

ANALISIS POTENSI SEBARAN KONTAMINAN LINDI TPA TAMBAKRIGADUNG TERHADAP AIR TANAH MENGGUNAKAN MODFLOW DAN MT3DMS

Mutiara Ulin Ni'mah¹, Dedy Suprayogi², Abdul Hakim³, Shinfi Wazna Auvaria⁴, dan Nihlatul Falasifah⁵

¹Prodi Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Ampel, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno No.682 Surabaya

Email: mutiaraulin1@gmail.com

²Prodi Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Ampel, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno No.682 Surabaya

Email: dsuprayogi@uinsa.ac.id

³Prodi Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Ampel, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno No.682 Surabaya

Email: abdul.hakim@uinsa.ac.id

⁴Prodi Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Ampel, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno No.682 Surabaya

Email: shinfiwazna@uinsa.ac.id

⁵Prodi Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Ampel, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno No.682 Surabaya

Email: nihlatul.falasifah@uinsa.ac.id

ABSTRACT

Population growth, economic development, and improved public welfare in Indonesia have led to a significant increase in domestic waste generation. In Lamongan Regency, this condition has directly contributed to the growing amount of waste disposed of at the Tambakrigadung Landfill. The accumulation of large volumes of waste produces leachate, a dark-colored liquid formed through rainwater infiltration and the decomposition of organic matter. This leachate contains various hazardous pollutants, including heavy metals such as mercury (Hg) and cadmium (Cd), which can contaminate soil and groundwater. This study aims to analyze the potential distribution of leachate contaminants using GIS-based MODFLOW and MT3DMS modeling, as the first application at the Tambakrigadung Landfill. Model parameters were derived from primary and secondary data, assuming a single saturated aquifer and steady-state flow conditions. Simulations were carried out over 25 years to map groundwater flow directions and contaminant distribution patterns. The MODFLOW simulation results indicate a dominant groundwater flow direction from south to north, while MT3DMS results show that after 25 years, Hg contaminants spread approximately 112 meters with a final concentration below 0.005 mg/L, and Cd spread about 107 meters with a concentration below 0.021 mg/L. The very low RMSE values (Hg = 0.0006; Cd = 0.0002) indicate a high level of model accuracy in representing actual field conditions.

Keywords: Leachate, Groundwater, MODFLOW, MT3DMS

ABSTRAK

Pertumbuhan penduduk, aktivitas ekonomi, dan peningkatan kesejahteraan masyarakat di Indonesia menyebabkan peningkatan signifikan volume sampah domestik. Di Kabupaten Lamongan, hal ini berdampak langsung pada peningkatan timbulan sampah yang dibuang ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Tambakrigadung. Timbunan sampah dalam jumlah besar menghasilkan lindi, yaitu cairan berwarna gelap yang terbentuk akibat infiltrasi air hujan dan proses dekomposisi bahan organik. Lindi ini mengandung berbagai zat pencemar berbahaya, termasuk logam berat seperti merkuri (Hg) dan kadmium (Cd), yang dapat mencemari tanah dan air tanah. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi sebaran kontaminan lindi menggunakan pemodelan MODFLOW dan MT3DMS berbasis GIS, sebagai penerapan pertama di TPA Tambakrigadung. Parameter model ditentukan dari data primer dan sekunder, dengan asumsi satu lapisan akuifer jenuh dan kondisi aliran tunak (*steady state*). Simulasi dilakukan untuk periode 25 tahun mendatang guna memetakan arah aliran air tanah serta pola sebaran kontaminan. Hasil simulasi MODFLOW menunjukkan arah aliran air tanah dominan dari selatan ke utara. Berdasarkan hasil MT3DMS, pada tahun ke-25 kontaminan Hg menyebar hingga ±112 meter

dengan konsentrasi akhir $<0,005$ mg/L, sementara Cd mencapai ± 107 meter dengan konsentrasi $<0,021$ mg/L. Nilai RMSE yang sangat rendah (Hg = 0,0006; Cd = 0,0002) menunjukkan tingkat akurasi model yang tinggi terhadap kondisi aktual di lapangan.

Kata kunci: Lindi, Air Tanah, MODFLOW, MT3DMS

1. PENDAHULUAN

Pesatnya pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi di berbagai daerah di Indonesia menyebabkan peningkatan tajam dalam jumlah sampah domestik yang dihasilkan. Peningkatan kesejahteraan dan perkembangan masyarakat turut berpengaruh pada bertambahnya volume sampah (Chalid, 2022). Jumlah sampah yang menumpuk berbanding lurus dengan produksi air lindi di TPA, di mana semakin besar timbunan sampah, semakin besar pula potensi terbentuknya lindi, terutama saat terjadi kontak dengan air hujan dan kelembaban udara (Wang dkk., 2018). Oleh karena itu, pengelolaan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) sampah menjadi salah satu tantangan utama dalam menjaga kualitas lingkungan, khususnya terkait pencemaran air tanah akibat lindi.

