

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Sampah

1. Pengertian Sampah

Menurut Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, sampah adalah sisa kegiatan sehari-hari manusia dan/atau proses alam yang berbentuk padat. Holimah et al (2024) mendefinisikan sampah sebagai material atau benda yang sudah tidak digunakan dan dianggap tidak memiliki nilai atau fungsi apa pun. Sampah dapat berasal dari berbagai sumber, seperti rumah tangga, industri, atau kegiatan sehari-hari.

2. Jenis-Jenis Sampah

Menurut Sabneno et al. (2024), secara umum sampah diklasifikasikan menjadi tiga jenis yaitu sampah organik, anorganik, dan sampah bahan berbahaya beracun (B3).

a. Sampah Organik

Sampah organik adalah material yang dapat terurai secara alami oleh mikroorganisme dan berasal dari makhluk hidup. Sampah organik terdiri dari sisa-sisa makanan, dedaunan, kulit buah, sayuran, limbah tumbuhan dan bahan organik lainnya. Pengelolaannya bisa dilakukan melalui proses *composting* untuk menghasilkan pupuk alami yang bermanfaat bagi tanah (Holimah et al., 2024).

Sampah organik dapat diuraikan oleh proses alamiah seperti pengomposan, namun penanganan yang tidak tepat dapat menyebabkan produksi gas metana yang merugikan lingkungan. Strategi pengelolaan termasuk pengomposan rumah tangga, pembuatan kompos massal, dan pemanfaatan energi melalui biodigester. Pengelolaan sampah organik memerlukan pengolahan khusus agar tidak menghasilkan gas rumah kaca saat sampah terurai (Ranno Marlany Rachman et al., 2024).

b. Sampah Anorganik

Sampah anorganik adalah bahan yang tidak terurai secara alami dan biasanya berasal dari proses industri. Sampah anorganik terdiri dari plastik, kertas, karton, logam, dan bahan/material yang terbuat dari bahan sintesis (bukan organik). Sampah anorganik dapat didaur ulang untuk membuat produk baru, mengurangi kebutuhan akan bahan baku baru dan mengurangi jumlah sampah di tempat pembuangan akhir (Holimah et al., 2024).

c. Sampah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3)

Sampah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) adalah sampah yang mengandung bahan atau senyawa yang jika tidak dikelola dengan benar dapat menimbulkan risiko bagi kesehatan manusia atau lingkungan. Sampah B3 terdiri dari baterai, cat, lampu neon, bahan kimia rumah tangga, limbah medis, dan pestisida. Pengelolaan limbah B3 sangat berisiko, karena memerlukan

penanganan khusus dan pemusnahan yang aman untuk mencegah dampak negatif. Pengelolaan yang tidak benar dapat mencemari tanah dan air. Pengumpulan khusus dan daur ulang limbah B3, serta kampanye kesadaran, diperlukan untuk mengatasi risiko kesehatan dan lingkungan (Ranno Marlany Rachman et al., 2024).

3. Tempat Pemrosesan Akhir (TPA)

Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 03/PRT/M/2013 tentang Penyelenggaraan Prasarana dan Sarana Persampahan dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga, Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) adalah tempat untuk memroses dan mengembalikan sampah ke media lingkungan secara aman bagi manusia dan lingkungan. Ada 3 jenis metode yang digunakan di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) yaitu penimbunan terbuka (*open dumping*), lahan urug terkendali (*controlled landfill*) dan lahan urug saniter (*sanitary landfill*).

a. Penimbunan Terbuka (*Open Dumping*)

Metode penimbunan terbuka atau *open dumping* adalah proses penimbunan sampah di TPA tanpa melalui proses pemadatan dan penutupan secara berkala. TPA jenis ini paling primitif dan tidak teratur, sering kali berupa tempat terbuka di mana sampah dibuang tanpa pengelolaan yang memadai. Tidak ada kontrol atas pencemaran tanah, air, atau udara sehingga menghasilkan masalah kesehatan dan lingkungan yang signifikan (Holimah et al., 2024).

Kelebihan dari metode *open dumping* yaitu teknis pelaksanaannya cenderung lebih mudah, personil yang dibutuhkan di lapangan relatif sedikit dan biaya operasi serta perawatan relatif rendah. Kekurangan dari aplikasi metode ini yaitu mengurangi estetika karena sampah dibiarkan menumpuk, adanya pencemaran lingkungan (air, udara, tanah), lahan yang sudah digunakan tidak dapat digunakan kembali, dan resiko kebakaran besar yang disebabkan oleh gas metana (Damanhuri & Padmi, 2010).

b. Lahan Urug Terkendali (*Controlled Landfill*)

Metode lahan urug terkendali atau *controlled landfill* adalah metode pengurangan di areal pengurangan sampah, dengan cara dipadatkan dan ditutup dengan tanah penutup sekurang-kurangnya setiap tujuh hari. Biasanya memiliki pelapis dasar tetapi kurang lengkap dalam pengelolaan *leachate* dan gas. Pengelolaan kontaminasi lingkungan dilakukan secara lebih terbatas (Holimah et al., 2024).

Kelebihan dari metode *controlled landfill* yaitu lahan dapat digunakan kembali setelah digunakan serta menghasilkan estetika yang cukup baik, namun adapaun kekurangannya yaitu biaya operasi dan perawatan yang cukup besar dan lebih sulit, serta memerlukan personil di lapangan yang terlatih (Damanhuri & Padmi, 2010).

c. Lahan Urug Saniter (*Sanitary Landfill*)

Metode lahan urug saniter atau *sanitary landfill* adalah metode pengurugan di areal pengurugan sampah yang disiapkan dan dioperasikan secara sistematis, dengan penyebaran dan pemadatan sampah pada area pengurugan serta penutupan sampah setiap hari. TPA jenis paling umum dan canggih. Sampah ditempatkan di dalam sel-sel yang tertutup rapat dan dipantau untuk mencegah pencemaran. Sel-sel disegel dengan liner (pelapis) dari bahan seperti plastik atau geotekstil untuk mencegah kebocoran bahan kimia ke tanah dan air tanah. Sistem pengumpulan gas metana dan *leachate* digunakan untuk mengelola dan mengolah produk sampingan (Holimah et al., 2024).

Metode *Sanitary landfill* memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan metode lainnya, timbulan gas metana dan air lindi terkontrol dengan baik sehingga tidak mencemari lingkungan, lahan dapat digunakan kembali, fleksibel terhadap fluktuasi jumlah sampah, dan dapat menerima berbagai tipe sampah. Kekurangan dari metode ini yaitu aplikasi sistem pelapisan dasar (*liner*) yang rumit, banyak biaya yang dikeluarkan misalnya pipa untuk gas metana dan air lindi, serta jika operasi tidak berfungsi maka akan kembali seperti metode open dumping (Damanhuri & Padmi, 2010).

