

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang.

Sampah merupakan material sisa dari aktivitas manusia yang tidak lagi memiliki nilai guna dan dibuang. Sampah dapat berasal dari berbagai sumber seperti rumah tangga, industri, pertanian, serta sektor komersial lainnya. Setiap jenis sampah memiliki karakteristik dan dampak yang berbeda terhadap lingkungan baik itu sampah organik, plastik, logam, atau bahan kimia (Rapii et al., 2021). Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk dan aktivitas manusia menyebabkan volume sampah yang dihasilkan juga semakin bertambah sehingga diperlukan tempat untuk menampung sampah dalam jumlah besar yaitu Tempat Pemrosesan Akhir (TPA).

Indonesia menduduki peringkat kedua sebagai negara penghasil sampah terbanyak di dunia setelah China dengan sampah rumah tangga menjadi jenis sampah yang paling dominan. Berdasarkan data dari Program Lingkungan PBB, Indonesia juga tercatat sebagai negara penghasil sampah plastik terbesar kedua di dunia setelah Tiongkok. Mayoritas sampah plastik di Indonesia berasal dari sektor rumah tangga, yang mencapai 38% pada tahun 2023. Sumber utama sampah ini adalah sampah anorganik yang sulit terurai. Data dari Bank Dunia menyebutkan bahwa Indonesia menghasilkan sekitar 151.921 ton sampah padat setiap harinya, yang berarti setiap individu di Indonesia membuang rata-rata 0,85 kg sampah per hari. Meskipun 80% dari total sampah yang dihasilkan berhasil dikumpulkan, sebagian besar sampah lainnya tidak terkelola dengan baik dan berakhir mencemari lingkungan (Devi. N, et.al 2024).

Sistem Data Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) menyebutkan bahwa untuk dua tahun berturut-turut, yakni pada tahun 2022 hasil input dari 202 kab/kota se Indonesia menyebut jumlah timbunan sampah nasional mencapai angka 21,1 juta ton. Dari total produksi sampah nasional tersebut, 65,71% (13,9 juta ton) dapat terkelola, sedangkan sisanya 34,29% (7,2 juta ton) belum terkelola dengan baik. Selanjutnya pada tahun 2023 terdapat sebesar 69,9 juta ton sampah. Berdasarkan komposisi sampah yang ada di Indonesia, didominasi oleh sampah sisa makanan sebesar 41,60% dan sampah plastik sebesar 18,71%. Sedangkan dari sisi sumber sampah, sampah terbanyak berasal dari Rumah Tangga dengan prosentasi sekitar 44,37% (SIPSN, 2023). Sebagian besar sampah yang dihasilkan di wilayah ini berakhir di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) yang berfungsi sebagai lokasi pembuangan akhir bagi limbah domestik maupun industri.

Tempat Pembuangan Akhir (TPA) merupakan salah satu tempat yang digunakan untuk membuang sampah yang sudah mencapai tahap akhir dalam pengolahan sampah yang dimulai dari pertama kali sampah dihasilkan, dikumpulkan, diangkut, dikelola dan dibuang (Sari Putri et al., 2020). Sampah yang berada di TPA selanjutnya akan mengalami proses dekomposisi secara alami oleh mikroorganisme sehingga dapat menghasilkan bahan organik berupa

padatan terlarut atau tersuspensi yang tinggi zat pencemar dan beracun yang biasa disebut air lindi (leachate). Air lindi ini terbentuk dari pencampuran air hujan dan zat-zat organik maupun anorganik yang terdapat dalam timbunan sampah. Komposisi air lindi sangat kompleks, mengandung logam berat, senyawa organik beracun, serta mikroorganisme patogen yang berbahaya bagi lingkungan yang nantinya akan mengikuti limpasan air hujan yang akan masuk ke tanah dan akan menurunkan kualitas air tanah (Permono & Mustain, 2024).

Air tanah merupakan salah satu sumber daya vital. Air tanah berada di zona jenuh di bawah permukaan tanah dan dapat bergerak menuju permukaan melalui proses alami maupun intervensi buatan (Fetter, 2001). Menariknya, lebih dari 98 persen sumber daya air di daratan tersembunyi di bawah permukaan tanah, sementara hanya sekitar 2 persen yang tersedia di sungai, danau, serta reservoir. Namun, keberlanjutan air tanah menghadapi ancaman serius akibat pencemaran, salah satunya dari air lindi yang berasal dari Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Air lindi yang mengandung berbagai zat-zat kimia berbahaya seperti logam berat dapat meresap ke dalam tanah dan mencemari air tanah sehingga menurunkan kualitasnya dan berpotensi membahayakan kesehatan manusia serta ekosistem (Nurhakim & Firdaus, 2022).

Zat-zat kimia yang dimaksud termasuk logam berat, yaitu polutan yang bersifat persisten dan tidak mudah terurai di lingkungan. Logam berat dapat berasal dari proses alami maupun aktivitas manusia (antropogenik) dan cenderung terakumulasi di ekosistem. Secara umum, logam berat merupakan unsur kimia dengan massa atom sama dengan atau lebih dari 200 (Setiawan et al., 2022). Salah satu logam berat yang paling banyak dikenal yakni timbal (Pb) (Velda et al., 2023). Timbal (Pb) memiliki sifat toksik bagi organisme hidup, bahkan dalam konsentrasi rendah, dan dapat mengganggu fungsi metabolisme makhluk hidup, terutama jika terakumulasi dalam jumlah tinggi. Pada manusia, paparan logam berat ini dapat menimbulkan dampak toksik yang serius. Salah satu jalur utama masuknya logam berat ke dalam tubuh manusia adalah melalui konsumsi air tanah yang telah tercemar, baik akibat infiltrasi air lindi dari tempat pembuangan sampah maupun sumber pencemaran lainnya (Nata et al., 2024).

Penelitian yang dilakukan oleh Hartini dan Yulianto (2020) menjelaskan bahwa berdasarkan analisis kualitas lingkungan di sekitar TPA Ciangir, air lindi yang dihasilkan dari proses penguraian sampah diketahui mengandung logam berat dan salah satu di antaranya yang paling banyak ditemukan yakni timbal (Pb), yang mencemari air tanah di sekitarnya. Timbal dalam air lindi berasal dari berbagai jenis limbah yang masuk ke TPA, termasuk limbah rumah tangga, industri, dan material anorganik lainnya. Kontaminasi ini dapat menurunkan kualitas air tanah, sehingga tidak layak untuk digunakan sebagai air minum tanpa pengolahan lebih lanjut. Selain itu, resapan lindi ke dalam tanah dapat memengaruhi ekosistem lokal, termasuk aktivitas pertanian yang menggunakan air dari sumber yang tercemar. Peningkatan volume sampah yang terus masuk ke TPA Ciangir memperbesar risiko pencemaran ini, sehingga diperlukan

pengelolaan limbah yang lebih efektif untuk melindungi lingkungan dan kesehatan masyarakat di sekitar lokasi (Hartini & Yulianto, 2020).

Penelitian yang sama dilakukan oleh Handriyani et al. (2023) di TPA Suwung, Denpasar Selatan yang meneliti kadar timbal (Pb) dalam air sumur gali sebagai air tanah yang digunakan oleh masyarakat sekitar sebagai sumber air utama. Dengan sistem open dumping yang masih diterapkan di TPA ini, potensi pencemaran air tanah menjadi perhatian utama. Sampel air sumur diambil dari beberapa lokasi sekitar TPA dan dianalisis menggunakan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) untuk mengukur kadar timbal. Hasil penelitian menunjukkan kadar timbal bervariasi antara 0,0060 mg/L hingga 0,1023 mg/L, di mana beberapa sampel melebihi ambang batas yang ditetapkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 416/MENKES/PER/IX/1990, yaitu 0,05 mg/L. Kadar tertinggi yang ditemukan yaitu 0,1023 mg/L, mengindikasikan adanya pencemaran signifikan yang berpotensi membahayakan kesehatan masyarakat yang mengonsumsi air tersebut. Penyebab utama pencemaran ini diduga karena jarak sumur yang terlalu dekat dengan TPA, sehingga meningkatkan risiko infiltrasi zat berbahaya ke dalam air tanah (Handriyani et al., 2023).

Data dari SIPSN tahun 2023 juga menunjukkan bahwa timbulan sampah di Provinsi Sulawesi Selatan didominasi oleh Kota Makassar dengan hampir 400.000 ton, jauh lebih tinggi dibandingkan daerah lain seperti Kabupaten Gowa dan Kabupaten Maros yang juga memiliki angka signifikan. Sebagian besar kabupaten lainnya seperti Bulukumba, Bone, dan Jeneponto menunjukkan jumlah timbulan sampah yang relatif kecil. Secara keseluruhan total timbulan sampah di provinsi ini mencapai lebih dari 1,6 juta ton, menggambarkan kebutuhan mendesak untuk pengelolaan sampah yang efektif, terutama di daerah dengan timbulan sampah tertinggi.

Besarnya timbulan sampah di Kota Makassar menuntut keberadaan Tempat Pembuangan Akhir (TPA) yang memadai untuk menampung dan mengelola sampah dengan efektif. Saat ini TPA Tamangapa menjadi satu-satunya lokasi utama pembuangan sampah di Kota Makassar. TPA Tamangapa atau yang lebih dikenal sebagai TPA Antang terletak di Kelurahan Tamangapa, Kecamatan Manggala, Kota Makassar, Sulawesi Selatan. Beroperasi sejak tahun 1993, TPA ini merupakan yang terbesar di Pulau Sulawesi dengan luas sekitar 19,1 hektar. TPA ini menampung sekitar 900–1.000 ton sampah per hari yang berasal dari seluruh wilayah Kota Makassar. Seiring waktu, kapasitas TPA semakin penuh. Pada tahun 2022, ketinggian tumpukan sampah di TPA ini mencapai 40–50 meter yang melebihi kapasitas seharusnya. Sampah yang menggunung ini meningkatkan risiko kebakaran, pencemaran air tanah, dan emisi gas metana, yang dapat berdampak pada lingkungan dan kesehatan masyarakat sekitar. TPA dengan sistem pengelolaan yang masih didominasi oleh metode open dumping ini dapat menyebabkan berbagai permasalahan lingkungan, seperti khususnya pencemaran air tanah, yang sangat berisiko bagi kesehatan masyarakat sekitar.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Maya Malle (2020) menyatakan bahwa masyarakat di Kelurahan Tamangapa, Kecamatan Manggala, Kota Makassar, yang berada di sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Tamangapa, sebagian besar masih mengandalkan air tanah sebagai sumber air bersih untuk kebutuhan sehari-hari. Namun, penelitian menunjukkan bahwa kualitas air tanah di sekitar TPA tersebut telah mengalami penurunan akibat kontaminasi. Penelitian ini juga menyebutkan bahwa parameter fisik dan kimia air tanah di wilayah tersebut menunjukkan adanya pencemaran, yang kemungkinan besar disebabkan oleh peresapan air lindi dari TPA ke dalam tanah.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Sigit (2022) juga mengidentifikasi bahwa TPA Tamangapa merupakan salah satu sumber utama pencemar terhadap sumber air baku di sekitarnya. Air hujan yang melewati timbunan sampah mempercepat proses masuknya lindi ke dalam tanah, sehingga menimbulkan pencemaran air tanah. Hal ini sangat merugikan masyarakat sekitar TPA Tamangapa karena masih banyak penduduk yang memanfaatkan air tanah untuk keperluan air bersih mereka.