Lindi atau *leachate* adalah cairan yang terbentuk ketika air masuk ke dalam tumpukan sampah dan membawa zat terlarut maupun partikel tersuspensi hasil dari proses dekomposisi sampah. Lindi bersifat beracun dan dapat meresap ke dalam lapisan tanah dangkal, kemudian bercampur dengan air tanah sehingga menimbulkan pencemaran langsung pada sumber air tersebut (Sari & Afdal, 2017). Air tanah dangkal berada pada lapisan pertama yang kedap air dan terletak dekat dengan permukaan tanah, sehingga rentan terhadap kontaminasi dari berbagai sumber seperti rembesan limbah dari TPA, kotoran manusia, hewan, dan bahan pencemar lainnya (Ameilia, 2018). Lindi mengandung berbagai zat pencemar berbahaya, termasuk logam berat merkuri (Hg) dan kadmium (Cd) yang berasal dari jenis sampah yang masuk ke TPA. Sumber pencemaran merkuri (Hg) dan kadmium (Cd) yang umum meliputi limbah alat elektronik, peralatan laboratorium, baterai, korosi pada pipa air, serta air limpasan dari lahan pertanian yang menggunakan pupuk fosfat mengandung kadmium (Fadhila & Purwanti, 2022). Sifat toksik yang dimiliki lindi dapat merusak ekosistem dan membahayakan kesehatan manusia, sehingga diperlukan pengolahan yang baik sebelum keluar dari TPA. Oleh karena itu, pemahaman tentang pola aliran air tanah dan sebaran kontaminan lindi di sekitar TPA sangat penting untuk mendukung upaya mitigasi pencemaran dan pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.

Pemodelan aliran air tanah dan transport pencemar merupakan metode efektif untuk memprediksi penyebaran kontaminan dan menentukan zona risiko di sekitar sumber pencemar. Model berfungsi sebagai alat manajemen yang efisien dalam studi akuifer serta tekanan hidrogeologi dan hidrologi. Keunggulan utama dari pemodelan ini adalah kemampuannya dalam melakukan prediksi terhadap kondisi di masa mendatang. Melalui pendekatan ini, berbagai skenario pengelolaan dapat diuji dengan penggunaan sumber daya dan biaya yang minimal (Afzali & Shahedi, 2023).

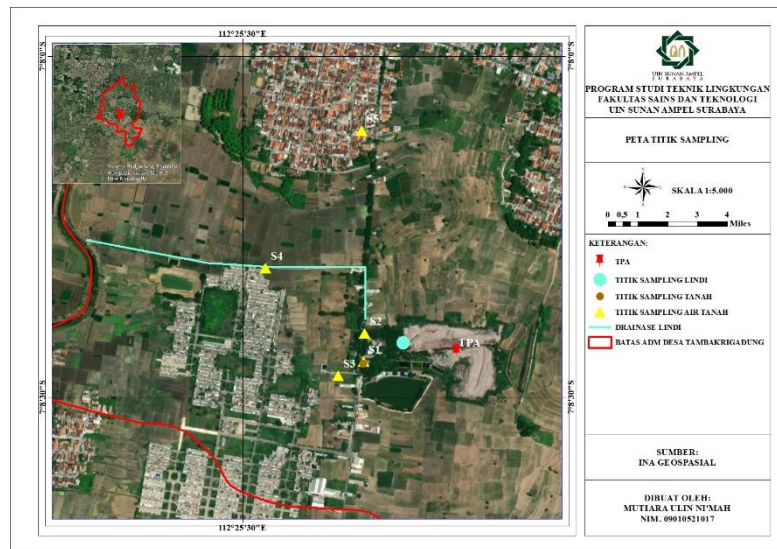
GMS (*Groundwater Modeling System*) adalah aplikasi pemodelan air tanah untuk membangun dan mensimulasikan model air tanah dari Aquaveo. Model MODFLOW dan MT3DMS telah banyak digunakan dalam studi hidrogeologi untuk mensimulasikan aliran air tanah dan pergerakan zat pencemar secara kuantitatif. MODFLOW dikenal sebagai model numerik aliran air tanah tiga dimensi berbasis metode beda hingga, yang dikembangkan oleh *U.S. Geological Survey* (McDonald & Harbaugh, 1988). Model ini bekerja berdasarkan gabungan hukum Darcy dan prinsip keseimbangan massa, baik untuk kondisi tetap maupun transien (Aghlmand & Abbasi, 2019). Sementara itu, MT3DMS digunakan untuk memecahkan persamaan adveksi-dispersi-reaksi dalam sistem aliran air tanah dengan berbagai kondisi hidrogeologi umum (Chowdhury & Rahnuma, 2023). Namun, keberhasilan pemodelan sangat bergantung pada akurasi data input dan proses kalibrasi model terhadap data observasi di lapangan (Zatlaković dkk., 2023).

