

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Limbah

1. Pengertian Limbah

Limbah merupakan suatu zat atau benda yang timbul sebagai hasil dari aktivitas manusia yang sudah tidak digunakan lagi dan dibuang. Limbah adalah barang sisa dari suatu kegiatan yang sudah tidak bermanfaat atau bernilai ekonomi lagi (Tamod, 2022). Limbah pada dasarnya adalah bahan yang terbuang atau dibuang dari sumber hasil aktivitas. Limbah dianggap memiliki nilai ekonomi negatif karena penanganannya membutuhkan biaya yang cukup tinggi. Limbah berpotensi mencemari lingkungan yang dapat mengancam keberlangsungan makhluk hidup. Limbah dianggap mencemari lingkungan apabila keberadaannya masuk ke dalam lingkungan dan menyebabkan perubahan pada keseimbangan lingkungan yang bersifat merugikan atau tidak diinginkan (Rahmadi A, Sari N M, and Indriyani, 2021)

2. Jenis Limbah

Limbah memiliki beberapa klasifikasi yang dapat dikategorikan berdasarkan karakteristik, sifat kimia, dan sumber pencemar. Berdasarkan karakteristiknya limbah dapat digolongkan menjadi tiga, yaitu limbah cair, padat, dan gas (Suhartini dan Nurika, 2018).

a. Limbah Cair

Limbah cair merupakan limbah yang berbentuk cair, pada umumnya dihasilkan dari kegiatan atau usaha industri. Limbah cair dapat dibedakan menjadi limbah cair domestik dan limbah cair industri. Contoh limbah cair domestik adalah air buangan cucian, air buangan sabun, dan sisa makanan atau minuman yang berbentuk cair. Contoh limbah industri adalah air buangan pewarna pakaian dari industri tekstil, sisa pengawet cair, dan air buangan dari proses industri tahu (Suhartini & Nurika, 2018).

b. Limbah Padat

Limbah padat dapat didefinisikan sebagai sebagai suatu hasil limbah buangan yang umumnya berbentuk padatan atau lumpur, berupa hasil buangan kegiatan rumah tangga, industri, atau buangan siklus alam dekomposisi dan pertumbuhan tanaman. Contoh limbah padat dari kegiatan industri adalah kulit dan bonggol singkong dari industri tapioka, ampas tahu, dan limbah makanan dari kegiatan restoran atau kantin (Suhartini & Nurika, 2018).

c. Limbah Gas

Limbah gas adalah keberadaan zat pencemar di udara dalam konsentrasi dan periode waktu tertentu yang dapat menimbulkan kerusakan pada manusia, hewan, tumbuhan, dan makhluk hidup lainnya. Pada umumnya limbah gas berbentuk asap, partikulat, ataupun debu yang ada di udara yang akan terbawa angin dan dapat

memperluas jangkauan paparan. Limbah gas biasanya dihasilkan dari aktivitas industri, pertanian, dan emisi kendaraan bermotor (Suhartini & Nurika, 2018).

B. Industri Penyamakan Kulit

Industri penyamakan kulit adalah industri yang mengolah kulit mentah menjadi kulit tersamak atau *leather* yang kemudian diolah kembali menjadi barang jadi seperti jaket, sepatu, tas, dompet, ikat pinggang dan produk lainnya. Tujuan dilakukannya penyamakan yaitu untuk mengubah sifat-sifat kulit mentah yang mudah mengalami kerusakan menjadi kulit tersamak yang tahan terhadap aktivitas mikroorganisme dan pembusukan (Kuncoro & Soedjono, 2022).

1. Proses Penyamakan Kulit

Dalam wahyu Nugraha et al., (2018) industri penyamakan kulit terdapat tiga proses yaitu proses *beamhouse*, *tanning*, *posttanning*, dan *finishing*, ketiga proses tersebut menggunakan air sebagai media reaksi bahan kimia yang digunakan selama proses. Berikut penjelasan dari ketiga proses tersebut:

a. Proses Pengerjaan Basah (*Beamhouse*)

Beamhouse bertujuan untuk mempersiapkan kulit mentah menjadi kulit piket yang siap untuk disamak, menghilangkan bagian kulit yang tidak perlu, dan memperbesar pori kolagen sehingga bahan penyamak bisa masuk dan proses ini merupakan yang paling banyak menggunakan air. Dalam proses *Beamhouse* terdapat tahapan *soaking*,

fleshing, liming, splitting, deliming, bating, dan picking (wahyu Nugraha et al., 2018).

Soaking atau perendaman berfungsi untuk menghilangkan kotoran, protein terlarut dan menghilangkan kadar air yang hilang selama proses pengeringan sebelumnya, karena jika kulit dalam kondisi basah maka akan lebih mudah bereaksi dengan bahan penyamak kimia. Bahan kimia yang digunakan dalam tahap ini adalah air, *teepol*, dan soda abu. Limbah dari proses ini berupa disinfektan dan kotoran dari kulit (Amelia, 2022). *Fleshing* merupakan proses yang bertujuan untuk menghilangkan lapisan antara daging dan kulit serta sisa-sisa daging yang masih menempel di kulit. *Liming* atau penghilangan kapur merupakan proses untuk menghilangkan jaringan rambut dan epidermis pada kulit. Pada proses ini menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar dan menghasilkan senyawa toksik seperti hidrogen sulfida dan nilai pH mencapai 11-12,5. *Splitting* dilakukan dengan tujuan menipiskan jaringan kolagen kulit sebelum disamak. *Deliming* merupakan tahap yang bertujuan menghilangkan kapur yang terdapat pada kulit, menurunkan pH dan mengembalikan ukuran kulit. *Bating* bertujuan untuk mendegradasi protein non struktural pada kulit (wahyu Nugraha et al., 2018).

b. Penyamakan (*Tanning*)