Konsentrasi timbal (Pb) yang tinggi di sekitar TPA Tamangapa Antang Kota Makassar disebabkan oleh berbagai faktor, terutama jenis sampah yang masuk ke TPA ini. Sebagai pusat pembuangan utama di Kota Makassar, TPA Tamangapa menerima berbagai limbah anorganik yang menjadi sumber utama timbal, seperti baterai bekas, cat, limbah elektronik (e-waste), serta limbah industri yang mengandung Pb. Dibandingkan logam berat lainnya seperti kadmium (Cd) atau merkuri (Hg), timbal lebih banyak ditemukan karena berasal dari berbagai produk rumah tangga dan industri yang umum digunakan oleh masyarakat. Selain itu, proses pelapukan dan dekomposisi sampah di lingkungan TPA yang bersifat asam dapat meningkatkan kelarutan timbal dalam air lindi, sehingga lebih mudah meresap ke dalam tanah dan mencemari air tanah. Sifat timbal yang lebih stabil dalam kondisi lingkungan yang bervariasi juga membuatnya lebih persisten dibandingkan logam berat lainnya, sehingga cenderung terakumulasi dalam jangka waktu yang lebih lama di lingkungan sekitar TPA Tamangapa.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Faisal Gunawan (2017) mendapatkan hasil yakni dibandingkan dengan logam lainnya, timbal cenderung lebih dominan karena berasal dari berbagai sumber limbah anorganik seperti baterai bekas, cat, dan limbah elektronik yang banyak dibuang ke TPA ini. Faktor kelarutan timbal yang lebih tinggi dalam kondisi lingkungan asam serta sifat yang persisten juga menyebabkan akumulasi lebih besar dalam air tanah di sekitar TPA Tamangapa Antang. Hasil penelitian ini mengkonfirmasi bahwa pencemaran logam berat, terutama timbal, perlu menjadi perhatian utama dalam pengelolaan lingkungan dan kesehatan.

Berdasarkan uraian di atas, peneliti ingin mengetahui sejauh mana sebaran logam berat timbal (Pb) memengaruhi kualitas air tanah di sekitar TPA Tamangapa Antang Kota Makassar sehingga dapat memberikan gambaran

mengenai potensi dampak bagi lingkungan serta kesehatan masyarakat akibat keberadaan logam berat dalam air tanah di kawasan tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah "Bagaimana analisis kandungan logam berat Timbal (Pb) terhadap air tanah di daerah TPA Tamangapa Antang Kota Makassar?"

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1.3.1 Tujuan Umum

Menganalisis kandungan logam berat Timbal (Pb) terhadap air tanah di daerah TPA Tamangapa Antang Kota Makassar.

1.3.2 Tujuan Khusus

Adapun tujuan khusus yang ingin dicapai adalah sebagai berikut:

- a. Mengidentifikasi penyebaran konsentrasi timbal (Pb) pada air tanah berdasarkan wilayah sekitar TPA Antang Tamangapa Kota Makassar
- b. Mengidentifikasi penyebaran konsentrasi timbal (Pb) pada air tanah berdasarkan jarak dari TPA Antang Tamangapa Kota Makassar
- c. Mengidentifikasi penyebaran konsentrasi timbal (Pb) pada air tanah berdasarkan kedalaman air tanah di wilayah sekitar TPA Antang Tamangapa Kota Makassar
- d. Mengidentifikasi konsentrasi timbal (Pb) pada air lindi di TPA Antang Tamangapa Kota Makassar

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1.4.1 Manfaat Ilmiah

Penelitian ini memberikan manfaat secara signifikan terhadap pemahaman ilmiah terkait sebaran logam berat timbal (Pb) terhadap kualitas air tanah di sekitar TPA Tamangapa Antang Kota Makassar. Dengan mengetahui kadar dan tingkat pencemaran timbal (Pb) air tanah, penelitian ini dapat menjadi acuan dan referensi bagi studi-studi selanjutnya yang berkaitan dengan sebaran logam berat khususnya timbal (Pb) terhadap air tanah.

1.4.2 Manfaat Bagi Institusi

Manfaat penelitian ini bagi institusi adalah sebagai dasar untuk mengembangkan kebijakan pengelolaan limbah yang lebih efektif, terutama terkait dengan pengelolaan air lindi khususnya di TPA. Hasil penelitian ini juga dapat digunakan untuk merancang strategi mitigasi pencemaran dan mendukung upaya perlindungan lingkungan serta kesehatan masyarakat, sekaligus memperkaya data untuk perencanaan pembangunan berkelanjutan.

1.4.3 Manfaat praktis

Penelitian ini dapat menjadi pengalaman yang sangat berharga dan menambah wawasan serta pengetahuan bagi peneliti dalam

menerapkan ilmu pengetahuan yang diperoleh selama proses perkuliahan.

1.5 Kajian Teori

1.5.1 Tinjauan Umum tentang Sampah

Sampah adalah material sisa dari aktivitas manusia yang tidak lagi memiliki nilai guna dan dibuang ke lingkungan. Sampah dapat berasal dari berbagai sumber, antara lain rumah tangga, industri, pertanian, dan sektor komersial lainnya. Sampah terdiri dari berbagai jenis, yang terbagi menjadi sampah organik dan anorganik. Sampah organik meliputi bahan-bahan yang berasal dari alam dan dapat terurai, seperti sisa makanan, daun, dan ranting, sedangkan sampah anorganik mencakup bahan-bahan yang sulit terurai secara alami, seperti plastik, kaca, logam, dan bahan-bahan sintetis lainnya (Fitri & Santoso, 2024).

Seiring dengan peningkatan jumlah penduduk dan perkembangan industri, jumlah sampah yang dihasilkan pun semakin meningkat. Sampah yang tidak dikelola dengan baik dapat menimbulkan dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan. Salah satu dampak terburuk dari pengelolaan sampah yang buruk adalah pencemaran tanah, air, dan udara. Sampah yang menumpuk dan terdekomposisi secara tidak terkontrol dapat menghasilkan gas berbahaya seperti metana, yang berdampak pada kualitas air dan meningkatkan pemanasan global. Selain itu, sampah yang dibuang sembarangan dapat mencemari tanah, menyebabkan kerusakan pada ekosistem tanah, dan berisiko terhadap kesehatan manusia (Mahendra & Salsabila, 2024).

Sampah juga dapat menghasilkan air lindi, yaitu cairan yang terbentuk dari proses peresapan air hujan atau air yang melewati timbunan sampah. Air lindi mengandung bahan kimia berbahaya, seperti logam berat dan zat organik, yang dapat mencemari sumber air tanah jika tidak dikelola dengan benar. Pencemaran air tanah akibat sampah ini menjadi salah satu isu besar, terutama di kota-kota dengan tingkat urbanisasi yang tinggi, di mana pengelolaan sampah yang efektif sering kali tidak tercapai (Utami et al., 2023).

Oleh karena itu, pengelolaan sampah yang tepat dan berkelanjutan sangat penting untuk menjaga kelestarian lingkungan dan kesehatan masyarakat. Salah satu pendekatan yang kini digalakkan adalah penerapan prinsip 3R (Reduce, Reuse, Recycle) yang bertujuan untuk mengurangi jumlah sampah yang dihasilkan, memanfaatkan kembali barang yang masih berguna, dan mendaur ulang sampah yang memungkinkan untuk diproses lebih lanjut. Pengelolaan sampah yang baik dapat membantu mengurangi beban TPA (Tempat Pemrosesan Akhir) serta mencegah dampak negatif dari sampah terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Fitri & Santoso, 2024).

1.5.2 Tinjauan Umum tentang Logam Berat Timbal (Pb)

a. Definisi Timbal (Pb)

Timbal (Pb) adalah salah satu logam berat yang tidak memiliki peran esensial bagi organisme yang berarti tidak dibutuhkan oleh tubuh dalam jumlah apapun untuk proses biologis yang normal. Sebagai logam berat beracun, timbal memiliki dampak merugikan bagi seluruh ekosistem baik itu tanaman, hewan, maupun manusia. Sifat toksiknya membuat timbal sangat berbahaya, terutama karena kemampuannya untuk menumpuk dalam tubuh dan menyebabkan kerusakan pada sistem saraf, organ vital lainnya, serta mengganggu proses metabolisme. Timbal juga merupakan salah satu logam berat yang paling banyak ditemukan di lingkungan, sering kali sebagai hasil dari aktivitas industri, kendaraan bermotor, dan pembuangan limbah beracun. Sebaran timbal yang luas ini menyebabkan pencemaran yang melibatkan tanah, air, dan udara, dengan potensi untuk merusak ekosistem dalam jangka panjang (Triyanto et al., 2024).

Timbal (Pb) adalah unsur kimia yang termasuk dalam golongan IVA dan memiliki sifat logam dengan warna abu-abu kebiruan, yang sering kali dikenal sebagai timah hitam. Timbal dapat ditemukan di lingkungan dalam dua bentuk utama, yaitu senyawa organik dan anorganik. Meskipun kedua bentuk tersebut memiliki komposisi kimia yang berbeda, keduanya mengandung sifat toksik yang serupa dan berpotensi membahayakan makhluk hidup, bahkan dalam konsentrasi yang sangat rendah sekalipun. Kedua bentuk timbal ini dapat terakumulasi dalam tubuh organisme, mengganggu fungsi biologis normal, dan menyebabkan kerusakan jangka panjang pada sistem saraf, ginjal, dan organ lainnya. Paparan terhadap timbal dalam bentuk apapun, baik melalui inhalasi, konsumsi, atau kontak langsung, dapat menyebabkan kerusakan serius pada kesehatan manusia dan hewan (Rachman et al., 2024).

Timbal yang memiliki permukaan yang mengkilap ini dengan mudah dimurnikan melalui proses metalurgi yang sering dilakukan di sektor pertambangan. Salah satu karakteristik utama timbal adalah titik leburnya yang relatif rendah, yaitu pada suhu $327,5^{\circ}\text{C}$, membuatnya mudah dicairkan dan diolah. Timbal memiliki berat jenis tinggi, yaitu $11,34 \text{ g/cm}^3$, serta bobot atom sebesar 207,2, yang menegaskan sifatnya sebagai logam yang padat dan berat (Wulandari, 2020).