Dalam penelitian ini, pemodelan berbasis MODFLOW dan MT3DMS diterapkan pada TPA Tambakrigadung untuk menganalisis arah aliran air tanah dan potensi sebaran kontaminan lindi secara spasial dan temporal, dengan fokus pada parameter logam berat merkuri (Hg) dan kadmium (Cd). Hasil dari pemodelan ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengambilan keputusan terkait mitigasi risiko pencemaran dan pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.

2. METODE

Tempat dan waktu penelitian

Penelitian dilakukan di TPA Tambakrigadung, Lamongan pada April 2025. Sampel lindi diambil dari titik dengan muka air tinggi dan kontak langsung dengan tanah. Air tanah diambil dari 2 sumur pantau TPA dan 3 sumur warga dalam radius 200 – 600 m. Teknik pengambilan menggunakan *systematic sampling* (Sugiyono, 2013). Selain itu, sampel tanah diambil pada kedalaman ± 1 m di hulu TPA untuk memperoleh tanah belum terkontaminasi. Peta titik sampling ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Peta Titik Sampling

Prosedur penelitian dan pengolahan data

Prosedur pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan secara sistematis untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan dalam penyusunan model aliran dan transport kontaminan. Data yang digunakan terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer diperlukan di antaranya karakteristik lindi dan kualitas air tanah dengan parameter Hg (SNI 6989-78:2019) dan Cd (SNI 06-6989.38- 2005), data karakteristik tanah meliputi nilai laju infiltrasi (SNI 7752:2012), tekstur tanah (Metode pipet), dan permeabilitas (ASTM D-5084). Sedangkan, data sekunder diperoleh dari instansi terkait meliputi luas area TPA, debit lindi, peta lokasi studi dan peta topografi wilayah.

Pengolahan data dilakukan melalui pemodelan aliran air tanah menggunakan MODFLOW dan simulasi transport kontaminan dengan MT3DMS. MODFLOW memodelkan aliran berdasarkan hukum Darcy dan prinsip kekekalan massa yang dinyatakan dalam persamaan diferensial parsial berikut ((Freeze & Cherry, 1979 dalam Kanmani dkk., 2022):

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

dengan, S_s = penyimpanan spesifik (1/L), h = waktu tekanan hidrolis (L). K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} = konduktivitas hidrolis (L/T) dalam arah xyz, dan W = discharge/recharge area (1/T).

Setelah simulasi aliran selesai, hasil *head* dan fluks dari MODFLOW digunakan oleh MT3DMS untuk memodelkan adveksi, dispersi, dan reaksi kimia kontaminan terlarut dengan persamaan:

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

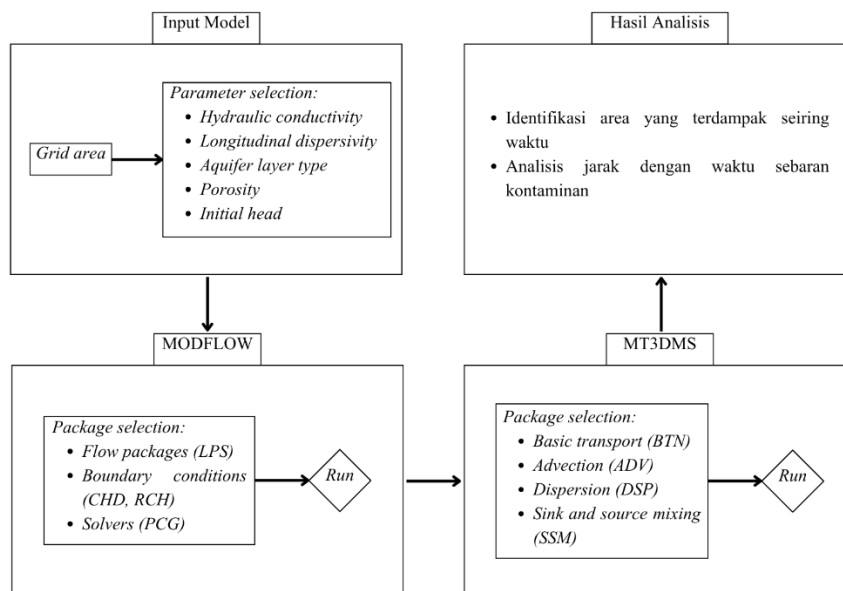
dengan, C^k = konsentrasi terlarut spesies k , θ = porositas media bawah permukaan tak berdimensi, t = waktu, x_i = jarak di sepanjang sumbu masing-masing koordinat cartesian, D_{ij} = tensor koefisien dispersi hidrodinamik, v_i = kecepatan rembesan atau linier air pori, q_s = laju aliran volumetric per satuan volume akuifer yang mewakili fluida sumber (positif) dan tenggelam (negatif), C_s^k = konsentrasi fluks sumber atau *sink* untuk spesies k , dan $\sum R_n$ = istilah reaksi kimia.