Penyamakan adalah proses inti dalam penyamakan kulit karena pada proses ini zat penyamak dimasukkan ke dalam jaringan serat kulit

bertujuan untuk menstabilkan jaringan protein kulit sehingga kulit mengalami perubahan sifat fisik, mekanik, kimia, dan biologi (Kuncoro & Soedjono, 2022). Jenis penyamak yang digunakan akan mempengaruhi hasil akhir yang diperoleh. Proses penyamakan biasanya menggunakan bahan kimia seperti cromosal B dan formalin. Terdapat 3 jenis bahan penyamak yang dapat digunakan serta pengaruh penggunaannya. Bahan penyamak nabati dapat berasal dari kulit akasia, manggis, buah pinah, dan gambir. Penyamak nabati memberikan warna coklat muda atau kemerahan, bersifat sedikit kaku namun empuk dan kurang tahan terhadap panas. Bahan penyamak mineral berbentuk garam yang berasal senyawa yang mengandung logam seperti aluminium, zirkonium, dan kromium. Penyamakan dengan krom menghasilkan kulit yang lebih lembut, lentur, memiliki daya tarik tinggi, serta lebih tahan terhadap panas dan serangan bakteri. Bahan penyamak dari minyak berasal dari minyak ikan hiu atau minyak ikan lainnya (Amelia, 2022).

c. Pasca Samak (*Posttanning*)

Pada proses terdapat proses *retanning*, *dyeing*, dan *fatliquoring* yang memiliki fungsi yang berbeda. *Retanning* adalah proses penyamakan ulang yang bertujuan untuk menyempurnakan penyamakan pada kulit sehingga kulit yang dihasilkan lebih resisten terhadap kerusakan. *Dyeing* adalah proses pewarnaan dasar pada kulit samak, bahan yang digunakan adalah air, cat dasar, dan asam formiat. *Fatliquoring* adalah proses yang bertujuan untuk memberikan minyak

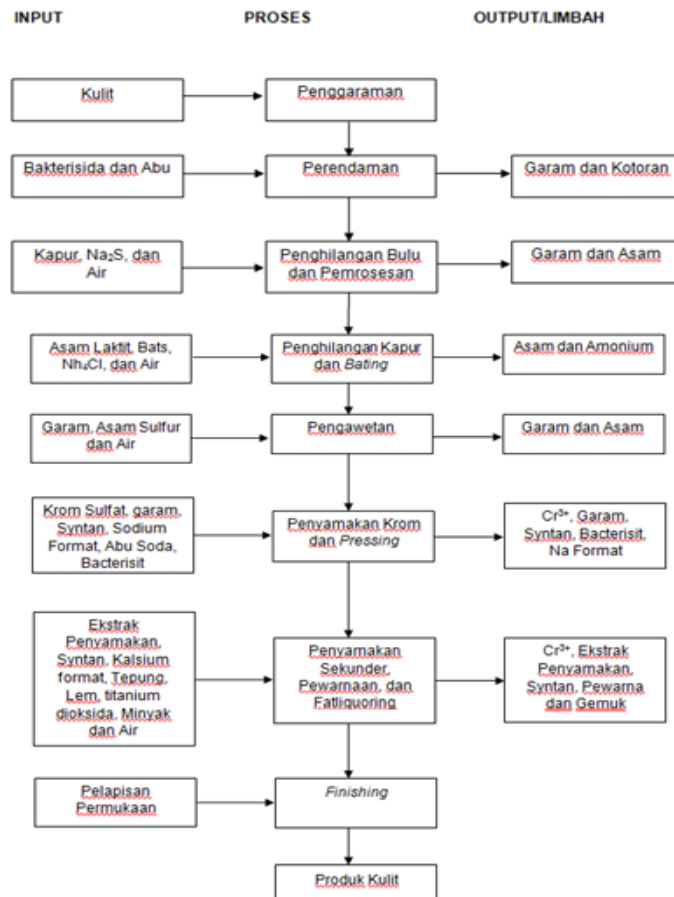
pada kulit sehingga kelembapan kulit terjaga dan memberikan efek lentur menggunakan bahan berupa air, minyak sulphonasi dan anti jamur (Amelia, 2022).

d. Penyelesaian Akhir (*Finishing*)

Pada tahap ini mencakup proses *stacking*, *toggling*, *embossing*, *buffing*, dan *spraying* yang bertujuan untuk meningkatkan penampilan, tekstur, dan ketahanan, memperbaiki permukaan kulit, mempercantik warna, memberikan efek mengkilap atau *doff*, dan melindungi kulit dari kerusakan. Tahap ini tetap menghasilkan limbah padat dan cair meskipun dalam jumlah yang kecil (Wahyu Nugraha et al., 2018).

2. Sumber dan Karakteristik Limbah Cair Penyamakan Kulit

Proses penyamakan kulit membutuhkan air yang banyak sebagai pelarut dan pembersih sehingga air yang dibuang sebagai limbah juga dalam jumlah yang banyak. Limbah cair dari proses penyamakan kulit mengandung bahan kimia, lemak, protein, dan bahan organik dari kulit dan daging sisa yang terbuang. Jenis-jenis polutan pada proses penyamakan kulit berasal dari tahapan proses yang berbeda, di mana setiap tahapan menghasilkan sumber dan jenis polutan yang beragam sebagaimana ditunjukkan pada gambar berikut (Rizky, 2017).



Gambar 2.1 *Input dan Output* Dari Proses Penyamakan Kulit

Limbah cair penyamakan kulit umumnya memiliki ciri-ciri seperti debit limbah buangan tidak teratur, warna biru kehijauan dari bahan pengawet krom, terkadang berbusa, mengandung sulfida, padatan tersuspensi, dan bahan organik yang tinggi, pH yang bervariasi, dan mudah busuk (Ansori, 2022). Karakteristik limbah cair dapat diketahui menurut sifat dan karakteristik kimia, fisika, dan biologis. Berikut penjelasan karakteristik limbah cair menurut Rizky (2017):

a. Sifat Fisik

1) *Total Suspended Solid (TSS)*

Total Suspended Solid merupakan total impurities yang tidak terlarut di dalam air, menyebabkan air keruh, merupakan mikroorganisme penyebab rasa dan bau. Jumlah kandungan padatan tersuspensi dalam limbah cair sangat bervariasi bergantung pada jenis industrinya.

