



ANALISIS PENGARUH NILAI KONDUKTIVITAS HIDRAULIK DAN DISPERSIVITAS DINAMIK TERHADAP REMEDIASI AIR TANAH MENGGUNAKAN SIMULASI NUMERIK

ANALYSIS OF THE EFFECT OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY AND DYNAMIC DISPERSIVITY VALUES ON GROUNDWATER REMEDIATION USING NUMERICAL SIMULATION

Agus M. Ramdhan^{1)*}, Arifin²⁾, Erik Hermawan³⁾, Lambok M. Hutasoit⁴⁾

^{1,2,4)}Prodi Teknik Geologi dan Prodi Magister Teknik Air Tanah, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No. 10, Bandung, Indonesia

³⁾Konsultan Hidrogeologi Independen

Jl. Dago Pakar Mawar 1 No. 26, Bandung, Indonesia

*Correspondence Email: agusmr@gl.itb.ac.id

Diterima: 9 Juli 2021; Direvisi: 24 Agustus 2021; Disetujui: 17 September 2021

ABSTRACT

Groundwater remediation is one of the solutions to restore the contaminated groundwater. This study was conducted to determine the effect of hydraulic conductivity and dynamic dispersivity on the groundwater remediation effectiveness. As a case study, in 2020, in an area located in Balikpapan, groundwater remediation will be carried out by injecting water containing NaOH through five wells and pumping it back through five wells to form a cycle. The method used is a numerical simulation consisting of groundwater flow simulation, mass transport, and sensitivity analysis. The results show that it takes 124 to 300 days for the injected NaOH to arrive at the pumping wells. The sensitivity analysis results show that when the hydraulic conductivity value is ten times greater, the time required is reduced to 84 to 172 days. Meanwhile, when the dynamic dispersivity is twice larger, the time required is reduced to 75 to 189 days. These results indicate that the groundwater remediation method will be effective for aquifers with high hydraulic conductivity and dynamic dispersivity values. For the study area, the groundwater remediation is suggested to be carried out by increasing the number of injection and pumping wells with a relatively close distance, i.e., around 10 meters, so that NaOH arrives at the pumping wells more quickly.

Keywords: groundwater, remediation, hydraulic conductivity, dynamic dispersivity, numerical simulation

ABSTRAK

Remediasi air tanah merupakan salah satu solusi untuk memulihkan air tanah yang telah tercemar. Studi ini bertujuan untuk menentukan pengaruh dari konduktivitas hidraulik dan dispersivitas dinamik terhadap efektivitas remediasi tersebut. Sebagai studi kasus, pada 2020, di suatu area di Balikpapan akan dilakukan remediasi air tanah dengan proses injeksi air yang mengandung NaOH melalui lima sumur dan pemompaan kembali melalui lima sumur sehingga terbentuk suatu siklus. Metode yang digunakan adalah simulasi numerik yang terdiri dari simulasi aliran air tanah, transportasi massa, dan analisis sensitivitas. Hasilnya menunjukkan bahwa dibutuhkan waktu selama 124 hingga 300 hari agar NaOH yang diinjeksikan tiba di sumur pemompaan. Hasil analisis sensitivitas menunjukkan ketika nilai konduktivitas hidraulik sepuluh kali lebih besar, maka waktu yang dibutuhkan berkurang menjadi 84 hingga 172 hari. Sementara itu, ketika nilai dispersivitas dinamik dua kali lebih besar, maka waktu yang dibutuhkan berkurang menjadi 75 hingga 189 hari. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa remediasi air tanah akan efektif untuk akuifer dengan nilai konduktivitas hidraulik dan dispersivitas dinamik yang tinggi. Untuk area studi, remediasi air tanah disarankan untuk dilakukan dengan menambah jumlah sumur injeksi dan pemompaan dengan jarak antar sumur yang relatif dekat, yaitu sekitar 10 meter agar NaOH tiba di sumur pemompaan dengan lebih cepat.

Kata Kunci: air tanah, remediasi, konduktivitas hidraulik, dispersivitas dinamik, simulasi numerik

PENDAHULUAN

Aktivitas manusia, contohnya kegiatan industri, dapat menyebabkan terjadinya pencemaran air tanah (Rochaddi et al., 2019; Siregar dan Kiswiranti, 2020; Widiyanto et al., 2015). Salah satu metode untuk memulihkan kondisi air tanah yang telah tercemar adalah dengan melakukan remediasi secara *in situ* (Ossai et al., 2020; Trulli et al., 2016). Remediasi tersebut dapat dilakukan melalui proses injeksi dan pemompaan (Ciampi et al., 2021). Air yang mengandung zat kimia tertentu diinjeksikan ke bawah permukaan melalui sumur injeksi, kemudian dipompa kembali melalui sumur pemompaan sehingga membentuk suatu siklus (Zhang, 2020). Zat kimia yang diinjeksikan bersama air tersebut akan bereaksi dengan kontaminan sehingga konsentrasi kontaminan pada air tanah berkurang. Jika air yang dipompa masih mengandung kontaminan, maka dapat diolah terlebih dahulu sebelum diinjeksikan kembali ke bawah permukaan. Namun, terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi efektivitas dari proses remediasi air tanah secara *in situ*, salah satunya adalah karakteristik akuifer (Ceconet et al., 2020; Domenico dan Schwartz, 1998; Hyldegaard et al., 2019; Rezaei et al., 2017; Wagner dan Gorelick, 1989).

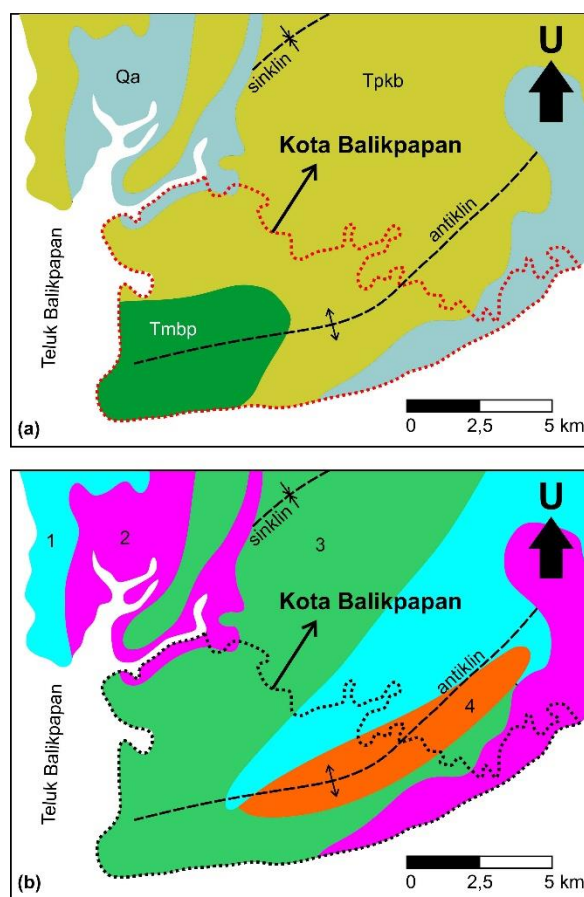
Secara hidrogeologi, remediasi air tanah melalui proses injeksi dan pemompaan melibatkan dua proses utama, yaitu aliran air tanah dan transportasi massa. Nilai konduktivitas hidraulik dan dispersivitas dinamik dari akuifer merupakan dua parameter yang sangat berpengaruh terhadap proses aliran air tanah dan transportasi massa pada air tanah. Dengan demikian, kedua parameter tersebut juga akan mempengaruhi efektivitas dari proses remediasi air tanah secara *in situ*.