Simulasi prediktif dilakukan untuk memproyeksikan sebaran kontaminan selama 1, 5, 10, dan 25 tahun ke depan di sekitar TPA Tambakrigadung. Kalibrasi model dilakukan dengan menghitung *Root Mean Square Error* (RMSE) antara hasil simulasi dan data observasi:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_m - x_s)^2} \tag{3}$$

dengan, n = jumlah sampel, x_m = data lapangan, dan x_s = data model.

Diagram alir model ditunjukkan pada **Gambar 2** berikut ini.



Gambar 2. Diagram Alir Model

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik lindi

Informasi mengenai karakteristik lindi merupakan salah satu data krusial dalam tahap analisis. Karakteristik tersebut diasumsikan sebagai konsentrasi awal (C_0) dalam proses pemodelan (Karami, 2022). Analisis karakteristik lindi bertujuan untuk mengidentifikasi komposisi kimia dari cairan hasil dekomposisi sampah di TPA Tambakrigadung yang berpotensi mencemari air tanah. Parameter yang dianalisis meliputi logam berat merkuri (Hg) dan kadmium (Cd). Hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil Analisis Karakteristik Lindi

Parameter	Nilai	Baku Mutu*	Satuan	Keterangan
Hg	0,0052	0,005	mg/L	Melebihi
Cd	0,021	0,1	mg/L	Memenuhi

Keterangan:

(*) Baku Mutu: PERMEN LHK No. 59 Tahun 2016

Berdasarkan **Tabel 1**, diketahui hasil analisis karakteristik lindi menunjukkan konsentrasi logam berat Cd terukur sebesar 0,021 mg/L, dimana masih jauh di bawah baku mutu (0,1 mg/L), menunjukkan bahwa keberadaan kadmium belum menjadi ancaman utama. Sebaliknya, kadar merkuri (Hg) mencapai 0,0052 mg/L, yang sedikit melampaui ambang batas 0,005 mg/L. Hal ini menjadi perhatian serius mengingat sifat toksik dan bioakumulatif Hg, yang berpotensi mengganggu kesehatan manusia dan ekosistem perairan meskipun dalam konsentrasi kecil. Komposisi lindi dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti jenis sampah yang ditimbun, banyaknya curah hujan di area TPA, dan kondisi spesifik lokasi pembuangan (Widyatama, 2021). Berdasarkan hasil observasi data komposisi sampah pada TPA Tambakrigadung didominasi oleh sampah makanan, sedangkan sampah dengan jenis logam merupakan komposisi yang paling sedikit.

Kualitas air tanah

Kualitas air tanah di sekitar TPA Tambakrigadung dianalisis untuk mengetahui sejauh mana keberadaan lindi memengaruhi kondisi sumur gali milik warga. Analisis kandungan logam berat seperti merkuri (Hg) dan kadmium (Cd) menjadi penting karena kedua unsur ini termasuk dalam kelompok logam berat toksik yang bersifat persisten dan bioakumulatif, serta dapat membahayakan kesehatan manusia dan ekosistem jika melebihi ambang batas. Hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Hasil Analisis Kualitas Air Tanah

Parameter	Hasil Uji					Baku Mutu*	Satuan	Keterangan
	S1	S2	S3	S4	S5			
Hg	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	0,001	mg/L	Memenuhi

Parameter	Hasil Uji					Baku Mutu*	Satuan	Keterangan
	S1	S2	S3	S4	S5			
Cd	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0,003	mg/L	Memenuhi

Keterangan:

(*) Baku Mutu: Peraturan Menteri Kesehatan RI Nomor 2 Tahun 2023

S1: Sumur pantau TPA 1

S2: Sumur pantau TPA 2

S3: Sumur warga (200 m dari TPA)

S4: Sumur warga (400 m dari TPA)

S5: Sumur warga (600 m dari TPA)

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada **Tabel 2**, baik sumur pantau di TPA maupun sumur milik warga, diketahui bahwa kadar logam Hg dan Cd masih berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 2 Tahun 2023. Hal ini menunjukkan bahwa pada saat pengambilan sampel, belum terdeteksi pencemaran logam berat yang signifikan ke dalam lapisan air tanah. Potensi pencemaran air tanah dapat dipengaruhi oleh jenis tanah dan curah hujan yang berperan dalam pergerakan polutan/kontaminan (Moelyaningrum & Pujiati, 2015). Namun demikian, mengingat karakteristik logam berat yang dapat terakumulasi dalam lingkungan dan organisme, pemantauan kualitas air tanah secara berkala tetap diperlukan untuk mengantisipasi potensi peningkatan konsentrasi di masa mendatang.

