

**TUGAS AKHIR**

**PEMODELAN PENYEBARAN KONTAMINAN LINDI DI SEKITAR TPA  
TAMANGAPA DENGAN MENGGUNAKAN METODE NUMERIK**



**SAYYIDINA RANGGA**

**D121 15 305**

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**2022**



**KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS HASANUDDIN FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN**

JL. POROS MALINO. KM.6 BONTOMARANNU KAB. GOWA

**LEMBAR PENGESAHAN**

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

**Judul : Pemodelan Penyebaran Kontaminan Lindi di Sekitar TPA Tamangapa dengan Menggunakan Metode Numerik**

**Disusun Oleh :**

**Nama : Sayyidina Rangga**

**D12115305**

Telah diperiksa dan disetujui  
Oleh Dosen Pembimbing

Gowa, 5 Juli 2022

Pembimbing I

**Dr. Eng. Kartika Sari, S.T., M.T.**  
NIP. 197312012000121001

Pembimbing II

**Dr. Eng. Muhammad Akbar Caronge, S.T., M. Eng**  
NIP. 198604092019043001

Menyetujui,

Ketua Departemen Teknik Lingkungan



**Dr. Eng. Muralia Hustim, S.T., M.T.**  
NIP. 197204242000122001

## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini, nama Dewi Yunita Sari, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul **“Pemodelan Penyebaran Kontaminan Lindi di sekitar TPA Tamangapa dengan menggunakan Metode Numerik”**, adalah karya ilmiah penulis sendiri, dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun.

Karya ilmiah ini sepenuhnya milik penulis dan semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dan penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala risiko.

Makassar, 7 Juli 2022

Yang membuat pernyataan,



**Sayyidina Rangga**

D121 15 305

## KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Pemodelan Penyebaran Kontaminan Lindi di sekitar TPA Tamangapa dengan menggunakan Metode Numerik”**. Shalawat dan salam semoga tercurahkan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW pimpinan dan sebaik-baik teladan bagi umat yang membawa manusia dari zaman kegelapan menuju zaman yang terang-benderang. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan kelulusan pada jenjang S1 Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis banyak mengalami hambatan, namun berkat bantuan, bimbingan, nasehat, dan doa dari berbagai pihak yang membuat penulis semangat dan mampu dalam menyelesaikan tugas akhir ini dengan sebaik-baiknya.

Terselesaikannya tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak, sehingga pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat penulis menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Orang tua penulis yakni bapak saya Muchlis Nur dan ibu saya Maemunah yang tiada hentinya memberikan dukungan, nasehat dan doa yang senantiasa mengiringi setiap langkah penulis dan yang telah mencurahkan segenap kasih sayang yang tak terbatas serta segala bentuk motivasi yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh pendidikan hingga saat ini.
2. Achmad Dalvin dan Aidha Arfani selaku saudara kandung penulis yang bersedia memberikan bantuan finansial serta dukungan kepada peneliti selama proses penelitian.
3. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Ibu Dr. Eng. Muralia Hustim, ST., MT., selaku Ketua Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

5. Ibu Dr. Eng. Kartika Sari, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., MT., selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan arahan dan bimbingan, meluangkan waktu di tengah kesibukannya selama penulis melaksanakan penelitian dan penyusunan tugas akhir ini, dan juga selalu memberikan semangat selama penulis melaksanakan penelitian dan penyusunan tugas akhir.
6. Ibu Sumiati dan Kak Olan selaku staf karyawan Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang sudah membantu setiap administrasi selama penulis melaksanakan perkuliahan.
7. Pak Abd Haris Djalante yang telah membantu memberikan data penelitian, membimbing, memberikan arahan, memotivasi serta memberikan semangat kepada penulis untuk menyelesaikan tugas akhir.
8. PT. Pandit yang telah membimbing, memberikan arahan, dan memotivasi penulis untuk segera menyelesaikan studi di Fakultas Teknik Unhas.
9. Bapak/Ibu Dosen Fakultas Teknik Departemen Teknik Lingkungan atas bimbingan, arahan, didikan, dan motivasi yang telah diberikan selama kurang lebih tujuh tahun.
10. Pak Syarifuddin selaku laboran laboratorium kualitas air yang telah membantu penulis selama pengujian sampel.
11. Alfian Pratama, Wiki Septian Saipul, Eghier Tiranda, dan Dzikri Fajriah Saleh yang banyak membantu dalam penyelesaian laporan.
12. Teman-teman Teknik Lingkungan 2015 atas segala bantuan, cerita, dan kenangan selama masa perkuliahan.
13. Adik-adik Se-Teknik Lingkungan atas segala bantuannya selama menjalani masa studi di Fakultas Teknik Unhas.
14. Pak Miskin selaku Staf DLH di TPA Tamangapa yang banyak membantu dalam pengambilan sampel untuk menyelesaikan penelitian.
15. Kepada rekan-rekan dan berbagai pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-satu, penulis ucapkan banya terima kasih atas setiap bantuan serta doa yang diberikan.

Semoga Allah SWT. membalaskan kebaikan mereka semua. Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Namun, penulis berharap tugas akhir ini memberikan manfaat bagi pembaca. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan guna melengkapi segala kekurangan dan keterbatasan dalam penyusunan tugas akhir ini. Akhir kata semoga tugas akhir ini memberikan manfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan dan lingkungan sekitar.

Gowa, Juli 2022  
Penulis,

**Sayyidina Rangga**  
**D121 15 305**

# **PEMODELAN PENYEBARAN KONTAMINAN LINDI DI SEKITAR TPA TAMANGAPA DENGAN MENGGUNAKAN METODE NUMERIK**

**Sayyidina Rangga<sup>(1)</sup>, Kartika Sari<sup>(2)</sup>, Akbar Caronge<sup>(3)</sup>**

Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

Jl. Poros Malino KM. 6, Bontomarannu (92172) Gowa, Sulawesi Selatan

Telp. (0411) 586015 Fax (0411) 586015

Email: [sayyidinaran@gmail.com](mailto:sayyidinaran@gmail.com)

## **ABSTRAK**

Tempat Pembuangan Akhir (TPA) merupakan salah satu tempat yang digunakan untuk membuang sampah yang sudah menacapai tahap akhir dalam pengelolaan sampah. Dalam pengolahan sampah, yang menjadi salah satu aspek penting ialah masalah lindi yang harus dikelola dengan baik. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian yang dapat memberikan informasi yang jelas tentang kondisi air tanah setempat guna menghasilkan penangan dan tindakan yang akurat. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pola penyebaran kontaminan lindi menggunakan pemodelan numerik tiga dimensi menggunakan program MODFLOW untuk mendapatkan arah dan kecepatan aliran serta program MT3DMS untuk transpor kontaminan. Dalam penyelesaian numerik terdapat beberapa bentuk proses hitungan atau algoritma dengan bantuan komputer atau perangkat lunak. Pengolahan data dilakukan dengan cara mengkonversi data yang telah didapatkan dilapangan (data sekunder dan data primer) sesuai kebutuhan perangkat lunak yang digunakan. Hasil penelitian didapatkan pola penyebaran kontaminan pada tiap parameter yang ingin dimodelkan yaitu BOD, COD, dan Merkuri. Dari hasil simulasi program MT3DMS, pola penyebaran kontaminan pada tiap parameter sama dan jarak yang ditempuh juga sama dikarenakan arah aliran berdasarkan program MODFLOW. Hasil simulasi 20 tahun penyebaran kontaminan dengan 1 titik sumber pencemar mencapai jarak 200 meter ke arah timur pada tiap parameternya, sedangkan hasil simulasi untuk 95 titik sumber pencemar terdapat berbagai arah penyebaran dengan jarak terjauh mencapai 170 - 180 meter ke utara pada tiap parameternya. Perlu penelitian lebih lanjut mengenai potensi penyebaran kontaminan yang terjadi akibat lindi yang dihasilkan TPA Tamangapa.