Tujuan dari studi ini adalah untuk menentukan pengaruh dari nilai konduktivitas hidraulik dan dispersivitas dinamik akuifer terhadap efektivitas remediasi air tanah secara *in situ* dengan menggunakan simulasi numerik. Sebagai studi kasus, dilakukan simulasi numerik proses remediasi air tanah pada suatu area di Kota Balikpapan, Kalimantan Timur, seluas 3.100 m². Air tanah pada area tersebut memiliki pH yang asam dengan nilai satu hingga dua akibat terkontaminasi asam sulfat (H₂SO₄). Untuk menetralkan pH air tanah tersebut, maka akan dilakukan remediasi air tanah secara *in situ* dengan menginjeksikan air yang mengandung NaOH ke akuifer.

Kondisi Geologi dan Hidrogeologi

Secara regional, Kota Balikpapan di mana area studi berada, dialasi oleh Formasi Balikpapan (Tmpb) berumur Miosen Tengah bagian atas,

Formasi Kampungbaru (Tpkb) berumur Miosen Akhir hingga Pliosen, dan Aluvium (Qa) berumur Holosen, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1a**. Formasi Balikpapan tersusun atas perselingan batupasir kuarsa, batulempung lanauan, dan serpih dengan sisipan napal, batugamping, dan batubara. Formasi Kampungbaru tersusun atas batulempung pasiran, batupasir kuarsa, dan batulanau dengan sisipan batubara, napal, batugamping, dan lignit. Sementara itu, Aluvium pada Gambar 1a tersusun atas kerakal, kerikil, pasir, lempung, dan lumpur sebagai endapan sungai, rawa, pantai, dan delta. Selain itu, terdapat antiklin yang diperkirakan (garis putus-putus) yang melalui Kota Balikpapan di mana area studi berada.



Gambar 1 Peta yang menunjukkan kondisi geologi (a) dan hidrogeologi (b) secara regional di area studi yang terletak di Kota Balikpapan (dikompilasi dan dimodifikasi dari Hidayat dan Umar, 1994; Margono, 1995)

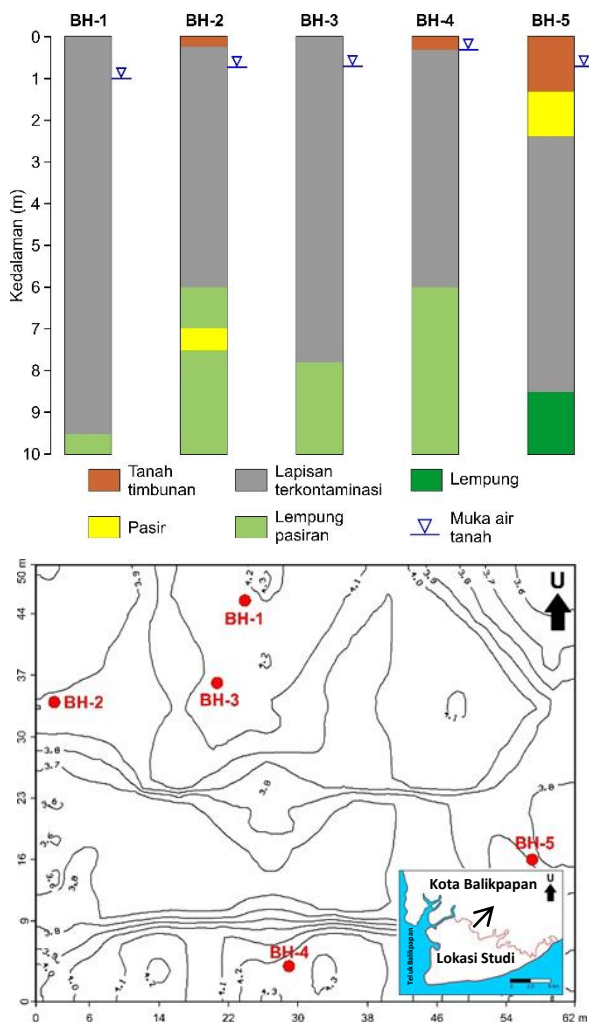
Secara hidrogeologi, terdapat empat zona akuifer di Kota Balikpapan, yaitu zona 1 hingga zona 4 seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 1b**. Zona 1 merupakan zona akuifer produktif dengan penyebaran yang setempat. Zona 2 adalah zona akuifer produktif kecil, dengan penyebaran yang setempat dan menutupi akuifer produktif sedang. Zona 3 adalah zona akuifer produktif sedang

dengan penyebaran yang luas. Sementara itu, zona 4 adalah zona akuifer produktif kecil dengan penyebaran yang setempat.

METODOLOGI

Data

Data yang digunakan dalam simulasi numerik ini dapat dibagi menjadi enam, yaitu data topografi, geologi, parameter akuifer, muka air tanah, konsentrasi zat kimia yang digunakan, dan kondisi batas pada area studi di Balikpapan, yang dikumpulkan pada tahun 2020. Topografi di area studi diperlihatkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Litologi pada masing-masing titik pengeboran di area studi dan peta topografi yang memperlihatkan lokasi titik pengeboran tersebut

Secara umum, topografi di area studi tergolong landai dengan elevasi tertinggi sebesar 4,3 m di atas permukaan laut. Adapun data geologi di area studi diperoleh dari hasil pengeboran pada lima titik. Litologi pada masing-masing titik pengeboran dapat dilihat pada Gambar 2. Secara umum, litologi

pada area studi dapat dibagi menjadi lima, yaitu tanah timbunan, lapisan terkontaminasi, pasir, lempung pasir, dan lempung. Berdasarkan Gambar 2, air tanah yang tercemar berada pada lapisan terkontaminasi yang didominasi oleh tanah timbunan dan pasir.

Data parameter akuifer yang digunakan dalam simulasi numerik ini dapat dilihat pada **Tabel 1**. Data parameter akuifer tersebut terdiri dari konduktivitas hidraulik dalam arah horizontal (Kh), konduktivitas hidraulik dalam arah vertikal (Kz), *specific storage* (Ss), *specific yield* (Sy), porositas (θ), dan dispersivitas dinamik (α). Nilai Kh, Kz, Ss dan Sy pada lapisan tanah timbunan, lapisan terkontaminasi, dan pasir diperoleh dari hasil uji pemompaan (*pumping test*) pada titik bor BH-1 dan BH-3 (Gambar 2), sedangkan pada lapisan lempung pasir dan lempung diperoleh dari literatur (Batu, 1998; Fetter, 2001; Freeze dan Cherry, 1979). Selain itu, nilai porositas dan dispersivitas dinamik juga diperoleh dari literatur. Berdasarkan nilai konduktivitas hidraulik yang lebih besar dari 10^{-5} cm/s (Fetter, 2001), maka tanah timbunan, lapisan terkontaminasi, dan lapisan pasir di area studi berperan sebagai akuifer. Sedangkan lempung pasir dan lempung berperan sebagai lapisan penyekat atau akuitar.

Berdasarkan Gambar 2, akuifer di area studi merupakan akuifer tidak tertekan karena di bagian atasnya tidak terdapat lapisan penyekat. Data muka air tanah diperoleh berdasarkan pengukuran muka air tanah pada titik pengeboran (Gambar 2). Adapun zat kimia yang digunakan untuk proses remediasi air tanah di area studi secara in situ yaitu NaOH. Konsentrasi NaOH yang diinjeksikan adalah sebesar 5.000 mg/L. Data kondisi batas yang digunakan dalam simulasi numerik ini terdiri dari jumlah air hujan yang meresap ke bawah permukaan tanah sebagai resapan (*recharge*) bagi air tanah, konsentrasi NaOH yang diinjeksikan, serta debit dan jumlah sumur injeksi dan pemompaan.