Parameter pemodelan

Parameter model merupakan batasan (*boundary*) untuk menjalankan program. Hasil dari parameter tersebut akan menghasilkan batas area pemodelan (X,Y,Z) yang akan di dijalankan. Penentuan unit dalam *software* juga merupakan parameter pemodelan untuk menentukan satuan nilai data yang diinput. Parameter model ditunjukkan pada **Tabel 3**.

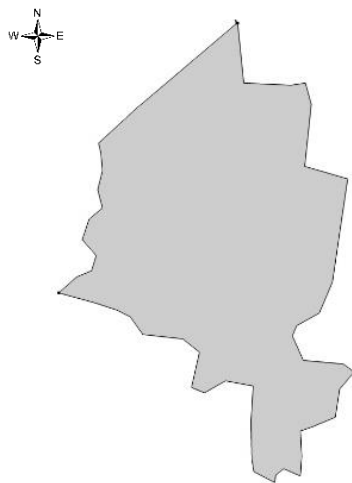
Tabel 3. Parameter Model

Parameter	Detail	Sumber
<i>Interest area</i>	4,8 Ha	Data TPA
Debit lindi	2,86 m ³ /hari	Data TPA
Infiltrasi tanah	45,5 mm/jam	Data lapangan
Konduktivitas hidrolik (K)	0,0021 m/hari	Analisis laboratorium
Porositas (n)	0,34	Notodarmojo (2005)
<i>Stress Period</i>	25 tahun	Asumsi model
<i>Layer</i>	1	Asumsi model
Konsentrasi merkuri (Hg)	0,0052 mg/L	Analisis laboratorium
Konsentrasi kadmium (Hg)	0,021 mg/L	Analisis laboratorium

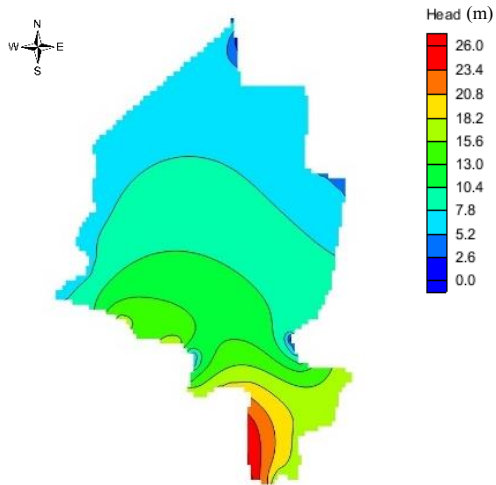
Karena keterbatasan data hidrologi dan hidrogeologi seperti stratigrafi tanah, dilakukan penyederhanaan model dengan tetap mengacu pada data sekunder yang relevan. Pemodelan menggunakan MODFLOW dilakukan dalam kondisi jenuh dengan satu lapisan (*layer*). Penelitian yang dilakukan oleh Khadri & Pande (2016), menunjukkan bahwa pendekatan satu lapisan dapat memberikan hasil yang memadai meskipun data vertikal terbatas. Hal ini juga didukung oleh penelitian Aghlmand & Abbasi (2019), yang menekankan pentingnya penggunaan batas model yang realistis untuk menghasilkan simulasi aliran air tanah yang akurat.

Pada **Gambar 3** merupakan ilustrasi berupa *polygon* sebagai area batas pemodelan (*boundary*) persebaran lindi TPA. Pemodelan aliran air tanah dilakukan secara 3D menggunakan MODFLOW dengan kondisi tunak (*steady state*), berdasarkan data topografi dan batas wilayah studi. Model ini mengikuti hukum Darcy untuk menggambarkan pola aliran fluida, dengan asumsi aliran masuk dan keluar dalam keadaan seimbang sehingga menghasilkan simulasi yang stabil dan tidak berubah terhadap waktu.

Hasil simulasi MODFLOW yang divisualisasikan pada **Gambar 4** menunjukkan pola distribusi muka air tanah di wilayah studi, dengan nilai *head* tertinggi di bagian selatan (sekitar 26 meter, ditunjukkan warna merah) dan terendah di bagian utara (0-5 meter, warna biru). Pola ini menunjukkan arah aliran dominan dari selatan ke utara. Arah aliran ini kemudian digunakan sebagai input *flow field* dalam pemodelan transport pencemar oleh MT3DMS.