B. Air Lindi (*Leachate*)

1. Pengertian Air Lindi

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

Menurut Damanhuri & Padmi (2010), air lindi adalah cairan yang merembes melalui tumpukan sampah dengan membawa zat terlarut atau tersuspensi terutama hasil penguraian sampah atau dapat pula didefinisikan sebagai limbah cair yang timbul akibat masuknya air eksternal ke dalam tumpukan sampah melarutkan dan membilas zat terlarut, termasuk juga zat organik hasil proses dekomposisi biologis.

Air lindi mengandung berbagai zat pencemar seperti bahan organik, anorganik, logam berat, senyawa toksik, serta mikroorganisme patogen. Air lindi mengalir ke tempat yang lebih rendah dan dapat merembes ke dalam tanah serta bercampur dengan air tanah, ataupun mengalir di permukaan tanah dan bermuara pada aliran air sungai (Laili, 2021).

2. Parameter Air Lindi

a. pH

Derajat keasaman atau pH (*puissance negative de H*) merupakan logaritma dari kepekatan ion-ion H (hidrogen) yang terlepas dalam suatu cairan. Ion hidrogen bersifat asam, keberadaan ion hidrogen menggambarkan nilai pH pada suhu tertentu atau dapat ditulis dengan persamaan $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$. Konsentrasi ion H^+ dan ion OH^- berbanding terbalik, semakin tinggi konsentrasi ion H^+ maka ion OH^- akan semakin rendah sehingga pH mencapai nilai < 7 (perairan asam). Jika konsentrasi ion OH^- lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi ion H^+ , maka perairan tersebut sifatnya basa karena memiliki nilai $\text{pH} > 7$. Ion hidrogen merupakan unsur yang sangat berpengaruh terhadap faktor kimia lainnya, seperti alkalinitas, kesadahan dan keasaman air. Tinggi rendahnya nilai pH air tergantung pada beberapa faktor yaitu konsentrasi gas-gas dalam air misalnya CO_2 , konsentrasi garam-garam karbonat dan bikarbonat, serta proses dekomposisi bahan organik di dasar perairan (Tarigan, 2019).

b. *Biochemical Oxygen Demand (BOD)*

Menurut Umaly dan Curvin (1988) dalam Tarigan (2019), *Biochemical Oxygen Demand (BOD)* adalah suatu karakteristik yang menunjukkan jumlah oksigen terlarut yang diperlukan oleh mikroorganisme (biasanya bakteri) untuk mengurai atau

mendekomposisi bahan organik dalam kondisi aerobik. Mays (1996) dalam Tarigan (2019) mendefinisikan BOD sebagai suatu ukuran jumlah oksigen yang digunakan oleh populasi mikroba yang terkandung dalam perairan sebagai respon terhadap masuknya bahan organik yang dapat diuraikan. BOD dapat juga diartikan sebagai gambaran jumlah bahan organik mudah urai (*biodegradable organics*) yang ada di perairan.

Adanya bahan organik yang tinggi, yang ditunjukkan dari nilai BOD dan COD menyebabkan mikroba menjadi aktif dan menguraikan bahan organik tersebut secara biologis menjadi senyawa asam-asam organik. Penguraian ini terjadi di sepanjang saluran secara aerob dan anaerob. Menghasilkan gas CH_4 , NH_3 dan H_2S yang berbau busuk. Uji terhadap BOD ini tidak dapat digunakan untuk mengukur jumlah bahan-bahan organik yang sebenarnya terdapat di dalam air, tetapi hanya mengukur secara relatif jumlah konsumsi oksigen yang digunakan untuk mengoksidasi bahan organik tersebut. Banyaknya oksigen yang dikonsumsi berbanding lurus dengan kandungan bahan-bahan organik di dalamnya. Pemeriksaan BOD didasarkan atas reaksi oksidasi zat organik dengan oksigen di dalam air, dan proses tersebut berlangsung karena adanya bakteri aerob (Tarigan, 2019).

c. *Chemical Oxygen Demand (COD)*

Chemical Oxygen Demand (COD) atau kebutuhan oksigen kimia (KOK) merupakan jumlah oksigen yang diperlukan untuk mengurai seluruh bahan organik yang terkandung dalam air untuk mengoksidasi zat-zat organik menjadi CO_2 dan H_2O . Beberapa bahan organik tertentu yang terdapat pada air limbah kebal terhadap degradasi biologis dan ada beberapa diantaranya yang beracun meskipun pada konsentrasi yang rendah. Bahan yang tidak dapat didegradasi secara biologis tersebut akan didegradasi secara kimiawi melalui proses oksidasi, jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi tersebut dikenal dengan *Chemical Oxygen Demand (COD)*. Kadar COD dalam air limbah berkurang seiring dengan berkurangnya konsentrasi bahan organik yang terdapat dalam air limbah. Pada pengukuran COD hampir semua zat yaitu sekitar 85% dapat teroksidasi menjadi CO_2 dan H_2O dalam suasana asam, sedangkan penguraian secara biologi (BOD) tidak semua zat organik dapat diuraikan oleh bakteri (Tarigan, 2019).

Pada analisis COD ada dua oksidator kimia berbeda yang digunakan, yaitu kalium permanganat dan kalium dikromat. Standar Nasional Indonesia (SNI) menggunakan metode yang digunakan oleh US-EPA (*United States of Environmental Agency*) dengan metoda kalium dikromat. Oksidasi dengan kalium dikromat, akan menghasilkan oksidasi yang lebih lengkap, termasuk oksidasi

terhadap bermacam-macam senyawa anorganik, seperti terhadap senyawa NO_2^- , S_2^- , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, Fe^{2+} , dan SO_3^{2-} . Nilai COD yang terukur memberikan gambaran mengenai kandungan total senyawa organik, karena umumnya senyawa anorganik tidaklah terlalu signifikan dalam air limbah. Jika senyawa anorganik bernilai cukup berarti dalam air limbah, maka nilai COD tersebut bukan hanya menggambarkan senyawa organik saja, tapi termasuk juga senyawa anorganik (Nurmayanti & Purwoko, 2017).

Lindi dari suatu TPA yang berusia muda akan memiliki konsentrasi organik (sebagai COD) di atas 10.000 mg/L, sedangkan pada TPA yang usianya di atas 10 tahun biasanya COD di bawah 3.000 mg/L. Nilai COD juga dipengaruhi oleh tingkat ketersediaan oksigen, dalam kondisi anaerob (tanpa oksigen) kemungkinan nilainya akan lebih tinggi dibanding dalam kondisi aerob (Purwanta & Susanto, 2017).