**Kata Kunci** : Air Tanah, Transpor Kontaminan, MODFLOW, MT3DMS.

## **ABSTRACT**

*Final Disposal Site (TPA) is one of the places used to dispose of waste that has reached the final stage in waste management. In waste processing, one of the important aspects is the leachate problem which must be managed properly. Therefore, it is necessary to conduct research that can provide clear information about local groundwater conditions in order to produce accurate treatment and action. The purpose of this study was to determine the pattern of leachate contaminant distribution using three-dimensional numerical modeling using the MODFLOW program to obtain flow direction and velocity and the MT3DMS program for contaminant transport. Data processing is done by converting the data that has been obtained in the field (secondary data and primary data) according to the needs of the software used. The results of the study obtained a pattern of contaminant distribution on each parameter to be modeled, namely BOD, COD, and Mercury. From the simulation results of the MT3DMS program, the contaminant distribution pattern in each parameter is the same and the distance traveled is also the same because the flow direction is based on the MODFLOW program. The simulation results for 20 years of contaminant distribution with 1 pollutant source point reaching a distance of 200 meters to the east on each parameter, while the simulation results for 95 pollutant source points have various distribution directions with the farthest distance reaching 170 - 180 meters to the north on each parameter. more about the potential spread of contaminants that occur due to leachate produced by the Tamangapa TPA.*

**Keywords :** *Groundwater, Contaminant Transport, MODFLOW, MT3DMS.*

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>SAMPUL</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	<b>ii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRAK</b>	<b>vii</b>
<b><i>ABSTRACT</i></b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b>	<b>xvii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	3
D. Ruang Lingkup	3
E. Manfaat Penelitian	3
F. Sistematika Penulisan	4
<b>BAB II KAJIAN PUSTAKA</b>	
A. Air Lindi	6
B. Tanah	8
1. Tekstur Tanah	9
2. Porositas	10

C. Air Tanah	11
1. Pencemaran Air Tanah	13
2. Transport Kontaminan dalam Air Tanah	14
3. Adveksi dan Dispersi	14
D. Solusi Numerik	15
E. GMS ( <i>Groundwater Modelling System</i> )	18
1. MODFLOW	18
2. MT3DMS	21

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

A. Rancangan Penelitian	24
B. Waktu dan Lokasi Penelitian	26
1. Waktu Penelitian	26
2. Lokasi Penelitian	26
C. Alat dan Bahan	28
D. Populasi dan Sampel	31
E. Metode Pengumpulan Data	31
1. Data Primer	31
2. Data Sekunder	37
F. Metode Pengolahan Data dan Analisis Data	37
1. Diagram Alir Pemodelan	38
2. Tahap <i>Setting Up</i> Model	40
3. Impor Data	41
4. Tahap Pembuatan Grid	46
5. Tahap <i>Setting Up</i> Program MODFLOW	47
6. Tahap Simulasi MODFLOW	51
7. Tahap <i>Setting Up</i> Model MT3DMS	52
8. Tahap Simulasi MT3DMS	57

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

A. Hasil Pengolahan Data Primer	59
---------------------------------	----

1. Data Pengujian Sampel	59
2. Elevasi Muka Air Tanah dan Permukaan Tanah	60
B. Hasil Pengolahan Data Sekunder	62
1. Data Karakteristik Tanah	62
2. Data Elevasi Muka Air Tanah	63
C. Hasil Analisis Data	65
1. Daerah Pemodelan	65
2. Parameter Pemodelan	66
3. Hasil Interpolasi 2D Scatter Data	67
4. Model Aliran Air Tanah	68
5. Model Penyebaran Kontaminan	70
<b>BAB V PENUTUP</b>	
A. Kesimpulan	71
B. Saran	72
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	<b>73</b>
<b>LAMPIRAN</b>	<b>74</b>

## DAFTAR TABEL

	<b>Halaman</b>
1. Baku Mutu Lindi	7
2. Hasil Pengujian Sampel Lindi	58
3. Hasil Pengukuran Kedalaman Sumur dan Permukaan Tanah	59
4. Nilai Porositas Konduktivitas Hidrolik Berdasarkan Jenis Tanah	61
5. Hasil Pengukuran Muka Air Tanah	62

## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
1. Segitiga Tekstur Tanah	10
2. Diagram Skematika Sistem 3 Fase dalam Tanah	11
3. Sifat Batuan Terhadap Air Tanah	14
4. Contoh Tampilan <i>Grid</i> dan <i>Layer</i>	21
5. Diagram Alir Penelitian	26
6. Peta Lokasi Penelitian	28
7. Peta Lokasi Pengujian Sampel di Laboratorium Dinas Kesehatan Provinsi Sulawesi Selatan	28
8. Peta Lokasi Pengujian Sampel di Laboratorium Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin	29
9. Alat Pengambilan dan Pengujian Sampel	29
10. Diagram Alir Pengambilan Data	33
11. Diagram Alir Pengambilan Sampel	34
12. Diagram Alir Pemodelan	40
13. Menentukan Sistem Koordinat	41
14. Menambahkan <i>Map</i> atau <i>World Imagery</i>	41
15. Menentukan Satuan Unit	42
16. Membuat Konseptual Model	42
17. Membuat <i>Boundary Condition</i> /Batas Area Pemodelan	43
18. <i>Set Up</i> Data Konduktivitas Hidrolik	43
19. <i>Set Up</i> Data Porositas	44

20. <i>Input Data</i> Konduktivitas Hidrolik dan Porositas	44
21. <i>Set Up Data</i> Muka Air Tanah dan <i>Boundary Condition</i>	45
22. <i>Input Data Specified Head</i> /Muka Air Tanah	45
23. <i>Input Data Specified Head/Boundary Condition</i>	45
24. Impor Data Elevasi Permukaan Tanah	46
25. Impor Data Elevasi Muka Air Tanah	46
26. Impor Data MDPL	47
27. Grid dan Grid Frame yang telah Dibuat	47
28. Menambahkan Program MODFLOW	48
29. Interpolasi Data Elevasi Tanah ke <i>Top Elevation Layer 1</i>	49
30. <i>Fix Layer Errors</i> pada <i>Layer 1</i>	49
31. Interpolasi Data Elevasi Muka Air Tanah ke <i>Bot Elevation Layer 1</i>	49
32. <i>Fix Layer Errors</i> pada <i>Layer 2</i>	50
33. Interpolasi Data MDPL ke <i>Bot Elevation Layer 2</i>	50
34. <i>Fix Layer Errors</i> untuk <i>Boundary</i> sumbu Y	50
35. <i>Input Data Conceptual Model</i> ke Program MODFLOW	51
36. <i>Model Checker/Check Simulation</i> MODFLOW	52
37. Proses <i>Running Simulation</i> MODFLOW	52
38. Menambahkan Program MT3DMS	53
39. Menentukan <i>Packages</i> MT3DMS	53
40. Menentukan lama Simulasi MT3DMS	53
41. Menentukan Kontaminan/Polutan	54
42. Menentukan Nilai <i>Advection Package</i> secara <i>Default</i>	54

43. Menentukan Nilai <i>Dispersion Package</i>	54
44. Menentukan <i>Define Species</i> pada <i>Conceptual Model</i>	55
45. <i>Set Up</i> Data Konsentrasi Kontaminan	55
46. Menginput Nilai Konsentrasi Kontaminan	56
47. Mengimpor Data <i>Conceptual Model</i> ke Program MT3DMS	56
48. <i>Model Checker/Check Simulation</i> MT3DMS	57
49. Proses <i>Running Simulation</i> MT3DMS	57
50. Titik Lokasi Pengambilan Data dan Sampel Penelitian	60
51. Lokasi Pengambilan Data	63
52. Batas Area Pemodelan	64
53. Hasil Interpolasi 2D Scatter Data	66
54. Kontur Muka Air Tanah	67
55. Arah dan Kecepatan Aliran Air Tanah	68
56. Kondisi Awal Kontaminan BOD dengan 1 Titik Pencemar	69
57. Hasil Simulasi 20 Tahun Kontaminan BOD dengan 1 Titik Pencemar	70
58. Kondisi Awal Kontaminan BOD dengan 95 Titik Pencemar	70
59. Hasil Simulasi 20 Tahun Kontaminan BOD dengan 95 Titik Pencemar	70
60. Kondisi Awal Kontaminan COD dengan 1 Titik Pencemar	71
61. Hasil Simulasi 20 Tahun Kontaminan COD dengan 1 Titik Pencemar	72
62. Kondisi Awal Kontaminan COD dengan 95 Titik Pencemar	72

63. Hasil Simulasi 20 Tahun Kontaminan COD dengan 95 Titik Pencemar	72
64. Kondisi Awal Kontaminan Merkuri dengan 1 Titik Pencemar	73
65. Hasil Simulasi 20 Tahun Kontaminan Merkuri dengan 1 Titik Pencemar	74
66. Kondisi Awal Kontaminan Merkuri dengan 95 Titik Pencemar	74
67. Hasil Simulasi 20 Tahun Kontaminan Merkuri dengan 95 Titik Pencemar	74

## DAFTAR LAMPIRAN

	<b>Halaman</b>
1. Potongan Melintang	81
2. Dokumentasi Pengambilan Sampel	83
3. Dokumentasi Pengujian Sampel	86

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **A. Latar Belakang**

Tempat Pembuangan Akhir (TPA) merupakan salah satu tempat yang digunakan untuk membuang sampah yang sudah menacapai tahap akhir dalam pengelolaan sampah yang dimulai dari pertamakali sampah dihasilkan, dikumpulkan, diangkut, dikelola dan dibuang. TPA adalah tempat pengumpulan sampah yang merupakan lokasi yang harus terisolir secara baik sehingga tidak menyebabkan pengaruh negatif pada lingkungan sekitar TPA.

