

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Pencemaran Air dari *Home Industry* Batik

1. Pengertian Pencemaran Air

Pencemaran air adalah terjadinya perubahan dan penyimpangan sifat-sifat alamiah dari air yang ada di lingkungan hidup manusia (Dewata and Danhas, 2018). Kristanto menyatakan disebut pencemaran air apabila terjadi penyimpangan sifat-sifat air dari keadaan normal. Keadaan normal tidak sama dengan kemurnian air. Di alam, air tidak pernah berbentuk murni, tapi bukan berarti semua air itu tercemar. Karena semua air yang ada di alam, sudah bercampur dengan CO₂ , O₂ dan N₂ serta bahan-bahan tersuspensi lainnya seperti partikel-partikel yang terbawa oleh air hujan karena peristiwa alamiah (Kristanto, 2004). Wardhana menyebutkan air yang tercemar adalah apabila air tersebut mengalami perubahan dari keadaan normalnya (Wardhana, 2001). Maka pencemaran air produksi batik merupakan keadaan terjadinya perubahan dan penyimpangan sifat-sifat air dari keadaan normalnya di lingkungan hidup manusia akibat dari produksi batik.

2. Indikator Pencemaran Air

Indikator air lingkungan yang tercemar adalah adanya tanda atau perubahan yang dapat diobservasi melalui:

a. Terdapat perubahan suhu air

Air yang panas hasil produksi yang dibuang ke sungai maka air sungai akan menjadi panas. Air sungai yang suhunya naik akan mengganggu kehidupan hewan air dan organisme air lainnya karena kadar oksigen yang terlarut dalam air akan turun bersamaan dengan kenaikan suhu. Padahal setiap kehidupan memerlukan oksigen untuk bernapas. Oksigen yang terlarut di dalam air berasal dari udara yang secara lambat terdifusi ke dalam air. Makin tinggi kenaikan suhu air makin sedikit oksigen yang terlarut di dalamnya (Wardhana, 2001). Suhu yang berbahaya bagi mikroorganisme maupun tanaman yaitu $>35^{\circ}\text{C}$. Suhu $\geq 40^{\circ}\text{C}$ dapat menyebabkan degradasi biologis mulai terganggu. Kemudian, suhu $>50^{\circ}\text{C}$ menyebabkan banyak mikroorganisme pengolah limbah menjadi inaktif atau mati (Abed and Alisawi, 2020).

b. Terdapat perubahan pH atau konsentrasi ion Hidrogen

Air normal yang memenuhi syarat untuk suatu kehidupan mempunyai pH berkisar antara 6,5-7,5. Air dapat bersifat asam atau basa, tergantung pada besar kecilnya pH air atau besarnya konsentrasi ion Hidrogen di dalam air. Air yang mempunyai pH lebih kecil dari pH normal akan bersifat asam, sedangkan air yang mempunyai pH lebih besar dari pH normal akan bersifat basa. Air limbah dan bahan buangan dari kegiatan industri yang dibuang ke sungai akan mengubah pH air

yang pada akhirnya dapat mengganggu kehidupan organisme di dalam air (Wardhana, 2001).

c. Terdapat perubahan warna, bau, dan rasa

Bahan buangan dan air limbah hasil dari kegiatan industri yang berupa bahan anorganik dan bahan organik seringkali dapat larut di dalam air. Apabila bahan buangan dan air limbah industri dapat larut dalam air maka akan terjadi perubahan warna air. Selain itu, degradasi bahan buangan industri dapat pula menyebabkan terjadinya perubahan warna air (Wardhana, 2001).