2) Bau

Bau pada limbah cair umumnya disebabkan oleh gas sulfida dan amoniak hasil dekomposisi zat organik.

3) Temperatur

Umumnya temperatur air limbah lebih tinggi dari temperatur air bersih. Kenaikan temperatur menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut yang akan menimbulkan bau tidak sedap.

4) Warna

Air limbah yang masih segar umumnya berwarna abu-abu dan akan menjadi warna hitam jika terjadi penguraian senyawa organik oleh bakteri.

b. Sifat Kimia

1) *Biological Oxygen Demand (BOD)*

BOD adalah banyaknya oksigen yang diperlukan untuk menguraikan bahan organik oleh mikroorganisme.

2) *Chemical Oxygen Demand (COD)*

COD adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk menguraikan bahan organik secara kimiawi.

3) Oksigen Terlarut (*Demand Oxygen/DO*)

DO digunakan sebagai derajat pengotoran limbah yang ada. Keberadaan oksigen terlarut menunjukkan tanda-tanda kehidupan ikan dan biota dalam perairan. Semakin tinggi angka DO maka menunjukkan keadaan air yang semakin baik. Hal ini berlawanan dengan BOD dan COD.

4) Lemak dan Minyak

Kandungan lemak dan minyak yang terdapat dalam limbah bersumber dari industri yang mengolah bahan baku mengandung minyak, bersumber dari proses klasifikasi dan perebusan. Lemak dan minyak merupakan bahan organik yang bersifat tetap dan sukar diuraikan oleh bakteri.

c. Sifat Biologi

Umumnya parameter yang biasa digunakan adalah banyaknya mikroorganisme yang terkandung dalam air limbah berupa bakteri, virus, jamur, gangga, dan plankton.

3. Baku Mutu Limbah Cair Penyamakan Kulit

Berdasarkan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2022) baku mutu air limbah adalah ukuran batas suatu polutan atau komponen yang ditenggang keberadaannya dalam air limbah yang akan dibuang atau

dilepas ke dalam sumber air dari suatu usaha atau kegiatan. Tujuan dari pengolahan limbah salah satunya adalah untuk mencapai baku mutu yang telah ditentukan sehingga aman untuk dibuang ke lingkungan.

Limbah cair yang dihasilkan industri penyamakan kulit umumnya mengandung berbagai bahan pencemar, termasuk logam berat kromium. Untuk mencegah pencemaran lingkungan, pemerintah telah mengatur baku mutu limbah cair penyamakan kulit dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan nomor 21 tahun 2018 tentang baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan industri penyamakan kulit

Tabel 2.1 Baku Mutu Limbah Cair Penyamakan Kulit

Parameter	Kadar Maksimum
<i>Potential Hydrogen</i> (pH)	6-9 mg/L
<i>Biological Oxygen Demand</i> (BOD)	30 mg/L
<i>Chemical Oxygen Demand</i> (COD)	200 mg/L
Amonial sebagai Nitrogen (NH ₃ -N)	2 mg/L
Total Kjedal Nitrogen (TKN)	30 mg/L
Krom (Cr) Total	0,6 mg/L
Minyak dan Lemak	5 mg/L
Sulfida	0,8 mg/L
<i>Total Suspended Solid</i> (TSS)	60 mg/L
Volume air limbah	40 m ³ /ton bahan baku mutu

C. Kromium

Kromium adalah bahan kimia yang bersifat persisten, biokumulatif, dan toksik, sulit terurai, dan dapat diakumulasi di dalam tubuh manusia melalui rantai makanan. Kromium memiliki beberapa bilangan oksidasi yaitu +2, +3, dan +6 dan stabil pada bilangan oksidasi +3. Kromium terdapat di alam dengan berbagai bentuk oksida, yaitu Cr (0), Cr³⁺ atau trivalent yang secara alami terjadi di alam, dan Cr⁶⁺ atau heksavalen yang berasal dari proses industri.

Kromium heksavalen lebih toksik 1.000 kali lipat dibandingkan kromium trivalent yang tidak bersifat iritatif, dan tidak korosif (W. Widowati et al., 2008). Logam kromium menjadi salah satu jenis limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) yang dapat mencemari air dan berbahaya bagi kesehatan manusia serta mengganggu keseimbangan ekosistem perairan dan lingkungannya.

Dalam industri penyamakan kulit, garam kromium berfungsi sebagai campuran senyawa tertentu untuk menghaluskan kulit binatang yang disamak dan merupakan bahan penyamak kulit yang paling banyak digunakan pada industri ini sehingga limbah cair nya mengandung logam kromium baik kromium trivalent dan heksavalen. Kromium trivalent yang dibuang berpotensi teroksidasi menjadi kromium heksavalen yang berbahaya dalam kondisi tertentu seperti pH basa dan keberadaan oksidator kuat (Murti dan Sugihartono, 2020).

D. Potensi Pencemaran

1. Pencemaran Lingkungan

Kromium dapat memasuki perairan melalui dua jalur, yaitu secara alami dan tidak alami. Secara alami, kromium masuk ke perairan akibat proses fisik seperti erosi atau pelapukan batuan yang mengandung mineral. Partikel dan debu yang mengandung kromium di atmosfer dapat terbawa turun ke permukaan bumi melalui air hujan dan masuknya kromium secara tidak alamiah merupakan dampak dari aktivitas manusia, dapat berupa limbah industri atau rumah tangga (Amelia, 2022).

