

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Sampah

1. Pengertian Sampah

Menurut *World Health Organization* (WHO) sampah merupakan barang yang sudah tidak digunakan lagi, tidak diinginkan, atau tidak terpakai yang berasal dari aktivitas manusia dan terjadi dengan sendirinya (Marlina *et al.*, 2021). Menurut Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, sampah merupakan hasil sisa dari aktivitas sehari-hari manusia dan/atau proses alam yang berbentuk padat. Sampah merupakan benda atau material yang dihasilkan dari sisa aktivitas manusia atau barang yang sudah tidak digunakan lagi dan tidak memiliki nilai atau kegunaan bagi pemiliknya. sampah dapat berupa benda padat, cair, atau gas yang dihasilkan manusia sebagai produk sampingan dari kegiatan sehari-hari, termasuk konsumsi, produksi, atau proses alami (Hasibuan, 2023).

Berdasarkan sifatnya, sampah dapat dibedakan menjadi dua kategori yaitu sampah spesifik dan non-spesifik. Sampah spesifik memerlukan penanganan khusus karena karakteristik, konsentrasi, atau volumenya. Sedangkan, sampah non-spesifik tidak memerlukan penanganan khusus. Pengelolaan sampah dilakukan dengan pengurangan dan penanganan sampah. Kegiatan pengurangan sampah meliputi upaya mengurangi jumlah sampah yang dihasilkan. Kegiatan penanganan sampah

mencakup pemisahan sampah berdasarkan jenis, jumlah, dan/atau karakteristiknya, serta pengumpulan dan pemindahan sampah dari sumbernya ke tempat penampungan sementara (TPS) atau fasilitas pengolahan sampah berskala kawasan atau terpadu (Sutisna, 2024).

2. Jenis Sampah

Sampah umumnya terdiri dari berbagai jenis material seperti kertas, plastik, logam, kaca, tekstil, makanan, limbah organik, limbah medis, limbah elektronik, dan lain sebagainya. Sampah dapat dibedakan menjadi tiga kategori (Hasibuan, 2023):

a. Sampah Organik

Sampah organik adalah jenis sampah yang terdiri dari material yang dapat terurai secara alami, seperti sisa makanan, daun-daunan, rumput, dan limbah tumbuhan lainnya. Sampah organik dapat diolah oleh bakteri dan mikroorganisme sehingga berubah menjadi kompos yang dapat digunakan sebagai pupuk.

b. Sampah Anorganik

Sampah anorganik adalah jenis sampah yang terdiri dari material yang sulit terurai secara alami, seperti kertas, plastik, logam, dan kaca. Sampah anorganik biasanya memerlukan proses daur ulang atau pengolahan khusus agar dapat diolah kembali menjadi bahan baru atau untuk mengurangi dampaknya terhadap lingkungan. Sampah anorganik dapat diolah dengan cara *reduce*, *reuse*, dan *recycle*. sampah plastik dapat diolah menjadi

kerajinan tangan, hiasan rumah atau barang yang dapat digunakan kembali (Nindya *et al.*, 2022).

c. Sampah Berbahaya (B3)

Sampah berbahaya adalah jenis sampah yang mengandung bahan-bahan beracun atau berbahaya, seperti baterai, lampu neon, cat pestisida, obat-obatan, dan limbah medis. Pengelolaan sampah berbahaya ini memerlukan penanganan khusus untuk mencegah kerusakan lingkungan dan risiko bagi kesehatan manusia. Hal ini mencakup pengurangan sampah melalui praktik pengurangan, penggunaan kembali barang, daur ulang bahan, serta pengolahan dan pembuangan yang aman terencana. Upaya untuk mengelola sampah secara efektif memerlukan partisipasi aktif dari masyarakat, pemerintah, dan sektor swasta dalam menerapkan kebijakan dan program yang mendukung pengelolaan sampah yang berkelanjutan. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2020 tentang Pengelolaan Sampah Spesifik, sampah spesifik memiliki sifat, konsentrasi dan/atau volumenya membutuhkan penanganan khusus. Pengelolaannya dilakukan dengan pengurangan dan penanganan. Adapun pengurangannya dengan cara membatasi timbulan sampah, daur ulang sampah, dan memanfaatkan kembali sampah. Untuk penanganan sampah dengan cara

pemilahan, pengumpulan, pengangkutan, pengolahan dan/atau pemrosesan akhir.

B. Air Lindi (*Leachate*)

1. Pengertian Air Lindi

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No 59 Tahun 2016 Tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah, lindi merupakan 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. Lindi dapat menimbulkan pencemaran apabila tidak diolah terlebih dahulu sebelum dibuang ke lingkungan.

Lindi adalah air limbah yang berasal dari Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) yang sangat pekat, terbentuk dari air hujan yang meresap melalui tumpukan sampah dan terkumpul di dasarnya. Lindi merupakan produk sampingan dari beberapa proses fisik, kimia, dan biologis. Sifat lindi secara umum dipengaruhi banyak variabel, termasuk jenis sampah, jumlah curah hujan, kondisi hidrologi, dan usia TPA (Mahtab *et al.*, 2021). Air lindi merupakan air yang dihasilkan dari rembesan sampah dan membawa kandungan terlarut tersuspensi bersumber dari hasil dekomposisi materi sampah serta proses pembusukan sampah. Air lindi dapat mencemari air tanah apabila air lindi langsung dibuang ke

lingkungan tanpa adanya pengolahan terlebih dahulu (Sudarmanto, 2021).