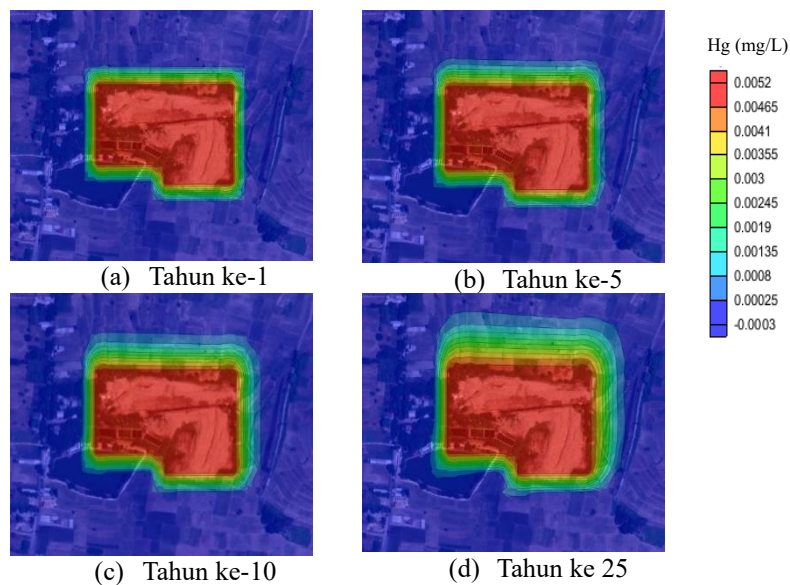
Gambar 3. Batas Area Pemodelan



Gambar 4. Kontur Muka Air Tanah

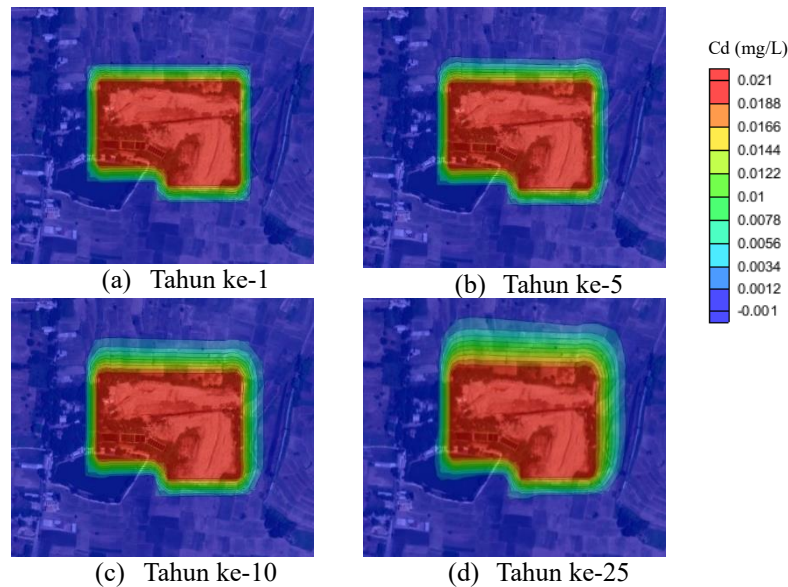
Hasil simulasi model

Setelah proses pemodelan aliran air tanah menggunakan MODFLOW diselesaikan, modul MT3DMS pada perangkat lunak GMS (*Groundwater Modeling System*) digunakan untuk mensimulasikan penyebaran kontaminan. Model ini kemudian dilengkapi dengan data konsentrasi awal sumber pencemar, seperti merkuri (Hg) dan kadmium (Cd). Simulasi dilakukan untuk periode waktu 1, 5, 10, dan 25 tahun mendatang. Modul MT3DMS dijalankan menggunakan paket adveksi dan dispersi, dengan *output* berupa visualisasi sebaran kontaminan (*plume*) yang menunjukkan arah pergerakan dan tingkat pencemaran dari waktu ke waktu. Hasil simulasi model dengan parameter Hg ditunjukkan pada Gambar 5 dan parameter Cd ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 5. Hasil Simulasi MT3DMS; Persebaran Parameter Hg

Berdasarkan Gambar 5 hasil simulasi MT3DMS menunjukkan bahwa kontaminan merkuri (Hg) bergerak secara progresif ke arah utara mengikuti arah aliran air tanah. Pada tahun pertama, sebaran mencapai radius ± 40 meter dari sumber dengan konsentrasi $0,0002$ mg/L, kemudian meluas menjadi ± 58 meter di tahun ke-5 ($0,00004$ mg/L), ± 79 meter di tahun ke-10 ($0,00001$ mg/L), dan mencapai ± 112 meter di tahun ke-25 dengan konsentrasi tetap $0,00001$ mg/L.



Gambar 6. Hasil Simulasi MT3DMS; Persebaran Parameter Cd

Berdasarkan **Gambar 6** hasil simulasi MT3DMS menunjukkan bahwa kontaminan kadmium (Cd) menyebar secara progresif ke arah utara mengikuti aliran air tanah. Pada tahun pertama, sebaran mencapai ± 39 meter dari sumber dengan konsentrasi 0,0009 mg/L, kemudian meluas menjadi ± 56 meter pada tahun ke-5 dan ± 78 meter pada tahun ke-10 dengan konsentrasi yang sama. Pada tahun ke-25, sebaran mencapai ± 107 meter dengan penurunan konsentrasi menjadi 0,00007 mg/L.