Limbah cair yang dihasilkan dari industri penyamakan kulit menjadi penyumbang pencemaran logam berat kromium di lingkungan. Pembuangan limbah tanpa pengolahan yang memadai dapat mencemari lingkungan. Keberadaan logam kromium di perairan menyebabkan penurunan kualitas air dan mengganggu organisme akuatik yang berdampak pada kematian organisme (Setiyono dan Gustaman, 2017) serta dapat menyebar pada tanah, air tanah, dan lingkungan biotik seperti tumbuhan dan hewan. Penurunan kualitas air sungai akibat pembuangan limbah dan sampah dapat mengancam ketersediaan air bersih serta berdampak negatif terhadap kesehatan ekosistem perairan yang pada akhirnya menurunkan kualitas lingkungan dan menimbulkan kerugian ekonomi bagi petani, menurunkan hasil panen, serta menyebabkan gagal panen (Nurfaiziya et al., 2023)

2. Pencemaran Pada Tumbuhan

Menurut H. Widowati et al., (2018) Logam kromium dapat menimbulkan beberapa efek stimulan terhadap tanaman. Toksisitas kromium dapat mempengaruhi panjang akar utama dan mamacu perubahan arsitektur akar secara keseluruhan. Efek gangguan kromium pada pertumbuhan akar dan efek toksiknya terhadap pembelahan sel berasal dari fiksasi Cr^{3+} oleh jaringan tanaman dan gangguan osmotis yang menimbulkan pembatasan pada pentrasportasian Ca^{2+} melalui membran plasma menuju sitoplasma.

Stres yang diakibatkan oleh kromium dapat menyebabkan terjadinya modifikasi metabolisme pada tanaman seperti perubahan fotosintesis, degradasi pigmen fotosintesis dan induksi tekanan oksidatif bahkan dapat menyebabkan penyempitan area daun dan perubahan biokimia yang dapat menghambat sintesis klorofil serta perubahan ultrastruktur kloroplas. Tekanan kromium juga dapat menyebabkan munculnya klorosis dan nekrosis daun, kerusakan oksidatif pada biomolekul seperti lipid dan protein, gangguan nutrisi mineral, peningkatan produksi *glutathione* dan asam askorbat, perubahan *metallic pool*, menurunnya pertumbuhan tanaman, dan menyebabkan kematian pada tanaman tersebut (H. Widowati et al., 2018).

Kromium dapat memengaruhi nutrisi mineral tanaman dengan cara berinteraksi dengan zat lain di dalam tanaman dan memberi pengaruh signifikan terhadap konsentrasi dan distribusi nutrisi di dalam tanaman, sekaligus memodifikasi morfologi dan sebagian proses fisiologisnya. Formasi senyawa kompleks kromium dengan asam organik dapat berperan penting dalam efek pengganggu dan stimulator yang ditimbulkan oleh kromium terhadap pertranslokasian nutrisi mineral yang berbeda-beda (H. Widowati et al., 2018).

3. Pencemaran Pada Manusia

Menurut Shin et al., (2023) efek paparan kromium terhadap manusia melalui 3 jalur utama yaitu kontak kulit, inhalasi, dan konsumsi. Kromium dapat menembus kulit terutama jika ada luka atau iritasi dan dapat

berinteraksi dengan sel-sel imun di kulit sehingga menimbulkan efek toksik. Paparan kromium juga dapat menyebabkan kulit menjadi sensitif dan memicu terjadinya dermatitis kontak melalui pembentukan ikatan antara kromium dengan protein tubuh (konjugat Cr-protein) serta menyebabkan iritasi kulit dapat berkembang menjadi luka atau ulkus. Paparan melalui inhalasi biasanya berasal dari udara yang mengandung kromium terhirup menembus sel epitel paru-paru dan dapat menumpuk di jaringan paru-paru sehingga mengalami proses reduksi yang menghasilkan radikal bebas (ROS), termasuk pembentukan reduksi DNA yang mengganggu stabilitas genetik dan memicu mutasi genetik yang berujung pada pneumonia, neoplasma paru, dan kanker paru-paru. Kromium juga mengganggu sistem adhesi sel, yaitu kemampuan sel untuk saling menempel sehingga mempercepat invasi sel kanker ke jaringan lain. Paparan kromium melalui ingesti atau makanan, terjadi ketika seseorang mengonsumsi air minum atau makanan yang terkontaminasi kromium dan diserap usus sehingga masuk ke aliran darah, lalu menyebar ke berbagai organ vital seperti hati, ginjal, dan saluran pencernaan. Di dalam tubuh, paparan kromium dapat memicu stres oksidatif yang berpotensi merusak DNA serta menimbulkan perubahan metabolisme. Kondisi ini juga dapat menekan berbagai proses metabolisme penting, seperti metabolisme alkohol, steroid, dan lipid yang pada akhirnya menimbulkan disfungsi hati. Selain itu, kromium juga diketahui dapat merusak membran brush border pada sel epitel usus yang berfungsi dalam

penyerapan nutrisi. Gangguan ini berkontribusi dalam disfungsi saluran cerna dan peningkatan risiko kanker gastrointestinal (Shin et al., 2023).

Logam kromium yang masuk ke dalam tubuh akan ikut dalam proses metabolisme dan berinteraksi dengan berbagai unsur biologis sehingga mengganggu fungsi-fungsi penting metabolisme. Senyawa kromium yang bermolekul rendah seperti yang terdapat dalam sel darah dapat terlarut dan ikut terbawa ke seluruh tubuh bersama peredaran darah. Ion-ion kromium akan menghalangi kerja enzim, di antaranya benzopiren hidroksilase (penghambat pertumbuhan kanker) yang mengakibatkan perubahan dalam kemampuan pertumbuhan sel sehingga sel-sel tumbuh liar dan tidak terkontrol. Selain itu, kromium dapat mengendapkan DNA dan RNA serta menyebabkan denaturasi albumin (H. Widowati et al., 2018).

E. Fitoremediasi

Fito berasal dari kata Yunani *phyton* yang berarti tanaman atau tumbuhan dan *remediation* asal kata latin *remediare* yang berarti memperbaiki, menyembuhkan atau membersihkan sesuatu. Fitoremediasi (*phytoremediation*) adalah salah satu metode biologis secara *in situ* yang dapat digunakan untuk memperbaiki lokasi yang tercemar, juga didefinisikan sebagai proses pengurangan zat pencemar oleh tanaman (Damayanti et al., 2023).