Jumlah air hujan yang meresap ke bawah permukaan tanah diasumsikan sebesar 500 mm/tahun, sekitar 19 persen dari curah hujan tahunan rata-rata di Kota Balikpapan yang sebesar 2.600 mm/tahun dari Stasiun Meteorologi Kelas I Sultan Aji Muhammad Sulaiman. Kemudian, NaOH dengan konsentrasi sebesar 5.000 mg/L akan diinjeksikan secara kontinu melalui lima sumur injeksi dengan debit injeksi sebesar 0,01 L/detik per sumur. NaOH yang diinjeksikan akan dipompa kembali melalui lima sumur pemompaan dengan debit pemompaan yang sama, yaitu sebesar 0,01 L/detik per sumur.

Simulasi Numerik

Simulasi numerik yang dilakukan dalam studi ini terdiri dari dua bagian, yaitu simulasi aliran air tanah dan simulasi transportasi massa, dalam hal ini NaOH. Simulasi aliran air tanah dilakukan untuk mengetahui perubahan muka air tanah akibat proses injeksi dan pemompaan yang dilakukan selama proses remediasi berlangsung. Adapun simulasi transportasi massa dilakukan untuk mengetahui pergerakan dan persebaran NaOH oleh air tanah dan untuk mengetahui perubahan konsentrasi NaOH akibat proses dispersi. Proses dispersi akan menyebabkan NaOH yang diinjeksikan menyebar mengikuti arah aliran air tanah dan konsentrasinya menurun akibat proses pengenceran.

Simulasi numerik dalam studi ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Visual MODFLOW. Simulasi aliran air tanah pada perangkat lunak ini menggunakan MODFLOW-2005 dengan persamaan pengatur (*governing equation*) sebagai berikut (Harbaugh, 2005):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \dots \dots \dots (1)$$

di mana:

K_{xx} , K_{yy} , dan K_{zz} : nilai konduktivitas hidraulik sepanjang sumbu x, y, dan z (L/T)

h : nilai *hydraulic head* (L)

W : fluks volumetrik per unit volume yang merepresentasikan penambahan atau pengurangan air (T⁻¹)

Ss : *specific storage* dari media berpori (L⁻¹)

t : waktu (T)

Adapun simulasi transportasi massa pada perangkat lunak Visual MODFLOW menggunakan MT3DMS dengan persamaan pengatur sebagai berikut (Zheng dan Wang, 1999):

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \dots \dots \dots (2)$$

di mana:

C^k : konsentrasi terlarut dari spesies k (ML⁻³)

θ : porositas media berpori

t : waktu (T)

x_i : jarak sepanjang sumbu koordinat kartesius (L)

D_{ij} : tensor koefisien dispersi hidrodinamik (L²T⁻¹)

v_i : kecepatan linear air pada pori (LT⁻¹)

q_s : laju aliran volumetrik per unit volume dari akuifer yang merepresentasikan penambahan atau pengurangan air (T⁻¹)

C_s^k : konsentrasi dari spesies k yang masuk atau keluar dari sistem (ML⁻³)

$\sum R_n$: parameter untuk reaksi kimia (ML⁻³T⁻¹)

Proses simulasi numerik yang dilakukan terdiri dari lima tahap, yaitu pembuatan model fisik, input data, simulasi aliran air tanah, simulasi transportasi massa, dan analisis sensitivitas. Model fisik untuk simulasi numerik ini dibuat berdasarkan data topografi dan data geologi (Gambar 2). Pembuatan model fisik tersebut diawali dengan penentuan jumlah dan ukuran grid dari model. Dalam studi ini, ukuran grid yang digunakan adalah 1×1 m² dengan jumlah grid sebanyak 62×50 buah (Gambar 3).

Data geologi digunakan untuk membagi lapisan tanah/batuan pada model fisik berdasarkan jenis litologinya. Berdasarkan data geologi tersebut, diperoleh model fisik 3D yang menunjukkan kondisi geologi di area studi (Gambar 4).

Tabel 1 Nilai parameter akuifer yang digunakan untuk simulasi numerik dalam studi ini

Litologi	Kh (m/s)	Kz (m/s)	Ss (m ⁻¹)	Sy	θ	α (m)
Tanah timbunan	3,57×10 ⁻⁶	1,93×10 ⁻⁶	3,7×10 ⁻⁴	0,056	0,3	5
Lapisan terkontaminasi	3,57×10 ⁻⁶	1,93×10 ⁻⁶	3,7×10 ⁻⁴	0,056	0,3	5
Pasir	3,57×10 ⁻⁶	1,93×10 ⁻⁶	3,7×10 ⁻⁴	0,056	0,3	5
Lempung pasiran	1×10 ⁻⁹	1×10 ⁻¹⁰	2×10 ⁻³	0,06	0,4	0,01
Lempung	1×10 ⁻¹⁰	1×10 ⁻¹¹	2×10 ⁻³	0,06	0,4	0,0001

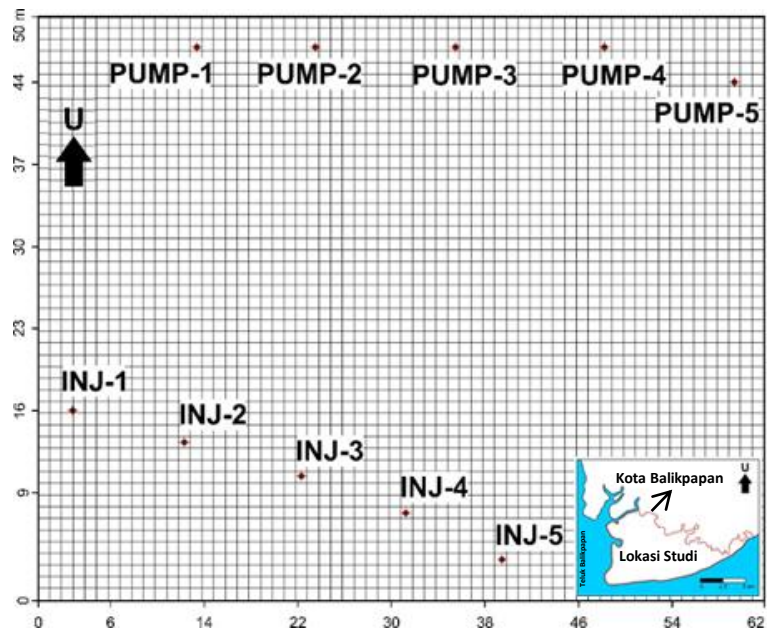
Setelah model fisik 3D tersebut selesai, maka tahap selanjutnya, yaitu input data pada model fisik tersebut berupa data parameter akuifer, muka air

tanah, konsentrasi zat kimia, dan kondisi batas. Kemudian, dilanjutkan dengan simulasi aliran air tanah dalam kondisi *steady state* dan *transient*