Hasil simulasi MT3DMS menunjukkan bahwa sebaran lindi mengikuti arah aliran air tanah dari selatan ke utara dan semakin meluas seiring waktu. Konsentrasi tertinggi terdistribusi sepanjang jalur utama aliran bawah permukaan yang dipengaruhi oleh gradien hidrolis. Sebaran kontaminan merkuri (Hg) dan kadmium (Cd) di TPA Tambakrigadung terutama dikendalikan oleh proses adveksi dan dispersi, di mana adveksi mendorong pergerakan kontaminan mengikuti arah aliran, dan dispersi menyebabkan penyebaran lateral. Konsentrasi merkuri menurun dari waktu ke waktu akibat proses dilusi dalam akuifer. Penurunan konsentrasi ini juga dipengaruhi oleh sifat geologi lokal, seperti permeabilitas dan daya adsorpsi batuan. Media berbutir halus seperti lempung dan napal memiliki kemampuan lebih tinggi dalam meredam pergerakan kontaminan dibandingkan batuan kasar atau kristalin karena luas permukaan dan pori yang sempit (Leluno dkk., 2020). Penelitian oleh Chowdhury & Rahnuma (2023), di Bangladesh menunjukkan bahwa jarak migrasi kontaminan meningkat seiring waktu, mengikuti tren logaritmik dengan Ward 14, 16, 17, dan 18 sebagai area paling rentan. Konsentrasi kontaminan cenderung menurun seiring waktu karena efek dilusi dalam akuifer. Studi ini menegaskan bahwa adveksi dan dispersi adalah proses dominan dalam penyebaran kontaminan di air tanah.

Kalibrasi model

Kalibrasi model aliran air tanah dilakukan untuk memastikan simulasi mencerminkan kondisi hidrogeologi aktual. Penyesuaian parameter seperti konduktivitas hidrolik dan *recharge* dilakukan hingga hasil model mendekati data observasi, seperti tinggi muka air tanah atau konsentrasi kontaminan. Tingkat kecocokan dievaluasi menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE), di mana semakin kecil nilai RMSE semakin baik akurasi model (Pidriansy, 2013). Perhitungan RMSE berdasarkan perbandingan hasil simulasi pada tahun pertama dengan data observasi lapangan.

Tabel 4. Data Pengujian RMSE

Sampel	Error ²	
	Hg	Cd
S1	0,00000036	0,00000004
S2	0,00000036	0,00000004
S3	0,00000036	0,00000004
S4	0,00000036	0,00000004
S5	0,00000036	0,00000004
RMSE	0,0006	0,0002

Sumber: Hasil analisis, 2025

Berdasarkan **Tabel 4** hasil perhitungan menunjukkan RMSE untuk parameter Hg sebesar 0,0006 dan Cd sebesar 0,0002. Dalam banyak studi hidrologi atau pemodelan lingkungan, nilai RMSE mendekati 0 dianggap menunjukkan akurasi tinggi (Rosidi, 2019). Dengan demikian, nilai RMSE yang rendah memperkuat keyakinan terhadap keakuratan model, sehingga hasil simulasi dapat dijadikan dasar pemantauan pencemaran di sekitar TPA Tambakrigadung.

Proyeksi pemodelan MODFLOW–MT3DMS menunjukkan bahwa sebaran Hg dapat mencapai ± 112 meter dan Cd mencapai ± 107 meter dalam 25 tahun, sehingga area berisiko dapat diidentifikasi sejak dini. Temuan ini penting sebagai dasar pengelolaan lingkungan, terutama untuk peningkatan sistem pengelolaan lindi dan penentuan lokasi sumur pantau baru pada zona yang diprediksi terdampak. Selain itu, hasil pemodelan dapat digunakan untuk merumuskan pemantauan jangka panjang dan kebijakan operasional TPA berbasis risiko. Dengan demikian, pemodelan tidak hanya menggambarkan kondisi saat ini, tetapi mendukung perencanaan pengelolaan TPA yang berkelanjutan.

4. KESIMPULAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontaminan merkuri (Hg) dan kadmium (Cd) mengalami pergerakan progresif ke arah utara mengikuti arah dominan aliran air tanah. Pada tahun pertama, sebaran Hg dan Cd terdeteksi hingga radius ± 40 meter dan ± 39 meter dari sumber, dan meningkat hingga ± 112 meter (Hg) dan ± 107 meter (Cd) pada tahun ke-25, dengan konsentrasi masing-masing $< 0,005$ mg/L dan $< 0,021$ mg/L. Model yang dibangun telah berhasil dikalibrasi dengan baik, ditunjukkan oleh nilai RMSE yang rendah (Hg = 0,0006; Cd = 0,0002), yang mengindikasikan akurasi tinggi dalam merepresentasikan kondisi lapangan dan mendukung perencanaan pengelolaan TPA yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Afzali, A., & Shahedi, K. (2023). Application of MODFLOW and MT3DMS Models to Evaluate Groundwater Quantity and Quality in Northern Iran. *Journal of Hydraulic and Water Engineering*, 1(2), 65–81. <https://doi.org/10.22044/jhwe.2023.13284.1025>
- Aghlmand, R., & Abbasi, A. (2019). Application of MODFLOW with Boundary Conditions Analyses Based on Limited Available Observations: A Case Study of Birjand Plain in East Iran. *Water*, 11(9), 1904. <https://doi.org/10.3390/w11091904>
- Ameilia, D. (2018). Analisis Kualitas Air Tanah Dangkal Untuk Keperluan Air Minum di Desa Pematang. *Jurnal Penelitian Geografi*, 6(4), 248475.
- Chalid, L. M. F. (2022). Analisis Kandungan Logam Berat Cd, Cu dan Pb Menggunakan Metode Spektrometer Serapan Atom pada Tanah TPA Piyungan, Bantul. *Universitas Islam Indonesia*.
- Chowdhury, A., & Rahnuma, M. (2023). Groundwater Contaminant Transport Modeling using MODFLOW and MT3DMS: A case study in Rajshahi City. *Water Practice & Technology*, 18(5), 1255–1272. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.076>
- Fadhila, D., & Purwanti, I. F. (2022). Kajian Fikoremediasi pada Air Tanah Tercemar Timbal dan Kadmium di Sekitar TPA Wukirsari, Gunungkidul. *Jurnal Teknik ITS*, 11(2), D34–D40. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v11i2.85265>
- Kanmani, S., Gandhimathi, R., Shanmuharajan, M. B., Ponraj, M., Srinivasan, N. P., Sharmiladevi, K., & Vivek, S. (2022). Leachate Transport Phenomenon on Groundwater Quality: Modeling Using MODFLOW and MT3DMS Tools. *Global NEST Journal*. <https://doi.org/10.30955/gnj.004564>
- Karami, A. A. (2022). Pemodelan Pola Persebaran Lindi di TPA Ngipik Kabupaten Gresik Menggunakan Solusi Analitik Ogata-Banks dan Domenico-Robbins. *UIN Sunan Ampel Surabaya*.
- Khadri, S. F. R., & Pande, C. (2016). Groundwater Flow Modeling for Calibrating Steady State using MODFLOW Software: A case study of Mahesh River basin, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(1), 39. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0049-7>
- Leluno, Y., Kembarawati, & Basuki. (2020). Kualitas Air Tanah di Sekitar TPA Km 14 Kota Palangka Raya. *Journal of Environment and Management*, 1(1), 75–82. <https://doi.org/10.37304/jem.v1i1.1208>
- McDonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (1988). A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. *US Geological Survey*.
- Moelyaningrum, A. D., & Pujiati, R. S. (2015). Cadmium (Cd) and Mercury (Hg) in the Soil, Leachate and Ground Water at the final Waste Disposal Pakusari Jember Distric Area. *International Journal of Sciences*, 24(2).
- Notodarmojo, S. (2005). Pencemaran Tanah dan Air Tanah. *ITB*.
- Pidriansy, Q. (2013). Kajian Pencemaran Air Tanah Dangkal. Laporan Tesis. ITB.
- Rosidi, M. (2019). Metode numerik menggunakan R untuk teknik lingkungan. *Piktochart: Bandung*.
- Sari, R. N., & Afdal, A. (2017). Karakteristik Air Lindi (Leachate) di Tempat Pembuangan Akhir Sampah Air Dingin Kota Padang. *Jurnal Fisika Unand*, 6(1), 93–99. <https://doi.org/10.25077/jfu.6.1.93-99.2017>

- Sugiyono. (2013) Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D. *ALFABETA*.
- Wang, K., Li, L., Tan, F., & Wu, D. (2018). Treatment of Landfill Leachate Using Activated Sludge Technology: A Review. *Archaea*, 2018, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2018/1039453>
- Widyatama, I. D. (2021). Identifikasi Pengaruh Air Lindi Terhadap Kualitas Air Tanah Dangkal di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Mrican Kabupaten Ponorogo. *Universitas Brawijaya*.
- Zatlakovič, M., Krčmář, D., Hodasová, K., Sracek, O., Marenčák, Š., Durdiaková, L., & Bugár, A. (2023). The Impact of Groundwater Model Parametrization on Calibration Fit and Prediction Accuracy—Assessment in the Form of a Post-Audit at the SLOVNAFT Oil Refinery Site, in Slovakia. *Water*, 15(5), 839. <https://doi.org/10.3390/w15050839>