TPA Tamangapa yang berlokasi di Kelurahan Tamangapa, Kecamatan Manggala, Kota Makassar merupakan satu-satunya TPA yang berada di kota ini. Layanan TPA Tamangapa mencakup seluruh sampah yang ada di dalam kota Makassar. Lahan TPA ini sangat dekat dengan daerah perumahan sehingga sering timbul keluhan dari penduduk setempat terkait dengan bau tak sedap yang berasal dari TPA. Terdapat pula beberapa pusat aktivitas dan perumahan seperti tempat ibadah dan sekolah, dan perkantoran yang berlokasi di sekitar 1 km dari lokasi. Semenjak tahun 2000, berbagai perumahan telah didirikan, seperti Perumahan Antang, Perumahan TNI Angkatan Laut, Perumahan Graha Janah, Perumahan Griya Tamangapa, dan Perumahan Taman Asri Indah yang berlokasi berdekatan dengan TPA Tamangapa.

Sampah yang dibuang di tempat ini terdiri dari sampah organik dan anorganik yang berasal dari pasar-pasar, rumah tangga, dan perkantoran. Hal ini menyebabkan sampah jenis ini lebih cepat membusuk dan menghasilkan polutan yang dapat mencemari air tanah. Sampah yang dibuang pada lokasi TPA akan mengalami pembusukan terutama pada sampah basah yang umumnya terdiri dari sampah organik, apalagi negara Indonesia merupakan negara tropis yang mempunyai iklim panas dan kelembaban tinggi. Hal ini merupakan faktor yang mempercepat terjadinya reaksi kimia, sehingga sampah lebih cepat membusuk. Air hasil pembusukan sampah disebut lindi (*leachate*).

TPA Tamangapa merupakan tempat pembuangan sampah utama bagi penduduk kota Makassar yang menghasilkan sampah sekitar 900 ton perhari. Masalah yang paling signifikan yang timbul dari TPA adalah cairan lindi (*leachate*). Cairan air lindi dapat merembes ke dalam air tanah dan sungai, menurunkan kualitas air permukaan, dan sumur penduduk. Jika ada air hujan yang melewati timbunan sampah maka akan mempercepat proses masuknya lindi ke dalam tanah, sehingga hal ini dapat menimbulkan pencemaran air tanah.

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia NO. P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 menyatakan bahwa Tempat Pemrosesan Akhir sampah yang menghasilkan lindi dan berpotensi mencemari lingkungan, perlu dilakukan pengolahan air lindi sebelum dibuang ke lingkungan. Penyebaran air lindi yang melebihi baku mutu yang telah ditetapkan akan mengganggu kesehatan manusia dan kenyamanan lingkungan.

Secara umum diketahui bahwa air tanah dalam pengalirannya memiliki arah dan kecepatan di dalam suatu medium berpori. Medium yang dilalui oleh air tanah bias berupa akuifer terkekang, akuifer tak terkekang, akuifer semi tak terkekang, dan akuifer artesis. Akuifer pada dasarnya adalah suatu lapisan, formasi atau kelompok formasi satuan geologi yang dapat dilewati air baik yang terkonsolidasi maupun yang tidak terkonsolidasi dengan kondisi jenuh air dan mempunyai suatu besaran koduktivitas hidrolis sehingga dapat membawa air (atau air dapat diambil) dalam jumlah yang ekonomi (Kondoatie, 1996). Mengingat sumber air tanah yang semakin penting, maka sumber daya air tanah perlu mendapatkan perhatian yang lebih baik utamanya dalam usaha mencegah terjadinya pencemaran air tanah baik dari industry maupun fasilitas-fasilitas umum seperti tempat pembuangan akhir (TPA) yang berpotensi menimbulkan pencemaran air tanah.

Dalam pengolahan sampah, yang menjadi salah satu aspek penting ialah masalah lindi yang harus dikelola dengan baik. Karena apabila hal tersebut tidak dikelola dengan baik maka akan menyebabkan masalah bagi lingkungan dan masyarakat. Air lindi mengandung bakteri dan akan menyebar pada aliran air permukaan dan air bawah tanah. Terlebih lagi sampah-sampah yang dibuang di tempat ini berasal dari pasar-pasar, rumah tangga dan perkantoran yang

menyebabkan pembusukan cepat dan akan menghasilkan polutan. Air lindi akan mempengaruhi kualitas air tanah dangkal dan juga mencemari sumur-sumur penduduk yang memanfaatkan air tanah sebagai sumber air bersih. Berdasarkan penelitian terdahulu terdapat sumur yang sudah berwarna kuning dan berbau, sumur tersebut berada di sisi timur TPA Tamangapa (Sugiarto Badaruddin, 2020).

Dengan melihat kondisi yang ada di TPA Tamangapa yang sangat berpotensi mencemari air tanah dan kondisi air tanah menurut penelitian terdahulu, peneliti tertarik untuk melakukan sebuah penelitian untuk memperkirakan seberapa jauh pola penyebaran air lindi yang terkontaminasi dengan air tanah yang berjudul: *“Pemodelan Penyebaran Kontaminan Lindi di sekitar TPA Tamangapa menggunakan Metode Numerik”*.

## **B. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang diatas, maka dapat dirumuskan permasalahan yaitu:

1. Bagaimana pola penyebaran air lindi di bawah permukaan tanah?

## **C. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini ialah sebagai berikut:

1. Mengetahui pola penyebaran air lindi di bawah permukaan tanah.

## **D. Batasan Masalah**

Adapun batasan - batasan dari penelitian ini ialah:

1. Data primer: data yang diperoleh dari hasil survey di lapangan yaitu elevasi permukaan tanah, sampel air lindi, dan air tanah di sekitar TPA Tamangapa. Parameter yang akan diuji yaitu pH, BOD, COD, dan Merkuri.
2. Data sekunder: data yang diperoleh dari penelitian sebelumnya yaitu data karakteristik tanah dan muka air tanah di sekitar TPA Tamangapa.

3. Penelitian ini hanya berfokus pada penggunaan *software* MODFLOW dan MT3DMS. MODFLOW untuk memodelkan arah aliran dan kecepatan aliran air tanah, sedangkan MT3DMS untuk penyebaran kontaminan lindi di sekitar TPA Tamangapa.
4. Penelitian ini hanya berfokus pada penyebaran kontaminan lindi dari parameter pH, BOD, COD, dan Merkuri.
5. Model penyebaran kontaminan pada tiap parameternya dibatasi dengan nilai tertentu agar gambaran kontur penyebaran kontaminan BOD, COD, dan Merkuri terbatas.

### **E. Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari penelitian ini terhadap beberapa pihak yaitu:

1. Bagi Penulis

Sebagai syarat untuk menyelesaikan studi dan mendapat gelar ST (Sarjana Teknik) di Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan meningkatkan ilmu di bidang gambaran aplikasi dan pemodelan.

2. Bagi Universitas

Dapat dijadikan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya dalam bidang riset gambaran aplikasi mengenai pola penyebaran air lindi pada air tanah di sekitar TPA Tamangapa.

3. Bagi Masyarakat

Dapat memberikan informasi mengenai penyebaran lindi yang terjadi pada air tanah di sekitar TPA Tamangapa.

### **F. Sistematika Penulisan**

Penulisan laporan penelitian tugas akhir ini terdiri dari beberapa bab dimana masing-masing bab membahas masalah tersendiri, selanjutnya sistematika laporan ini sebagai berikut:

## **BAB 1 PENDAHULUAN**

Bab ini menjelaskan mengenai latar belakang, identifikasi permasalahan objek tugas akhir, maksud dan tujuan, batasan masalah, dan bagaimana sistematika penulisannya.

## **BAB 2 LANDASAN TEORITIS**

Bab ini menjelaskan tentang teori-teori yang berkaitan dengan penelitian ini yang akan digunakan juga di dalam menganalisa hasil yang diperoleh.