Timbal (Pb) juga biasa dikatakan sebagai logam berat yang lunak dan tahan terhadap korosi atau karat, sehingga sering digunakan sebagai bahan pelapis pada konstruksi pabrik-pabrik kimia, dan alat mekanik, contohnya timbal dalam industri baterai

digunakan sebagai bahan aktif untuk pengaliran arus elektron (Pratama et al., 2020). Contoh lainnya juga terdapat pada bahan bakar minyak yaitu bensin yang di mana timbal ini sendiri berperan sebagai bahan yang dapat meningkatkan daya pelumasan dan meningkatkan efisiensi pembakaran (Sudarma & Bintari, 2023).

b. Sifat dan Perilaku di Lingkungan

Timbal dapat masuk ke perairan sebagai dampak dari aktivitas kehidupan manusia, diantaranya melalui air buangan limbah dari industri yang berkaitan dengan Pb, air buangan limbah dari pertambangan bijih timah hitam, dan sisa air dari industri baterai. Limbah tersebut berpotensi menyebabkan pencemaran air (Pratama et al., 2020). Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengolahan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, keberadaan Pb dalam air diharapkan nihil. Batas maksimal Pb yang dibolehkan di air adalah 0,01 ppm (Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 492 Tahun 2010). Kadar Pb yang melebihi batas maksimal dapat bersifat toksik bagi semua organisme hidup.

Sumber-sumber pencemaran timbal dari lingkungan, antara lain adalah kegiatan penambangan, peleburan, manufaktur dan daur ulang baterai/aki bekas, dan di beberapa negara, penggunaan cat bertimbal dan bahan bakar bertimbal. Sebagian besar konsumsi timbal di dunia adalah untuk pembuatan baterai (aki) kendaraan bermotor. Namun, timbal juga digunakan dalam banyak produk lain, misalnya cat, solder, kaca patri, gelas kristal, amunisi, glasir keramik, perhiasan, mainan dan beberapa kosmetik dan obat-obatan tradisional. Air minum yang dialirkan melalui pipa yang mengandung timbal atau pipa yang disambung dengan solder timbal juga merupakan sumber pajanan. Penggunaan pestisida yang mengandung timbal merupakan salah satu sumber pajanan utama bagi masyarakat di wilayah pertanian. Sumber pajanan timbal lain, yang banyak terjadi di masyarakat, adalah asap rokok lingkungan (environmental tobacco smoke, ETS). Partikulat yang mengandung timbal dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui perantara lingkungan, yaitu air, udara, dan tanah (Suhartono, 2022).

Konsentrasi logam berat dalam air lindi dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk volume dan jenis sampah yang dihasilkan dari berbagai sumber pencemaran. Sampah domestik, industri, maupun komersial dapat memberikan kontribusi berbeda terhadap kadar logam berat yang terakumulasi. Selain itu, tingkat logam berat dalam air lindi juga sangat bergantung pada jenis dan kondisi pengelolaan tempat pembuangan akhir (TPA). TPA yang menerapkan sistem pengelolaan lindi yang efektif, seperti penggunaan lapisan pelindung tanah (liner), saluran drainase, dan fasilitas pengolahan air

lindi, memiliki kemampuan lebih baik untuk mengurangi pencemaran. Sistem pengumpulan dan pengolahan lindi yang terstruktur dapat secara signifikan menekan dampak negatif terhadap kualitas air tanah dan lingkungan sekitar. Sebaliknya, TPA yang tidak dikelola dengan baik berpotensi memperbesar risiko pencemaran lingkungan, khususnya pada sumber daya air dan tanah yang berada di sekitarnya (Rachmawati et al., 2024).

1.5.3 Tinjauan Umum tentang Air Lindi

a. Definisi Air Lindi

Sampah dapat diartikan sebagai material sisa yang dihasilkan dari berbagai aktivitas manusia atau proses alami, yang dianggap tidak memiliki nilai ekonomi. Bahkan, dalam banyak kasus, sampah memiliki nilai ekonomi negatif karena pengelolaannya memerlukan biaya yang signifikan, baik untuk proses pembuangan, pengangkutan, maupun pembersihan lingkungan. Salah satu produk sampingan dari keberadaan sampah adalah air lindi, atau yang sering disebut juga air sampah. Air lindi merupakan cairan yang terbentuk akibat peresapan air ke dalam limbah padat, seperti yang terjadi saat air hujan meresap ke dalam timbunan sampah. Cairan ini mengandung berbagai bahan terlarut, seperti zat organik, logam berat, dan senyawa kimia lainnya, serta partikel tersuspensi yang dihasilkan dari interaksi antara sampah dan air. Kehadiran air lindi menjadi tantangan lingkungan yang serius karena potensi pencemarannya yang tinggi, sehingga diperlukan strategi pengelolaan yang efektif untuk mengurangi dampaknya terhadap ekosistem (Lucyana, 2023).

Air lindi merupakan cairan yang terbentuk ketika air melewati lapisan timbunan sampah dan membawa serta berbagai zat dari material yang melewatinya. Cairan ini mengandung senyawa-senyawa terlarut dan partikel tersuspensi yang dihasilkan dari proses pelarutan dan interaksi kimia antara air dan komponen limbah. Di lokasi tempat pembuangan akhir (TPA), saluran air umumnya berasal dari sumber eksternal seperti hujan, limpasan air permukaan, atau air tanah, serta dari cairan yang dikeluarkan selama proses tersebarnya sampah. Sementara itu, air yang berasal dari kadar kelembaban alami dalam limbah hanya memberikan kontribusi kecil terhadap pembentukan air lindi (Said & Hartaja, 2020).

b. Komposisi Air Lindi

Cairan yang terbentuk akibat akumulasi timbunan sampah ini yang mengandung berbagai senyawa pencemar dengan konsentrasi tinggi, terutama zat organik. Proses pembentukannya terjadi karena adanya infiltrasi air hujan yang meresap ke dalam timbunan sampah, kelembapan alami yang berasal dari bahan

organik di dalamnya, serta dekomposisi material organik yang berlangsung secara terus-menerus. Air lindi ini secara bertahap mengisi rongga-rongga yang ada di antara lapisan sampah, menciptakan jalur bagi cairan untuk mengalir dan menyebar. Ketika volume air lindi yang terbentuk melampaui kapasitas tampung rongga atau tekanan dalam timbunan, cairan tersebut akan merembes keluar dari struktur timbunan. Dalam proses perembesan ini, air lindi membawa serta berbagai senyawa organik dan anorganik yang dihasilkan melalui mekanisme kompleks, termasuk proses fisika seperti pergerakan cairan dan tekanan, reaksi kimia seperti oksidasi dan reduksi, serta aktivitas biologis yang melibatkan mikroorganisme dalam mendegradasi bahan organik (Apriyani & Lesmana, 2020).

Air lindi yang dihasilkan dari proses pembusukan sampah merupakan salah satu indikator aktifnya aktivitas biologis dalam tumpukan limbah. Pembentukan cairan ini tidak hanya mencerminkan adanya dekomposisi bahan organik tetapi juga menandakan interaksi kimia dan fisik yang terjadi antara berbagai komponen limbah. Dalam proses pembusukan, mikroorganisme memecah bahan organik menjadi senyawa yang lebih sederhana, menghasilkan produk sampingan seperti cairan ini. Selain itu, pembusukan yang berlangsung secara terus-menerus menghasilkan senyawa larut yang beragam, termasuk zat-zat yang sebelumnya terikat dalam bentuk padat. Air lindi ini seringkali mengandung senyawa yang menunjukkan perubahan kimiawi yang dinamis, seperti lonjakan konsentrasi asam organik atau zat terlarut lainnya, yang dapat memengaruhi sifat cairan seiring waktu. Dengan demikian, keberadaan air lindi adalah bukti nyata dari proses biologis dan kimiawi yang kompleks di dalam tumpukan sampah (Herlina et al., 2023).

Air lindi adalah cairan yang terbentuk ketika air eksternal, seperti hujan atau percolation, meresap ke dalam tumpukan sampah dan melarutkan berbagai materi yang terkandung di dalamnya, termasuk bahan organik yang dihasilkan dari proses dekomposisi biologis. Proses ini menghasilkan cairan yang kaya akan berbagai polutan, baik yang bersifat organik maupun anorganik. Lindi yang dihasilkan di tempat pembuangan akhir (TPA) merupakan salah satu jenis limbah yang sangat pekat, dengan kandungan bahan-bahan seperti humus, yang merupakan komponen utama hasil dekomposisi organik, serta nitrogen dalam bentuk amonia. Selain itu, air lindi juga mengandung logam berat yang berbahaya bagi lingkungan, garam anorganik, dan senyawa lain yang dapat mencemari tanah dan air. Salah satu karakteristik utama dari air lindi adalah rasio BOD5 (Biochemical Oxygen Demand) terhadap COD (Chemical Oxygen

Demand) yang rendah, yang menunjukkan bahwa air lindi memiliki kandungan oksigen terlarut yang rendah dibandingkan dengan jumlah total bahan kimia yang dapat terurai. Selain itu, konsentrasi TDS (Total Dissolved Solids) dalam air lindi sangat tinggi, menunjukkan jumlah total zat terlarut yang ada dalam cairan ini. pH air lindi biasanya berkisar antara 6 hingga 7, yang mencerminkan sifatnya yang relatif netral namun tetap berpotensi menimbulkan dampak pencemaran jika tidak dikelola dengan baik (Rizqia & Slamet, 2021).

c. Faktor Pengaruh

Karakteristik air lindi sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk jenis limbah yang terkandung, kondisi lingkungan di sekitar tempat pembuangan, serta tahap degradasi yang terjadi dalam timbunan sampah. Limbah organik cenderung menghasilkan air lindi dengan kandungan senyawa organik yang tinggi, seperti asam lemak volatil, yang memberikan kontribusi pada bau menyengat dan tingkat keasaman yang signifikan. Sebaliknya, limbah anorganik, termasuk bahan berbahaya seperti baterai atau bahan kimia industri, dapat meningkatkan kadar logam berat dan senyawa toksik dalam air lindi, sehingga menambah risiko pencemaran lingkungan. Proses dekomposisi biologis dan kimia yang berlangsung dalam timbunan limbah menyebabkan perubahan bertahap pada sifat fisik dan kimia air lindi, termasuk perubahan warna, aroma, dan pH. Pada tahap awal degradasi, air lindi cenderung bersifat asam akibat aktivitas mikroorganisme yang mengurai bahan organik. Namun, seiring waktu, proses ini dapat menghasilkan senyawa yang lebih stabil, sehingga tingkat keasaman berangsur-angsur mendekati netral. Kompleksitas komposisi air lindi ini mencerminkan interaksi yang dinamis antara limbah, air, dan lingkungan sekitarnya, yang menuntut pengelolaan yang hati-hati untuk mengurangi dampak negatifnya terhadap ekosistem (Mawuntu et al., 2023)

Air lindi memiliki ciri khas yang membedakannya dari jenis cairan limbah lainnya. Kandungannya kaya akan bahan organik, logam berat, senyawa asam, garam terlarut, serta berbagai mikroorganisme, baik yang bersifat patogen maupun non-patogen. Kombinasi elemen-elemen ini menjadikan air lindi sebagai ancaman serius bagi lingkungan, dengan potensi pencemaran yang sering kali lebih tinggi dibandingkan beberapa jenis limbah industri. Sifatnya yang kompleks dan berbahaya tidak hanya berdampak pada kualitas tanah dan air, tetapi juga dapat memengaruhi ekosistem secara keseluruhan, termasuk kesehatan manusia. Tingginya kandungan logam berat dan senyawa toksik dalam air lindi dapat mengakibatkan bioakumulasi dalam rantai makanan,

sementara keberadaan mikroorganisme berpotensi memicu penyebaran penyakit. Oleh karena itu, pengelolaan air lindi yang efektif sangat diperlukan untuk meminimalkan dampak buruknya terhadap lingkungan dan mendukung keberlanjutan ekosistem (Said & Hartaja, 2020).