Air lindi memiliki bau tidak sedap yang berasal dari proses pembusukan sampah dan warna gelap dari air lindi berasal dari bahan organik yang terkandung dalam air lindi. Tingginya bahan organik yang berada dalam air lindi menyebabkan warna lindi semakin gelap (Saputra, 2021). Lindi terbentuk akibat infiltrasi air ke dalam tumpukan sampah yang dapat mengakibatkan pencemaran pada air tanah, terutama di air tanah dangkal (galian) dan sumur milik warga disekitar TPA. Resapan air dari timbunan sampah organik dapat mengakibatkan pencemaran tanah yang berdampak buruk bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Air lindi merupakan salah satu komponen air resapan yang sangat sulit diuraikan secara alami (Tangahu *et al.*, 2021).

2. Karakteristik Air Lindi

Karakteristik air lindi sangat bervariasi tergantung dari proses yang terjadi di dalam *landfill*, prosesnya yaitu proses fisik, kimia, dan biologi. Adapun faktor yang mempengaruhi proses yang terjadi pada *landfill* yaitu berdasarkan jenis sampah, lokasi *landfill*, hidrogeologi dan sistem pengoperasian. faktor tersebut bervariasi antara satu tempat pembuangan sampah dengan yang lainnya. Perbedaan kondisi aerob dan anaerob dalam tumpukan sampah menyebabkan perbedaan pada aktivitas biologis. Perbedaan ini berdampak signifikan pada proses

dekomposisi sampah yang dapat memengaruhi kualitas dan kuantitas lindi serta gas yang terbentuk (Saputra, 2021).

Karakteristik lain dari air lindi yaitu pada lindi muda memiliki sifat asam dan kandungan organik yang tinggi serta memiliki kandungan COD atau BOD yang besar. Lindi tua memiliki kandungan hampir mencapai kondisi netral, dengan kadar karbon organik yang relatif rendah (Raffinet, 2022). Lindi pada umumnya mengandung senyawa organik dan anorganik yang tinggi, berupa natrium, kalsium, kalium, magnesium, klor, sulfat, fosfat, fenol, nitrogen, dan senyawa logam berat. Kerja bakteri membantu air hujan dalam proses penguraian sehingga menghasilkan lindi. Dalam lindi biasanya mengandung makrokomponen anorganik seperti klorida, amoniak, Cd, Ni, Cu, Pb, dan Fe serta senyawa organik xenobiotik seperti senyawa organik terhalogenasi (Tangahu *et al.*, 2021).

3. Parameter Air Lindi

Parameter air lindi merupakan aspek penting yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas air limbah yang dihasilkan dari tempat pemrosesan akhir (TPA). Parameter air lindi berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No 59 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Air Lindi Bagi usaha Dan/Atau Kegiatan Tempat Pemrosesan akhir mencakup beberapa aspek penting yang harus dipatuhi untuk menjaga kualitas lingkungan.

a. *Potential Hydrogen* (pH)

pH merupakan parameter yang perlu dipantau dan diatur selama proses pengolahan air. Hal ini disebabkan oleh pengaruh pH yang tepat memengaruhi efektivitas proses pengolahan serta stabilitas kimia air. kadar pH pada air lindi dipengaruhi oleh usia sampah. Seiring dengan bertambahnya usia tumpukan sampah, terjadi proses fermentasi metana akibat domposisi biologis anaerobik yang hampir sempurna, dengan nilai pH berkisar antara 7,5 hingga 9 (Aji & Kokoh, 2024).

b. *Biochemical Oxygen Demand* (BOD)

Biochemical Oxygen Demand adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh bakteri untuk menguraikan seluruh zat organik yang terlarut dan beberapa zat organik yang tersuspensi dalam air. Dominasi sampah organik menyebabkan nilai BOD menjadi tinggi, karena bakteri memerlukan oksigen untuk proses penguraian zat-zat organik tersebut. semakin banyak sampah organik yang masuk ke TPA, semakin tinggi pula nilai BOD yang dihasilkan. Hal ini mengakibatkan peningkatan kebutuhan oksigen oleh bakteri untuk mengurai senyawa organik yang ada. Kadar BOD yang tinggi dapat mengurangi ketersediaan oksigen terlarut dalam air yang berdampak negatif pada lingkungan sekitar (Aji & Kokoh, 2024).

c. *Chemical Oxygen Demand (COD)*

Chemical Oxygen Demand merupakan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk proses dekomposisi zat organik serta oksidasi senyawa kimia anorganik seperti nitrit dan amonia. COD memberikan indikasi mengenai jumlah oksigen yang diperlukan untuk mengoksidasi senyawa terlarut dan partikel organik yang terdapat dalam air (Andika *et al.*, 2020). Tingginya nilai COD, menunjukkan adanya senyawa dalam air yang tidak dapat diuraikan oleh mikroorganisme. Penguraian senyawa organik yang tidak terdegradasi secara biokimia, diperlukan kadar oksigen yang tinggi. Tingginya kadar COD akan menyebabkan penurunan oksigen terlarut dalam air. Apabila tidak ditangani dengan baik, air lindi dapat mencemari lingkungan dan mengakibatkan kematian organisme air karena kebutuhan oksigen tidak terpenuhi (Aji & Kokoh, 2024).