Fitoremediasi merupakan salah satu teknologi yang memiliki beberapa keunggulan seperti proses berlangsung secara *in-situ*, penggunaan tanaman tidak menyebabkan polusi sekunder, meningkatkan produktivitas tanah dan aerasi, akar tanaman dapat memberi lokasi pertumbuhan mikroorganisme serta

memperbaiki struktur tanah dan aerasi, tidak memakan biaya yang tinggi, dan tidak memerlukan peralatan khusus. Fitoremediasi memiliki kekurangan seperti keterbatasan kedalaman akar, prosesnya membutuhkan waktu, dan kondisi cuaca (Suhartini & Nurika, 2018).

Keberhasilan fitoremediasi dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik dari tanaman itu sendiri maupun kondisi lingkungan. Setiap jenis tanaman memiliki kemampuan berbeda dalam menyerap, mentranslokasikan, atau mengakumulasi logam berat. Adapun faktor-faktor yang memengaruhi kemampuan fitoremediasi adalah sebagai berikut (Shalsa Bamiati, 2023):

a. Jenis dan Jumlah Tanaman

Fitoremediasi merupakan metode pengolahan air yang memanfaatkan tanaman. Untuk melakukan fitoremediasi diperlukan tanaman yang bersifat hiperakumulator atau toleran terhadap logam. Ciri-ciri tumbuhan hiperakumulator adalah memiliki ketahanan terhadap unsur logam dalam konsentrasi tinggi, tingkat laju penyerapan unsur hara lebih tinggi daripada tumbuhan lain, serta dapat mentranslokasi dan mengakumulasi unsur logam dari akar ke bagian tubuh lain (Ansori, 2022)

Tumbuhan yang digunakan dalam fitoremediasi biasanya memiliki kemampuan toleransi tinggi terhadap logam berat, mampu bertahan pada konsentrasi oksigen rendah, serta memiliki sistem perakaran yang luas dan berkembang baik. Sistem perakaran yang luas meningkatkan kontak dengan media tercemar sehingga akumulasi logam berat lebih besar (Suhartini & Nurika, 2018). Selain itu, jumlah tanaman memiliki pengaruh

dalam proses fitoremediasi, berkaitan dengan luas permukaan akar dan biomassa penyerapan. Semakin banyak tumbuhan akan menyebabkan logam berat pencemar semakin turun (Khasanah et al., 2020)

b. Waktu Kontak

Waktu kontak menentukan proses transpor ion, penyerapan, dan akumulasi logam di jaringan tanaman dengan kata lain Semakin lama tanaman berada dalam media tercemar, semakin banyak logam yang dapat terakumulasi (Haeril et al., 2024). Namun jika tumbuhan sudah mencapai titik jenuh maka tumbuhan tidak akan mampu menyerap polutan secara optimal sehingga faktor ini bergantung pada titik jenuh tumbuhan terhadap logam berat (Shalsa Bamiati, 2023)

c. Kadar Logam

Konsentrasi kadar logam berat yang tinggi dapat meningkatkan tingkat toksisitas, menyebabkan penurunan pertumbuhan, kerusakan struktural dan gangguan fisiologis tanaman serta dapat mempercepat akumulasi logam dalam jaringan tanaman hingga mencapai batas toleransinya (Rizvi et al., 2024).

d. Faktor Lingkungan

Faktor lingkungan memegang peran penting dalam proses fitoremediasi. Fitoremediasi dapat bekerja dengan baik selama kebutuhan sinar matahari, suhu, pH, dan kelembaban yang optimal untuk mendukung pertumbuhan tanaman (Paulina dan Faradika, 2024). Oksigen dan nutrisi

memengaruhi aktivitas akar dan mikroorganisme rizosfer yang berperan dalam transformasi dan pengikatan logam (Haeril et al., 2024).

Mekanisme kerja fitoremediasi terdiri dari beberapa konsep. Menurut (Suhartini & Nurika, 2018) mekanisme fitoremediasi terdapat beberapa tahap dalam mereduksi berbagai zat pencemar diantaranya:

a. Fitoekstraksi

Fitoekstraksi atau fitoakumulasi adalah teknik penghilangan kontaminan biasanya diaplikasikan pada tanah oleh tanaman, mengacu pada serapan dan translokasi kontaminan logam di dalam tanah oleh akar tanaman, untuk membersihkan tanah yang terkontaminasi. Fitoekstraksi memanfaatkan tanaman yang mampu menyerap, mengakumulasi, dan mengendapkan logam beracun dari dalam tanah ke bagian tanaman di atas permukaan tanah seperti daun, batang, dan pucuk (Sukono et al., 2020).

b. Fitodegradasi

Fitodegradasi atau fitotransformasi menghilangkan kontaminan dengan bantuan enzim tanaman atau enzim ko-faktor. Enzim yang digunakan untuk meliputi dehalogenase (transformasi senyawa terklorinasi), peroksidase (transformasi senyawa felonik), nitroreductase (transformasi bahan peledak dan senyawa nitrat), nitrilasi (transformasi senyawa aromatik sianat), dan fosfonat (transformasi pestisida organofosfat)

Mekanisme fitodegradasi terjadi ketika tanaman air dan darat menyerap, menyimpan serta secara biokimiawi menguraikan atau

mengubah senyawa organik menjadi tidak berbahaya, selanjutnya diuraikan oleh mikroba menjadi senyawa yang lebih tidak berbahaya. Enzim pertumbuhan dan penuaan tanaman membantu dalam proses metabolisme dan detoksifikasi (Yuliasni et al., 2023).