## **BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN**

Menjelaskan mengenai langkah-langkah atau prosedur pengambilan dan pengolahan data hasil penelitian.

## **BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN**

Dalam bab ini menyajikan data-data hasil penelitian yang telah dikumpulkan, analisis data, hasil analisis data dan pembahasannya.

## **BAB 5 PENUTUP**

Dalam bab ini berisi kesimpulan dari hasil analisis data yang telah dilakukan serta terdapat saran atau rekomendasi yang akan diberikan kepada pihak yang terkait sehubungan dengan isi dari tugas akhir ini.

## **BAB II**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **A. Air Lindi**

Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah. Lindi adalah cairan yang timbul akibat masuknya air eksternal ke dalam timbunan sampah, melarutkan dan membilas materi-materi terlarut, termasuk materi organik hasil proses dekomposisi secara biologi.

Air lindi juga dapat didefinisikan sebagai air atau cairan yang telah tercemar akibat kontak dengan sampah. Terbentuknya air lindi merupakan hasil dari proses infiltrasi air hujan, air tanah, air limpasan atau air banjir yang menuju ke lokasi pembuangan sampah. Air lindi merupakan senyawa yang sulit didegradasi, mengandung bahan-bahan polimer (makro molekul) dan bahan organik sintetik (Suprihatin, 2002). Selain itu, air lindi juga dapat mengandung unsur logam, yaitu Zn (seng) dan Hg (raksa). Dalam kehidupan sehari-hari, air lindi dapat dianalogikan seperti seduhan teh yang membawa materi tersuspensi dan terlarut dari produk degradasi sampah. Air lindi dapat diproses menjadi biogas dan pupuk cair. Hal ini disebabkan karena air tersebut mengandung berbagai macam bahan organik, yaitu nitrat dan mineral.

#### **1. Komposisi Air Lindi**

Komposisi air lindi berasal dari beberapa sumber seperti air hujan, drainase permukaan, air tanah, dan mata air. Komposisi air lindi sangat bervariasi karena proses pembentukannya dipengaruhi oleh karakteristik sampah (organik-anorganik), mudah tidaknya penguraian (larut dan tidak larut), kondisi tumpukan sampah (suhu, pH, kelembaban dan umur sampah), karakteristik sumber air (kuantitas dan kualitas air yang dipengaruhi iklim dan hidrogeologi), komposisi tanah penutup, ketersediaan nutrisi dan mikroba, dan kehadiran inhibitor. Proses

penguraian bahan organik menjadi komponen yang lebih sederhana oleh mikroorganisme aerobik dan anaerobic pada lokasi pembuangan dapat menjadi penyebab terbentuknya gas dan air lindi.

## 2. Kualitas Air Lindi

Kuantitas dan kualitas air lindi dipengaruhi oleh iklim. Infiltrasi air hujan dapat membawa kontaminan dari tumpukan sampah dan memberikan kelembaban yang dibutuhkan bagi proses penguraian biologis dalam pembentukan air lindi. Meskipun sumber dari kelembapannya mungkin dibawa oleh sampah masukannya, tetapi sumber utama dari pembentukan air lindi ini adalah adanya infiltrasi air hujan. Jumlah hujan yang tinggi dan sifat timbunan yang tidak solid akan mempercepat pembentukan dan meningkatkan kuantitas air lindi yang dihasilkan (Pohland dan Harper, 1985). Baku mutu lindi menurut Permen Nomor P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 adalah ukuran batas atau kadar unsur pencemar dan/atau jumlah unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya dalam lindi yang akan dibuang atau dilepas ke dalam sumber air dari kegiatan TPA.

Baku Mutu Lindi menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Baku Mutu Lindi

Parameter	Kadar Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
pH	6-9	-
BOD	150	mg/L
COD	300	mg/L
TSS	100	mg/L
N Total	60	mg/L
Merkuri	0,005	mg/L
Kadmium	0,1	mg/L

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016

Berikut beberapa penjelasan dari parameter-parameter kontaminan di atas yang menjadi baku mutu lindi (*leachate*):

### 2.1 Merkuri

Secara umum logam merkuri memiliki karakteristik sebagai berikut, berwujud cair pada suhu kamar (25°C) dengan titik beku (-39°C). Merupakan logam yang paling mudah menguap. Memiliki tahanan listrik yang sangat rendah, sehingga digunakan sebagai penghantar listrik yang baik.

Merkuri terdiri dari 3 jenis, yaitu merkuri elemental, merkuri inorganik, dan merkuri organik. Merkuri elemental pada suhu 25°C berwujud cairan berwarna abu-abu, tidak berbau dengan berat molekul 200,59 g/mol, memiliki titik lebur -38,87 °C, dan titik didih 356,72 °C. Jenis ini paling mudah menguap, relatif tidak larut dalam air dan asam hidroklorida; larut dalam lemak, asam nitrat, dan pentane. Merkuri inorganik, khususnya merkuri klorida (HgCl<sub>2</sub>) yang digunakan dalam penelitian ini memiliki berat molekul 271,52, memiliki tekanan uap 0,1 kPa pada suhu 136,20°C, berwujud kristal putih atau bubuk, bersifat larut dalam air dan alkohol. Merkuri organik tidak mudah larut dalam air, tetapi mudah larut dalam pelarut organik.

Air raksa atau merkuri (Hg) adalah salah satu elemen atau senyawa yang diatur dengan ketat, dan sering kali dibatasi kurang dari 1 µg/l (mikrogram per liter). Senyawa logam merkuri sering dijumpai di dalam air lindi dari tempat pembuangan akhir sampah, air scrubber dari incinerator, air limbah pelapisan logam, industri pencucian komponen elektronika, air limbah laboratorium dan lainnya.

### 2.2 BOD & COD

BOD atau (*Biochemical Oxygen Demand*), adalah banyaknya oksigen terlarut yang diperlukan oleh bakteri untuk menguraikan 19 zat organik secara biologis yang terdapat dalam limbah cair dalam keadaan aerobik.

Sedangkan COD, atau (*Chemical Oxygen Demand*) adalah banyaknya senyawa oksigen yang digunakan untuk mengoksidasi secara kimiawi zat-zat organik yang terdapat dalam limbah cair.

BOD dan COD merupakan parameter yang digunakan untuk menentukan berapa banyak oksigen yang diperlukan dalam limbah cair, sehingga dapat ditentukan tingkat pengotoran atau pencemaran buangan limbah cair tersebut. Penambahan oksigen terlarut secara alamiah dapat terjadi melalui proses photosynthesa oleh tumbuhan air dan re-aerasi atmosfer, misal terjadinya terpaan angin pada permukaan air, adanya terjunan air dan sebagainya.

### 2.3 pH

pH (*Power of Hydrogen*) adalah derajat keasaman yang digunakan untuk menyatakan tingkat keasaman atau kebasaan yang dimiliki oleh suatu larutan. Nilai pH menunjukkan tinggi rendahnya konsentrasi ion hidrogen dalam air. Kemampuan air untuk mengikat atau melepaskan sejumlah ion hidrogen akan menunjukkan apakah perairan tersebut bersifat asam atau basa. Nilai pH air lindi pada tempat pembuangan sampah perkotaan berkisar antara 1,5 – 9,5 (Barus, 2002).

## **B. Tanah**

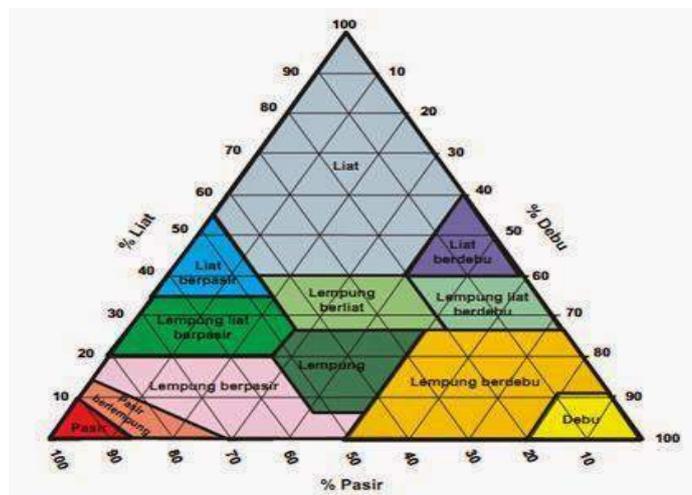
Tanah dapat didefinisikan sebagai suatu tubuh alam di permukaan bumi yang terjadi akibat bekerjanya gaya-gaya alami terhadap bahan alami. Tanah juga dianggap bahan mineral hasil evolusi yang dipengaruhi oleh faktor genesis (proses lahir atau pembuatannya) dan factor lingkungan seperti batuan induk, iklim, makroorganisme, mikroorganisme dan topografi (Wesley, 1977; Foth, 1984 dalam Notodarmojo, 2005). Menurut Madjid (2009) tanah adalah lapisan permukaan bumi yang secara fisik berfungsi sebagai tempat tumbuh dan berkembangnya perakaran sebagai penopang tumbuh tegaknya tanaman; secara kimiawi berfungsi sebagai gudang penyuplai hara atau nutrisi dan secara biologis sebagai habitat dari organisme tanah.