d. *Total Suspended Solids (TSS)*

Total Suspended Solids adalah zat padat yang tersuspensi dalam air. TSS terdiri dari berbagai komponen termasuk lumpur, sisa-sisa tanaman yang membusuk, jasad hewan, dan limbah industri. TSS berasal dari padatan seperti lumpur dan organisme mikroskopis yang terbawa oleh aliran air lindi. Degradasi bahan organik oleh mikroorganisme menghasilkan partikel-partikel padat yang menyebabkan peningkatan kadar TSS dalam air. Kadar TSS tinggi

dapat menghalangi masuknya cahaya matahari yang berfungsi untuk proses fotosintesis, akibat kekeruhan yang ditimbulkan. Terhambatnya fotosintesis mengakibatkan dekomposisi hanya dapat berlangsung secara anaerobik (Tarigan, 2021). Aktivitas mikroba dalam kondisi anaerob menghasilkan senyawa seperti CO_2 , NH_3 , H_2S , dan CH_4 yang dapat menyebabkan bau busuk (Aji & Kokoh, 2024).

e. Nitrogen Total (N-Total)

Total nitrogen adalah jumlah keseluruhan nitrogen yang terdapat dalam air limbah. Senyawa seperti amonia (NH_3), nitrit (NO_2^-), dan nitrat (NO_3^-) mengandung unsur nitrogen (N). Unsur nitrogen merupakan salah satu unsur makro yang penting untuk pertumbuhan organisme. Proses dekomposisi bahan organik dalam sampah meningkatkan kadar total nitrogen, mencakup berbagai bentuk nitrogen terlarut dalam air lindi termasuk amonia, nitrit, dan nitrat. Peningkatan kadar nitrogen dapat disebabkan oleh limbah organik yang mengandung nitrogen, seperti sisa makanan, kertas, dan bahan-bahan tanaman yang terbuang (Aji & Kokoh, 2024).

f. Merkuri (Hg)

Merkuri atau air raksa adalah logam yang berbentuk cairan keperakan pada suhu kamar 25°C . sifat merkuri mencerminkan stabilitas kimiawinya, terutama dalam lingkungan sedimen yang meliputi pengikatan terhadap protein, penguapan, dan emisi atau

pelepasan uap merkuri yang beracun, bahkan pada suhu ruangan yang tinggi (Mareza, 2024).

Merkuri adalah salah satu jenis logam berat yang berbahaya karena memiliki racun. Merkuri secara alami berasal dari alam dan aktivitas manusia. Dalam perairan, merkuri memiliki laju bioakumulasi yang lebih tinggi dibandingkan logam berat lainnya. Keberadaan merkuri di lingkungan perairan dapat menyebabkan perubahan dalam struktur komunitas biota air. Perubahan ini terjadi akibat kematian mikroorganisme, organisme yang mengalami resistensi terhadap paparan zat kimia serta perubahan kualitas air akibat paparan merkuri (Bernadus & Rorong, 2021).

g. Kadmium (Cd)

Kadmium merupakan jenis logam yang bersifat toksik bagi organisme perairan dan manusia, meskipun dalam konsentrasi rendah. Konsentrasi dan komposisi kadmium yang melebihi ambang batas dalam suatu ekosistem perairan mengindikasikan terjadinya pencemaran. Logam kadmium yang terintroduksi ke dalam perairan cenderung mengalami sedimentasi. Kadmium yang terdeposisi di perairan maupun sedimen berpotensi mengalami bioakumulasi dalam organisme akuatik (Wuni, Y. S., & Kesuma, 2024). Kadmium muncul dalam air dalam bentuk ion terhidrasi, garam klorida, kompleks dengan ligan anorganik atau sebagai kompleks dengan ligan organik. kadmium dalam bentuk logam

dapat mengalami proses biotransformasi dan bioakumulasi di dalam organisme hidup, termasuk tanaman, hewan, dan manusia (Mareza, 2024).

4. Baku Mutu Air Lindi

Baku mutu air lindi adalah standar yang menetapkan batasan atau konsentrasi unsur pencemar dan/atau jumlah unsur pencemar yang diperbolehkan dalam air lindi sebelum dibuang atau dilepaskan ke sumber air akibat kegiatan tempat pemrosesan akhir (TPA). Air lindi merupakan hasil dari proses pelarutan dan pencucian material dalam tumpukan sampah oleh air, yang mengandung berbagai zat berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia.

Baku mutu air lindi ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No 59 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Air Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir pada lampiran 1 dapat dilihat pada tabel :

Tabel 2. 1 Parameter Baku Mutu Lindi

Parameter	Kadar Maksimum
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

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No 59 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha Dan/Atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir

C. Dampak Kesehatan Pencemaran Air Lindi

Sebagian besar masyarakat di Indonesia masih bergantung pada air sumur sebagai sumber utama untuk memenuhi kebutuhan air sehari-hari. Air sumur diperoleh melalui dua cara, yaitu sumur gali yang dibuat dengan menggali tanah secara manual dan sumur bor yang menggunakan mesin bor untuk mencapai lapisan tanah yang lebih dalam guna menemukan sumber air. Air sumur yang berdekatan dengan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) memiliki risiko lebih tinggi tercemar oleh lindi. Air sumur yang terkontaminasi lindi dianggap sebagai air yang tidak layak digunakan, karena akan berdampak negatif pada kesehatan (Thomas *et al.*, 2023).