Sumur warga di sekitar TPA yang terletak searah dengan aliran air tanah memiliki konsentrasi BOD dan COD yang tinggi, sehingga terindikasi adanya pengaruh air lindi dari TPA terhadap air sumur di sekitarnya. Nilai BOD dan COD yang tinggi menyebabkan DO (oksigen terlarut) yang ada di air sumur warga rendah. Nilai DO rendah menunjukkan adanya bahan pencemar organik dalam jumlah banyak masuk ke dalam akifer bebas sehingga air sumur tercemar. Dampak negatif berupa menurunnya kandungan oksigen terlarut

disebabkan oleh adanya mikroba yang mengkonsumsi oksigen untuk menguraikan bahan pencemar organik yang masuk ke perairan terutama air permukaan. Selain bisa memberikan dampak ke air permukaan, bahan organik tinggi juga dapat mengancam kualitas air bawah permukaan. Jika tidak dilakukan penanganan, air lindi akan menyebabkan organisme air mati karena kebutuhan oksigen yang ada tidak mencukupi (Widiarti & Muryani, 2018).

d. *Total Suspended Solid (TSS)*

Padatan tersuspensi total atau *total suspended solid (TSS)* merupakan residu dari padatan total yang tertahan oleh saringan dengan ukuran partikel maksimal 2 μm atau lebih besar dari ukuran partikel koloid. TSS menyebabkan kekeruhan pada air akibat padatan tidak terlarut dan tidak dapat langsung mengendap. TSS terdiri dari partikel-partikel yang ukuran maupun beratnya lebih kecil dari sedimen, misalnya tanah liat, bahan-bahan organik tertentu, sel-sel mikroorganisme, dan sebagainya. TSS terdiri dari lumpur, tanah liat, logam oksida, sulfida, ganggang, bakteri dan jamur. Kadar TSS umumnya dihilangkan dengan flokulasi dan penyaringan. Parameter ini memberikan kontribusi untuk kekeruhan (*turbidity*) dengan membatasi penetrasi cahaya untuk fotosintesis dan visibilitas di perairan sehingga nilai kekeruhan tidak dapat dikonversi ke nilai TSS. Kekeruhan adalah kecenderungan ukuran

sampel untuk menyebarkan cahaya, sementara hamburan diproduksi oleh adanya partikel tersuspensi dalam sampel (Tarigan, 2019).

e. N-Total

Nitrogen adalah nutrisi penting dalam sistem biologis makhluk hidup. Amonia (NH_3), nitrit (NO_2^-) dan nitrat (NO_3^-) merupakan senyawa-senyawa yang mengandung unsur nitrogen (N). Proporsi nitrogen berupa nitrogen organik dan nitrogen amonia dalam air limbah, tergantung degradasi bahan organik yang berlangsung. Senyawa nitrogen organik dapat ditransformasi menjadi nitrogen amonium dan dioksidasi menjadi nitrogen nitrit dan nitrat dalam sistem biologis makhluk hidup. Unsur N sebagai salah satu unsur makro yang penting dibutuhkan untuk pertumbuhan suatu organisme (Angrianto et al., 2021).

Nitrogen terdapat dalam keadaan terlarut dan juga ditemukan sebagai bahan tersuspensi dalam air. Senyawa-senyawa ini memegang peranan sangat penting dalam perairan melalui reaksi-reaksi biologi perairan. Sebagian besar dari nitrogen total dalam air terikat sebagai nitrogen organik, yaitu dalam bahan-bahan yang berprotein, juga berbentuk bahan pencemar dalam bentuk senyawa/ion-ion lainnya. Nitrogen perairan merupakan penyebab utama pertumbuhan yang sangat cepat dari ganggang yang menyebabkan eutrofikasi (Nurmayanti & Purwoko, 2017).

Unsur nitrogen merupakan bagian yang penting untuk keperluan pertumbuhan protista dan tanaman karena nitrogen dikenal sebagai unsur hara atau makanan dan perangsang pertumbuhan. Nitrogen dalam limbah cair terutama merupakan gabungan dari bahan-bahan berprotein dan urea yang dapat diuraikan secara cepat kemudian diubah menjadi ammonia oleh bakteri, sehingga umur dari air buangan secara relatif dapat ditunjukkan dari jumlah ammonia yang ada (Mahyuddin et al., 2023).

f. Merkuri (Hg)

Merkuri (Hg) adalah logam berat berbentuk cair, berwarna putih perak serta mudah menguap pada suhu ruangan. Merkuri akan memadat pada tekanan 7.640 Atm. Merkuri dapat larut dalam asam sulfat atau asam nitrit, tetapi tahan terhadap basa. Berbagai produk yang mengandung merkuri di antaranya yaitu bola lampu, penambal gigi, dan thermometer. Merkuri digunakan dalam kegiatan penambangan emas, produksi gas klor dan soda kaustik, serta dalam industry pulp, kertas, dan baterai. Merkuri organik dapat berasal dari air hujan atau aliran sungai dan bersifat stabil pada pH rendah. Tersebar nya logam berat merkuri di tanah, perairan, ataupun udara bisa melalui berbagai jalur seperti pembuangan limbah industri secara langsung, baik limbah padat maupun limbah cair yang dibuang ke tanah, udara, dan air (Widowati et al., 2008).

Menurut Suhendrayatna dalam Kusumaningrum (2023), merkuri adalah salah satu logam berat yang memiliki efek toksik yang signifikan pada tubuh manusia dan lingkungan. Keracunan merkuri dapat terjadi melalui paparan langsung atau melalui konsumsi makanan yang terkontaminasi merkuri. Efek toksik merkuri terutama mengenai sistem saraf pusat, pencernaan, dan ginjal. Pada sistem saraf pusat, merkuri dapat menyebabkan gejala seperti gangguan koordinasi motorik, gangguan penglihatan, gangguan pendengaran, tremor, dan gangguan perilaku. Pada sistem pencernaan, paparan merkuri dapat menyebabkan mual, muntah, diare, dan gangguan saluran cerna. Beberapa sumber paparan merkuri termasuk konsumsi ikan tertentu yang terkontaminasi merkuri, penggunaan produk yang mengandung merkuri seperti termometer raksa, serta aktivitas industri tertentu yang mengeluarkan merkuri ke lingkungan.

g. Kadmium (Cd)

Kadmium (Cd) adalah logam berwarna putih perak, lunak, mengkilap, tidak larut dalam basa, mudah bereaksi, serta menghasilkan kadmium oksida jika dipanaskan. Kadmium umumnya terdapat dalam kombinasi klor dan belerang. Sumber pencemaran dan paparan kadmium berasal dari polusi udara, keramik berglazur, rokok, air sumur, makanan yang tumbuh di daerah pertanian yang tercemar kadmium, fungisida, pupuk, serta cat. Senyawa kadmium

digunakan dalam industri baterai dan dapat dimanfaatkan sebagai zat warna (Widowati et al., 2008).