Hillel (2004) dan Dokuchaev (1949) memiliki pengertian yang hampir sama mengenai tanah yaitu lapisan terluar permukaan darat bumi yang terbentuk dari lapukan melalui disintegrasi, dekomposisi, dan rekomposisi bahan mineral yang terkandung dalam batuan maupun organisme secara fisik, kimia, dan proses biologis. Hal inilah yang menyebabkan tanah terlihat seperti lapisan-lapisan yang

tersusun vertikal. Dilihat dari susunan lapisan tanah dari lapisan paling atas sampai yang paling dalam, para ahli tanah (pedologist) berpendapat tidak ada profil tanah yang benar-benar sama dimana pun di muka bumi ini. Untuk memudahkan disusunlah model profil tanah yang mempresentasikan asal terbentuknya lapisan-lapisan tanah berupa horizon-horizon secara vertikal dari permukaan yang paling atas sampai lapisan batuan yang paling bawah.

### 1. Tekstur Tanah

Tekstur tanah merupakan proporsi relatif dari masing-masing ukuran partikel *sand*, *silt*, dan *clay*. Fraksi pasir (*sand*) sering dibagi lagi menjadi subfraksi coarse, medium, dan fine sand. Berikutnya adalah *silt*, yang secara ukuran berada diantara sand dan clay. Kandungan mineral yang ada pada silt hampir menyerupai sand, tapi ukuran lebih kecil sehingga memiliki luas permukaan yang jauh lebih besar dalam tiap unit massa. Sedangkan fraksi clay karena ukurannya yang sangat kecil sering dikategorikan sebagai fraksi koloid.



**Gambar 1.** Segitiga Tekstur Tanah

*Clay* memiliki luas permukaan yang paling besar, clay merupakan fraksi yang paling berpengaruh pada perilaku tanah karena menyebabkan aktivitas fisiokimia. Partikel clay biasanya membawa muatan elektrosatis negatif yang dapat mendorong terjadinya pertukaran ion dengan larutan di sekitarnya. Komposisi ketiga fraksi inilah yang menentukan tekstur tanah. Untuk memudahkan dalam mengidentifikasi

jenis tanah, dibuatlah segitiga tekstur tanah. Gambar 1 menunjukkan tekstur tanah loam dengan komposisi 40% sand; 40% silt; 20% clay.

## 2. Porositas dan Void Ratio

Porositas adalah persentase volume kosong (*void spaces*) yang terdapat pada komponen padatan tanah (Notodarmojo, 2005) ataupun batu (Keller, 2011). Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\text{Porositas } (\eta) = \frac{(100V_v)}{V} \quad \text{(Pers.2.1)}$$

Dimana:

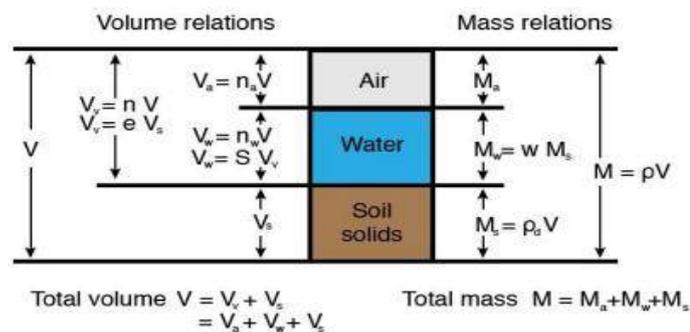
$\eta$  = dalam satuan persen (%)

$V_v$  = Volume void dalam satuan tanah

$V$  = Volume tanah, termasuk volume void dan komponen pada tanah

Istilah porositas tidak terlepas dari komponen tiga fase dalam tanah yaitu padat, air dan udara. Perbandingan ketiga komponen ini akan menghasilkan nilai porositas dari setiap tanah. Berdasarkan sistim tiga fase ini, persamaan matematis untuk nilai porositas dapat dituliskan:

$$\eta = \frac{V_f}{V_t} \quad \text{(Pers.2.2)}$$



**Gambar 2.** Diagram Skematik Sistim 3 Fase dalam Tanah

Sedangkan istilah void ratio (*e*) mengacu pada perbandingan volume kosong ( $V_f$ ) dengan volume solid ( $V_s$ ) yang ada di tanah. Secara matematis dituliskan:

$$\text{Void Ratio } (e) = \frac{V_f}{V_s} \quad \text{(Pers.2.3)}$$

### C. Air Tanah

Air tanah adalah air yang terdapat di bawah permukaan tanah (Bear dan Cheng, 2010) yang terbentuk sebagai bagian dari siklus hidrologi (Elango, 2005) melalui proses infiltrasi dan perkolasi dari air yang ada di permukaan tanah (Lee dan Lin, 1999). Todd (1980) dalam Bedient et al. mengkarakterisasi air tanah secara vertikal menjadi zona air tanah tidak jenuh (*unsaturated*) dan zona air tanah jenuh (*saturated*) yang dipisahkan oleh *capillary zone* (Bedient et al., 1999) atau *capillary fringe* (Schnoor, 1996).

Perbedaan utama dari aliran dalam kondisi jenuh dan tidak jenuh adalah pada nilai permeabilitas atau konduktivitas hidrolis. Pada kondisi jenuh, nilai permeabilitas atau konduktivitas hidrolis dianggap konstan. Berbeda dengan kondisi tidak jenuh dimana konduktivitas hidrolis dipengaruhi oleh kadar air. Selain itu, pada aliran tidak jenuh diffusivitas air yang ikut berperan dalam pergerakan air, terutama pergerakan front basah (*wetting front*) juga merupakan fungsi dari kadar air (Notodarmojo, 2005). Keberadaan air tanah terbagi menjadi dua zona yaitu zona tak jenuh (*unsaturated*) dan zona jenuh (*saturated*). Pada zona tak jenuh air, air tanah berkumpul dengan air tak jenuh pertengahan dan air kapiler. Sedangkan pada zona jenuh air hanya terdapat air tanah. Pembatasan zona bergantung kepada potongan irisan tanah.

#### a. Unsaturated Zone

Zona tidak jenuh (*unsaturated*) disebut juga dengan istilah *vadose zone* atau ada juga yang menyebut dengan *zone of aeration* karena pada zona ini terdapat ruang pori-pori yang berisi udara (Kamil, 2012). Air pada zona ini mengalir ke bawah menuju *water table* secara gravitasi. *Unsaturated zone* dibagi atas tiga subzone mulai dari yang paling atas: (1) zona akar atau disebut juga dengan zona tanah-air, (2) *intermediate zone* dan (3) *capillary zone* atau *capillary fringe* (Bear 2010).

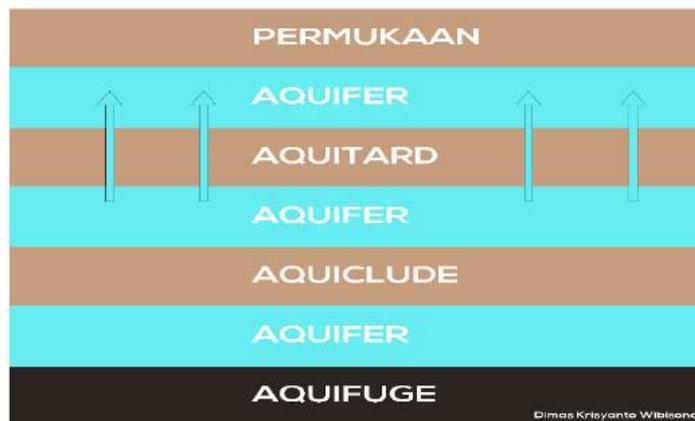
Zona akar adalah lapisan teratas dari *unsaturated zone* dimana tumbuhan sangat dipengaruhi oleh jumlah air di zona ini. Kelembaban air di zona ini juga sangat dipengaruhi oleh kondisi di permukaan tanah seperti musim, presipitasi, dan suhu udara. Kemudian *intermediate zone* dimulai

dari batas paling bawah zona akar sampai bagian paling atas capillary fringe. Ketebalan lapisan ini bersifat temporer tergantung pada kedalaman water table di bawah permukaan tanah. Bisa saja tidak ditemukan dalam kasus dimana water table sangat tinggi atau dengan kata lain capillary fringe mencapai zona akar. Subzone terbawah dari unsaturated zone adalah capillary fringe yaitu batas yang dapat dicapai oleh air dari water table secara kapilaritas (Bear dan Cheng, 2010). Secara umum kelembaban tanah di vadose zone akan menurun bila semakin jauh diatas permukaan air tanah (water table) secara vertikal ke permukaan tanah.

b. Saturated Zone

Aliran air di zona jenuh (saturated) terjadi pada formasi geologis yang disebut dengan akifer (aquifer) yaitu suatu formasi geologis yang bersifat kedap yang dapat menyimpan dan memindahkan sejumlah air. Berdasarkan posisi formasi geologinya, akifer dibedakan menjadi aliran akifer bebas, akifer semitertekan, akifer tertekan, dan perched aquifer (Notodarmojo, 2005: Bear 2000).