Lindi merupakan salah satu faktor penyebab pencemaran air. Pencemaran yang disebabkan lindi memiliki risiko yang sangat besar terhadap kualitas sumber daya air. Lindi dianggap sebagai polutan karena mengandung berbagai jenis sampah yang dibuang, yang dapat menyebabkan pencemaran pada air tanah dangkal dan menimbulkan bahaya yang signifikan (Rajoo *et al.*, 2020). Lindi mengandung kadar logam berat yang sangat tinggi, kehadiran lindi sebagai polutan dapat mencemari air tanah, sehingga harus memperhatikan kualitas air tanah tersebut. Adapun kriteria kualitas air tanah yaitu parameter fisika, kimia, radioaktivitas, serta mikrobiologi yang harus sesuai dengan PERMENKES Nomor 2 Tahun 2023 tentang Kesehatan mengenai syarat dan prinsip kualitas air. Air yang memiliki kualitas baik, tidak mengandung zat kimia beracun dan kadar logam berat yang melebihi standar mutu air bersih. Kandungan logam berat

dalam air yang melebihi nilai ambang batas menyebabkan pencemaran dan berpotensi membahayakan kesehatan masyarakat (Syuzita *et al.*, 2022).

Logam berat merupakan senyawa yang diperlukan oleh organisme dalam jumlah tertentu, namun dapat menjadi beracun jika dalam kadar yang berlebih (Karamina *et al.*, 2021). Konsentrasi logam berat dalam air lindi dipengaruhi oleh volume dan jenis sampah yang berasal dari berbagai sumber pencemar. Tingkat logam berat juga tergantung pada jenis dan kondisi tempat pembuangan sampah. TPA yang dilengkapi dengan sistem pengumpulan lindi yang baik dan efektif dapat mengurangi dampak negatif terhadap kualitas air (Hussein *et al.*, 2021). Pencemaran logam berat dapat mengakibatkan masalah kesehatan pada masyarakat dan kerusakan pada lingkungan hidup (Karamina *et al.*, 2021). Paparan logam berat dengan konsentrasi tinggi dapat menimbulkan berbagai masalah kesehatan, seperti kelemahan otot dan fisik, gangguan sistem saraf serta kanker (Tony *et al.*, 2021).

Kualitas air tanah yang tercemar dapat menyebabkan air memiliki bau yang tidak sedap, keruh, serta mengandung bakteri *E. coli* dan *coliform*. Air yang memiliki sifat asam dapat mengakibatkan korosi pada pipa logam, sementara air yang bersifat alkali menunjukkan adanya proses disinfeksi (Lathifah *et al.*, 2023). Kondisi sanitasi lingkungan yang tidak memenuhi standar dalam penyediaan air bersih dapat menjadi faktor risiko untuk penyakit seperti diare, thyphoid, cholera, dan hepatitis A (Prisilla *et al.*, 2024).

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Mela Melisa (2023) sebanyak 52 orang mengalami diare, hal ini disebabkan oleh air lindi dari TPA yang mengalir ke sungai digunakan oleh masyarakat mengandung berbagai jenis bakteri yang berasal dari sampah, seperti popok bayi dan sisa makanan yang membusuk. Terdapat 80 orang mengalami penyakit kulit dengan gejala gatal-gatal dan bintik-bintik merah. Kulit yang mengalami gatal dan kemerahan adalah reaksi dari kulit terhadap interaksi dengan zat-zat kimia bersifat toksik atau alergen yang langsung bersentuhan dengan permukaan kulit. Kondisi ini merupakan salah satu gejala dari dermatitis. Dermatitis adalah kondisi kulit kronis yang dapat muncul kembali dan dapat dialami oleh individu dari berbagai usia. Penyebab utama dermatitis sering kali berkaitan dengan alergi seseorang terhadap zat tertentu dan iritasi yang timbul akibat kontak dengan bahan-bahan tertentu, yang biasa dikenal sebagai dermatitis kontak iritan (Prinendia *et al.*, 2023).

D. Lahan Basah Buatan (*Constructed wetland*)

1. Pengertian Lahan Basah Buatan

Constructed wetland atau lahan basah buatan adalah sistem pengolahan yang meningkatkan kualitas air menggunakan proses vegetasi lahan basah, tanah, dan mikroba. *Wetland* yang dibangun memiliki banyak manfaat bagi manusia dan satwa liar. Salah satu fungsinya adalah menyaring air. Banyak zat padat tersuspensi terperangkap oleh tanaman dan mengendap saat air mengalir melalui lahan basah. Tanaman yang terdapat pada *constructed wetland*

dibutuhkan agar mikroorganisme tetap hidup. Mikroorganisme ini berperan mengubah dan menghilangkan polutan dari air melewati berbagai proses (Suthersan, 2020) .

Kelebihan *constructed wetland* adalah pengolahan dilakukan secara in-situ sehingga limbah dapat langsung diolah tanpa dipindahkan ke tempat lain. Metode ini mampu mereduksi COD sebesar 60-85%, *Total Suspended Solids* (TSS) sebesar 80-95%, dan dapat menurunkan konsentrasi nitrogen dan fosfor dalam air limbah. Kelemahan *constructed wetland* yaitu harus ada pemanenan tanaman secara teratur agar persen penyisihan pada tanaman dilakukan secara maksimal sehingga memerlukan biaya yang tinggi untuk proses pemanenan. Pada spesies tanaman berbeda-beda tingkat penyisihan tiap parameter (Parde *et al.*, 2021).