Menurut Sudarmaji dalam Kusumaningrum (2023), kadmium adalah bahan beracun yang dapat mencemari lingkungan, terutama jika bahan-bahan yang mengandung kadmium seperti plastik bekas, baterai, dan sisa cat tidak dikelola dengan baik dan dibuang ke tempat pembuangan akhir seperti TPA tanpa pengolahan yang memadai. Kadmium memiliki sifat toksik dan berpotensi menyebabkan kerusakan pada organ dan sistem dalam tubuh manusia jika terpapar dalam jumlah yang cukup besar. Beberapa efek negatif kesehatan akibat paparan kadmium antara lain, gangguan pencernaan, gangguan otak dan saraf, gangguan ginjal, gangguan pada hati, gangguan pada sistem kardiovaskular, gangguan pada paru-paru, pengaruh terhadap pertumbuhan dan reproduksi.

3. Baku Mutu Lindi

Baku mutu lindi adalah ukuran batas atau kadar unsur pencemar dan/atau jumlah unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya dalam lindi yang akan dibuang atau dilepas ke dalam sumber air dari kegiatan TPA, diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah.

Tabel 2. 1 Baku Mutu Lindi

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

Sumber: PermenLHK No. 59 Tahun 2016

C. Dampak Air Lindi

1. Penurunan Kualitas Lingkungan

Keberadaan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) dapat memberikan dampak negatif bagi lingkungan berupa pencemaran air, udara dan tanah. Pencemaran tanah terjadi karena rembesan dan perkolasi sampah ke dalam tanah. Tumpukan sampah yang tidak teratur dapat menyebabkan bahan kimia berbahaya dan zat-zat toksik yang terkandung dalam sampah meresap ke dalam tanah. Hal ini mengakibatkan pencemaran tanah yang berdampak negatif terhadap kesuburan tanah dan kemampuan tanah dalam mendukung pertumbuhan tumbuhan. Rembesan dari tumpukan sampah dapat mencemari sumber air tanah di sekitar TPA. Zat-zat berbahaya yang terlarut dalam air dapat mencemari kualitas air tanah dan dapat mengurangi ketersediaan air yang aman serta berkualitas untuk keperluan domestik dan pertanian. Pencemaran air tanah ini berpotensi menyebabkan masalah kesehatan bagi masyarakat yang menggunakan air tersebut.

Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) juga dapat menghasilkan gas berbahaya seperti metana. Metana adalah gas rumah kaca yang sangat berpotensi menyebabkan perubahan iklim. Gas metana dilepaskan ke atmosfer pada saat sampah terdekomposisi di dalam tumpukan. Peningkatan emisi metana dapat memberikan kontribusi terhadap pemanasan global dan perubahan iklim yang lebih lanjut. Dalam jangka panjang, dampak pencemaran lingkungan dari TPA dapat mengganggu ekosistem dan mengancam kehidupan makhluk hidup di sekitarnya. Pencemaran tanah dan air tanah dapat merusak keanekaragaman hayati, mengganggu siklus nutrisi, dan mengancam kehidupan organisme di ekosistem tersebut (Hafizah, 2023).

Oktapiani et al (2025) pada penelitiannya menjelaskan air lindi Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Ciangir pada akhirnya mengalir ke Sungai Cipajaran melalui parit-parit kecil yang menyebabkan pencemaran, terutama pada lahan pertanian padi dan kolam ikan masyarakat yang berada di sekitar area Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Air lindi yang ikut mengalir bersama air sungai mempengaruhi hasil pertanian padi warga, baik dari segi kualitas maupun kuantitas produksinya. Beberapa warga mengeluhkan lahan pertanian padi mengalami penurunan hasil panen akibat tercemarnya saluran irigasi oleh air lindi. Hal tersebut terjadi karena tidak tersedia sumber air bersih alternatif. Kondisi lahan pertanian padi yang cukup baik dapat menghasilkan sekitar 40 kg padi, namun pada saat kondisi lahan buruk

hasilnya bisa turun menjadi 10 kg atau bahkan gagal panen karena kualitas padi sangat rendah.

2. Risiko Kesehatan Masyarakat

Dari dampak yang dihasilkan banyak gangguan yang dirasakan oleh warga yang berada di sekitar lokasi TPA. Kebanyakan masyarakat merasakan penyakit seperti demam, diare, penyakit kulit (dermatitis), dan Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA). Air yang digunakan oleh beberapa warga mempunyai bau dan berwarna kuning kecoklatan (keruh) sehingga dapat menimbulkan penyakit gatal-gatal dan diare jika digunakan. Penyakit tersebut berhubungan dengan kualitas lingkungan (air dan udara), kondisi atau kualitas lingkungan ada keterkaitannya dengan keberadaan TPA telah mempengaruhi kesehatan masyarakat kawasan sekitar (Busanto & Rahmadyanti, 2021).

a. Diare

Diare merupakan salah satu penyakit menular, penyakit ini diartikan sebagai buang air besar dengan feses cair atau semi padat dan feses lebih banyak dari biasanya. Virus *Rotavirus*, bakteri *Escherichia coli*, *Shigella spp.*, dan parasit *Entamoeba histolytica* merupakan penyebab utama diare. Diare dapat disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk kurangnya akses terhadap air bersih, air yang terkontaminasi tinja, penyiapan dan penyimpanan makanan yang tidak sesuai, fasilitas sanitasi yang tidak memadai, serta pembuangan tinja yang tidak bersih. Air lindi dari TPA masuk ke

dalam air sungai yang digunakan masyarakat terkandung berbagai macam bakteri yang berasal dari sampah di TPA seperti pampers bayi dan sisa makanan yang membusuk. Masyarakat juga mengeluhkan adanya keberadaan lalat yang banyak, sedangkan lalat merupakan vektor penyakit yang berperan dalam penularan penyakit diare (Melisa et al., 2024).

b. Dermatitis

Penyakit kulit bisa menyerang orang dewasa ataupun anak-anak yang diakibatkan oleh agent penyakit seperti jamur, virus, dan parasit. Kulit gatal dan merah merupakan respon kulit akibat dari kulit yang berinteraksi dengan zat kimia bersifat toksik dan alergik yang berkontak langsung ke kulit dan merupakan salah satu gejala dermatitis. Bahan-bahan kimia ini dapat berasal dari air sungai yang digunakan masyarakat sehari-hari dan kemungkinan besar tercemar oleh air lindi. Air lindi yang mengalir ke sungai kemungkinan besar dapat mempengaruhi kualitas sumber air di sekitar TPA karena sifat fisika dan kimia air lindi dapat mempengaruhi kandungan air sungai dan air tanah di sekitarnya. Penyakit kulit juga dapat disebabkan oleh tingkat sosial ekonomi yang rendah, kebersihan pribadi yang buruk, lingkungannya yang kotor, dan perbuatan yang tidak sehat (Melisa et al., 2024).