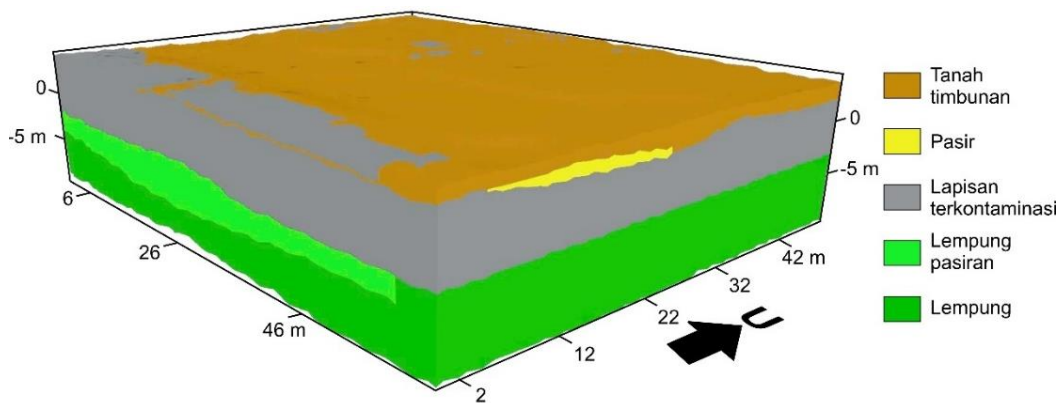
dengan menggunakan MODFLOW. Simulasi dalam kondisi *steady state* belum melibatkan proses injeksi dan pemompaan. Hasil simulasi aliran air tanah dalam kondisi *steady state* tersebut dibandingkan dengan muka air tanah pada titik pengeboran dengan asumsi bahwa muka air tanah tersebut berada dalam kondisi *steady state*. Jika hasil simulasi aliran air tanah dalam kondisi *steady state* sudah mendekati kondisi muka air tanah yang diukur, maka dapat dilanjutkan dengan simulasi aliran air tanah dalam kondisi *transient* yang melibatkan proses injeksi dan pemompaan. Setelah simulasi aliran air tanah selesai, maka dilanjutkan dengan simulasi transportasi massa dengan menggunakan MT3DMS. Karena keterbatasan data, maka simulasi transportasi massa dalam studi ini tidak melibatkan proses adsorpsi dan reaksi kimia di bawah permukaan, tetapi hanya melibatkan

proses dispersi. Simulasi aliran air tanah dan transportasi massa dalam studi ini dilakukan selama 10 tahun.

Tahap terakhir dalam simulasi numerik ini adalah analisis sensitivitas dengan melakukan simulasi aliran air tanah dan transportasi massa menggunakan sepuluh skenario. Analisis tersebut dilakukan terhadap parameter konduktivitas hidraulik dan dispersivitas dinamik akuifer tidak tertekan di area studi. Deskripsi dari masing-masing skenario tersebut dapat dilihat pada **Tabel 2**. Tujuan dari analisis sensitivitas ini adalah untuk mengetahui seberapa sensitif model yang dihasilkan terhadap kedua parameter tersebut dan hubungannya terhadap efektivitas remediasi air tanah yang dilakukan secara in situ.



Gambar 3 Grid dan lokasi sumur injeksi (kode: INJ) serta sumur pemompaan (kode: PUMP) pada area studi



Gambar 4 Model fisik 3D yang menunjukkan kondisi geologi di area studi

Tabel 2 Skenario simulasi numerik yang dilakukan dalam studi ini

No.	Skenario	Kh (m/s)	Kz (m/s)	α (m)
1	1	$3,57 \times 10^{-3}$	$1,93 \times 10^{-3}$	5
2	2	$3,57 \times 10^{-4}$	$1,93 \times 10^{-4}$	5
3	3	$3,57 \times 10^{-5}$	$1,93 \times 10^{-5}$	5
4	4	$3,57 \times 10^{-6}$	$1,93 \times 10^{-6}$	5
5	5	$3,57 \times 10^{-7}$	$1,93 \times 10^{-7}$	5
6	6	$3,57 \times 10^{-6}$	$1,93 \times 10^{-6}$	2
7	7	$3,57 \times 10^{-6}$	$1,93 \times 10^{-6}$	4
8	8	$3,57 \times 10^{-6}$	$1,93 \times 10^{-6}$	6
9	9	$3,57 \times 10^{-6}$	$1,93 \times 10^{-6}$	8
10	10	$3,57 \times 10^{-6}$	$1,93 \times 10^{-6}$	10

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Simulasi Numerik

Hasil simulasi aliran air tanah dalam kondisi *steady state* di area studi diperlihatkan pada **Gambar 5**. Hasil simulasi tersebut sudah cukup baik dimana kontur muka air tanah hasil simulasi sudah mendekati kontur muka air tanah awal berdasarkan data dari titik pengeboran. Secara umum, dalam kondisi *steady state*, air tanah pada area studi mengalir dari barat daya ke timur laut.

Hasil simulasi aliran air tanah dalam kondisi *transient* dapat dilihat pada **Gambar 6**. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa arah aliran air tanah berubah akibat proses remediasi yang dilakukan melalui sumur injeksi dan pemompaan, dimana secara umum air tanah bergerak dari sumur injeksi menuju sumur pemompaan.

Hasil simulasi transportasi massa diperlihatkan pada **Gambar 7**. Adapun hasil analisis sensitivitas diperlihatkan pada **Gambar 8** dan **Gambar 9**. **Gambar 7** tersebut menunjukkan sebaran konsentrasi NaOH di bawah permukaan. Konsentrasi NaOH yang paling tinggi berada di area sekitar sumur injeksi. Akibat pergerakan air tanah, konsentrasi NaOH menyebar hingga ke sumur pemompaan. **Gambar 9** menunjukkan bahwa NaOH yang diinjeksikan pertama kali tiba di sumur pemompaan PUMP-1, yang berjarak lebih kurang 33 m dari sumur INJ-1, setelah 124 hari.

Waktu terlama untuk NaOH tiba di sumur pemompaan ditemukan pada sumur pemompaan PUMP-5 yang berjarak sekitar 46 m dari sumur INJ-5, yaitu selama 300 hari. Konsentrasi NaOH pada sumur pemompaan yang sama dengan konsentrasi NaOH yang diinjeksikan hanya ditemukan pada

sumur PUMP-3 dan PUMP-4. Pada kedua sumur tersebut, dibutuhkan waktu yang cukup lama, yaitu 5,6 hingga 8,4 tahun agar konsentrasi NaOH mencapai 5.000 mg/L.

Hasil analisis sensitivitas (**Gambar 8**) berdasarkan skenario pada Tabel 2 memperlihatkan bahwa model simulasi numerik dalam studi ini sensitif terhadap parameter konduktivitas hidraulik dan dispersivitas dinamik. Secara umum, semakin kecil nilai konduktivitas hidraulik dan dispersivitas dinamik lapisan akuifer, maka akan semakin lama waktu yang dibutuhkan oleh NaOH yang diinjeksikan untuk tiba di sumur pemompaan. Sebagai contoh, pada sumur pemompaan PUMP-1 dan PUMP-5, jika nilai konduktivitas hidraulik akuifer diperbesar sepuluh kali (skenario 3; $K_h=3,57 \times 10^{-5}$ m/s; $K_v=1,93 \times 10^{-5}$ m/s; $\alpha=5$ m), maka dibutuhkan waktu masing-masing selama 84 dan 172 hari agar NaOH yang diinjeksikan tiba di kedua sumur tersebut. Ketika nilai konduktivitas hidraulik diperkecil sepuluh kali (skenario 5; $K_h=3,57 \times 10^{-7}$ m/s; $K_v=1,93 \times 10^{-7}$ m/s; $\alpha=5$ m), maka dibutuhkan waktu selama 304 dan 596 hari agar NaOH yang diinjeksikan tiba di sumur PUMP-1 dan PUMP-5. Pada skenario 3, dibutuhkan waktu selama 2,8 hingga 4,1 tahun agar konsentrasi NaOH pada sumur PUMP-3 dan PUMP-4 mencapai 5.000 mg/L, sedangkan pada skenario 5 konsentrasi NaOH pada kedua sumur tersebut tidak akan mencapai 5.000 mg/L hingga waktu akhir simulasi, yaitu 10 tahun.