2. Jenis Lahan Basah Buatan

Lahan basah buatan atau *Constructed wetland* memiliki beberapa jenis yaitu *surface flow wetlands*, *subsurface flow wetlands*, dan *hybrid system* yang menggabungkan *surface flow wetland* dan *subsurface flow wetland*. *Constructed wetland* dapat dipadukan dengan teknologi pengolahan konvensional. Jenis-jenis *constructed wetland* dapat disesuaikan untuk air limbah domestik, air limbah pertanian, drainase tambang batubara, dan limpasan air hujan (Thangadurai *et al.*, 2020).

a. *Surface Flow Wetland*

Surface Flow Wetland terdiri dari cekungan dangkal, tanah, atau media lain untuk mendukung akar vegetasi, dan struktur pengendali air yang menjaga kedalaman air agar tetap dangkal. Permukaan air berada di atas substrat. *Surface flow* mirip dengan rawa alami dan dapat menyediakan habitat bagi satwa liar serta manfaat estetika, selain itu berfungsi dalam pengolahan air. Pada lapisan dekat permukaan bersifat aerobik, untuk air dan substrat yang lebih dalam memiliki sifat anaerobik. Kelebihan dari *surface flow wetland* adalah biaya operasional yang rendah, dan konstruksi, operasi, serta pemeliharannya yang relatif sederhana. Kelemahan utamanya yaitu memerlukan area lahan yang lebih besar dibandingkan dengan sistem lainnya.

b. *Subsurface Flow Wetland*

Subsurface Flow Wetland terdiri dari cekungan tertutup dengan substrat berpori dari batu atau kerikil. Tingkat air dirancang agar tetap berada di bawah permukaan substrat. *Subsurface flow* memiliki 2 jenis aliran, yaitu aliran horizontal dan vertikal. *Subsurface flow* paling cocok digunakan untuk air limbah dengan konsentrasi padatan yang relatif rendah dan dalam kondisi aliran yang cukup seragam, karena batasan hidrolis yang ditetapkan oleh substrat. Kelebihan sistem ini yaitu toleransi terhadap suhu dingin yang lebih baik serta minim masalah hama dan bau. Kelemahan

dari *subsurface flow* adalah biaya konstruksi yang lebih tinggi, karena biaya yang tinggi *subsurface flow* sering digunakan untuk aliran kecil. Sistem ini memiliki biaya pemeliharaan dan perbaikan lebih tinggi, serta masalah operasional seperti penyumbatan dan limpasan air yang tidak diinginkan.

c. *Hybrid System*

Hybrid system merupakan proses pengolahan air terjadi ditempat yang sama. Sistem *hibrida* atau *multistage* memiliki desain yang unik, terdiri dari beberapa sel yang dikhususkan untuk melakukan jenis reaksi yang berbeda-beda. Contohnya, untuk mengolah air limbah dari tambang, perlu menggunakan beberapa sel lahan basah yang berbeda secara berurutan agar dapat mendorong reaksi aerobik dan anaerobik. Berlaku juga untuk menghilangkan amonia dari air limbah pertanian.

3. Mekanisme Lahan Basah Buatan

Constructed wetland merupakan kumpulan kompleks air, substrat, tanaman, sampah (terutama organik), invertebrata (larva serangga dan cacing), dan mikroorganisme. Adapun mekanisme dalam *constructed wetland* adalah (Thangadurai *et al.*, 2020):

- a. Pengendapan partikel padat tersuspensi, proses ini terjadi ketika air mengalir melalui lahan basah, memperlambat aliran dan memungkinkan partikel untuk mengendap.

- b. Filtrasi dan presipitasi kimia melalui kontak air dengan substrat dan sampah, terjadi proses penyaringan dan pengendapan bahan kimia.
- c. Transformasi kimia, proses ini mengubah zat-zat kimia menjadi bentuk lain yang lebih aman.
- d. Adsorpsi dan pertukaran ion pada permukaan tanaman, substrat, sedimen, dan sampah.
- e. Penguraian dan transformasi polutan oleh mikroorganisme dan tanaman untuk menguraikan polutan yang ada,
- f. Penyerapan dan transformasi nutrisi, nutrisi diserap oleh mikroorganisme dan tanaman untuk pertumbuhan.
- g. Predasi dan kematian alami patogen, proses ini dikendalikan oleh predator alami atau mati secara alami.

Constructed wetland yang paling efektif untuk pengolahan air adalah lahan yang dapat mendukung berbagai proses alami. Setiap jenis limbah memiliki cara pengolahan yang berbeda-beda.

E. Fitoremediasi

Salah satu metode untuk menangani air limbah dan mengurangi potensi pencemaran adalah melalui fitoremediasi. Metode ini terbilang ekonomis karena tanaman yang digunakan mudah ditemukan dan tumbuh melimpah di sekitar lingkungan. Fitoremediasi adalah teknologi pengelolaan limbah yang bertujuan untuk menghilangkan atau mengurangi polutan berbahaya dalam air atau tanah dengan bantuan tanaman. Jenis

tanaman yang digunakan dapat disesuaikan dengan yang tersedia di lingkungan. Contohnya, di daerah rawa atau sungai sering ditemukan tanaman seperti eceng gondok, kangkung, dan melati air (Novita *et al.*, 2021). Menurut *Environmental Protection Agency*, (2012) proses alami yang dapat dilakukan oleh tanaman untuk membersihkan kontaminan hingga ke akarnya meliputi :

1. Menyimpan kontaminan di akar, batang, dan daun.
2. Mengubah kontaminan menjadi senyawa kimia yang tidak berbahaya di dalam tanaman.
3. Mengubah menjadi uap dan melepaskannya ke atmosfer.
4. Menyerap atau menempelkan kontaminan pada akar berkat keberadaan mikroba.