D. Pengolahan Air Lindi

Kurniawan (2023), membagi proses pengolahan limbah menjadi empat bagian yaitu pengolahan primer, sekunder, tersier, dan lanjutan melalui beberapa rangkaian pengolahan limbah air yang terdiri dari pengolahan secara fisika, kimia, dan biologi.

1. Pengolahan Secara Fisika

a. Pengendapan

Pengendapan adalah proses pemisahan partikel padat dari air limbah melalui penggunaan gravitasi untuk memisahkan partikel yang lebih berat yang mengendap di dasar tangki atau wadah. Metode ini digunakan untuk menghilangkan partikel padat seperti lumpur, pasir, dan bahan-bahan padat lainnya yang terlarut dan tersuspensi dalam air limbah. Proses pengendapan dipengaruhi oleh ukuran partikel dan kecepatan aliran. Partikel yang lebih besar cenderung lebih mudah mengendap daripada partikel kecil dan kecepatan aliran air limbah yang lambat memungkinkan partikel padat memiliki waktu yang cukup lama untuk mengendap (Kurniawan, 2023).

b. Flotasi

Flotasi adalah pemisahan partikel padat dari air limbah dengan menggunakan gelembung gas untuk membuat partikel-partikel tersebut terapung dan terpisah dari air. Metode ini memanfaatkan prinsip bahwa partikel padat yang terapung memiliki densitas yang lebih rendah daripada air. Proses flotasi udara terlarut

melibatkan pengenalan udara terlarut atau gas lainnya ke dalam air limbah untuk membentuk gelembung-gelembung kecil, kemudian gelembung tersebut melekat pada partikel padat dan membuatnya terapung ke permukaan air limbah. Flotasi biasanya digunakan dalam pengolahan air limbah untuk menghilangkan partikel padat, minyak, lemak, dan bahan-bahan organik lainnya (Kurniawan, 2023).

c. Penyaringan (Filtrasi)

Penyaringan atau filtrasi adalah proses pemisahan partikel-partikel padat berukuran besar dari air limbah melalui penggunaan filtrasi dengan ukuran lubang yang sesuai. Metode ini digunakan untuk menghilangkan partikel-partikel besar seperti kotoran, sampah, serpihan makanan, dan benda-benda padat lainnya dari air limbah. Prinsip utama filtrasi yaitu melewatkan air limbah melalui penyaring dengan ukuran lubang yang lebih kecil daripada partikel yang ingin disaring. Terdapat beberapa jenis filtrasi diantaranya filtrasi kasar (10-25 mm), filtrasi halus (0,2-2 mm), filtrasi ayakan bergerak, dan filtrasi drum. Proses filtrasi dibagi menjadi penyaringan statis dan penyaringan dinamis. Pada proses penyaringan statis, air limbah dialirkan melalui filtrasi yang ditempatkan secara horizontal atau vertikal dengan ukuran yang sesuai. Pada proses penyaringan dinamis, filtrasi bergerak atau

berputar secara terus-menerus untuk memisahkan partikel padat dari air limbah (Kurniawan, 2023).

2. Pengolahan Secara Biologi

a. Secara Aerobik

Pengolahan aerobik adalah proses pengolahan limbah yang melibatkan penggunaan mikroorganisme yang membutuhkan oksigen untuk menguraikan kontaminan organik dalam air limbah. Mikroorganisme ini memecah zat-zat organik menjadi senyawa yang lebih sederhana seperti karbon dioksida dan air. Prinsip utama pengolahan aerobik adalah penggunaan oksigen sebagai agen oksidasi untuk menguraikan bahan organik. Mikroorganisme aerobik memperoleh energi dari oksidasi bahan organik dan menggunakan nutrisi lainnya untuk pertumbuhan dan reproduksi mereka. Prinsip pengolahan aerobik melibatkan pengendalian faktor-faktor lingkungan seperti suhu, pH dan konsentrasi oksigen terlarut. Beberapa metode pengolahan biologi secara aerobik meliputi proses lumpur aktif tersuspensi (*activated sludge process*), filtrasi lumpur aktif (*trickling filter*), dan proses nitrifikasi-denitrifikasi, fitoremediasi (Kurniawan, 2023).

b. Secara Anaerobik

Pengolahan anaerobik adalah proses penguraian bahan organik dalam air limbah oleh mikroorganisme tanpa adanya oksigen sebagai agen oksidasi utama. Proses ini terjadi dalam

kondisi anaerob dan dalam prosesnya mikroorganisme mengubah bahan organik menjadi gas metana (CH_4) serta karbon dioksida (CO_2) melalui serangkaian reaksi biokimia. Pengolahan anaerobik membutuhkan kondisi lingkungan yang bebas oksigen, baik dengan menghilangkan oksigen yang ada atau dengan mencegah masuknya oksigen ke dalam sistem. Faktor-faktor seperti suhu, pH dan waktu tinggal diatur untuk mendukung pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme. Metode pengolahan anaerobik meliputi reaktor biogas, sistem filter anaerobik, dan pengolahan aerobik terpadu (Kurniawan, 2023).

3. Pengolahan Secara Kimia

a. Koagulasi

Koagulasi adalah proses penggumpalan partikel-partikel terlarut dan tersuspensi dalam air melalui penambahan koagulan ke dalam air. Metode ini bertujuan untuk menggabungkan partikel-partikel kecil menjadi flok yang lebih besar agar mudah diendapkan atau dihilangkan dari air. Prinsip utama koagulasi yaitu dengan penambahan zat kimia tertentu ke dalam air yang menyebabkan partikel-partikel terlarut dan tersuspensi saling berinteraksi dan membentuk flok. Flok yang terbentuk dapat dengan mudah diendapkan atau dihilangkan dari air melalui proses pengendapan atau filtrasi. Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi koagulasi yaitu dosis koagulan, pH air limbah, dan waktu kontak. Dosis bahan

kimia yang tepat sangat penting karena dosis yang terlalu rendah dapat mengurangi efisiensi penggumpalan, sedangkan dosis terlalu tinggi dapat menyebabkan pemborosan bahan kimia. Beberapa koagulan bekerja lebih baik pada pH tertentu, sehingga perlu melakukan penyesuaian pH jika diperlukan. Waktu kontak koagulasi yang cukup juga diperlukan agar bahan kimia memiliki waktu yang cukup untuk bereaksi dengan partikel-partikel kecil dan membentuk flok yang lebih besar (Kurniawan, 2023).