Pembentukan dan karakteristik air lindi sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan di sekitar tempat pembuangan akhir (TPA). Faktor-faktor seperti iklim, curah hujan, suhu, dan pola aliran air tanah memainkan peran utama dalam menentukan volume dan sifat air lindi yang dihasilkan. Di daerah dengan curah hujan tinggi, infiltrasi air ke dalam timbunan sampah cenderung lebih besar, sehingga meningkatkan jumlah air lindi yang terbentuk. Suhu lingkungan juga memengaruhi proses dekomposisi biologis dalam timbunan sampah, yang pada akhirnya memengaruhi komposisi kimia air lindi, termasuk kadar bahan organik dan senyawa toksik. Selain itu, pola hidrologi setempat, seperti arah aliran air tanah dan keberadaan lapisan tanah yang tidak tembus air, dapat memengaruhi penyebaran dan akumulasi air lindi di sekitar TPA. Dengan kondisi lingkungan yang beragam ini, penting untuk menerapkan pendekatan pengelolaan air lindi yang responsif terhadap karakteristik lokal agar dampak pencemaran dapat diminimalkan secara efektif (Sari & Lucyana, 2021).

1.5.4 Tinjauan Umum tentang Tempat Pembuangan Akhir

a. Definisi Tempat Pembuangan Akhir (TPA)

Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) merupakan komponen penting dalam sistem manajemen persampahan. Salah satu program nasional di setiap daerah terkait sarana dan prasarana persampahan yaitu penyediaan TPA sebagai konsep keberlanjutan manajemen pengelolaan sampah. TPA disediakan oleh pemerintah sebagai bentuk tanggungjawab terhadap pelayanan kepada masyarakat. Kebersihan lingkungan dan TPA yang aman akan memberi keuntungan bagi kesehatan masyarakat dan lingkungan secara menyeluruh. Pengadaan TPA dimaksudkan untuk mengurangi dampak negatif yang ditimbulkan akibat penimbunan sampah (Herlina & Dharma, 2024).

Tempat Pembuangan Akhir (TPA) adalah fasilitas yang digunakan untuk menampung sampah setelah proses pemilahan dan pengolahan sampah lainnya. TPA berfungsi sebagai tempat pembuangan sampah yang tidak dapat didaur ulang atau diolah lebih lanjut. Menurut Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, TPA memiliki peran penting dalam pengelolaan sampah di tingkat kota, di mana sampah yang sudah tidak dapat diproses lebih lanjut dibuang di sana untuk menghindari penumpukan sampah di lingkungan sekitar. TPA juga berfungsi

untuk meminimalkan dampak sampah terhadap kesehatan dan lingkungan (Islami et al., 2023).

Secara umum TPA berfungsi untuk menampung sampah dari berbagai jenis sumber, seperti rumah tangga, industri, dan komersial, sebelum diproses lebih lanjut atau dibuang ke tempat lain. Namun, karena sifat sampah yang bervariasi, pengelolaan TPA harus dilakukan dengan hati-hati untuk menghindari kontaminasi tanah dan air tanah. (Prasetya & Setyawan, 2022). TPA juga berperan dalam pengelolaan limbah yang dapat berbahaya jika tidak ditangani dengan benar, seperti limbah medis atau bahan berbahaya lainnya. Penanganan yang tepat di TPA diperlukan untuk mencegah bahaya pencemaran terhadap lingkungan, baik di air, tanah, maupun air. Misalnya, tumpukan sampah yang tidak tertangani dengan baik dapat menghasilkan gas berbahaya seperti metana yang berisiko menyebabkan kebakaran dan polusi air. Oleh karena itu, peran TPA sangat krusial dalam menjaga kualitas lingkungan dan kesehatan masyarakat sekitar (Axmalia & Mulasari, 2020).

Selain itu TPA juga berfungsi sebagai penghubung antara proses pengolahan sampah dan pemulihan lingkungan. Pengelolaan TPA yang efektif dapat mengurangi volume sampah yang mencemari lingkungan, serta mengoptimalkan ruang yang tersedia di dalam TPA. Dalam hal ini, TPA juga dapat berfungsi sebagai tempat untuk melakukan proses dekomposisi sampah yang bisa digunakan kembali sebagai bahan kompos atau energi. Dengan pengelolaan yang baik, TPA tidak hanya menjadi tempat pembuangan sampah, tetapi juga dapat menjadi bagian dari solusi untuk pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan (Islami et al., 2023).

b. Metode Pembuangan Sampah di TPA

Tempat Pembuangan Akhir (TPA) adalah fasilitas yang dirancang untuk penanganan sampah pada tahap akhir di mana sampah yang tidak dapat didaur ulang atau diolah lebih lanjut dibuang secara terkontrol. Menurut Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, TPA merupakan lokasi pemrosesan sampah pada tahap akhir. Dalam operasionalnya, TPA harus memenuhi standar teknis tertentu untuk mencegah dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat. Adapun metode yang digunakan sebagai berikut:

- a) Open Dumping adalah metode pembuangan sampah dengan cara menumpuknya secara terbuka tanpa pengelolaan yang memadai. Metode ini sering menyebabkan masalah lingkungan, seperti pencemaran tanah, air, dan air, serta menimbulkan

risiko kesehatan bagi masyarakat sekitar. Penelitian oleh Anifah et al. (2021) menunjukkan bahwa metode open dumping memiliki dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat (Ermayendri et al., 2022).

- b) Controlled Landfill merupakan perbaikan dari metode open dumping, di mana sampah ditimbun dan dipadatkan secara teratur, kemudian ditutup dengan lapisan tanah pada interval tertentu untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Studi oleh Pamungkas et al. (2021) membahas perencanaan Tempat Pembuangan Akhir (TPA) dengan sistem controlled landfill di TPA Lubuk Binjai, Lubuklinggau, yang menunjukkan peningkatan dalam pengelolaan sampah dibandingkan dengan metode open dumping (Pamungkas et al., 2021).
- c) Sanitary Landfill adalah metode pengelolaan sampah yang lebih maju, di mana sampah ditimbun, dipadatkan, dan ditutup dengan lapisan tanah setiap hari untuk mencegah pencemaran lingkungan. Selain itu, sistem ini dilengkapi dengan fasilitas pengelolaan lindi dan gas metana yang dihasilkan dari proses dekomposisi sampah. Penelitian oleh Anifah et al. (2021) menunjukkan bahwa penerapan metode sanitary landfill mampu mereduksi emisi gas rumah kaca sebesar 94% dibandingkan dengan metode open dumping (Ermayendri et al., 2022).

1.5.5 Tinjauan Umum tentang Air Tanah

a. Definisi Air Tanah

Air tanah adalah air yang bergerak melalui pori-pori atau celah di antara butiran tanah dan batuan, hasil dari proses peresapan air permukaan yang kemudian terakumulasi membentuk lapisan air di dalam tanah. Lapisan tanah ini secara umum terbagi menjadi dua jenis berdasarkan kemampuannya dalam mengalirkan air, yaitu lapisan permeabel dan impermeabel. Lapisan permeabel merupakan lapisan tanah yang memungkinkan air meresap dan mengalir dengan mudah. Lapisan ini biasanya terdiri dari material seperti pasir, kerikil, atau batuan dengan porositas tinggi, sehingga menciptakan jalur-jalur alami bagi air untuk bergerak. Sebaliknya, lapisan impermeabel adalah lapisan tanah yang kedap air, yang biasanya tersusun dari material seperti lempung atau batuan padat. Sifatnya yang tidak tembus air membuat lapisan ini menjadi penghalang alami, mencegah air tanah mengalir lebih dalam atau keluar dari sistem tersebut. Interaksi antara kedua jenis lapisan ini memainkan peran penting dalam pembentukan dan penyimpanan air tanah. Lapisan permeabel biasanya menjadi reservoir air bawah tanah, sementara lapisan impermeabel berfungsi sebagai penghalang yang menjaga

air tetap berada dalam sistem tertentu. Pemahaman tentang karakteristik lapisan tanah ini sangat penting untuk kegiatan eksplorasi sumber air, pembangunan sumur, hingga pengelolaan sumber daya air secara berkelanjutan (Angrianto et al., 2021).

Air tanah ditinjau dari kedudukan atau letak kedalamannya dibagi menjadi 2 macam, yaitu air tanah dangkal (phreatic) dan air tanah dalam. Air tanah dangkal (phreatic), umumnya berada pada lapisan akuifer tak tertekan, yakni yang tersimpan dalam akuifer dekat permukaan dengan kedalaman 15 sampai 40 m. Pada lapisan akuifer ini sangat mudah dipengaruhi oleh kondisi lingkungan setempat. Sedangkan air tanah dalam berada pada lapisan akuifer tertekan dengan kedalaman lebih dari 40 m. Akuifer ini bersifat tertekan dan tidak terpengaruh oleh kondisi air permukaan setempat karena dipisahkan oleh lapisan batuan kedap (Nurhakim & Firdaus, 2022).

Seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa air tanah dapat dibedakan atas air tanah yang tertekan dan yang tidak tertekan. Air tanah tertekan atau lebih populer sebagai air tanah dalam (groundwater) disebut juga air artesis, yakni air pada lapisan pembawa yang terapat oleh dua lapisan kedap. Jika dilakukan pengeboran tanah dan menjumpai air tertekan, permukaan air itu dapat menyembur keluar. Yang dimaksud dengan air tanah yang tak tertekan atau air tanah bebas atau lebih populer di masyarakat sebagai air tanah dangkal (soil water), ialah air tanah yang tidak terapat oleh lapisan penyekap. Ini merupakan air tanah yang biasanya kita jumpai jika kita membuat sumur gali. Batas atas air tanah bebas disebut muka air tanah, yang sekaligus juga merupakan batas lajur jenuh. Air tanah (groundwater) bergerak ke bawah tanah melalui proses perkolasi dan kemudian mengalir ke dalam saluran atau alur air sebagai seepage.