Fitoremediasi merupakan metode revegetasi untuk tanah yang terkontaminasi logam berat yang diterima oleh masyarakat dan memiliki keunggulan dibandingkan teknik lainnya. Pendekatan rekayasa genetik dapat dilakukan untuk memodifikasi tanaman agar memiliki pertumbuhan yang cepat, menghasilkan biomassa tinggi, serta memiliki toleransi dan kemampuan akumulasi logam berat yang baik, sekaligus dapat beradaptasi dengan kondisi iklim dan geologi yang berbeda (Yan *et al* 2020). Menurut Fatiha (2022) tahapan-tahapan dalam mengurangi berbagai zat pencemar atau polutan melalui mekanisme kerja fitoremediasi oleh agen fitoremediator umumnya meliputi :

a. *Phytoaccumulation (Phytoextraction)*

Phytoaccumulation atau *Phytoextraction* adalah proses dimana tanaman menyerap zat kontaminan dan mengakumulasikannya di sekitar akar, kemudian meneruskannya ke bagian tanaman lainnya, seperti batang dan daun (Navis, 2023).

b. *Rhizofiltration*

Rhizofiltration merupakan absorpsi kontaminan yang terjadi ketika zat kontaminan masuk ke dalam akar dan terlarut di sekitar zona akar. Proses *Rhizofiltration* tergantung pada waktu karena melibatkan mekanisme biosorpsi dan bioakumulasi. *Rhizofiltration* memanfaatkan tanaman untuk menyerap dan menetralkan polutan dalam air tanah, merupakan alternatif ramah lingkungan yang berpotensi efektif dalam air tanah (Kristanti *et al.*, 2021).

c. *Phytostabilization*

Phytostabilization merupakan proses dimana zat-zat kontaminan melekat pada akar tanaman dan tidak dapat diserap ke dalam batang. Proses ini mencakup transpirasi dan pertumbuhan akar yang mengendalikan kontaminan dengan cara mengurangi pencucian, mengontrol erosi, menciptakan lingkungan aerobik di zona akar, serta menambahkan bahan organik ke substrat yang dapat mengikat kontaminan (Paulina & Faradika, 2024).

d. *Rhizodegradation*

Rhizodegradation merupakan mekanisme penguraian senyawa-senyawa kontaminan oleh tanaman yang didukung oleh aktivitas mikroba yang berada di sekitar akar tanaman.

e. *Phytodegradation (phyto-transformation)*

Phytodegradation merupakan prosedur remediasi terhadap senyawa kontaminan dilakukan oleh bagian-bagian tanaman (daun, akar, dan batang) untuk mengubah molekul organik kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana melalui proses metabolisme tanaman. Proses ini melibatkan berbagai enzim yang dihasilkan dalam jaringan tanaman, seperti enzim dehalogenase dan oksigenase.

f. *Phytovalatization*

Phytovalatization merupakan proses dimana tanaman menyerap zat kontaminan dan mengubahnya menjadi senyawa yang mudah menguap, sehingga menjadi tidak berbahaya saat dilepaskan ke atmosfer (Navis, 2023).

F. Tanaman Melati Air (*Echinodorus palaefolius*)

Hidrofit atau tanaman air adalah jenis tanaman yang mampu beradaptasi untuk hidup di lingkungan perairan. Tanaman ini dapat tumbuh sepenuhnya terendam dalam air atau hanya sebagian, seperti bagian akarnya. Hidrofit sangat bergantung pada keberadaan air selama masa hidupnya, bukan hanya pada tanah yang lembab atau basah. Istilah hidrofit

dapat merujuk pada tanaman yang dapat hidup dalam kondisi tanah yang berair, dalam kehidupan sehari-hari dapat tumbuh dengan kadar air yang normal (Ulfa *et al.*, 2023).

Tanaman melati air adalah jenis tanaman akuatik yang tumbuh berumpun dan sebagian terendam. Tanaman ini memiliki kemampuan yang baik dalam menangani polutan, termasuk kemampuannya untuk menyerap logam berat dan senyawa sulfida (Novita *et al.*, 2021). Melati air termasuk dalam kategori tanaman akuatik yang tumbuh berumpun dan setengah terendam di dalam air. Penyebaran tanaman ini cukup luas di benua Amerika, mencakup wilayah Amerika Tengah, Venezuela, Brasil, Peru, Meksiko, dan Uruguay, menurut rachmawati 2020, taksonomi dari tanaman melati air adalah sebagai berikut:

1. Kingdom : *Plantae*
2. Subkingdom : *Tracheobionta*
3. Superdivisi : *Spermatophyta*
4. Divisi : *Magnoliophyta*
5. Kelas : *Liliopsida*
6. Subkelas : *Alismatidae*
7. Ordo : *Alismatales*
8. Famili : *Alismataceae*
9. Genus : *Echinodorus*
10. Spesies : *Echinodorus radicans*



Gambar 2. 1 Tanaman Melati Air

Melati air memiliki morfologi yang khas, diantaranya adalah daun tunggal yang cukup kaku, dengan permukaan atas dan bawah daun dilapisi oleh bulu-bulu kasar yang berwarna hijau muda. Daun melati air memiliki bentuk bulat telur dengan pangkal yang melengkung dan ujung yang membulat. Tipe tulang daun berupa menjari dan menjulur ke sisi permukaan bawah. Tangkai daun berbentuk setengah lingkaran di bagian pangkal. Pinggiran daun rata, dengan anak tulang daun yang saling menyatu dari pangkal hingga ujung daun. Batangnya keras dan memiliki panjang antara 50 – 100 cm serta diameter 1 – 3 cm, terdapat batang tipis beralur di sepanjang tangkai yang memiliki bintik-bintik putih di atas dasar berwarna hijau muda. Bunga melati muncul di pusat tangkai, membentuk susunan menyerupai payung. Bunga melati air berwarna putih, mirip dengan bunga melati yang tumbuh di tanah. Kelopak bunga berukuran kecil dan berwarna hijau, bagian tengah bunga berupa putik dan benang sari yang berwarna kekuningan (Fatiha, 2022). Perubahan musim yang tidak stabil dapat memengaruhi waktu munculnya bunga melati air. Tanaman ini hanya dapat bertahan dalam paparan sinar matahari langsung untuk waktu yang relatif

singkat. Hal ini disebabkan oleh kebutuhan melati air akan habitat teduh, yang penting untuk menjaga agar struktur daunnya tidak rusak (Hidayah *et al.*, 2020).