Menurut Rosariawari & Mirwan (2013) kecepatan putaran, waktu pengadukan, dan suhu merupakan faktor yang mempengaruhi proses koagulasi. Kecepatan putaran berperan dalam mendistribusikan koagulan secara merata ke dalam air serta membantu proses destabilisasi partikel koloid. Perbedaan kecepatan aliran yang ditimbulkan oleh pengadukan menyebabkan partikel bergerak dengan kecepatan yang berbeda, sehingga terjadi tumbukan antar partikel yang memungkinkan partikel dan presipitat bergabung membentuk flok berukuran lebih besar. Pada tahap koagulasi, pengadukan cepat (*rapid mixing*) diperlukan untuk mempercepat distribusi koagulan dan proses netralisasi muatan partikel. Kecepatan putaran yang terlalu rendah dapat menyebabkan koagulan tidak tersebar secara optimal, sedangkan kecepatan yang terlalu tinggi berpotensi menimbulkan gaya geser berlebih yang dapat mengganggu pembentukan mikroflok.

Suhu yang rendah memberikan efek yang merugikan terhadap efisiensi semua proses pengolahan dan waktu kontak dalam fasilitas koagulasi-flokulasi sebaiknya diatur. Pada suhu yang rendah membutuhkan waktu kontak semakin lama karena mempengaruhi pembentukan flok-flok supaya cepat mengendap di bak pengendap karena pada suhu rendah, viskositas air meningkat dan reaksi hidrolisis koagulan melambat, sehingga tumbukan antar partikel berkurang dan pembentukan flok menjadi lebih kecil dan rapuh. Pada suhu yang lebih tinggi, proses hidrolisis berlangsung lebih cepat, flok yang terbentuk lebih padat dan mudah mengendap. Penurunan suhu dari 20°C sampai 5°C dapat menurunkan efisiensi koagulasi hingga 20%. Hal ini mengindikasikan bahwa suhu berpengaruh langsung terhadap laju reaksi kimia, viskositas air, serta kualitas flok yang terbentuk (Metcalf & Eddy, 2015).

Menurut Kurniawan (2023), beberapa koagulan yang umum digunakan untuk pengolahan limbah di antaranya *aluminium sulfat* (tawas), *ferric chloride*, dan *poly aluminium chloride* (PAC).

1) *Aluminium Sulfate* (Tawas)

Aluminium sulfat merupakan koagulan yang paling banyak digunakan secara global. Mekanisme utama alum adalah pembentukan $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang berfungsi sebagai media *sweep floc*. Koagulan ini bekerja efektif pada rentang pH 5,5 – 7,8 dan memerlukan alkalinitas yang cukup untuk menetralkan ion sulfat

yang dilepaskan. Kelebihan alum adalah ketersediaannya luas dan relatif murah, sedangkan kekurangannya adalah menghasilkan lumpur dalam jumlah besar serta menurunkan pH air limbah (Engelhardt, 2010).

2) *Poly Aluminium Chloride* (PAC)

Poly Aluminium Chloride (PAC) merupakan koagulan berbasis aluminium yang telah dihidrolisis sebagian sehingga lebih stabil terhadap perubahan pH maupun temperatur. PAC mampu menghasilkan flok lebih cepat dengan dosis lebih rendah dibandingkan alum. Koagulan ini efektif pada rentang pH 5 – 8 dan banyak digunakan dalam pengolahan limbah dengan kandungan bahan organik alami dan warna tinggi, termasuk pada lindi TPA (Anes, 2019). Adapun menurut Salsabila et al., (2018), beberapa keunggulan koagulan *Poly Aluminium Chloride* (PAC) diantaranya memiliki kemampuan koagulasi yang kuat, dapat bekerja efektif pada rentang pH 6-9, biayanya murah dan cara pengoperasiannya mudah tetapi sedikit berpengaruh terhadap pH.

Koagulan berbasis aluminium banyak digunakan dalam pengolahan air limbah dan air lindi karena memiliki efektivitas tinggi dalam menurunkan kadar pencemar. *Poly Aluminium Sulfate* (PAS) dan *Poly Aluminium Chloride* (PAC) mempunyai ukuran partikel besar serta muatan positif tinggi yang mampu

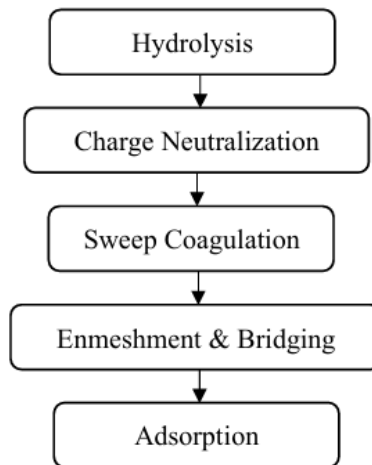
menarik partikel tersuspensi dan bahan organik dengan efisien. Keunggulan utama koagulan berbasis alum terletak pada kemampuannya bekerja efektif dengan dosis yang relatif rendah, pembentukan flok yang cepat dan padat, serta produksi lumpur yang lebih sedikit dibandingkan koagulan lainnya. *Poly Aluminium Chloride* (PAC) dikenal mampu menghilangkan senyawa organik kompleks seperti asam humat pada air lindi. Kekurangan koagulan berbasis aluminium yaitu potensi meningkatnya kadar residu aluminium pada air hasil olahan (Sossou et al., 2024).

Proses koagulasi pada air lindi TPA menggunakan koagulan PAC terjadi melalui mekanisme destabilisasi koloid. Ketika PAC ditambahkan ke dalam air lindi, ion aluminiumnya (Al^{3+}) akan bereaksi dengan partikel-partikel tersuspensi dan koloid (seperti zat organik, logam berat, dan padatan tersuspensi) yang bermuatan negatif. Reaksi ini menetralkan muatan partikel, kemudian partikel-partikel kecil tersebut kehilangan gaya tolak-menolaknya sehingga menggumpal menjadi flok yang lebih besar dan berat. Flok-flok yang terbentuk ini kemudian akan mengendap di dasar wadah karena gaya gravitasi, sehingga dapat dipisahkan dari air lindi. Proses koagulasi dengan PAC efektif menurunkan kekeruhan, *Chemical Oxygen Demand* (COD),

Biological Oxygen Demand (BOD), dan *Total Suspended Solid (TSS)* dalam air lindi (Purnomo et al., 2018).