Untuk parameter dispersivitas dinamik, pada skenario 6 ($K_h=3,57 \times 10^{-6}$ m/s; $K_v=1,93 \times 10^{-6}$ m/s; $\alpha=2$ m) dibutuhkan waktu selama 207 dan 475 hari agar NaOH yang diinjeksikan tiba di sumur PUMP-1 dan PUMP-5. Sedangkan pada skenario 10 ($K_h=3,57 \times 10^{-6}$ m/s; $K_v=1,93 \times 10^{-6}$ m/s; $\alpha=10$ m), hanya dibutuhkan waktu selama 75 dan 189 hari agar NaOH yang diinjeksikan tiba di kedua sumur tersebut. Pada skenario 6, dibutuhkan waktu selama 4,8 hingga 6,3 tahun agar konsentrasi NaOH pada sumur PUMP-3 dan PUMP-4 mencapai 5.000 mg/L, sedangkan pada skenario 10 konsentrasi NaOH sebesar 5.000 mg/L hanya ditemukan pada sumur PUMP-4, setelah injeksi selama 6,8 tahun.

Secara hidrogeologi, akuifer di area studi tidak ekonomis untuk dieksploitasi atau tidak dapat dipompa dengan debit yang besar karena memiliki nilai transmisivitas (perkalian antara konduktivitas hidraulik dan ketebalan akuifer) yang kecil. Berdasarkan Freeze dan Cherry, (1979), akuifer yang ekonomis untuk dieksploitasi memiliki nilai transmisivitas lebih besar dari 0,015 m²/s.

Dengan membagi nilai transmisivitas tersebut terhadap nilai konduktivitas hidraulik akuifer di area studi, maka dibutuhkan ketebalan lapisan akuifer hingga empat km untuk memperoleh nilai

transmisivitas tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa nilai konduktivitas hidraulik akuifer di area studi tergolong sangat kecil jika dibandingkan dengan ketebalannya untuk dapat menghasilkan nilai transmisivitas lebih dari 0,015 m²/s.

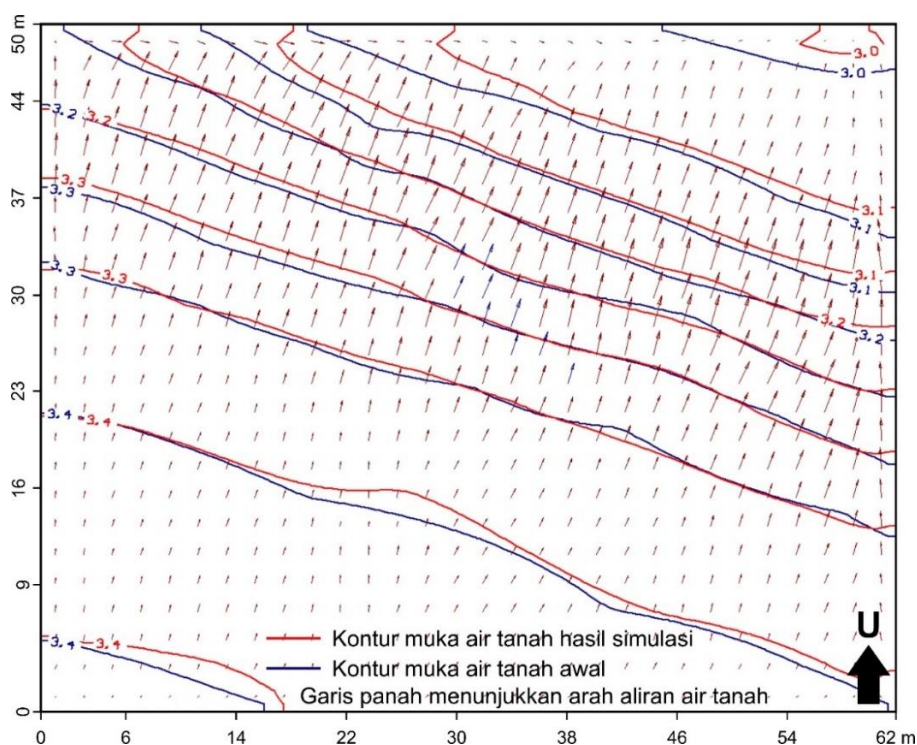
Hasil simulasi numerik dan analisis sensitivitas menunjukkan bahwa nilai konduktivitas hidraulik dan dispersivitas dinamik sangat mempengaruhi efektivitas remediasi air tanah secara in situ. Jika nilai konduktivitas hidraulik dan dispersivitas lapisan akuifer kecil, maka akan dibutuhkan waktu yang lama agar NaOH tiba di sumur pemompaan (**Gambar 10**) yang juga menunjukkan bahwa akan dibutuhkan waktu yang lama untuk memulihkan kondisi air tanah yang tercemar pada akuifer tersebut. Kd pada gambar tersebut menunjukkan perbandingan nilai konduktivitas hidraulik yang digunakan terhadap data konduktivitas hidraulik (K) yang tersedia pada **Tabel 1**, sedangkan α menunjukkan nilai dispersivitas yang digunakan.

Di Indonesia, belum ada penelitian yang mengkaji secara komprehensif mengenai remediasi air tanah secara in situ, termasuk pengaruh nilai parameter konduktivitas hidraulik dan dispersivitas dinamik terhadap efektivitas proses remediasi air tanah. Oleh karena itu, hasil penelitian ini telah menunjukkan bahwa kedua parameter tersebut berperan sangat penting dalam menentukan efektivitas proses remediasi air tanah secara in situ, dalam hal ini yaitu waktu remediasi yang dibutuhkan.