Melati air adalah tanaman yang media pertumbuhannya membutuhkan air. Tanaman ini memiliki kemampuan yang sangat baik dalam menyerap dan menguraikan polutan, sehingga dapat mengurangi kandungan polutan dalam air. Tanaman melati air yang telah mencapai tahap dewasa atau berumur minimal 2 bulan digunakan dalam proses fitoremediasi agar memperoleh hasil yang maksimal. Proses penyerapan dimulai dari fotosintesis, dimana tanaman menghasilkan oksigen yang cukup untuk mendukung aktivitas mikroorganisme di sekitarnya. Sistem rhizosfer melati air memiliki saluran udara yang tebal, memungkinkan tanaman menyerap berbagai zat beracun. Oksigen yang dilepaskan di sekitar akar menghasilkan oksigen yang banyak, sehingga mendukung pertumbuhan bakteri aerob. Bakteri ini berperan dalam menguraikan senyawa organik secara lebih efisien, senyawa organik yang terurai menjadi bentuk yang lebih sederhana diserap oleh tanaman untuk proses metabolisme. Melati air tidak hanya berfungsi sebagai penyerap polutan tetapi juga berkontribusi pada peningkatan kualitas air melalui mekanisme fitoremediasi (Windyanti *et al.*, 2020).

Pada proses fitoremediasi, akar memiliki peranan penting dalam menyerap polutan dalam air limbah. Sistem perakaran melati air terletak di dasar air dan memiliki karakteristik yang fleksibel, kuat, panjang, dan

menyebar. Hal ini membuat melati air sangat efektif dalam memperluas area tempat mikroorganisme dapat menempel dan berinteraksi. Akar melati air memiliki *aerenchyma*, yang berfungsi untuk pengurai yang membantu proses fitoremediasi. Sistem perakaran yang baik tidak hanya meningkatkan penyerapan nutrisi tetapi menciptakan lingkungan yang kondusif bagi mikroorganisme untuk menguraikan polutan, sehingga meningkatkan kualitas air secara keseluruhan. Oksigen yang dihasilkan dialirkan ke akar kemudian disebarkan ke batang secara difusi pada pori-pori daun. Pelepasan oksigen oleh akar tanaman melati air dapat meningkatkan kadar oksigen terlarut di dalam air dan tanah di sekitar akar, dibandingkan dengan area yang tidak ditumbuhi tanaman melati air. Hal ini menciptakan lingkungan yang lebih baik bagi organisme pengurai, seperti bakteri aerob yang mampu hidup dalam lingkungan lahan basah dengan kondisi anaerob (Windyanti *et al.*, 2020).

G. Faktor Pengganggu Lahan Basah Buatan

1. Suhu

Suhu memiliki pengaruh besar terhadap laju reaksi biokimia yang berlangsung dalam proses degradasi. Pada suhu yang sangat rendah, aktivitas mikroorganisme akan mengalami penurunan signifikan, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat merusak mikroorganisme atau menghambat aktivitas enzimatik. Suhu ideal untuk mikroorganisme dekomposer berada dalam rentang 20°C hingga 40°C, meskipun beberapa mikroorganisme mampu bertahan pada suhu ekstrem.

Mikroorganisme mesofilik berfungsi efektif dalam kisaran suhu sedang antara 25°C dan 37°C, suhu berperan penting dalam degradasi bahan organik di berbagai ekosistem (Ziliwu & Lase, 2025). Kondisi mesofilik merujuk pada suhu optimal untuk penguraian bahan organik yang harus dipertahankan secara konsisten. Suhu memiliki dampak signifikan terhadap aktivitas mikroorganisme dan tanaman, sehingga memengaruhi efektivitas pengolahan air limbah dalam reaktor *constructed wetland*. Pada suhu 16,5°C dan 32°C sangat mendukung proses nitrifikasi di lahan basah. Suhu yang tinggi dan stabil akan mempercepat laju degradasi bahan organik dan nitrifikasi, karena meningkatkan aktivitas mikroorganisme yang terdapat pada media (Suwandhi *et al.*, 2022).