- (1) Aliran akuifer bebas (*unconfined aquifer*) yaitu aliran yang terjadi dalam akuifer yang mempunyai permukaan air yang tidak bertekanan.
- (2) Aliran akuifer tertekan (*confined aquifer*) yaitu aliran dalam akuifer yang dibatasi oleh formasi kedap air di bagian atas maupun bawahnya.
- (3) Aliran akuifer semitertekan (*semiconfined*) yaitu aliran dalam akuifer yang mengalir dari suatu akuifer tertekan menuju akuifer tidak tertekan atau sebaliknya melalui formasi yang membocorkan (*semipervious*) atau sering disebut aquitard.
- (4) *Perched aquifer* adalah kondisi khusus yang terbentuk oleh formasi *semipervious* ataupun *impervious* (kedap) yang posisinya berada diantara akuifer tak tertekan dengan permukaan tanah. Kondisi ini biasanya tidak bersifat permanen, hanya terjadi pada saat musim hujan saja (Notodarmojo, 2005).



**Gambar 3.** Sifat Batuan Terhadap Air Tanah

### 1. Pencemaran Air Tanah

Pencemaran dalam air tanah diakibatkan oleh sebuah kontaminan yang dapat didefinisikan sebagai zat kimia (cair, padat, maupun gas), baik yang berasal dari alam yang kehadirannya dipicu oleh manusia secara langsung maupun tidak langsung ataupun dari kegiatan manusia yang memberikan efek negative atau dampak yang buruk bagi kehidupan manusia atau lingkungannya belum teridentifikasi secara baik.

Kontaminan yang mempunyai potensi untuk mencemari tanah dan air tanah berasal dari berbagai sumber. Pada laporan tahun 1984, *Protecting the Nations Groundwater from Contamination, The Office of Tecnology Asessment* (OTA, 1984) mendaftarkan lebih dari 30 sumber kontaminan yang berpotensi dan membaginya menjadi 6 kategori. Rerking tertinggi dari daftar kontaminan tersebut adalah tangki penyimpanan bawah tanah, tempat pembuangan sampah yang ditinggalkan, kegiatan pertanian, tangki septic, bahan urugan tanah, dan landfill.

Dalam PP No.20/1990 tentang Pengendalian Pencemaran Air, pencemaran air didefinisikan sebagai masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi dan atau komponen lain kedalam air oleh kegiatan manusia sehingga kualitas air turun sampai ketingkat tertentu yang menyebabkan air tidak berfungsi lagi sesuai dengan peruntukannya.

Indikator atau tanda bahwa air telah tercemar adalah adanya perubahan atau tanda yang dapat diamati yang dapat digolongkan menjadi:

- a. Pengamatan secara fisik, yaitu pengamatan pencemaran air berdasarkan tingkat kejernihan air (kekeruhan), perubahan suhu, dan adanya perubahan warna, bau dan rasa.
- b. Pengamatan secara kimiawi, yaitu pengamatan pencemaran air berdasarkan zat kimia yang terlarut dan perubahan pH.
- c. Pengamatan secara biologis, yaitu pengamatan pencemaran air berdasarkan mikroorganisme yang ada dalam air, terutama ada tidaknya bakteri patogen.

## **2. Transport Kontaminan dalam Air Tanah**

Kontaminan/polutan yang berada dalam tanah selalu dalam kondisi dinamis, yaitu berinteraksi dengan partikel tanah atau mengalami transformasi sampai terjadi keseimbangan. Selain itu, larutan tanah atau air tanah dapat bergerak sesuai dengan energi yang dimilikinya, ke arah di mana energinya lebih rendah. Dengan adanya pergerakan massa air tersebut, maka kontaminan yang ada dalam air akan ikut bergerak. Dalam upaya memahami proses transportasi kontaminan dalam tanah, hal yang perlu diperhatikan yaitu: adveksi, dispersi, dan retardasi (Notodarmojo, 2005).

Transportasi karena adveksi merupakan proses fisik di mana air sebagai medium bergerak membawa kontaminan yang berada di dalamnya. Transportasi karena proses dispersi hidrodinamik merupakan perpindahan massa akibat difusi kontaminan, gradien konsentrasi mengakibatkan gerak Brown serta mekanisme dispersi. Hal ini terjadi karena ketidakaturan alur atau lintasan air melalui pori. Retardasi merupakan fenomena yang menunjukkan perubahan jumlah dari kontaminan selama terjadi proses transportasi akibat reaksi antara kontaminan dengan media tanah, yang memberikan efek seolah-olah gerakan kontaminan menjadi terhambat (Notodarmojo, 2005).

## **3. Adveksi dan Dispersi**

Adveksi dan dispersi merupakan dua proses transport yang paling utama dalam penyebaran kontaminan. Adveksi merupakan proses transport massa yang disebabkan adanya aliran air yang membawa serta kontaminan terlarut (Domenico and Schwartz, 1990). Adveksi menggambarkan pergerakan kontaminan yang

mengikuti aliran air tanah menurut kecepatan *seepage* pada media berpori, didefinisikan berdasarkan persamaan 2.4 sebagai berikut (Bedient et al., 1999):

$$V_x = - \frac{K}{n} \frac{dh}{dL} \quad (\text{Pers.2.4})$$

Dimana:

$V_x$  = Kecepatan air tanah

$K$  = Konduktivitas hidrolik

$n$  = Porositas

$dh/dL$  = Gradien hidrolik

Dispersi dikarenakan adanya media yang heterogen dan menyebabkan perbedaan kecepatan dan lintasan aliran. Perbedaan tersebut terjadi akibat pergeseran antara pori, perbedaan kecepatan antara lintasan yang satu dengan yang lainnya, dan panjang lintasan (Bedient et al., 1999). Flux dispersi pada suatu aliran mempunyai kecepatan yang linear ( $v_x = \bar{v} \times \text{konstan}$ ) diasumsikan sebanding dengan gradien konsentrasi pada jarak  $x$  dapat dijelaskan berdasarkan persamaan 2.6 sebagai berikut:

$$f_x = nCv_x = -nD_x \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (\text{Pers.2.6})$$

Dimana:

$f_x$  = dispersi flux

$n$  = efektifitas porositas

$C$  = konsentrasi kontaminan

$D_x$  = koefisien dispersi pada longitudinal

$\partial C/\partial x$  = gradient konsentrasi pada jarak.

#### **D. Solusi Numerik**

Metode numerik merupakan teknik penyelesaian permasalahan yang diformulasikan secara matematis dengan menggunakan operasi hitungan (aritmatik) yaitu operasi tambah, kurang, kali, dan bagi. Metode ini digunakan karena banyak permasalahan matematis tidak dapat diselesaikan menggunakan metode analitik. Jikapun terdapat penyelesaiannya secara analitik, proses

penyelesaiannya sering kali cukup rumit dan memakan banyak waktu sehingga tidak efisien. Hasil dari penyelesaian numerik merupakan nilai perkiraan atau pendekatan dari penyelesaian analitis.

Terdapat keuntungan dan kerugian terkait penggunaan metode numerik. Keuntungan dari metode ini antara lain:

1. Solusi persoalan selalu dapat diperoleh.
2. Dengan bantuan komputer, perhitungan dapat dilakukan dengan cepat serta hasil yang diperoleh dapat dibuat sedekat mungkin dengan nilai sesungguhnya.
3. Tampilan hasil perhitungan dapat disimulasikan.