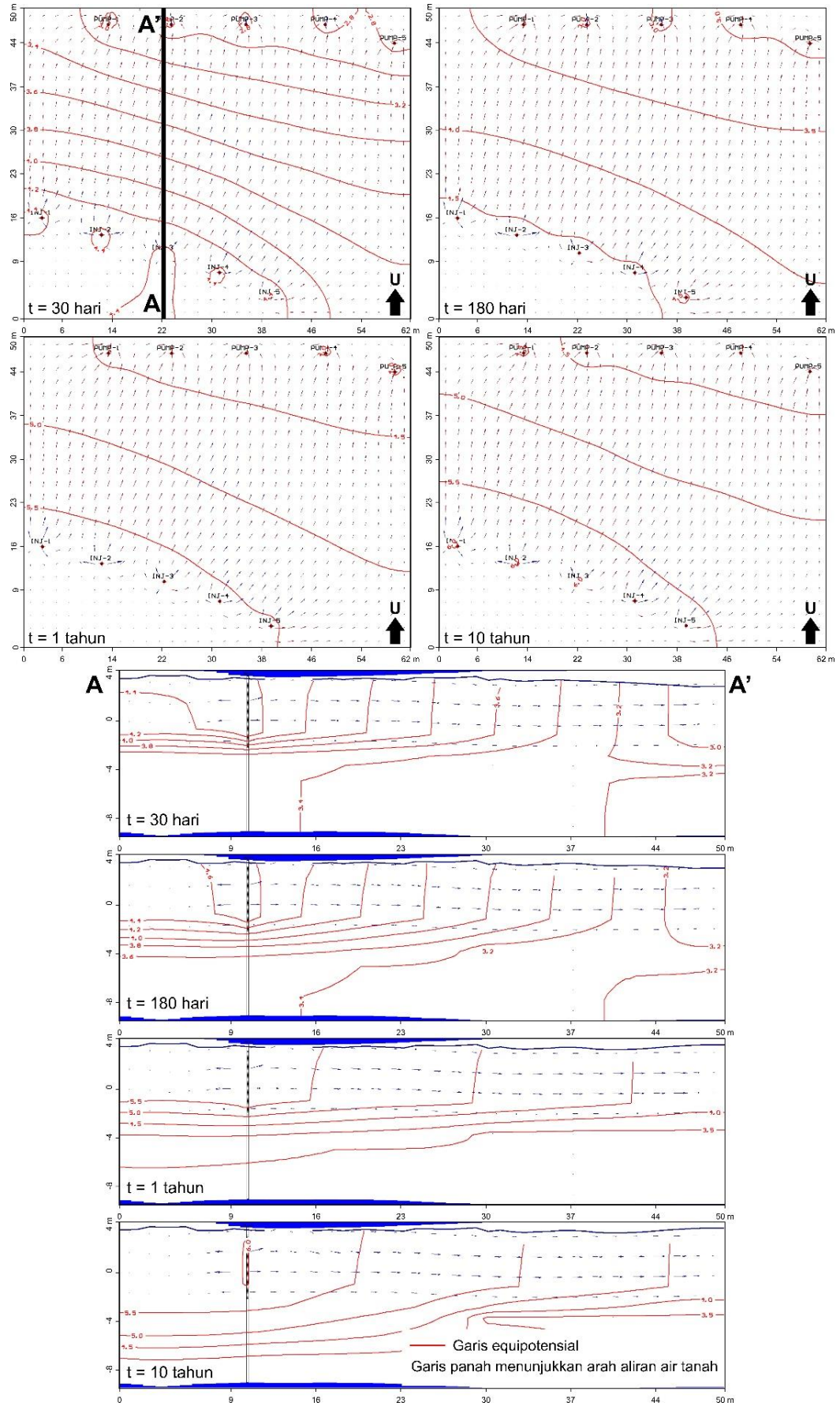
Limitasi

Limitasi dari simulasi numerik ini terutama adalah terbatasnya data parameter akuifer, dimana data parameter akuifer yang digunakan hanya berasal dari dua uji pemompaan (*pumping test*). Lapisan tanah/batuan di alam bersifat heterogen dan anisotropis. Oleh karena itu, dibutuhkan data parameter akuifer yang lebih banyak agar simulasi numerik remediasi air tanah secara in situ pada studi ini dapat dilakukan dengan lebih baik. Selain itu, nilai parameter akuifer juga perlu diuji dengan metode lain selain uji pemompaan, misalnya *slug test*, *piezometer test*, dan uji sampel tanah/batuan di laboratorium menggunakan permeameter sebagai perbandingan. Nilai parameter dispersivitas dinamik dari lapisan akuifer di area studi juga belum diketahui. Dengan demikian, perlu dilakukan pengujian nilai dari parameter tersebut, misalnya dengan *tracer test* di lapangan.

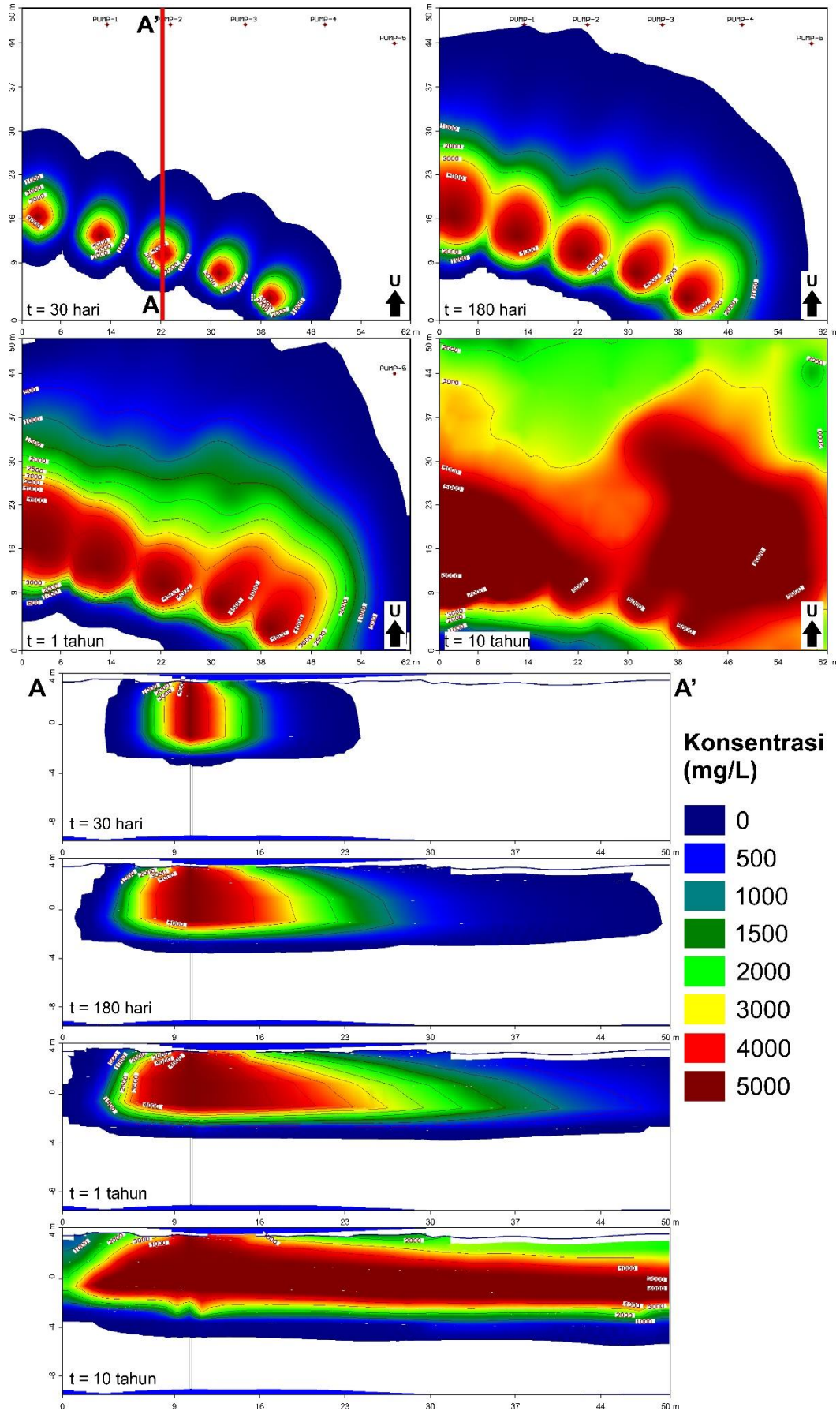
Jika hanya digunakan 5 sumur injeksi dan 5 sumur pemompaan, maka remediasi air tanah secara in situ di area studi tidak akan berjalan secara efektif karena akan membutuhkan waktu yang cukup lama agar NaOH tiba di sumur pemompaan, yaitu 124 hingga 300 hari. Untuk mempercepat waktu remediasi, maka diperlukan jumlah sumur injeksi dan pemompaan yang lebih banyak dengan jarak antar sumur yang lebih dekat.