Air tanah dangkal umumnya berada pada kedalaman kurang dari 40 m dari permukaan tanah. Akifer air tanah ini bersifat tidak tertekan, sangat mudah dipengaruhi oleh kondisi lingkungan setempat. Hal ini disebabkan karena antara air tanah pada akifer dan air yang ada di permukaan tanah tidak dipisahkan oleh lapisan batuan yang kedap. Jika terjadi hujan, air yang meresap ke dalam tanah akan langsung menambah air tanah ini. Air tanah dalam, keberadaannya cukup dalam sehingga untuk mendapatkannya harus menggunakan alat bor besar. Air tanah ini berada pada akifer kedalaman antara 40-150 m dan di bawah 150 m. Akifer ini bersifat tertekan dan tidak dipengaruhi oleh kondisi air permukaan setempat karena antara air tanah pada akifer dan air yang ada di permukaan tanah dipisahkan oleh lapisan batuan yang kedap. Air tanah ini mengalir dari daerah resapannya di daerah yang bertopografi tinggi (Rejekiningrum, 2020).

Potensi air tanah di suatu cekungan sangat tergantung kepada porositas dan kemampuan batuan untuk melalukan dan meneruskan air. Di Indonesia telah teridentifikasi 263 cekungan air tanah dengan total kandungan 522,2 milyar m³/tahun, 80 cekungan air tanah terletak di Pulau Jawa dan Madura dengan kandungan 43,314 milyar m³/tahun (Direktorat Geologi Tata Lingkungan dan Kawasan Pertambangan, 2004).

b. Mekanisme Penyebaran

Air lindi TPA yang merembes dalam tanah akan mencemari air tanah, dan menyebar mengikuti aliran air tanah. Air tanah, terbentuk dari sebagian dari air hujan yang jatuh ke permukaan dan sebagian meresap ke dalam tanah melalui pori-pori/celah-celah dan akar tanaman serta bertahan pada lapisan tanah membentuk lapisan yang mengandung air tanah (aquifer), air tanah yang disebut air tanah dalam atau artesis, artinya air tanah yang letaknya pada dua lapisan tanah yang kedap air, ada yang sifatnya tertekan dan yang tidak tertekan. Air tanah dangkal artinya terletak pada aquifer yang dekat dengan permukaan tanah dan fluktuasi volumenya sangat dipengaruhi oleh adanya curah hujan (Imaduddin et al., 2022).

Persebaran logam berat pada air tanah terjadi melalui serangkaian mekanisme fisik, kimia, dan biologi yang kompleks. Proses ini dimulai dengan infiltrasi air permukaan yang terkontaminasi seperti air hujan yang membawa polutan dari sumber pencemar, ke dalam tanah. Air ini kemudian bergerak secara vertikal melalui lapisan tanah (perkolasi) hingga mencapai zona jenuh, di mana air tanah berada. Setelah berada di zona jenuh, logam berat menyebar mengikuti aliran air tanah melalui proses adveksi yang dipengaruhi oleh gradien hidrolik dan permeabilitas tanah. Selain itu, difusi molekuler dapat terjadi ketika terdapat perbedaan konsentrasi logam berat, menyebabkan penyebaran ke daerah dengan konsentrasi yang lebih rendah (Amiratul & Notodarmojo, 2021).

Selama pada proses pergerakan logam berat tersebut dapat teradsorpsi pada partikel tanah atau mineral tergantung pada sifat kimia tanah seperti pH, kandungan bahan organik, dan mineral liat. Sebaliknya, desorpsi dapat melepaskan logam berat kembali ke air tanah jika kondisi lingkungan berubah. Reaksi kimia lain, seperti presipitasi dan pelarutan, juga berperan, di mana logam berat dapat membentuk senyawa tidak larut atau terlarut tergantung pada kondisi lingkungan. Mikroorganisme dalam tanah turut memengaruhi bentuk dan mobilitas logam berat melalui reaksi biogeokimia seperti oksidasi atau reduksi. Proses retardasi, yaitu perlambatan pergerakan logam berat akibat interaksi dengan material tanah, juga berkontribusi pada penyebarannya. Keseluruhan mekanisme ini menentukan pola

penyebaran logam berat di air tanah, yang sangat dipengaruhi oleh karakteristik tanah, geokimia lingkungan, dan sumber pencemar (Harian, 2024).

c. Kondisi Fisik Lingkungan

Kondisi fisik lingkungan yang mencakup jenis tanah, permeabilitas, dan aliran air tanah sangat penting dalam menentukan kualitas air tanah serta risiko pencemaran lingkungan. Jenis tanah memengaruhi kemampuan tanah dalam menyerap dan menyaring air. Tanah dengan tekstur berpasir, misalnya, memiliki permeabilitas yang tinggi sehingga memungkinkan air meresap dengan cepat, tetapi kurang efektif dalam menyaring polutan. Sebaliknya, tanah liat yang memiliki permeabilitas rendah cenderung menahan air dan memperlambat pergerakan polutan, tetapi dapat menyebabkan akumulasi kontaminan di permukaan. Penelitian oleh Ricky & Andoyono (2021) menunjukkan bahwa karakteristik tanah di sekitar tempat pembuangan akhir (TPA) sangat memengaruhi persebaran logam berat ke dalam air tanah. Adapun jenis jenis tanah berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh sebagai berikut

- a) Tanah pasir memiliki tekstur kasar dengan ukuran partikel besar, sehingga memiliki permeabilitas tinggi yang memungkinkan air meresap dengan cepat. Namun, tanah pasir kurang mampu menyaring polutan, membuat air tanah di daerah ini lebih rentan terhadap pencemaran.
- b) Tanah lempung memiliki partikel yang sangat halus dan daya retensi air tinggi, tetapi permeabilitasnya rendah. Tanah lempung sering bertindak sebagai penghalang alami terhadap pergerakan air dan kontaminan, meskipun dapat menyebabkan akumulasi polutan di permukaan tanah.
- c) Tanah lanau yang memiliki ukuran partikel di antara pasir dan lempung, menunjukkan sifat moderat dalam menyerap dan mengalirkan air, membuatnya efektif dalam menyaring kontaminan dengan risiko penyebaran yang lebih terkendali.
- d) Tanah gambut terdiri dari bahan organik yang belum terurai sepenuhnya dan memiliki daya serap air yang sangat tinggi. Meskipun tanah gambut cenderung asam dan dapat menyerap logam berat, tanah ini juga dapat menjadi sumber kontaminasi bila mengalami proses dekomposisi anaerobik yang menghasilkan senyawa beracun.

Permeabilitas tanah atau kemampuan tanah untuk mengalirkan air juga memainkan peran penting dalam distribusi kontaminan. Tanah dengan permeabilitas tinggi memungkinkan aliran air yang lebih cepat, yang dapat mempercepat penyebaran polutan ke dalam air tanah. Namun, tanah dengan permeabilitas rendah dapat bertindak sebagai penghalang alami yang menghambat migrasi

polutan. Penelitian oleh Wijaya et al. (2020) menunjukkan bahwa lapisan tanah dengan permeabilitas rendah, seperti lempung dapat berfungsi sebagai lapisan pelindung alami yang membatasi kontaminasi air tanah di daerah dekat TPA. Permeabilitas tanah secara umum merujuk pada kemampuan tanah untuk memungkinkan air atau cairan lainnya mengalir melalui pori-porinya. Faktor yang memengaruhi permeabilitas tanah meliputi ukuran partikel tanah, komposisi material tanah, dan kepadatannya. Tanah dengan partikel besar seperti pasir memiliki permeabilitas tinggi karena pori-porinya lebih besar, sedangkan tanah dengan partikel kecil seperti lempung memiliki permeabilitas rendah karena pori-porinya lebih kecil dan rapat. Permeabilitas tanah penting untuk berbagai aspek, seperti pengelolaan air tanah, drainase, dan pertanian. Tanah yang memiliki permeabilitas baik dapat membantu aliran air yang lebih baik, mencegah genangan, dan mendukung pertumbuhan tanaman dengan memberikan akses yang lebih baik untuk air dan oksigen ke akar tanaman (Fatimah, 2023).

Aliran air tanah dipengaruhi oleh kondisi hidrogeologis seperti kemiringan lahan, kedalaman air tanah, dan keberadaan lapisan akuifer. Pola aliran air tanah menentukan arah dan kecepatan penyebaran kontaminan dari sumber pencemaran. Studi oleh Pratama et al. (2020) di daerah TPA Antang, Makassar, menunjukkan bahwa aliran air tanah cenderung bergerak ke arah dataran rendah, sehingga area di hilir lebih rentan terhadap kontaminasi logam berat. Analisis ini menyoroti pentingnya pemetaan aliran air tanah untuk mengidentifikasi daerah-daerah yang berisiko tinggi terhadap pencemaran.

Secara keseluruhan, memahami jenis tanah, permeabilitas, dan aliran air tanah sangat penting dalam pengelolaan sumber daya air tanah. Informasi ini dapat digunakan untuk merancang strategi mitigasi pencemaran, seperti pemasangan lapisan pelindung di TPA atau perencanaan lokasi sumur air tanah yang aman dari sumber pencemar. Dengan demikian, pengelolaan yang berbasis pada kondisi fisik lingkungan dapat membantu melindungi kualitas air tanah dan mendukung keberlanjutan ekosistem.

d. Dampak Lingkungan

Rembesan air lindi di lingkungan berpotensi menjadi sumber pencemaran serius. Ketika air lindi bercampur dengan air hujan, cairan ini dapat menyusup ke dalam lapisan tanah dan membawa polutan yang mencemari air tanah. Polutan yang terkandung dalam air lindi, seperti logam berat, senyawa kimia berbahaya, dan mikroorganisme patogen, dapat merusak kualitas air tanah, menjadikannya tidak layak untuk konsumsi atau keperluan lain. Selain itu, keberadaan polutan ini juga mengganggu keseimbangan

ekosistem tanah. Kehidupan mikroorganisme tanah yang berperan penting dalam proses dekomposisi alami dan siklus nutrisi dapat terganggu, yang pada akhirnya memengaruhi produktivitas tanah dan kesehatan ekosistem secara keseluruhan. Dengan kata lain, rembesan air lindi tidak hanya berdampak pada kualitas air tanah tetapi juga berpotensi menghambat keberlanjutan ekosistem tanah dalam jangka panjang (Fauziah & Suparmi, 2022).