c. Fitovolatilisasi

Mekanisme fitovolatilisasi melalui penyerapan ke dalam bentuk larutan terurai sehingga zat beracun bertransformasi menjadi kurang beracun atau menghilangkan kontaminan dari tanah atau air lalu diupkan ke atmosfer melalui daun. Kontaminan yang terserap struktur kimianya dapat berubah sebelum lepas ke udara. Semua zat memiliki tingkat tekanan uap yang berbeda yang dapat menentukan banyak sedikitnya proses fitovolatilisasi (Mangkoedihardjo & Samudro, 2010).

d. Rizofiltrasi

Metode ini umum digunakan untuk pengolahan limbah cair industri dan pertanian. Penyerapan limbah cair terjadi melalui permukaan akar atau bagian tanaman yang terendam air yang terkontaminasi. Rhizofiltrasi merujuk pada proses adsorpsi atau presipitasi kontaminan pada akar atau penyerapan ke dalam akar. Adsorpsi berlangsung melalui ikatan ionik antara ion akar dengan ion kontaminan yang bermuatan berlawanan. Sementara itu, presipitasi atau pengendapan dipengaruhi oleh proses koagulasi kontaminan serta kondisi pH tanah atau air. Dengan demikian, kontaminan yang dapat terikat dan mengendap di zona perakaran umumnya adalah zat yang mampu mengalami penggumpalan, terutama

pada kondisi lingkungan yang bersifat basa (Mangkoedihardjo & Samudro, 2010).

e. Fitostabilisasi

Fitostabilisasi merupakan salah satu mekanisme fitoremediasi yang berfungsi untuk meminimalkan migrasi kontaminan di dalam tanah. Proses ini terjadi ketika kontaminan menempel pada akar tanaman sehingga tidak terbawa oleh aliran air tanah maupun air permukaan. Pada zona perakaran, kontaminan akan terakumulasi dan menjadi tidak bergerak (*immobile*) sehingga pergerakannya dapat dikendalikan. Dengan demikian, tanaman mampu menstabilkan kontaminan dengan cara mengendapkannya di sekitar akar sehingga tidak menyebar luas ke dalam tanah maupun air. Mekanisme ini membuat kontaminan tetap berada di lokasi awal dalam bentuk lebih stabil dan tidak aktif serta mengurangi risiko pencemaran yang lebih luas (Mangkoedihardjo & Samudro, 2010).

F. Tanaman Air

1. Kayu Apu

Tanaman air kayu apu merupakan tanaman yang hidup di perairan seperti danau, sawah, rawa-rawa dan air yang tenang. Tanaman kayu apu termasuk kelompok tanaman yang mengapung dan mengambang (*floating plant*). Akarnya banyak ditumbuhi buku-buku akar yang halus, panjang, dan lebat. Tanaman kayu apu berpotensi dalam menurunkan kadar pencemar limbah cair salah satunya logam kromium. Kelebihan tanaman kayu apu yaitu daya berkecambah yang tinggi, pertumbuhan cepat, tingkat

penyerapan yang tinggi, mudah ditemukan, dan daya adaptasi iklim yang tinggi. Berdasarkan USDA (United States Departement Of Agriculture)

Tanaman kayu apu diklasifikasikan sebagai berikut:

Kingdom : Plantae
Subkingdom : Tracheobionta
Suverdivisi : Spermatophyta
Divisio : Magnoliophya
Kelas : Liliopsida
Subkelas : Arecidae
Ordo : Arales
Familia : Araceae Juss
Genus : Pistia L.
Spesies : *Pistia stratiotes* L.



Gambar 2.2 Tanaman Kayu Apu (USDA, 2025)

Kayu apu memiliki potensi dalam menurunkan kadar pencemar air limbah yang memiliki kadar organik tinggi serta memiliki kemampuan mengikat butiran lumpur yang halus sehingga dapat digunakan untuk menjernihkan air dan dapat digunakan sebagai fitoremediator limbah

industri atau rumah tangga (Buta et al., 2023). Kayu apu memiliki kemampuan membentuk fitokelat yang mampu mengikat logam berat sehingga menghilangkan efek toksiknya yang kemudian disimpan dalam vakuola serta memiliki kemampuan untuk memecah krom menjadi partikel yang tidak membahayakan bagi tumbuhan (Safarrida et al., 2015).

Kayu apu termasuk ke dalam tanaman yang memiliki stomata hanya pada bagian abaksial (atas) saja. Banyak nya stomata pada daun kayu apu bergantung pada luasnya permukaan daun, semakin lebar daun maka stomata semakin banyak. Hal tersebut dapat mempercepat proses fotosintesis. Daun kayu apu tidak memiliki lapisan lilin karena lapisan lilin dapat memperlambat proses penguapan dan letak stomata yang ada di bagian atas berhadapan langsung dengan atmosfer sehingga mempercepat proses transpirasi (Puspita Sari & Herkules, 2019)

Mekanisme penurunan kromium disebabkan kayu apu memiliki kemampuan biosorpsi, yaitu pengikatan ion logam oleh gugus fungsi kimia yang terdapat pada dinding sel akar. Kromium yang terikat diserap ke dalam jaringan, sebagian besar logam tertahan di akar dan sebagian lain ditranslokasikan ke jaringan lain seperti batang dan daun. Hal tersebut berfungsi untuk mengurangi toksisitas lokal di akar agar tanaman dapat bertahan hidup (Haeril et al., 2024).

2. Eceng Gondok

Eceng gondok merupakan salah satu tumbuhan air yang hidup secara liar di rawa maupun di sungai berkembang biak secara vegetatif maupun

generatif. Eceng gondok memiliki akar tidak bercabang dan memiliki tudung akar yang ditumbuhi bulu, memiliki bentuk bulat oval dan mengapung di permukaan air. Susunan akar pada eceng gondok berfungsi menyerap logam berat di perairan dan akumulasi menyerap logam lebih tinggi dibandingkan dengan batang dan daun. Selain itu, eceng gondok termasuk tanaman hiperakumulator karena mampu menyerap logam berat tanpa mengalami kerusakan fisiologis yang berarti (Putri et al., 2018). Menurut USDA (United States Departement Of Agriculture) tanaman eceng gondok diklasifikasikan sebagai berikut:

Kingdom	: Plantae
Subkingdom	: Tracheobionta
Suverdivisio	: Spermatophyta
Divisio	: Magnoliophya
Kelas	: Liliopsida
Subkelas	: Lilidae
Ordo	: Liliales
Familia	: Pontederiaceae Kunth
Genus	: <i>Eichhornia</i> kunth
Spesies	: <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.)