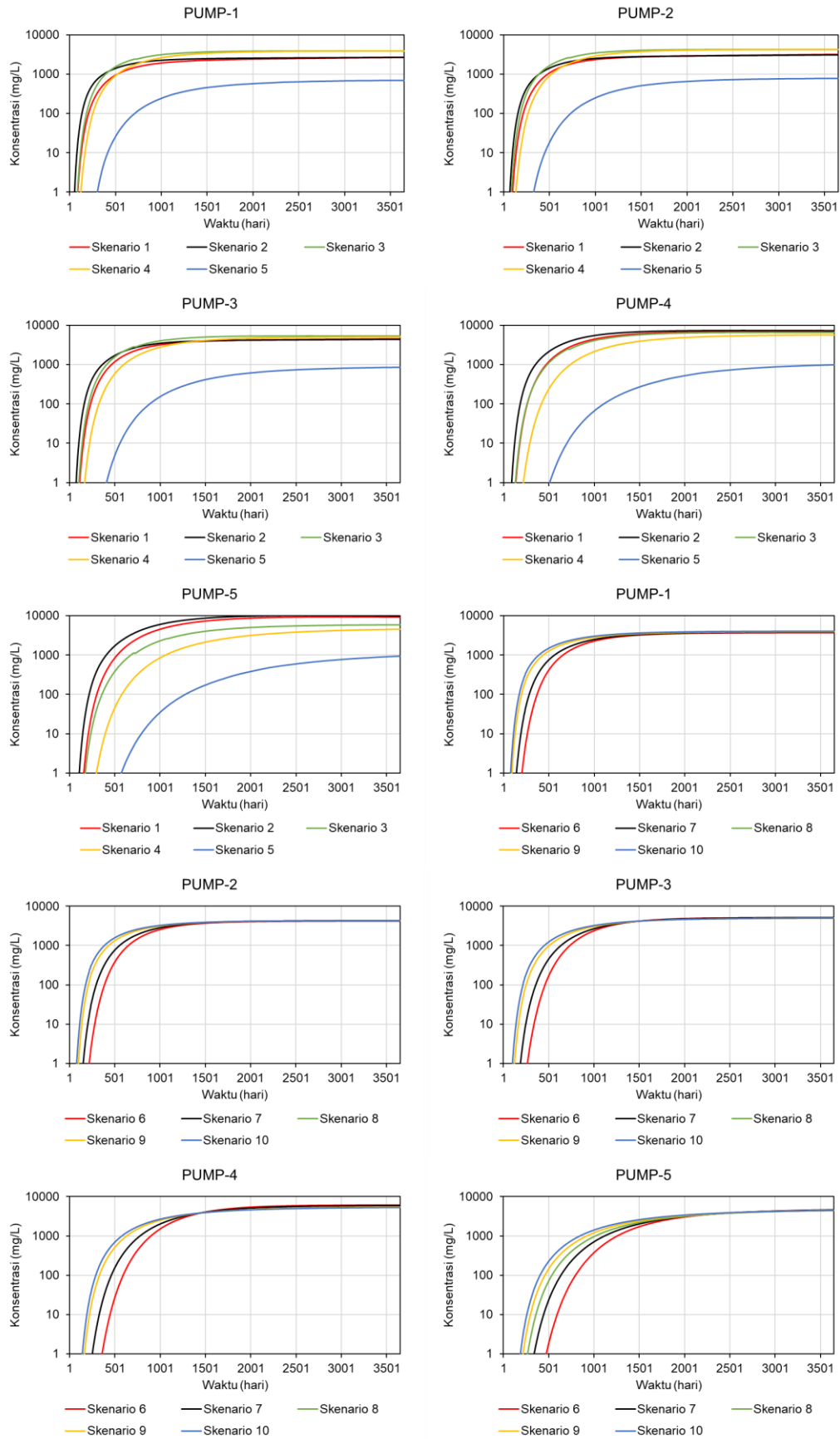
Gambar 5 Hasil simulasi aliran air tanah dalam kondisi *steady state*



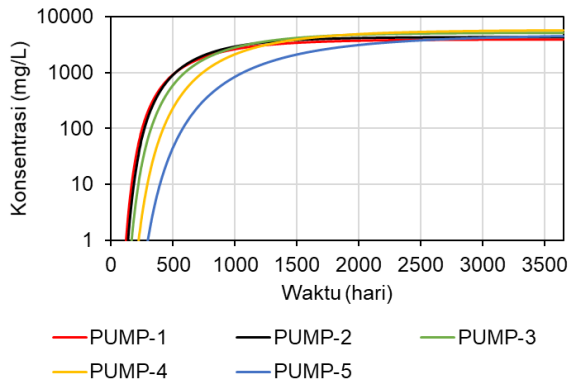
Gambar 6 Hasil simulasi aliran air tanah dalam kondisi *transient*



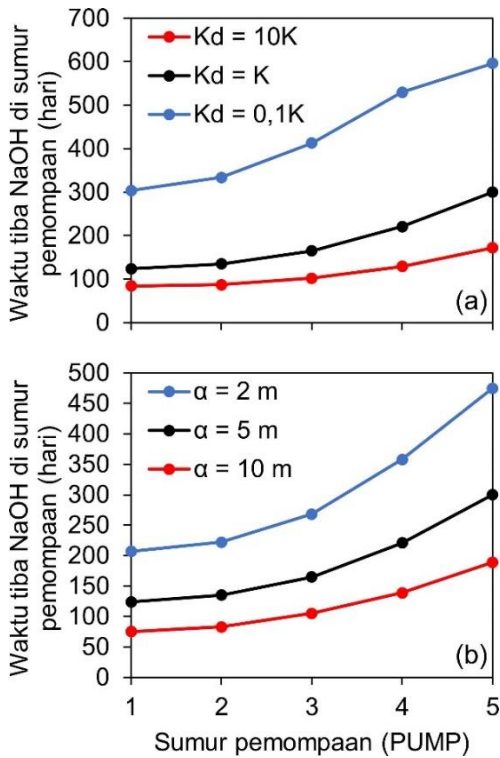
Gambar 7 Hasil simulasi yang menunjukkan sebaran konsentrasi NaOH



Gambar 8 Perubahan konsentrasi NaOH pada masing-masing sumur pemompaan terhadap waktu berdasarkan hasil analisis sensitivitas (**Tabel 2**)



Gambar 9 Perubahan konsentrasi NaOH pada sumur pemompaan terhadap waktu sesuai dengan data pada Tabel 1



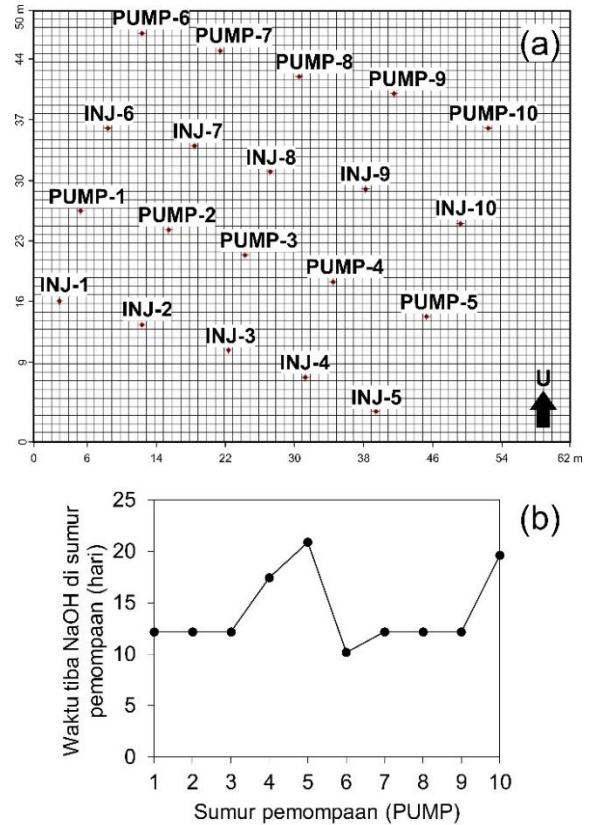
Gambar 10 Waktu yang dibutuhkan agar NaOH tiba di masing-masing sumur pemompaan untuk nilai konduktivitas hidraulik (K_d , K) dan dispersivitas dinamik (α) yang berbeda

Gambar 11 menunjukkan bahwa jika jumlah sumur injeksi dan pemompaan yang digunakan masing-masing sebanyak 10 buah dengan jarak antar sumur lebih kurang 10 m, maka dibutuhkan waktu sekitar 10 hingga 21 hari agar NaOH yang diinjeksikan tiba di sumur pemompaan. Dengan demikian, proses remediasi air tanah secara in situ akan berlangsung dengan lebih cepat.