Adapun kelemahan metode ini antara lain:

1. Nilai yang diperoleh berupa pendekatan atau hampiran.
2. Tanpa bantuan komputer, proses perhitungan akan berlangsung lama dan berulang-ulang.

Di dalam metode numerik terdapat nilai kesalahan numerik yang disebut *error* atau kesalahan yang timbul akibat adanya proses pendekatan atau hampiran. Kesalahan numerik terjadi karena dua hal:

1. Kesalahan bawaan (*inherent error*), merupakan kesalahan data yang timbul akibat adanya pengukuran, human error seperti kesalahan pencatatan, atau tidak memahami hukum-hukum fisik dari data yang diukur.
2. Kesalahan pembulatan (*round-off error*), adalah kesalahan yang terjadi karena adanya pembulatan angka. Contoh: 3,142857143... menjadi 3,14.
3. Kesalahan pemotongan (*truncation error*), adalah kesalahan yang ditimbulkan pada saat dilakukan pengurangan jumlah angka signifikan.

Ada beberapa metoda numerik yang telah digunakan dalam bidang hidrologi air tanah, seperti misalnya metoda beda hingga, elemen hingga, elemen batas, dan analitis elemen. Dua diantaranya merupakan metode numerik yang paling umum digunakan, yaitu:

- a. Metoda beda hingga (*finite difference*)
- b. Metoda elemen hingga (*finite element*)

Kedua metode tersebut telah berkembang dengan segala variasi dan bentuknya hingga kini. Metoda beda hingga merupakan metoda numerik yang paling tua dalam solusi persamaan diferensial parsial seperti persamaan gerak air tanah (Ashcroft, 1962; Forsythe & Wasow, 1960). Metoda ini mempunyai keunggulan dalam hal kesederhanaan dan relatif lebih mudah bila di bandingkan dengan metoda kedua. Salah satu kekurangan metoda beda hingga dibandingkan dengan metoda elemen adalah kurangnya fleksibilitas dalam mengakomodasi bentuk geometric dari domain yang di modelkan. Hal ini disebabkan grid untuk diskretisasi yang berbentuk persegi empat. Metoda elemen hingga mempunyai kelebihan dalam fleksibilitasnya mengikuti wilayah studi, walaupun teknik pemrograman dalam aplikasi komputer memerlukan keahlian yang lebih tinggi bila di bandingkan dengan aplikasi menggunakan metoda beda hingga.

*Finite Difference Methods* dan *Finite Element Methods* merupakan dua macam pendekatan numerik untuk mencari solusi persamaan diferensial parsial. *Finite difference methods* lebih awal diperkenalkan untuk menyelesaikan beberapa persamaan fisika, yaitu pada tahun 1930-an. Metode ini menyelesaikan persamaan differensial dengan membagi bidang menjadi sejumlah berhingga yang berbentuk segi empat. Selanjutnya pada tahun 1950-an diperkenalkan metode lain untuk menyelesaikan beberapa persamaan diferensial parsial yang digunakan pada bidang teknik, yang dikenal dengan *Finite Element Methods*. Metode ini membagi domain dengan sejumlah berhingga elemen, yang direpresentasikan dalam bentuk polinomial. Dengan demikian elemen yang digunakan pada *Finite Element Methods* tidak harus berbentuk segiempat.

Mengingat keterbatasan solusi analitik, solusi numerik menjadi alternatif yang penting dan menarik. Keterbatasan solusi analitik terutama dalam memodelkan persoalan praktis di lapangan yang pada umumnya mempunyai geometri yang lebih kompleks dan kondisi akifer serta aliran yang tidak homogen. Untuk kondisi tersebut solusi numerik menjadi alat yang penting karena kemampuannya dalam mengakomodasikan bentuk geometri yang tidak teratur dan sistem aliran dalam akifer yang tidak homogen dan tidak tunak. Carnahan et al., (1969), Kinzelbach (1986), Bear dan Verruijt (1990), menyajikan pengantar metode beda hingga dan

aplikasinya dalam bidang transport kontaminan dalam tanah. Dalam metode beda hingga, ada tiga langkah dasar, yaitu:

- a. Membagi wilayah (*domain*) dengan grid dan interval waktu,
- b. Memtransformasikan persamaan numerik (dalam hal ini persamaan diferensial parsial) menjadi persamaan aljabar, dan
- c. Memecahkan atau menghitung persamaan aljabar tersebut untuk seluruh domain.

### **E. GMS (*Groundwater Modelling System*)**

GMS (*Groundwater Modeling System*) adalah aplikasi pemodelan air tanah untuk membangun dan mensimulasikan model air tanah dari Aquaveo. Terdapat fitur geostatistik 2D dan 3D, pemodelan stratigrafi dan pendekatan model konseptual yang unik. Model yang didukung saat ini termasuk MODFLOW, MODPATH, MT3DMS, RT3D, FEMWATER, SEEP2D, dan UTEXAS. Sedangkan model yang digunakan dalam penelitian ini adalah MODFLOW dan MT3DMS.

#### **1. MODFLOW**

MODFLOW adalah program komputer yang secara numerik memecahkan persamaan aliran air tanah tiga dimensi untuk media berpori dengan menggunakan metode beda hingga (McDonald dan Harbaugh, 1988). Meskipun MODFLOW dirancang agar mudah ditingkatkan, desainnya berorientasi pada penambahan persamaan aliran air tanah. Seringkali ada kebutuhan untuk menyelesaikan persamaan tambahan; misalnya, persamaan transport dan persamaan untuk memperkirakan nilai parameter yang menghasilkan kecocokan terdekat antara *head* dan *flow* yang dihitung model dan nilai terukur.

Persamaan umum yang digunakan untuk aliran air tanah yang diadopsi oleh MODFLOW adalah sebagai berikut (Harbaugh, et al. 2000):

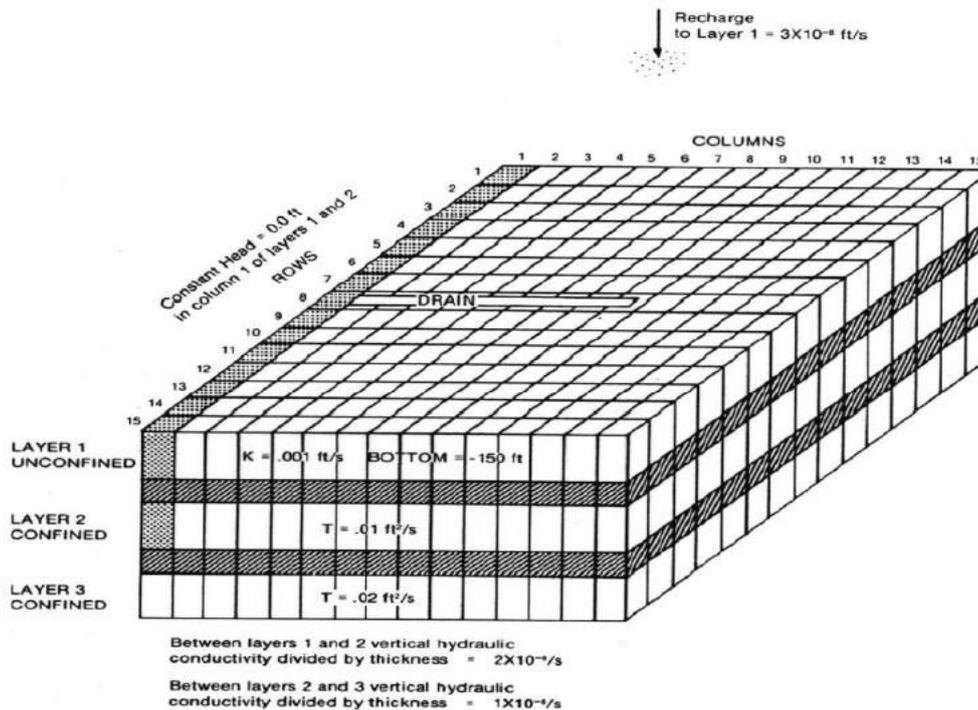
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{(Pers.2.7)}$$

dengan keterangan  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$  adalah nilai kelulusan hidraulik arah sumbu x, y, dan z, h adalah tinggi potensiometrik, W adalah fluks volume,  $S_s$  adalah tampungan spesifik pada material porus.