Gambar 2.3 Tanaman Eceng Gondok (USDA, 2025)

Eceng gondok adalah tanaman air yang efektif sebagai biofilter alami dalam mengatasi pencemaran perairan maupun limbah. Keberhasilan fitoremediasi oleh eceng gondok didukung oleh struktur akar yang kompleks dan interaksi dengan mikroorganisme rhizofera serta didukung oleh daya absorpsi yang bersama-sama berperan dalam menyerap dan mengakumulasi bahan pencemar. Mikroba rhizosfer ini membantu mengakumulasi bahan pencemar ke dalam tubuhnya dan menyediakan nutrisi bagi tanaman. Kemampuan toleransi dan detoksifikasi yang dimiliki eceng gondok dilakukan dengan akumulasi sebagian besar logam berat di akar dan sebagian lain di vakuola dalam struktur selnya. (Hapsari et al., 2020).

Mekanisme lain yang terjadi saat mengakumulasi logam yakni asam amino seperti asam aspartat, asam glutamat, dan glisin yang terkandung di dalam eceng gondok dapat membentuk senyawa pengkelat yang berperan dalam mengikat logam berat. Dalam kondisi stres yang disebabkan oleh logam berat eceng gondok akan berusaha bertahan hidup dengan

meningkatkan aktivitas enzim antioksidan seperti perokside (Ramadhani & Juswardi, 2022).

3. Kiambang

Tumbuhan kiambang termasuk ke dalam tumbuhan paku air yang memiliki batang bercabang tumbuh mendatar berbuku-buku dan ditumbuhi bulu-bulu, memiliki daun relatif kecil berambut rapat seperti buludru dan struktur akarnya adalah daun tereduksi yang mengandung di bawah air. Kiambang tumbuh cepat di perairan tenang dan membentuk massa padat menutupi air (Saputra & Tangahu, 2021). Berdasarkan USDA (United States Department Of Agriculture) tanaman kiambang diklasifikasikan sebagai berikut::

Kindom	: Plantae
Subkingdom	: Tracheobionta
Divisi	: Pteridophyta
Kelas	: Filicopsida
Ordo	: Hydropteridales
Familia	: Salviniaceae martinov
Genus	: <i>Salvinia</i> seg
Spesies	: <i>Salvinia molesta</i> Mitchell



Gambar 2.4 Tanaman Kiambang (USDA, 2025)

Kiambang merupakan tanaman yang efektif sebagai remediator karena memiliki kemampuan hiperakumulasi yang tinggi sehingga mampu menyerap limbah organik maupun anorganik dengan baik serta memiliki kemampuan untuk bertahan dan tumbuh meskipun dalam kondisi nutrisi yang rendah (Damayanti et al., 2023). Kiambang memiliki kemampuan untuk tumbuh subur di perairan yang terkontaminasi limbah industri, pertanian, dan domestik dan memiliki kemampuan adaptasi tinggi terhadap berbagai kondisi lingkungan (Rawung et al., 2024). Mekanisme penyerapan logam oleh kiambang yaitu pada saat akar menyerap logam berat akan membentuk enzim reduktase yang berfungsi mereduksi logam yang kemudian diangkut menuju membran akar dan diangkut melalui jaringan ke bagian lain (Ramadhani & Juswardi, 2022).

Kiambang memiliki sistem perakaran yang rapat sehingga mendukung proses penyerapan logam berat melalui mekanisme adsorpsi dan absorpsi. Kontaminan yang berada di sekitar akar kemudian terlarut dan selanjutnya diserap oleh tanaman melalui proses adsorpsi dan bioakumulasi berjalan seiring waktu. Selain itu, peningkatan jumlah daun dan luas kanopi tanaman dapat memperluas permukaan fotosintetik serta

meningkatkan aktivitas metabolisme sehingga kemampuan tanaman dalam mengakumulasi logam berat semakin besar (Zain et al., 2025).

Setelah proses adsorpsi, ion kromium masuk ke jaringan tanaman. Kromium valensi enam direduksi menjadi valensi tiga oleh enzim. Setelah itu, kromium dikompleksasikan dengan senyawa organik dan diakumulasi dalam vakuola atau jaringan lain. Sementara sebagian besar kromium tetap disimoan dakan jaringan meskipun sedikit dapat kembali terlepas ke lingkungan (Pritha Wardhani, 2024).

G. Parameter Pengganggu

1. Suhu

Peningkatan suhu dapat meningkatkan laju reaksi biokimia. Suhu yang terlalu tinggi dapat merusak enzim dan kerusakan pada fotosistem sehingga menghambat proses fotosintesis dan menurunkan kemampuan tanaman dalam menyerap polutan (Lupitasari dan Kusumaningtyas, 2020). Peningkatan suhu menyebabkan peningkatan kecepatan metabolisme dan respirasi organisme air hingga kebutuhan oksigen juga meningkat. Namun di sisi lain, kemampuan air untuk melarutkan oksigen menurun seiring kenaikan suhu. Kondisi ini dapat menghambat kinerja fitoremediasi karena oksigen terlarut dibutuhkan baik oleh mikroorganisme maupun tanaman untuk mendukung proses penyerapan logam berat (Damayanti et al., 2023). Sedangkan suhu yang terlalu rendah dapat memperlambat metabolisme tanaman dan aktivitas mikroorganisme rhizosfer mengakibatkan penurunan efisiensi penghilangan logam berat hingga 15-

55% (El-Alfy et al., 2023). Selain mempengaruhi efisiensi penyerapan logam, suhu larutan juga mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Suhu antara 20°C-30°C dapat menghasilkan budidaya optimal bagi sebagian besar tanaman air (Pang et al., 2023).