Rekomendasi

Dalam studi ini, untuk meningkatkan efektivitas proses remediasi air tanah secara *in situ*, maka

jumlah sumur injeksi dan pemompaan perlu ditambah dengan jarak antar sumur yang relatif dekat, yaitu sekitar 10 meter, agar NaOH tiba di sumur pemompaan dengan lebih cepat. Dengan demikian, diharapkan proses remediasi air tanah akan berlangsung lebih cepat.



Gambar 11 (a) Jumlah dan lokasi sumur pemompaan (kode PUMP) dan injeksi (kode INJ) agar proses remediasi berlangsung lebih cepat; (b) waktu tiba NaOH pada masing-masing sumur pemompaan

KESIMPULAN

Dalam studi ini, remediasi air tanah secara in situ dengan cara menginjeksikan air yang mengandung NaOH ke bawah permukaan sangat dipengaruhi oleh nilai parameter konduktivitas hidraulik dan dispersivitas dinamik. Secara hidrogeologi, akuifer di area studi merupakan akuifer tidak tertekan yang tersusun atas lapisan tanah timbunan, pasir, dan lapisan terkontaminasi. Nilai konduktivitas hidraulik akuifer tersebut tergolong kecil sehingga dibutuhkan waktu yang lama 124 hingga 300 hari agar NaOH yang diinjeksikan tiba di sumur pemompaan.

Jika nilai konduktivitas hidraulik akuifer tersebut sepuluh kali lebih besar, maka waktu yang dibutuhkan menjadi lebih singkat, yaitu 84 hingga 172 hari. Sementara itu, jika nilai dispersivitas dinamik akuifer dua kali lebih besar, maka waktu

yang dibutuhkan juga lebih singkat, yaitu 75 dan 189 hari. Hasil tersebut menunjukkan bahwa remediasi air tanah secara in situ efektif diaplikasikan pada area dengan akuifer yang memiliki nilai konduktivitas hidraulik dan dipersivitas dinamik yang tinggi. Pada area studi, dibutuhkan sumur injeksi dan pemompaan masing-masing sebanyak 10 buah dengan jarak antar sumur lebih kurang 10 m agar proses remediasi air tanah secara insitu dapat berlangsung lebih cepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Batu, V., (1998). *Aquifer hydraulics : a comprehensive guide to hydrogeologic data analysis*. Wiley.
- Ceconet, D., Sabba, F., Devecseri, M., Callegari, A., Capodaglio, A.G., (2020). In situ groundwater remediation with bioelectrochemical systems: A critical review and future perspectives. *Environ. Int.* 137, 105550.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2020.105550>
- Ciampi, P., Esposito, C., Cassiani, G., Deidda, G.P., Rizzetto, P., Papini, M.P., (2021). A field-scale remediation of residual light non-aqueous phase liquid (LNAPL): chemical enhancers for pump and treat. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021 2826 28, 35286–35296.
<https://doi.org/10.1007/S11356-021-14558-2>
- Domenico, P.A., Schwartz, F.W., (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology*, 2nd ed., New York. Wiley.
- Fetter, C.W., (2001). *Applied Hydrogeology*, 4th ed. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River.
- Freeze, R., Cherry, J.A., (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- Harbaugh, A.W., (2005). *MODFLOW-2005 : the U.S. Geological Survey modular ground-water model--the ground-water flow process*. Tech. Methods 6-A16.
<https://doi.org/10.3133/TM6A16>
- Hidayat, S., Umar, L., (1994). *Peta Geologi Lembar Balikpapan, Kalimantan*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi,.
- Hyldegaard, B.H., Jakobsen, R., Weeth, E.B., Overheu, N.D., Gent, D.B., Ottosen, L.M., (2019). Challenges in electrochemical remediation of chlorinated solvents in natural groundwater aquifer settings. *J. Hazard. Mater.* 368, 680–688.
<https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2018.12.064>
- Margono, B., (1995). *Peta Hidrogeologi Indonesia Lembar Balikpapan*. Bandung: Direktorat Geologi Tata Lingkungan.
- Ossai, I.C., Ahmed, A., Hassan, A., Hamid, F.S., (2020). Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. *Environ. Technol. Innov.* 17, 100526.
<https://doi.org/10.1016/J.ETI.2019.100526>
- Rezaei, H., Bozorg-Haddad, O., Loáiciga, H.A., (2017). Effect of Hydraulic Conductivity Uncertainty on In Situ Bioremediation of Groundwater Contaminated with Dissolved Petroleum Hydrocarbons. *J. Irrig. Drain. Eng.* 143, 04017049.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001252](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001252)
- Rochaddi, B., Atmodjo, W., Satriadi, A., Suryono, C.A., Irwani, I., Widada, S., (2019). The Heavy Metal Contamination in Shallow Groundwater at Coastal Areas of Surabaya East Java Indonesia. *J. Kelaut. Trop.* 22, 69–72.
<https://doi.org/10.14710/JKT.V22I1.4464>
- Siregar, S., Kiswiranti, D., (2020). Analisis Kualitas Air Tanah Akibat Pengaruh Sungai Klampok yang Tercemar Limbah Industri di Kecamatan Bergas Semarang Jawa Tengah. *J. Mns. dan Lingkung.* 26, 36–41.
<https://doi.org/10.22146/JML.39962>
- Trulli, E., Morosini, C., Rada, E.C., Torretta, V., (2016). Remediation in Situ of Hydrocarbons by Combined Treatment in a Contaminated Alluvial Soil due to an Accidental Spill of LNAPL. *Sustain.* 2016, Vol. 8, Page 1086 8, 1086.
<https://doi.org/10.3390/SU8111086>
- Wagner, B.J., Gorelick, S.M., (1989). Reliable aquifer remediation in the presence of spatially variable hydraulic conductivity: From data to design. *Water Resour. Res.* 25, 2211–2225.
<https://doi.org/10.1029/WR025I010P02211>
- Widiyanto, A., Widiyanto, A.F., Yuniarno, S., Kuswanto, K., (2015). Polusi Air Tanah Akibat Limbah Industri dan Limbah Rumah Tangga. *KEMAS J. Kesehat. Masy.* 10, 246–254.
<https://doi.org/10.15294/kemas.v10i2.3388>
- Zhang, C., (2020). *Soil and groundwater remediation : fundamentals, practices and sustainability*. Wiley, Hoboken, NJ.
- Zheng, C., Wang, P.P., (1999). *MT3DMS : a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide*, U.S. Army Corps of Engineers. U.S. Army Engineer Research and Development Center.