Persamaan tersebut di atas dapat diselesaikan dengan menggunakan metode beda hingga (*finite difference*) yang dibagi berdasarkan *grid/cell*. Proses terjadinya aliran air tanah, dijelaskan dengan aspek dasar teori air tanah. Persamaan aliran yang digunakan dalam program MODFLOW adalah dengan mengasumsikan sebuah *grid/cell* dimana aliran yang masuk ke dalam kotak dari berbagai arah sumbu dikurangi oleh aliran yang ke luar kotak dari berbagai arah sumbu sama dengan nol untuk aliran tetap (*steady state*).

Dalam program MODFLOW terdapat parameter seperti yang digunakan dalam terminologi estimasi parameter. Untuk memungkinkan penggabungan estimasi parameter dengan lancar ke MODFLOW 2000 dan memberikan pendekatan tambahan untuk menentukan data input. Jadi, di sini parameter adalah nilai tunggal yang diberi nama dan menentukan nilai variabel yang digunakan dalam persamaan aliran air tanah beda hingga pada satu atau lebih sel model. Definisi parameter menentukan variabel mana yang sedang didefinisikan dan sel yang parameternya berlaku. Misalnya parameter mungkin menentukan konduktivitas hidrolis akuifer untuk sekelompok sel dalam lapisan model atau parameter mungkin menentukan konduktansi dasar sungai untuk satu atau lebih jangkauan sungai. Parameter didefinisikan sebagai bagian dari Proses Aliran Air Tanah MODFLOW dan dapat digunakan oleh proses lain. Selain memfasilitasi penggabungan Proses Observasi, Sensitivitas, dan Parameter-Estimasi, pendekatan parameter untuk input model dapat mempermudah input data.

*Grid/cell* yang telah dibentuk akan menjadi wadah terhadap data yang telah diinput pada tiap parameter yang berbeda. Gambar di atas merupakan ilustrasi untuk pembuatan grid dan layer serta penginputan data yang nantinya akan disimulasikan menggunakan program MODFLOW. Berikut merupakan conto dari pembuatan *grid* dan *layer* pada pemodelan 3 dimensi yang digunakan *Software GMS (Groundwater Modelling System)*:



**Gambar 4.** Contoh Tampilan *Grid* dan *Layer*

MODFLOW sering digunakan dalam pemodelan air tanah. MODFLOW dapat menggambarkan aliran air tanah pada bawah permukaan dengan perhitungan aliran memenuhi hukum Darcy dan hukum kekekalan massa. MODFLOW dirancang untuk memiliki struktur modular yang memfasilitasi dua tujuan utama: kemudahan pemahaman dan kemudahan peningkatan. Kemudahan pemahaman adalah tujuan karena manajer teknis Survei Geologi A.S. umumnya percaya bahwa pemodel harus memahami bagaimana model bekerja untuk menggunakannya dengan benar. Kemudahan peningkatan adalah tujuan karena pengalaman menunjukkan bahwa ada kebutuhan berkelanjutan untuk kemampuan baru. Contoh perangkat tambahan adalah laporan oleh Prudic (1989), Hill (1990), Leake dan Prudic (1991), Goode dan Appel (1992), Harbaugh (1992), McDonald dan lain-lain (1992), Hsieh dan Freckleton (1993), Leake dan lain-lain (1994), Fenske dan lain-lain (1996).

## 2. MT3DMS

Setelah memodelkan aliran air tanah, dilanjutkan dengan menggunakan MT3DMS. MT3DMS adalah model transportasi tiga dimensi modular untuk

simulasi adveksi, dispersi, dan reaksi kimia dari konstituen terlarut dalam sistem air tanah. MT3DMS menggunakan struktur modular yang mirip dengan struktur yang digunakan oleh MODFLOW dengan metode beda hingga (*finite difference*). MT3DMS digunakan bersama dengan MODFLOW dalam simulasi aliran dan transportasi dua langkah. *Head* dan istilah *fluks* sel demi sel dihitung oleh MODFLOW selama simulasi aliran dan ditulis ke file yang diformat khusus. File ini kemudian dibaca oleh MT3DMS dan digunakan sebagai bidang aliran untuk bagian transportasi simulasi.

Model transportasi massal baru yang didokumentasikan dalam manual ini disebut sebagai MT3DMS, di mana MT3D adalah singkatan dari M adalah Modular, T adalah Transport 3-Dimensional sementara MS menunjukkan Multi Struktur khusus untuk mengakomodasi paket reaksi tambahan. MT3DMS memiliki serangkaian opsi dan kemampuan komprehensif untuk mensimulasikan adveksi, dispersi/difusi, dan reaksi kimia kontaminan dalam sistem aliran air tanah di bawah kondisi hidrogeologi umum. Bagian ini merangkum fitur utama MT3DMS.

MT3DMS dapat mengakomodasi skema diskritisasi spasial yang sangat umum dan kondisi batas transportasi, yaitu:

1. Lapisan akuifer terbatas, tidak terbatas atau bervariasi terbatas/tidak terbatas.
2. Lapisan model miring dan ketebalan sel variabel dalam lapisan yang sama.
3. Konsentrasi tertentu atau batas fluks massa.
4. Efek transpor zat terlarut dari sumber hidrolik eksternal dan sink seperti sumur, saluran air, sungai, areal resapan dan evapotranspirasi.

MT3DMS dirancang untuk digunakan dengan model aliran perbedaan hingga yang berpusat pada blok, seperti model aliran air tanah perbedaan hingga modular Survei Geologi AS, MODFLOW, dengan asumsi densitas fluida konstan dan kondisi jenuh.

MT3DMS unik karena mencakup tiga teknik solusi transportasi dalam satu kode, yaitu metode perbedaan hingga standar, pelacakan partikel berdasarkan metode Eulerian-Lagrangian, dan metode TVD volume terbatas orde tinggi. Karena tidak ada teknik numerik tunggal yang terbukti efektif untuk semua kondisi transportasi, kombinasi teknik solusi ini masing-masing memiliki kekuatan dan keterbatasannya

sendiri yang diyakini menawarkan pendekatan terbaik untuk memecahkan masalah transportasi.

MT3DMS mencakup pemecah matriks yang efisien dan serbaguna berdasarkan metode gradien konjugasi umum (GCG) dengan tiga opsi pengkondisian awal dan skema percepatan Lanczos/ORTHOMIN untuk matriks non simetris (lihat Zheng dan Wang, 1999, Appen dix A). Pemecah GCG selalu diaktifkan untuk memecahkan dispersi, sink/sumber, dan istilah reaksi secara implisit tanpa kendala stabilitas. Untuk istilah adveksi, pengguna memiliki opsi untuk memilih skema solusi yang tersedia, termasuk metode perbedaan hingga implisit, metode Eulerian-Lagrangian berbasis pelacakan partikel (MOC dan variannya), dan metode TVD orde ketiga. Metode beda hingga sepenuhnya implisit tanpa kendala stabilitas untuk membatasi ukuran langkah transportasi, tetapi pelacakan partikel berbasis metode Eulerian-Lagrangian dan metode TVD orde ketiga masih memiliki kendala ukuran langkah waktu yang terkait dengan pelacakan partikel dan metodologi TVD.

Persamaan diferensial parsial yang menggambarkan nasib dan pengangkutan kontaminan spesies kedalam tiga dimensi, sistem aliran air tanah transien dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad \text{Pers 2.8}$$

Ketetangan:

- $C^k$  = Konsentrasi terlarut spesies  $k$ ,  $ML^{-3}$
- $\theta$  = Porositas media bawah permukaan, tak berdimensi
- $t$  = Waktu T
- $x_i$  = Jarak di sepanjang sumbu masing-masing koordinat cartesian, L
- $D_{ij}$  = Tensor koefisien dispersi hidrodinamik,  $L^2T^{-1}$
- $v_i$  = Kecepatan rembesan atau linier air pori,  $LT^{-1}$ , terkait dengan debit spesifik atau fluks darcy melalui hubungan,  $v_i = q_i/\theta$
- $q_s$  = Laju aliran volumetrik per satuan volume akuifer yang mewakili fluida sumber (positif) dan tenggelam (negatif),  $T^{-1}$
- $C_s^k$  = Konsentrasi fluks sumber atau sink untuk spesies  $k$ ,  $ML^{-3}$

$\sum R_n$  = istilah reaksi kimia,  $ML^{-3} T^{-1}$

Untuk persamaan adveksi dan dispersi yang digunakan oleh program MT3DMS merupakan persamaan transport yang telah dijelaskan sebelumnya sedangkan sumber/sink perlu menentukan nilai konsentrasi awalnya. Kedua paket tersebut merupakan jenis data yang akan diinput kedalam MT3DMS.