PAC memiliki struktur yang baik dengan kepadatan muatan tinggi serta kondisi optimumnya tidak terbatas. Aplikasi dosis yang rendah menunjukkan aktivitas koagulan yang sangat baik. Endapan Al(OH)₃ yang bermuatan positif membantu menarik dan mengikat zat humat sehingga mempercepat proses pembentukan flok (Mohd-Salleh et al., 2018).

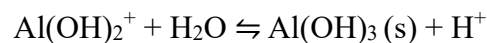
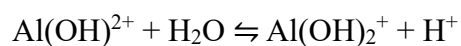
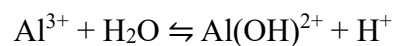
Koagulan berperan untuk mendestabilisasi dan menggumpalkan partikel-partikel halus yang tersuspensi di dalam air. Mekanisme destabilisasi dan penggumpalan partikel tersebut melibatkan beberapa tahapan kimia dan fisika yang saling berkaitan. Secara umum mekanisme koagulasi-flokulasi dapat dirangkum menjadi lima proses utama, yaitu netralisasi muatan (*charge neutralization*), koagulasi penyapuan (*sweep coagulation*), penjebakan dan pembentukan jembatan antar partikel (*enmeshment and bridging*), adsorpsi (*adsorption*), serta hidrolisis (*hydrolysis*). Kombinasi dari kelima mekanisme tersebut menyebabkan partikel menjadi tidak stabil dan bergabung membentuk flok, sehingga mempermudah proses pemisahan dari fase cair melalui tahapan seperti sedimentasi, flotasi, maupun filtrasi (Sossou et al., 2024).



Gambar 2. 1 Mekanisme Koagulasi-Flokulasi

a) Hidrolisis (*Hydrolysis*)

Hidrolisis adalah reaksi kimia yang melibatkan pemutusan ikatan suatu senyawa dengan bantuan molekul air (H_2O), sehingga senyawa kompleks diuraikan menjadi komponen yang lebih sederhana. Pada saat *Poly Aluminium Chloride* (PAC) dilarutkan ke dalam air, ion aluminium (Al^{3+}) akan mengalami serangkaian reaksi hidrolisis yang menghasilkan berbagai spesies aluminium terhidrolisis. Reaksi hidrolisis tersebut dapat ditunjukkan sebagai berikut:



Proses hidrolisis ini menghasilkan spesies aktif seperti Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, dan $\text{Al}(\text{OH})_3$, yang

berperan penting dalam proses destabilisasi partikel selama koagulasi.

b) Netralisasi Muatan (*Charge Neutralization*)

Partikel koloid dalam air limbah, termasuk bahan organik penyumbang COD, umumnya memiliki muatan negatif pada permukaannya. Ion logam positif hasil hidrolisis PAC seperti Al^{3+} , $Al(OH)^{2+}$, dan $Al(OH)_2^+$ akan berinteraksi dengan partikel tersebut dan menetralkan muatannya. Mekanisme netralisasi muatan berlangsung melalui adsorpsi spesies koagulan bermuatan berlawanan pada permukaan partikel koloid, yang menyebabkan penurunan muatan permukaan efektif dan melemahnya gaya tolak-menolak antarpartikel. Kondisi ini mengakibatkan destabilisasi partikel sehingga memungkinkan terjadinya penggabungan partikel (Bratby, 2016).

c) Koagulasi Penyapuan (*Sweep Coagulation*)

Hasil hidrolisis Al^{3+} selanjutnya membentuk endapan aluminium hidroksida $Al(OH)_3$ yang bersifat amorf. Endapan ini berfungsi sebagai medium penyapu yang menangkap dan mengikat partikel koloid serta zat organik terlarut di sekitarnya. Partikel tersuspensi dan bahan organik yang terperangkap kemudian mengendap bersama flok

$\text{Al}(\text{OH})_3$, sehingga menurunkan kadar COD dan kekeruhan air.

d) Penjebakan & Pembentukan Jembatan (*Enmeshment and Bridging*)

Pada proses ini, flok-flok kecil mulai saling menempel membentuk flok besar melalui mekanisme jembatan antar partikel. Partikel halus terjebak (*enmeshed*) di dalam struktur flok besar yang terbentuk dari $\text{Al}(\text{OH})_3$. Mekanisme jembatan (*bridging*) juga terjadi akibat adsorpsi spesies koagulan pada antarmuka antara partikel dan larutan. Koagulan logam memiliki kecenderungan kuat untuk mengalami polimerisasi selama reaksi hidrolisis. Seiring meningkatnya tingkat hidrolisis, akan terbentuk spesies polinuklir dengan ukuran yang semakin besar. Ketika spesies koagulan polimerik ini teradsorpsi pada permukaan partikel, koagulan tersebut dapat membentuk jembatan yang menghubungkan partikel-partikel yang berdekatan, sehingga mendorong terjadinya destabilisasi dan penggabungan partikel. Hal tersebut mengakibatkan flok menjadi lebih padat, berat, dan stabil, sehingga lebih cepat mengendap (Bratby, 2016).

e) Adsorpsi (*Adsorption*)

Gugus hidroksil ($-OH$) yang terdapat pada permukaan $Al(OH)_3$ memiliki afinitas tinggi terhadap senyawa organik, seperti asam humat, fenol, dan senyawa penyumbang COD lainnya. Sisa bahan organik terlarut yang belum tersapu pada tahap sebelumnya kemudian teradsorpsi di permukaan flok $Al(OH)_3$ melalui ikatan hidrogen, gaya elektrostatik, atau gaya van der Waals, sehingga semakin menurunkan kadar COD dalam air lindi.

3) *Ferric Chloride*

Koagulan berbasis besi seperti $FeCl_3$ dan $Fe_2(SO_4)_3$, bekerja melalui pembentukan endapan $Fe(OH)_3$ yang mampu menjerat partikel tersuspensi. Rentang pH efektif lebih luas dibanding alum, yaitu 4 – 11 dengan efektivitas tinggi pada penghilangan warna dan fosfat. Kekurangan penggunaan *ferric chloride* sebagai koagulan dapat menyebabkan penurunan pH signifikan dan menimbulkan masalah korosi pada peralatan (Engelhardt, 2010).