Air lindi yang tidak dikelola dengan benar dapat menimbulkan pencemaran yang serius terhadap lingkungan di sekitarnya. Salah satu dampak utama yang ditimbulkan adalah kontaminasi terhadap sumber daya air, baik itu air permukaan maupun air tanah. Ketika air lindi merembes atau tumpah ke tanah, polutan yang terkandung di dalamnya, seperti logam berat, bahan kimia berbahaya, dan senyawa organik, dapat dengan mudah masuk ke dalam sistem air tanah. Selain itu, jika air lindi mencapai saluran air permukaan, seperti sungai, danau, atau waduk, maka polutan ini dapat mencemari badan air tersebut, merusak kualitas air, dan mengancam ekosistem yang bergantung pada sumber daya air tersebut. Kontaminasi air ini juga berdampak pada kesehatan manusia, terutama bagi mereka yang bergantung pada air tanah untuk kebutuhan sehari-hari (Aji & H, 2024).

Masalah ini diperburuk jika landfill sebagai lokasi penimbunan sampah tidak dilengkapi dengan lapisan pelindung yang memadai, seperti geomembran, untuk mencegah infiltrasi air lindi ke dalam tanah. Selain itu, potensi kebocoran dapat terjadi pada sistem pipa yang mengalirkan air lindi dari landfill menuju kolam penampungan sebelum diolah di Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Kebocoran ini tidak hanya memperluas area pencemaran tetapi juga mengurangi efisiensi sistem pengolahan. Oleh karena itu, penting untuk memastikan desain, konstruksi, dan pemeliharaan TPA dilakukan dengan standar yang tinggi untuk meminimalkan risiko kebocoran air lindi dan dampaknya terhadap lingkungan (Nurjanna, 2021).

e. Dampak Kesehatan

Timbal (Pb) merupakan salah satu logam berat beracun yang memiliki sifat akumulatif dalam tubuh manusia, sehingga berpotensi menimbulkan berbagai efek buruk bagi kesehatan. Paparan terhadap timbal dapat terjadi melalui berbagai jalur, seperti menghirup air yang tercemar oleh partikel timbal, mengonsumsi makanan atau air yang terkontaminasi, serta melalui kontak langsung dengan kulit akibat penggunaan produk yang mengandung logam ini. Akibatnya, timbal dapat masuk ke dalam tubuh, terdistribusi melalui aliran darah, dan mengendap di jaringan tubuh, termasuk tulang dan otak, yang dapat menyebabkan gangguan kesehatan jangka pendek maupun jangka

panjang. Adapun dampak kesehatan akibat paparan timbal sebagai berikut:

- a) Sistem hematopoietik, yaitu sistem yang bertanggung jawab atas pembentukan darah dalam tubuh. Timbal dapat mengganggu aktivitas enzim-enzim penting yang berperan dalam sintesis hemoglobin, protein utama dalam sel darah merah yang bertugas mengangkut oksigen ke seluruh tubuh. Akibatnya, paparan timbal dapat menyebabkan anemia, suatu kondisi di mana tubuh kekurangan sel darah merah yang sehat untuk mendistribusikan oksigen secara optimal (Lestari, 2022).
- b) Sistem Saraf: Menurut WHO (2021) paparan timbal memiliki dampak yang sangat merugikan pada sistem saraf, baik pusat maupun perifer. Pada sistem saraf pusat, timbal dapat mengganggu fungsi normal otak dengan menghambat aktivitas neurotransmitter, merusak membran sel saraf, dan memengaruhi perkembangan jaringan otak, terutama pada anak-anak. Dampaknya meliputi gangguan kognitif seperti penurunan IQ, gangguan konsentrasi, kesulitan belajar, serta perubahan perilaku seperti hiperaktif atau agresi. Anak-anak sangat rentan terhadap efek neurotoksik timbal karena otak mereka masih dalam tahap perkembangan, sehingga paparan pada masa kanak-kanak dapat mengakibatkan gangguan permanen yang memengaruhi kemampuan akademik dan sosial mereka
- c) Sistem Reproduksi: Pada wanita dampak paparan timbal balik dapat mencakup gangguan pada siklus menstruasi, penurunan kualitas sel telur, dan peningkatan risiko komplikasi selama kehamilan. Timbal dapat melewati plasenta, sehingga paparan selama kehamilan dapat mempengaruhi perkembangan janin. Kondisi ini sering kali dikaitkan dengan risiko kelahiran prematur, berat badan lahir rendah, hingga keguguran. Penelitian menunjukkan bahwa paparan timbal balik pada ibu hamil dapat mempengaruhi perkembangan otak janin, meningkatkan risiko gangguan saraf pada anak (Siodlak et al., 2023)
- d) Sistem Kardiovaskular: Paparan timbal balik memiliki dampak yang signifikan terhadap kesehatan sistem kardiovaskular, baik melalui mekanisme langsung maupun tidak langsung. Timbal dapat menyebabkan disfungsi pada pembuluh darah, meningkatkan stres oksidatif, dan mempengaruhi regulasi tekanan darah. Salah satu dampak paling umum dari paparan timbal adalah hipertensi, yang terjadi karena timbal dapat merusak lapisan endotel pembuluh darah, meningkatkan kekakuan arteri, serta mengganggu keseimbangan ion kalsium yang berperan dalam kontraksi otot polos pembuluh darah. Hal

ini mengakibatkan peningkatan tekanan darah secara kronis, yang merupakan faktor risiko utama untuk penyakit jantung dan stroke (Navas-acien et al., 2021)

f. Standar Kualitas Air

Tabel 1.1
Parameter Kimia dalam Standar Baku Mutu Kesehatan
Lingkungan untuk Media Air untuk Keperluan Higiene Sanitas
sesuai Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No.
32 Tahun 2017

No.	Parameter	Unit	Standar Baku Mutu (kadar maksimum)
Wajib			
1.	pH	mg/L	6,5 – 8,5
2.	Besi	mg/L	1
3.	Fluorida	mg/L	1,5
4.	Kesadahan (CaCO ₃)	mg/L	500
5.	Mangan	mg/L	0,5
6.	Nitrat, sebagai N	mg/L	10
7.	Nitrit, sebagai N	mg/L	1
8.	Sianida	mg/L	0,1
9.	Deterjen	mg/L	0,05
10.	Pestisida total	mg/L	0,1
Tambahan			
1.	Air raksa	mg/L	0,001
2.	Arsen	mg/L	0,05
3.	Kadmium	mg/L	0,005
4.	Kromium (Valensi 6)	mg/L	0,05
5.	Selenium	mg/L	0,01
6.	Seng	mg/L	15
7.	Sulfat	mg/L	400
8.	Timbal	mg/L	0,05
9.	Benzene	mg/L	0,01
10.	Zat organik (KMNO ₄)	mg/L	10

Tabel 2.2
Standar Baku Mutu Kualitas Air Minum

Parameter	Unit	Standar Baku Mutu
Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No.2 Tahun 2023		

Besi (Fe) terlarut	mg//L	0,2
Timbal (Pb) terlarut	mg/L	0,01
Tembaga (Cu) terlarut	mg/L	Tidak diatur
Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 492		
Tahun 2010		
Besi (Fe) terlarut	mg/L	0,3
Timbal (Pb) terlarut	mg/L	0,01
Tembaga (Cu) terlarut	mg/L	2

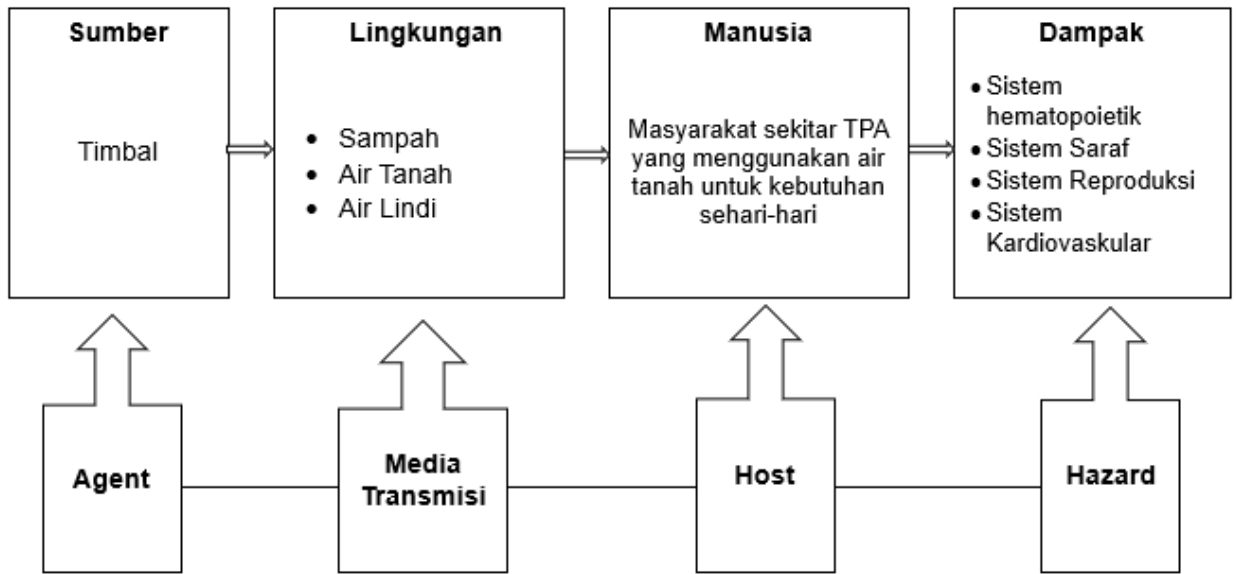
Tabel 1.3
Sintesa artikel terkait logam timbal (Pb) pada air tanah di daerah
TPA Tamangapa Antang Kota Makassar

N O	Peneliti (Tahun dan Sumber Jurnal)	Judul dan Nama Jurnal)	Desain Peneliti an dan Metode Analisi s)	Sampel	Temuan
1	Handriyani, K., Habibah, N., & Dhyanaputri (2023). <i>Jurnal Sains dan Teknologi</i> , 9(1), 68-75	Analisis Kadar Timbal (Pb) Pada Air Sumur Gali Di Kawasan Tempat Pembuangan Akhir Sampahbanjar Suwung Batan Kendal Denpasar Selatan	<i>Cross sectional</i>	11 sampel sumur gali	Kadar timbal (Pb) dalam air sumur gali di sekitar TPA Suwung berkisar 0,0060 – 1,023 ppm. Satu sampel melebihi ambang batas >0,05 ppm sesuai Permenkes RI No. 416/MENKES/PER/IX/1990, tiga sampel di bawah ambang batas, dan tujuh sampel tidak terdeteksi Pb.
2	Siswoyo, E., & Habibi, G. (2018). <i>Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan</i> , 8(1), 1-6	Sebaran Logam Berat Cadmium (Cd) Dan Timbal (Pb) Pada Air Sungai Dan Sumur Di Daerah Sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Wukirsari Gunung Kidul, Yogyakarta	<i>Cross Sectional</i>	10 Sampel yang meliputi air sumur (mewakili air tanah dangkal), sumur pantau, dan air sungai (mewakili air permukaan)	Konsentrasi Pb tertinggi ditemukan di sumur pantau 2 yang mencapai 0,55 mg/L, jauh di atas baku mutu 0,03 mg/L. Sementara itu, kadar Cd di sumur pantau 2 dan sumur warga 2 mencapai 0,03 mg/L, melebihi batas aman 0,01 mg/L.