2. Cahaya Matahari

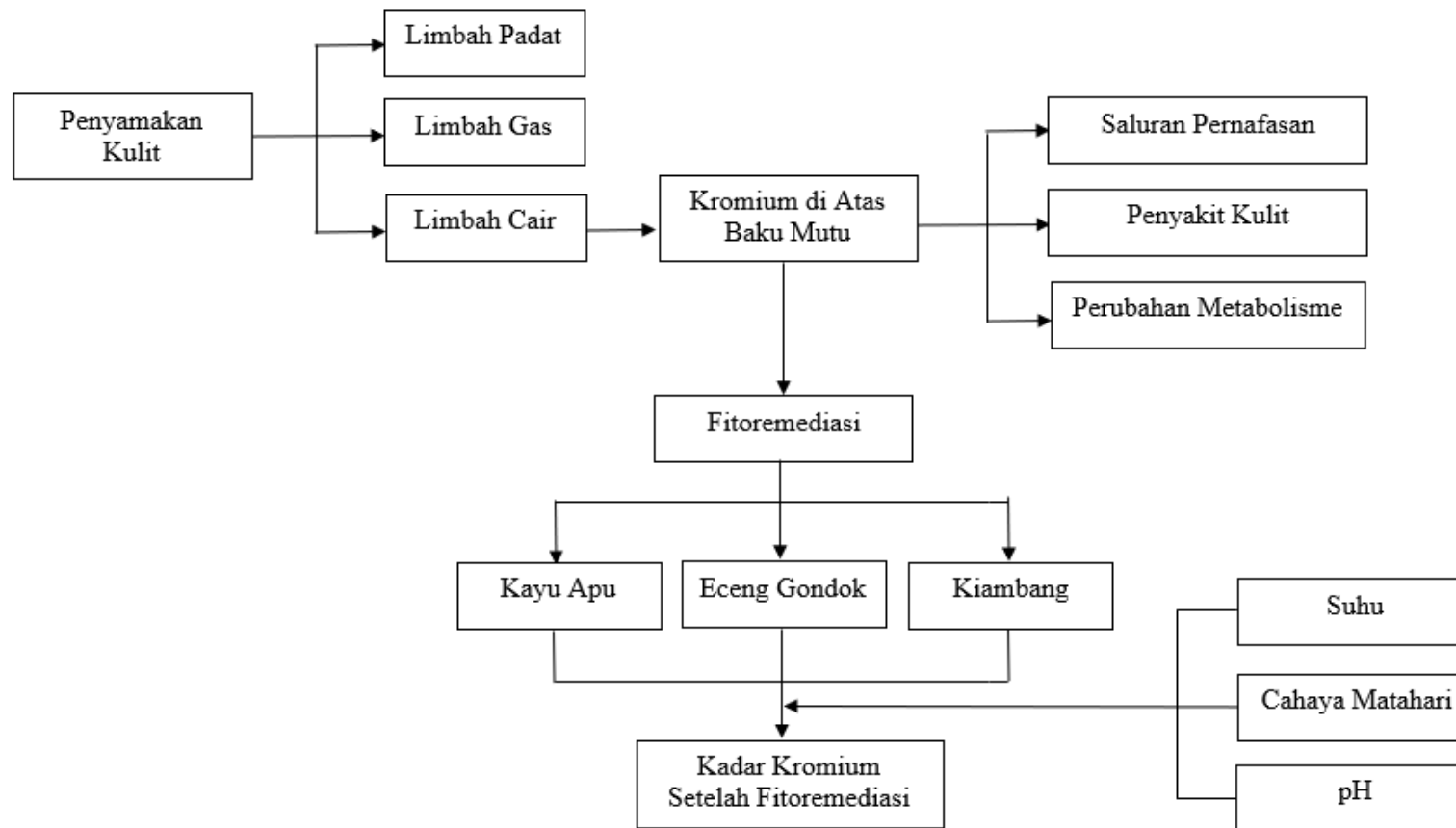
Intensitas cahaya matahari adalah faktor internal yang berpengaruh primer pada proses fotosintesis. Saat terjadi perubahan intensitas cahaya, tanaman akan menyesuaikan diri yang bertujuan mengoptimalkan proses fotosintesis agar tanaman tetap mampu bertahan hidup dan mempertahankan tingkat produktivitasnya (Zahara dan Fuadiyah, 2021). Tanpa cahaya yang cukup, tanaman tidak menghasilkan energi dan oksigen secara optimal sehingga memperlambat laju reaksi fotosintesis dan kemampuannya dalam menyerap polutan seperti logam berat ikut menurun (Lupitasari & Kusumaningtyas, 2020).

3. *Potential Hydrogen* (pH)

pH adalah derajat keasaman yang digunakan untuk mengukur nilai keasaman atau kebasaan dari suatu cairan. pH memiliki skala 0-7 adalah asam, skala 7 adalah netral dan skala 7-14 adalah basa sedangkan pH normal berada pada pH 6-8. Kadar pH yang ideal adalah yang masih mendukung berlangsungnya aktivitas biologis di dalam air secara optimal. Jika pH air tidak berada dalam kondisi netral, hal tersebut dapat menghambat proses biologis dan berpotensi mengganggu upaya penjernihan air (Gazali dan Widada, 2021). pH berpengaruh terhadap

proses penyerapan logam, molekul H^+ dalam membran yang membentuk kompleks menimbulkan terjadinya penyerapan logam secara aktif dan mengangkut ion logam. pH yang tinggi dapat merusak jaringan pada tanaman sehingga pertumbuhan tanaman terganggu dan fungsi tanaman sebagai fitoremediator logam tidak optimal (Hapsari et al., 2020).

H. Kerangka Teori



Gambar 2.5 Kerangka Modifikasi dari Suhartini dan Nurika (2018); Tamod (2022); Wahyu Nugraha *et al.*, (2018); Aldhita Rizky (2017); Shin *et al.*, (2023)