Jenis koagulan berbasis besi memiliki kelebihan dalam menghasilkan flok yang lebih padat dan berat, sehingga meningkatkan efisiensi proses pengendapan. Koagulan berbasis besi efektif dalam menghilangkan warna, kekeruhan, serta logam berat dari air limbah. Penggunaan koagulan ini

mebutuhkan dosis yang cenderung lebih tinggi dibandingkan koagulan aluminium, serta menyebabkan pembentukan lumpur dalam jumlah besar dan peningkatan biaya pengolahan. Sisa besi dalam air olahan juga dapat menyebabkan perubahan warna atau noda kecokelatan, sehingga menurunkan kualitas estetika air hasil pengolahan (Sossou et al., 2024)

b. Flokulasi

Flokulasi adalah proses pembentukan flok atau gumpalan partikel-partikel kecil menjadi flok yang lebih besar melalui penggunaan bahan kimia yang disebut flokulan. Metode ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi penghilangan partikel tersuspensi dalam air dan memudahkan proses pengendapan atau filtrasi. Prinsip kerjanya sama seperti koagulasi namun pada proses flokulasi dilakukan dengan pengadukan yang lambat. Koagulan membantu menggumpalkan partikel-partikel kecil menjadi flok yang lebih besar, sedangkan flokulan membantu memperbaiki struktur flok dan meningkatkan kecepatan pengendapan atau filtrasi. Bahan kimia yang umum digunakan sebagai flokulan antara lain poliakrilamida (PAM) dan polielektrolit anionik atau kationik (Kurniawan, 2023).

c. Oksidasi

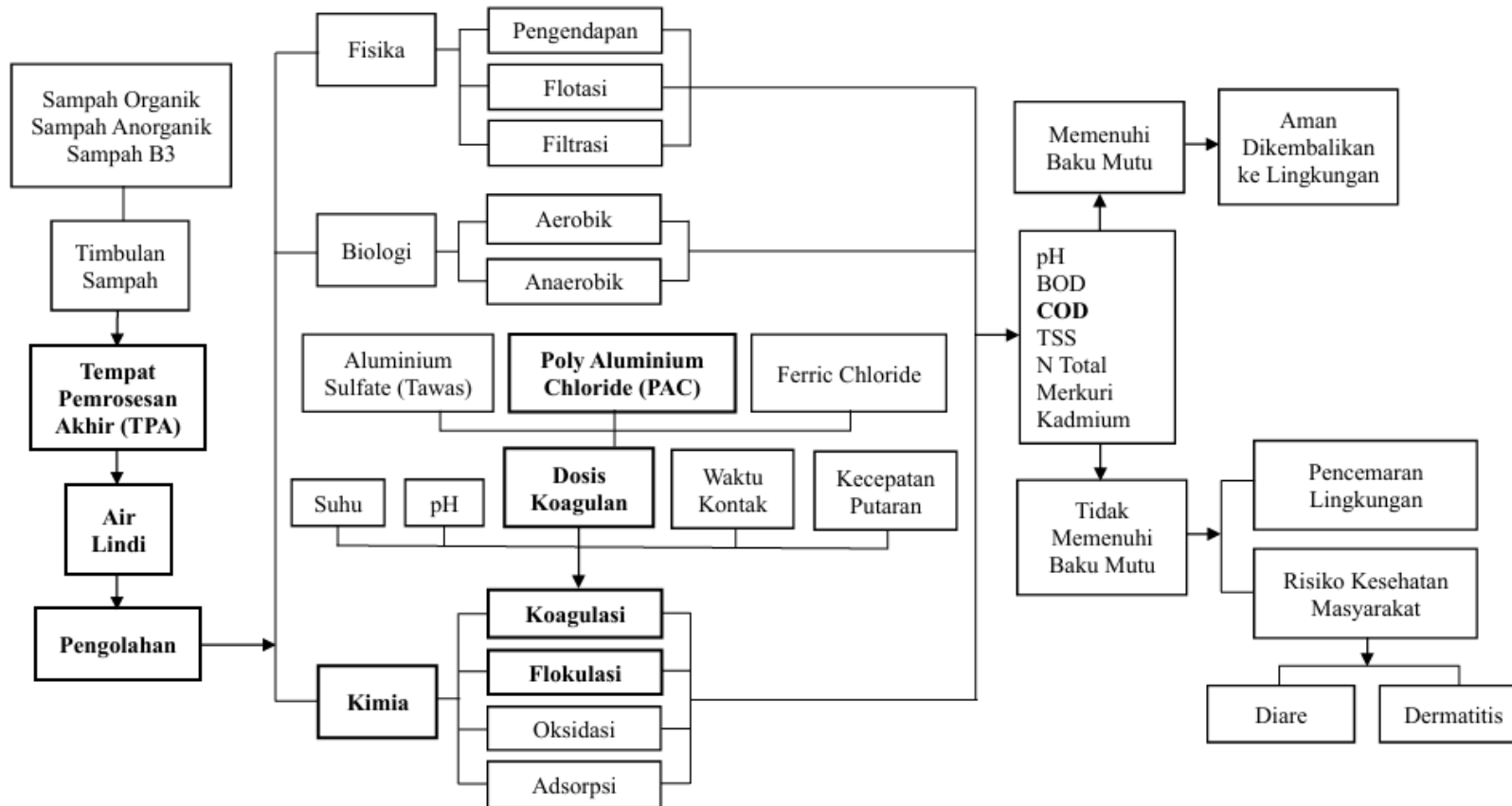
Oksidasi adalah reaksi kimia saat zat-zat teroksidasi mengalami peningkatan jumlah oksigen atau kehilangan elektron.

Dalam pengolahan air dan air limbah, oksidasi digunakan untuk mengubah kontaminan menjadi bentuk yang kurang berbahaya atau lebih mudah dihilangkan. Prinsip utama oksidasi yaitu reaksi kimia antara zat oksidator dan zat yang akan dioksidasi. Jenis-jenis zat oksidator diantaranya yaitu ozon (O_3), hidrogen peroksida (H_2O_2), dan klorin (Cl_2). Ozon (O_3) adalah oksidator yang kuat dan dapat mengoksidasi berbagai kontaminan seperti senyawa organik, bahan kimia berbahaya, serta zat-zat terlarut yang sulit dihilangkan. Hidrogen peroksida (H_2O_2) dapat digunakan untuk mengoksidasi senyawa organik dan menghilangkan bau yang tidak diinginkan. Klorin (Cl_2) merupakan oksidator yang sering digunakan dalam pengolahan air untuk menghilangkan kontaminan dan memastikan keamanan air minum karena klorin juga dapat mengoksidasi mikroorganisme patogen dan membunuhnya (Kurniawan, 2023).

d. Adsorpsi

Pengolahan menggunakan metode adsorpsi melibatkan penambahan adsorben ke dalam air limbah untuk menyerap kontaminan dalam bentuk partikel atau senyawa. Proses adsorpsi menggunakan media adsorben seperti arang aktif atau resin untuk menyerap senyawa-senyawa yang masih ada dalam air limbah (Kurniawan, 2023).

E. Kerangka Teori



Gambar 2. 2 Kerangka Teori Modifikasi Busanto & Rahmadyanti (2021), Ian Kurniwan (2023), Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 59 Tahun 2016, Rosariawari & Mirwan (2013), Rosariawari & Mirwan (2018), Sabneno et al. (2024)