3	Purba, D., & Kamil, I. (2015). <i>Jurnal Teknik Lingkungan</i> , 21(2), 149-158	Analisis Pola Penyebaran Logam Berat Pada Air Tanah Dangkal Akibat Lindi Di Sekitar Tempat Pemrosesan Akhir (Tpa) Jatibarang, Semarang	Cross Sectional	6 sampel air tanah	Konsentrasi Pb mencapai 0,131 mg/L , jauh di atas ambang batas yang diperbolehkan. Dalam sampel air tanah kadar Pb berada di kisaran 0,0005 – 0,0042 mg/L , yang masih berada di bawah baku mutu. Hasil simulasi model menunjukkan Pb dapat terdeteksi hingga $\pm$ 200 meter.
4	Nora, N., Maksuk, M., & Amin, M. (2022). <i>Jurnal Sanitasi Lingkungan</i> , 2(2), 79-84	Analisis Pencemaran Logam Berat Timbal (Pb) pada Air Sumur Gali Masyarakat di Sekitar Tempat Pembuangan Akhir Sukawinata	Cross section al	15 sampel sumur gali	Kadar timbal dalam air sumur bervariasi antara 0,02 - 0,03 mg/L , yang masih di bawah nilai batas baku mutu air bersih menurut Permenkes No. 32 Tahun 2017 (0,05 mg/L). Namun jika dibandingkan dengan standar air minum , semua sampel tidak memenuhi syarat karena tetap mengandung Pb.
5	Messy, M., Winardi, W., & Fitrianiingsih, Y. (2024). <i>Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah</i> , 12 (3), 764	Analisis Kualitas Air Tanah di Kawasan TPA Sampah Desa Sungai Bakau Besar Laut Kabupaten	Cross section al	5 sampel sumur gali	kadar timbal (Pb) dalam sampel tanah melebihi ambang batas yang ditetapkan oleh peraturan yang berlaku. Dari analisa yang dilakukan, kadar timbal yang terdeteksi

Mempawah	mencapai 0,15 mg/L , sedangkan ambang batas yang ditetapkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia adalah 0,01 mg/L .
----------	--

1.6 Kerangka Teori



Gambar 2.1 Kerangka Teori Penelitian

Sumber: *Teori Simpul* (Achmadi, 1987 dan Palar, 2008).
Dimodifikasi

1.7 Dasar Pemikiran Variabel Penelitian

Logam berat timbal (Pb) merupakan salah satu polutan berbahaya yang sering ditemukan di sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) akibat percolasi lindi yang mengandung zat beracun. Menurut penelitian sebelumnya, Pb memiliki sifat toksik yang dapat mencemari sumber air tanah dan berdampak negatif terhadap kesehatan manusia, termasuk gangguan sistem saraf, gangguan ginjal, dan keterlambatan perkembangan anak-anak (Diyah et al., 2024).

Sebaran Pb dalam air tanah dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti arah aliran air tanah ataupun jarak dari sumber pencemar. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Rahman et al. (2022), kontaminasi logam berat di air tanah cenderung menyebar secara tidak merata dan bergantung pada jarak dari sumber pencemaran serta kedalaman air tanah. Oleh karena itu, pemetaan spasial sebaran Pb menggunakan metode geostatistik atau GIS menjadi penting untuk memahami pola distribusi pencemaran dan menentukan area yang berisiko tinggi (Rachmawati et al., 2024).

Berbagai faktor lingkungan dapat mempengaruhi tingkat pencemaran Pb dalam air tanah, termasuk jarak dari TPA, kedalaman air tanah, atau bahkan air lindi yang terkontaminasi timbal sebelumnya. Studi yang dilakukan oleh Widodo et al. (2021) menunjukkan bahwa jarak yang lebih dekat ke sumber pencemaran dan kedalaman air tanah yang lebih dangkal cenderung memiliki konsentrasi Pb yang lebih tinggi, sementara area yang lebih jauh atau dengan kedalaman lebih dalam cenderung memiliki kadar Pb yang lebih rendah. Dengan memahami pola sebaran ini, dapat diidentifikasi area yang lebih berisiko terhadap pencemaran (Putri et al., 2024).

Penilaian kualitas air tanah dilakukan dengan membandingkan hasil analisis konsentrasi Pb dengan baku mutu yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan WHO. Menurut Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 492 Tahun 2010, batas aman kadar Pb dalam air minum adalah 0,01 mg/L. Sedangkan untuk media air untuk keperluan higiene sanitasi sesuai Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 32 Tahun 2017 adalah sebesar 0,05 mg/L. Jika kadar Pb dalam air tanah di sekitar TPA Tamangapa Antang melebihi batas ini, maka air tanah tersebut tidak layak konsumsi dan berpotensi menimbulkan dampak kesehatan yang serius (Santoso et al., 2023).

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini hadir dengan tujuan untuk menganalisis sebaran logam berat timbal (Pb) yang ada pada air lindi terhadap air tanah di TPA Tamangapa Antang Kota Makassar menggunakan metode *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS). Variabel yang digunakan dalam penelitian ini meliputi variabel independen dan variabel dependen, sebagai berikut:

1.7.1 Variabel Independen

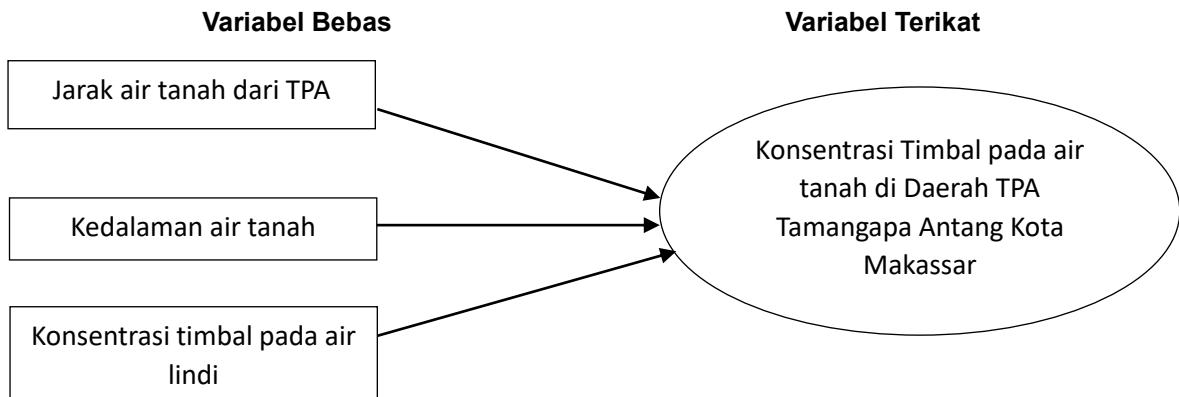
Variabel independen adalah variabel yang berperan sebagai faktor penyebab atau yang dapat mempengaruhi perubahan pada variabel lainnya. Dalam penelitian ini mencakup tiga faktor utama yang

memengaruhi konsentrasi logam berat timbal (Pb) pada air tanah. Adapun variabel-variabel tersebut yakni konsentrasi Pb pada air lindi yang dihasilkan oleh TPA menjadi sumber utama pencemaran, jarak antara TPA dan titik pengambilan sampel air tanah turut berperan, serta kondisi kedalaman air tanah. Kombinasi dari ketiga variabel ini menentukan tingkat pencemaran air tanah di sekitar TPA.

1.7.2 Variabel Dependen

Variabel dependen merupakan variabel yang dipengaruhi atau yang menjadi akibat berubahnya suatu variabel. Variabel dependen dalam penelitian ini adalah konsentrasi logam berat timbal (Pb) pada air tanah, yang menjadi indikator utama untuk mengukur tingkat pencemaran akibat peresapan air lindi dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Konsentrasi Pb mencerminkan sejauh mana air tanah tercemar oleh limbah yang berasal dari sampah di TPA, di mana air lindi mengandung berbagai bahan kimia berbahaya, termasuk logam berat seperti timbal. Peningkatan konsentrasi Pb pada air tanah dapat menunjukkan adanya pencemaran yang serius, yang berpotensi memengaruhi kualitas air tanah serta kesehatan manusia dan ekosistem di sekitarnya.

1.8 Kerangka Konsep



Gambar 3.1 Kerangka Konsep Penelitian



1.9 Definisi Operasional dan Kriteria Objektif

Tabel 1.4 Definisi Operasional dan Kriteria Objektif Penelitian

No	Variabel	Definisi Operasional	Alat Ukur	Kriteria Objektif	Skala Pengukuran
1	Konsentrasi Logam Berat Timbal (Pb) pada Air Lindi	Konsentrasi timbal (Pb) pada air lindi yang diukur dalam satuan mikrogram per liter ($\mu\text{g/L}$)	<i>Atomic Absorption Spectroscopy</i> (AAS)	$\leq 1,0 \text{ mg/L}$	Rasio (mg /L)
2	Jarak antara Lokasi TPA dan Titik Pengambilan Sampel Air Tanah	Jarak yang diukur dalam satuan meter (m) antara lokasi TPA dan titik pengambilan sampel air tanah pada setiap wilayah (4 wilayah) sekitar TPA	GPS	- Jarak dekat ($\leq 500 \text{ m}$) - jarak sedang (500-1000 m) - jarak jauh ($>1000 \text{ m}$).	Rasio (meter)
3	Kedalaman Air Tanah	Kedalaman air tanah atau titik pengambilan sampel dari permukaan tanah.	Meteran	- Air tanah dangkal (sumur gali): $\leq 10 \text{ m}$ - Air tanah dalam (sumur bor) $>10 \text{ m}$	Rasio (meter)

4	Konsentrasi Timbal pada air tanah di Daerah TPA Tamangapa Antang Kota Makassar	Konsentrasi Timbal (Pb) pada air tanah adalah jumlah unsur timbal (Pb) yang terlarut dalam air tanah (dangkal dan dalam) di daerah TPA Tamangapa Antang Kota Makassar	<i>Atomic Absorption Spectroscopy</i> (AAS)	• 0,05 mg/L (<i>hygiene</i> dan sanitasi) • 0,01 mg/L (air minum)	Rasio (mg/L)
---	--	---	---	--	--------------

1.10 Hipotesis Penelitian

3.3.1 Hipotesis null (H_0)

- a. Tidak ada perbedaan yang signifikan pada konsentrasi timbal (Pb) dalam air tanah berdasarkan jarak dari TPA Antang Tamangapa Kota Makassar.
- b. Tidak ada perbedaan yang signifikan pada konsentrasi timbal (Pb) dalam air tanah berdasarkan wilayah di sekitar TPA Antang Tamangapa Kota Makassar.
- c. Tidak ada perbedaan konsentrasi timbal (Pb) pada air tanah berdasarkan kedalaman air tanah di wilayah sekitar TPA Antang Tamangapa Kota Makassar.
- d. Konsentrasi timbal (Pb) pada air lindi di TPA Antang Tamangapa Kota Makassar melebihi baku mutu yang ditetapkan untuk kualitas air lingkungan..