2. *Potential Hydrogen (pH)*

pH adalah ukuran yang digunakan untuk menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan pada suatu larutan. Derajat keasaman ini mempengaruhi potensi racun dari bahan pencemar dan kelarutan berbagai gas, serta berperan dalam menentukan konsentrasi zat-zat tertentu di dalam air (Fattayat, 2022). pH memiliki peran yang sangat penting dalam fitoremediasi karena memengaruhi kelarutan unsur hara yang mendukung pertumbuhan tanaman. Perubahan pH dapat terjadi akibat aktivitas penyerapan nutrisi oleh tanaman. Saat akar tanaman menyerap ion positif, tanaman juga melepaskan ekskret berupa ion positif (H^+) ke lingkungan. Nilai pH mencerminkan konsentrasi ion H^+

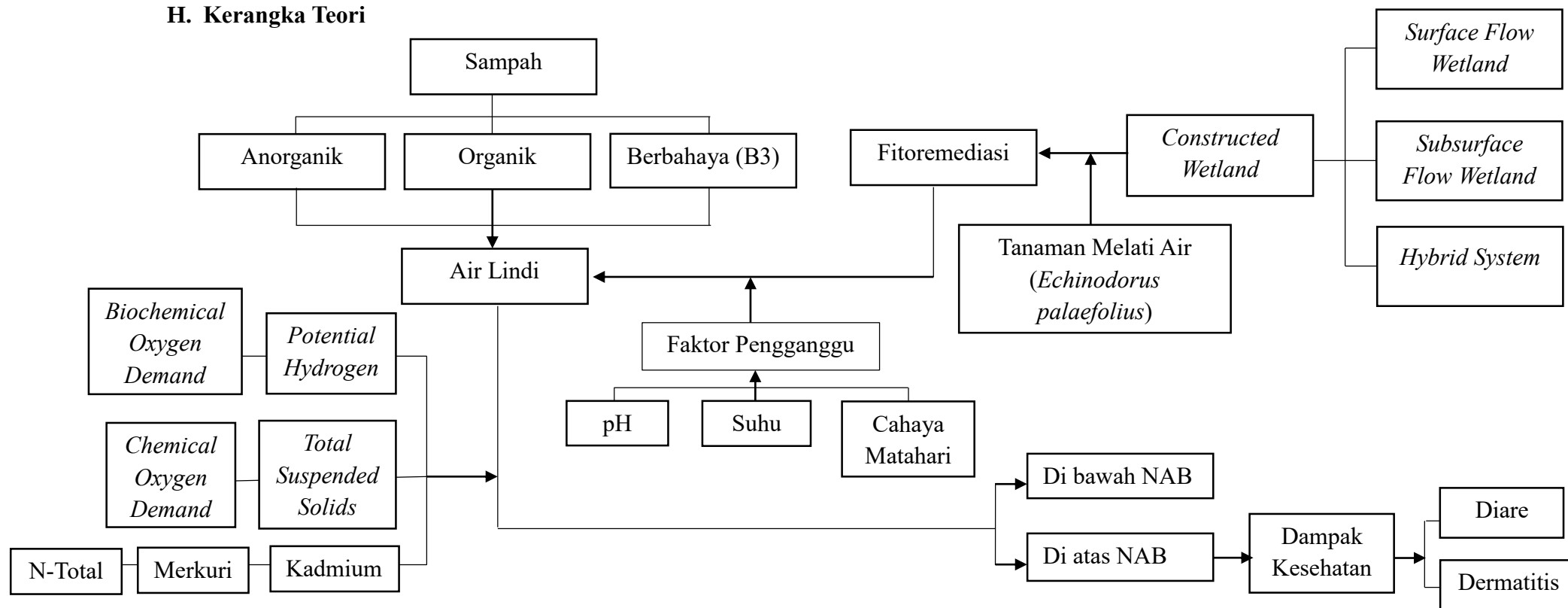
dan ion OH⁻ dalam limbah. Tingginya konsentrasi ion H⁺ menunjukkan tingkat keasaman yang tinggi pada limbah tersebut. Sedangkan semakin tinggi konsentrasi ion OH⁻, semakin basa limbah tersebut. Nilai pH dalam suatu perairan memiliki dampak yang signifikan terhadap kehidupan organisme. Perubahan pH yang ekstrem dan berlangsung terus-menerus dapat menghambat pertumbuhan dan bahkan menyebabkan kematian organisme (Saad *et al.*, 2022; Tambunan *et al.*, 2024).

3. Cahaya Matahari

Cahaya matahari adalah sumber energi yang krusial bagi kehidupan manusia dan sangat penting dalam proses pertumbuhan tanaman. Tanaman akan tumbuh dengan optimal ketika menerima sinar matahari yang cukup (Mahardika *et al.*, 2023). Intensitas cahaya adalah jumlah cahaya yang diterima oleh tanaman dalam periode waktu tertentu per satuan luas. Baik intensitas cahaya yang terlalu tinggi maupun terlalu rendah dapat menghambat pertumbuhan tanaman, karena hal ini memengaruhi kemampuan sel-sel stomata pada daun dalam melakukan proses transportasi (Zannah *et al.*, 2023). Pengaruh utama dari intensitas cahaya matahari dapat dilihat dalam proses fotosintesis tanaman, sedangkan pengaruh sekunder muncul dalam aspek morfogenetik. Mengenai intensitas cahaya, tanaman beradaptasi dengan mengatur posisi daun agar dapat menyerap cahaya secara maksimal. Daun yang mendapatkan intensitas cahaya tertinggi biasanya

terletak di tajuk utama yang terkena sinar matahari langsung. Produksi tanaman cenderung meningkat ketika luas permukaan daun bertambah atau jumlah daun dan anak daun meningkat, karena hal ini memungkinkan proses fotosintesis berlangsung secara maksimal (Previansari *et al.*, 2020).

H. Kerangka Teori



Gambar 2. 2 Kerangka Teori Modifikasi Hasibuan, (2023); PermenLHK No 59 Tahun 2016 Tentang Baku Mutu Lindi, (2016); Mela Melisa, (2023); Thangadurai *et al.*, (2020); Mirwan dan Pramesti, (2023); Fattayat, (2022); Suwandhi *et al.*, (2022); Zannah *et al.*, (2023)