg/L di titik sumber menjadi 0,25 mg/L pada jarak 115-meter dari titik sumber. Berdasarkan jarak penyebaran konsentrasi minyak dan lemak dalam tanah, nilai minyak dan lemak mengalami penurunan yang semula 0,15 mg/L di titik sumber menjadi 0,01 mg/L pada jarak 115-meter dari titik sumber. Berdasarkan jarak penyebaran konsentrasi BOD dalam tanah, terjadi penurunan konsentrasi BOD yang semula 0,54 mg/L di titik sumber menjadi 0,02 mg/L pada jarak 115-meter dari titik sumber. Konsentrasi amonia dalam tanah mengalami penurunan sepanjang bertambahnya jarak, yang semula 0,21 mg/L di titik sumber menjadi 0,00 mg/L pada jarak 115-meter dari titik sumber. Berdasarkan jarak penyebaran konsentrasi residual klorin dalam tanah, nilai residual klorin hampir mendekati 0 pada jarak 115-meter dari titik sumber (0,05 mg/L). Fecal coliform dalam tanah mengalami penurunan sepanjang bertambahnya jarak, yang semula 1 MPN/100 mL di titik sumber tetap bernilai 0 MPN/100 mL pada jarak 115-meter dari titik sumber. Namun demikian, studi ini merupakan prakiraan sehingga diperlukan uji coba lapangan ketika IPAL telah dibangun untuk memastikan dampak nyata terhadap kualitas airtanah di sekitar lokasi rumah sakit. Pengelolaan lingkungan yang efektif harus melibatkan sistem pengolahan air limbah yang tepat, seperti IPAL dengan teknologi sesuai untuk memenuhi target baku mutu yang dipersyaratkan, serta pemantauan yang kontinu pada inlet dan outlet IPAL serta sumur pantau untuk dapat melihat dampak nyata yang terjadi. Selain itu, diperlukan juga prosedur untuk mengantisipasi seperti kondisi IPAL tidak memenuhi baku mutu, kondisi tanggap darurat, dan kondisi-kondisi lainnya yang diperlukan.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada perusahaan tempat penulis bekerja atas hal sumber daya dan fasilitas sangat berharga bagi kelancaran proses penelitian. Selain itu, penulis juga menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam kepada Program Magister Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, yang telah memberikan bimbingan, fasilitas, serta lingkungan akademik yang mendukung untuk penyelesaian tugas akhir ini. Semoga kerjasama yang baik ini terus terjalin di masa mendatang.

#### Daftar Pustaka

- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport* (2nd ed.). Academic Press.
- Banciu, A. R., Pascu, L. F., Rădulescu, D. M., Stoica, C., Gheorghe, S., Lucaciu, I., Ciobotaru, F. V., Novac, L., Manea, C., & Nita-Lazar, M. (2024). The COVID-19 pandemic impact of hospital wastewater on aquatic systems in Bucharest. *Water*, 16(2), 245. <https://doi.org/10.3390/w16020245>
- Drocelle, N., Mupenzi, C., & Nsanzumukiza, M. V. (2023). Impact of hospital wastewater on the rivers' quality: Case of Byumba hospital. *International Journal of Climate Research*, 7(1), 1–8. <https://doi.org/10.18488/112.v7i1.3355>
- Fatimazahra, S., Mouhir, L., Saafadi, L., & Khazraji, M. (2023). Review of hospital effluents: Special emphasis on characterization, impact, and treatment of pollutants and antibiotic resistance. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(3), Article 393. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11002-5> PubMed Central
- Gafil, Z. M., Al-Tameemi, H., & Obaid, A. (2022). Treatment of hospital wastewater by potassium ferrate. *Maġallaẗ Al-Qādisiyyaẗ Li-l-‘ulūm al-Handasiyyaẗ*, 15(2), 136–141.
- Gholami-Borujeni, F., Zahedi, A., & Sheikhi, M. (2019). Evaluation of hospital treated wastewater on seed germination and plant growth indices. *Journal of Health Research*, 5(1), 49–59.
- IWA Publishing. (2022). Groundwater contamination by hospital effluent with a focus on carbamazepine and sulfamethoxazole. In *IWA Publishing eBooks* (pp. 101–132).

- Khan, M. T., Ahmad, R., Liu, G., Zhang, L., Santagata, R., Lega, M., & Casazza, M. (2024). Potential environmental impacts of a hospital wastewater treatment plant in a developing country. *Sustainability*, 16(6), 2233. <https://doi.org/10.3390/su16062233MDPI>
- Khan, M. T., Shah, I. A., Ihsanullah, I., Naushad, M., Ali, S., Shah, S. H. A., & Mohammad, A. W. (2021). Hospital wastewater as a source of environmental contamination: An overview of management practices, environmental risks, and treatment processes. *Journal of Water Process Engineering*, 41, 101990. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.101990>
- Liu, W., Park, S., Bailey, R. T., Molina-Navarro, E., Andersen, H. E., Thodsen, H., Nielsen, A. L., Jeppesen, E., Jensen, J. S., Jensen, J. B., & Trolle, D. (2019). Comparing SWAT with SWAT-MODFLOW hydrological simulations when assessing the impacts of groundwater abstractions for irrigation and drinking water. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1–51.
- Luo, M. (2022). Re-use of treated wastewater for irrigation and groundwater recharge: Environmental impact assessment based on tracer method at the experimental site in Kinrooi, Belgium.
- Morsy, S. M. (2023). Planning for groundwater management using visual MODFLOW model and multi-criteria decision analysis, West-West Minya, Egypt. *Applied Water Science*, 13, 72. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01881-x> SpringerLink
- Perez-Bou, L., Rosa-Masegosa, A., Vilchez-Vargas, R., Link, A., Gonzalez-Martinez, A., González-López, J., & Muñoz-Palazon, B. (2024). Treatment of hospital wastewater using aerobic granular sludge technology: Removal performance and microbial dynamics. *Journal of Water Process Engineering*.
- Pourdara, H., Zeyni, M., & Falah, J. (2004). Using hospital wastewater effluent for irrigation of green fields. *Journal Name*, 15(149), 43–49.
- Ramírez-Coronel, A. A., Mohammadi, M. J., Majdi, H. Sh., Zabibah, R., Taherian, M., Prasetyo, D. B., Gabr, G. A., Asban, P., Kiani, A., & Sarkohaki, S. (2023). Hospital wastewater treatment methods and its impact on human health and environments. *Reviews on Environmental Health*.
- Somay, M. A., Elçi, A., & Gonçalves, W. T. (2023). A groundwater flow modeling application for the impact assessment of treated wastewater reuse by managed aquifer recharge.
- Tahershamsi, A., Feizi, A., & Molaei, S. (2018). Modeling groundwater surface by MODFLOW math code and geostatistical method. *Civil Engineering Journal*, 4(4), 812.
- Torres, H. (2020). Assessing groundwater contamination risk and detection of unknown sources using a multi-component reactive transport model. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8, 1–15.
- Xie, W., Ren, B., Hursthouse, A. S., Wang, Z., & Luo, X. (2020). Simulation of manganese transport in groundwater using Visual MODFLOW: A case study from Xiangtan manganese ore area in central China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(1), 1–10.