3.3.2 Hipotesis Alternatif (H_a)

- a. Terdapat perbedaan yang signifikan pada konsentrasi timbal (Pb) dalam air tanah berdasarkan jarak dari TPA Antang Tamangapa Kota Makassar; semakin dekat dengan TPA, konsentrasi Pb cenderung lebih tinggi.
- b. Terdapat perbedaan yang signifikan pada konsentrasi timbal (Pb) dalam air tanah berdasarkan wilayah di sekitar TPA Antang Tamangapa Kota Makassar.
- c. Terdapat hubungan antara jarak air tanah dari TPA Tamangapa dengan konsentrasi timbal (Pb) dalam air tanah di wilayah sekitarnya
- d. Terdapat hubungan antara kedalaman air tanah dari TPA Tamangapa dengan konsentrasi timbal (Pb) dalam air tanah di wilayah sekitarnya.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menggambarkan kualitas air tanah di sekitar TPA Tamangapa Antang Kota Makassar, dengan fokus pada konsentrasi logam berat timbal (Pb). Adapun jenis penelitian yang digunakan yakni dengan metode *Cross Sectional* dan menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif, penelitian ini mengumpulkan data numerik melalui pengukuran konsentrasi Pb pada sampel air tanah yang diambil dari berbagai titik di sekitar TPA. Data yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan nilai ambang batas yang ditetapkan oleh peraturan lingkungan, seperti yang ditentukan oleh Permenkes No. 32 Tahun 2017 untuk standar baku mutu logam berat terkhusus timbal (Pb) untuk keperluan higiene dan sanitasi sebesar 0,05 mg/l, sedangkan untuk keperluan air minum di atur dalam Permenkes No. 492 Tahun 2010 dan No.2 Tahun 2023 masing masing menyebutkan sebesar 0,01 mg/l.

2.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada Bulan Mei 2025 di TPA Tamangapa Antang Kota Makassar. Pemeriksaan sampel dilakukan di Laboratorium Balai Besar Laboratorium Kesehatan Masyarakat Makassar (Labkesmas Makassar 1)

2.3 Populasi dan Sampel

2.3.1 Populasi

Populasi dalam penelitian ini mencakup seluruh air tanah (air tanah dalam dan air tanah dangkal) yang ada di sekitar TPA Tamangapa Antang yang berpotensi terpengaruh oleh pencemaran akibat peresapan air lindi. Populasi ini mencakup berbagai jenis tanah dan kedalaman yang berbeda, yang semuanya dapat mempengaruhi kadar timbal (Pb) dalam air tanah.

2.3.2 Sampel

Teknik pengambilan sampel yang digunakan adalah *purposive sampling*, di mana titik-titik sampel dipilih secara sengaja berdasarkan kriteria tertentu, seperti jarak dari TPA dan kedalaman tanah. Titik sampel sebanyak 25 titik, meliputi dekat dengan TPA (<500 m) di mana kemungkinan pencemaran lebih tinggi akibat peresapan air lindi, jarak

menengah (500 – 1000 m), untuk melihat penurunan konsentrasi Pb, dan jauh (>1000 m) dari TPA.

Pengambilan 24 titik sampel air tanah, masing-masing sebanyak 200 ml akan dibagi menjadi empat wilayah:

- a) Wilayah Barat: Terdapat 3 titik pengambilan sesuai jarak dan masing masing untuk air tanah dangkal dan air tanah dalam (6 titik pengambilan sampel)
- b) Wilayah Utara: Terdapat 3 titik pengambilan sesuai jarak dan masing masing untuk air tanah dangkal dan air tanah dalam (6 titik pengambilan sampel)
- c) Wilayah Selatan: terdapat 3 titik pengambilan sesuai jarak dan masing masing untuk air tanah dangkal dan air tanah dalam (6 titik pengambilan sampel)
- d) Wilayah Timur: Terdapat 3 titik pengambilan sesuai jarak dan masing masing untuk air tanah dangkal dan air tanah dalam (6 titik pengambilan sampel).

2.4 Alat, Bahan Prosedur dan Pemeriksaan Sampel

Dalam penelitian ini, peralatan dan bahan yang digunakan, yaitu sebagai berikut:

2.4.1 Alat dan Bahan Pengambilan Sampel

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam pengambilan sampel penelitian ini sebagai berikut:

1. Tali
2. Botol kaca
3. Kertas label
4. Spidol
5. Botol plastik

2.4.2 Alat dan bahan pemeriksaan sampel

Adapun alat dan bahan yang digunakan untuk pemeriksaan sampel dalam penelitian ini mengacu pada SNI 6989.46:2009, sebagai berikut:

Alat:

1. Spektrofotometer Serapan Atom (SSA)- tungku karbon
2. Lampu katoda berongga (Hallow Chathode Lamp/HCL) timbal
3. Gelas piala 100 mL dan 250 MI
4. Pipet volumetric 10,0 mL, dan 50,0 mL
5. Labu ukur 50,0 mL, 100,0 mL dan 1000,0 mL
6. Erlenmeyer 100 mL

7. Corong gelas
8. Kaca arloji
9. Pemanas listrik
10. Seperangkat alat saring vakum
11. Labu semprot
12. Mikropipet atau auto sampler; dan
13. Timbangan analitik dengan ketelitian 0,0001 g.

Bahan:

1. Larutan induk timbal 100 mg/L
2. Asam nitrat (HNO_3) pekat
3. Air bebas logam; dan
4. Gas argon

2.4.3 Prosedur Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel untuk parameter Timbal:

1. Disiapkan 1 buah botol kaca dilengkapi dengan pengikat tali untuk mengambil sampel air Sungai
2. Dibilas botol kaca sebanyak 3 kali, lalu air sampel diambil
3. Disiapkan 4 botol plastik yang dapat ditutup rapat, tidak mudah pecah, bersih dan bebas kontaminan.
4. Dibuka tutup botol dan dibilas masing-masing botol plastik sebanyak 3 kali sebelum air sampel dimasukan.
5. Diisi botol plastik dengan air sampel hingga penuh dan tidak terdapat gelembung air
6. Dilakukan pemeriksaan segera

2.4.4 Prosedur Pemeriksaan

Prosedur pemeriksaan parameter timbal (SNI 6989.46:2009):

Pembuatan contoh uji

1. Dihomogenkan contoh uji, masukkan 50 ml contoh uji ke dalam gelas piala 100 ml;
2. Ditambahkan 5 ml HNO_3 pekat dan panaskan perlahan-lahan sampai sisa volumenya 15 ml sampai dengan 20 ml;
3. Ditambahkan lagi 5 ml HNO_3 pekat, kemudian tutup gelas piala dengan kaca arloji dan panaskan lagi;
4. Dilanjutkan penambahan asam dan pemanasan sampai semua logam larut, yang terlihat dari warna endapan dalam contoh uji menjadi agak putih atau contoh uji menjadi jernih;

5. Ditambahkan 2 ml HNO_3 pekat dan panaskan kira-kira 10 menit;
6. Dibilas kaca arloji dan masukkan air bilasannya ke dalam gelas piala;
7. Dipindahkan contoh uji masing-masing ke dalam labu ukur 50 ml dan tambahkan air suling sampai tepat pada tanda tera;
8. Contoh uji siap diukur.
9. Atur alat SSA dan optimasikan sesuai dengan petunjuk penggunaan alat untuk pengukuran timbal;
10. Suntikkan larutan kerja ke dalam tungku karbon dan panaskan tungku karbon, kemudian catat serapannya. Ulangi hal yang sama untuk larutan kerja lainnya;
11. Buat kurva kalibrasi dari data di atas, dan atau tentukan persamaan garis lurusnya.

2.5 Pengumpulan Data

2.5.1 Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh secara langsung melalui penelitian dan pemeriksaan kandungan logam timbal pada sampel air tanah di Balai Laboratorium Kesehatan Masyarakat Makassar. Data primer yang digunakan pengukuran dan hasil pemeriksaan.

2.5.2 Data Sekunder

Data sekunder adalah data yang diperoleh dari literatur terkait seperti buku, jurnal, skripsi hasil penelitian serta data dari instansi terkait.

2.6 Pengolahan dan Analisis Data

2.6.1 Pengolahan Data

Pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan dengan mengelompokkan hasil pengukuran dari sampel air yang diambil di beberapa titik. Setiap sampel yang telah diambil akan dilakukan uji di laboratorium untuk mengetahui tingkat konsentrasi logam berat timbal (Pb) pada air tanah menggunakan spektrofotometer serapan atom (ASS).

2.6.2 Analisis Univariat

Data diolah dan dianalisis secara deskriptif untuk mengetahui jenis sebaran data, apakah terdistribusi normal atau tidak. Uji normalitas dilakukan sebelum data

dianalisis berdasarkan model penelitian yang akan dilakukan. Uji normalitas data bertujuan untuk mendeteksi distribusi data dalam satu variabel yang akan digunakan dalam penelitian. Data yang berdistribusi normal apabila nilai uji lebih dari 0.05 ($p > 0.05$). Pada analisis univariat, distribusi data kategorik disajikan dengan menggunakan diagram yang meliputi nilai mean, median, minimum-makimum, standar deviasi dan kenormalan distribusi.

2.6.3 Analisis Bivariat

Analisis dilakukan untuk mengetahui rata-rata konsentrasi kandungan logam timbal (Pb) di air. Analisis dilakukan menggunakan uji statistik, dengan taraf signifikan ($\alpha = 0.05$).

2.7 Penyajian Data

Data yang diperoleh dari hasil pemeriksaan laboratorium akan disajikan dalam bentuk tabel, grafik dan juga penyajian dalam analisis Geographic Information Sisytm untuk melihat sebaran paparan timbal pada air tanah di daerah TPA Tamangapa Antang Kota Makassar.

2.8 Etik Penelitian

Etika penelitian berfungsi sebagai perlindungan bagi peneliti dan institusi tempat penelitian. Dalam pelaksanaan penelitian ini, peneliti akan mengajukan kode etik penelitian kepada Komisi Etik Penelitian Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin untuk mendapatkan surat keterangan kelayakan etik penelitian. Sebagai bagian dari penghormatan terhadap prinsip dasar etika penelitian, peneliti diwajibkan memberikan penjelasan yang cukup kepada setiap individu yang akan dilibatkan sebagai subjek penelitian dan memperoleh persetujuan dari mereka. Penjelasan ini bertujuan agar subjek penelitian memahami tujuan penelitian, risiko, manfaat yang mungkin dialami, serta hak dan kewajiban mereka sebagai peserta.