Bau yang keluar dari dalam air dapat langsung berasal dari bahan buangan atau air limbah dari kegiatan industri, atau dapat pula berasal dari hasil degradasi bahan buangan oleh mikroba yang hidup di dalam air. Bahan industri yang bersifat organik menimbulkan bau yang sangat menyengat hidung. Mikroba di dalam air akan mengubah bahan buangan organik, terutama gugus protein, secara degradasi menjadi bahan yang mudah menguap dan berbau. Timbulnya bau pada air lingkungan secara mutlak dapat dipakai sebagai salah satu tanda terjadinya tingkat pencemaran air yang cukup tinggi. Adanya rasa pada air pada umumnya diikuti pula dengan perubahan pH air (Wardhana, 2001).

d. Adanya endapan, koloidal, dan bahan terlarut

Endapan dan koloidal serta bahan terlarut berasal dari adanya bahan buangan industri yang berbentuk padat. Bahan buangan industri yang

berbentuk padat kalau tidak dapat terlarut sempurna akan mengendap di dasar sungai dan yang dapat larut sebagian akan menjadi koloidal. Endapan sebelum ke dasar sungai akan melayang di dalam air bersama-sama dengan koloidal. Endapan dan koloidal yang melayang di dalam air akan menghalangi masuknya sinar matahari ke dalam lapisan air. Padahal sinar matahari sangat diperlukan oleh mikroorganisme untuk melakukan proses fotosintesis. Karena tidak ada sinar matahari maka proses foto sintesis tidak dapat berlangsung. Akibatnya, kehidupan mikroorganisme jadi terganggu (Wardhana, 2001).

Apabila endapan dan koloidal yang terjadi berasal dari bahan buangan organik, maka mikroorganisme, dengan bantuan oksigen yang terlarut di dalam air, akan melakukan degradasi bahan organik tersebut sehingga menjadi bahan yang lebih sederhana. Dalam hal ini oksigen yang terlarut di dalam air akan berkurang sehingga mikroorganisme lain yang memerlukan oksigen akan terganggu pula. Banyaknya oksigen yang diperlukan untuk proses degradasi biokimia disebut dengan *Biological Oxygen Demand* atau disingkat BOD. BOD merupakan banyaknya oksigen dalam ppm atau miligram/liter (mg/l) yang diperlukan untuk menguraikan benda organik oleh bakteri, sehingga limbah tersebut menjadi jernih kembali (Sugiharto, 2008).

Jika bahan buangan industri berupa bahan anorganik yang dapat larut maka air akan mendapat tambahan ion-ion logam yang berasal dari bahan anorganik tersebut. Banyak bahan anorganik yang memberikan

ion-ion logam berat yang pada umumnya bersifat racun, seperti Cd, Cr, dan Pb (Wardhana, 2001).

e. Terdapat mikroorganisme

Mikroorganisme sangat berperan dalam proses degradasi bahan buangan dari kegiatan industri yang dibuang ke air lingkungan, baik sungai, danau, maupun laut. Jika bahan buangan yang didegradasi cukup banyak maka mikroorganisme akan ikut berkembang biak. Pada perkembangbiakan mikroorganisme ini tidak tertutup kemungkinan bahwa mikroba patogen ikut berkembang pula. Mikroba patogen adalah penyebab timbulnya berbagai macam penyakit (Wardhana, 2001).

3. Komponen Pencemaran Air Limbah Produksi Batik

Produksi batik menghasilkan limbah cair, limbah gas, dan limbah padat (Apriyani, 2018). Limbah cair industri batik merupakan limbah yang paling banyak dihasilkan dan berpotensi mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Limbah cair ini dihasilkan akibat penggunaan pewarna sintetis dalam industri batik (Apriyani, 2018). Jumlah aliran air limbah yang berasal dari industri sangat bervariasi tergantung dari jenis dan besar-kecilnya industri, pengawasan pada proses industri, derajat penggunaan air, derajat pengolahan air limbah yang ada. Sebagai patokan dapat dipergunakan pertimbangan bahwa 85 – 95% dari jumlah air yang dipergunakan adalah berupa air limbah apabila industri tersebut tidak menggunakan kembali air limbah. Adapun banyaknya pemakaian dari industri batik adalah rata-rata sekitar 200 – 360 m³ (Metcalf dan Edy, 1979)

dalam (Sugiharto, 2008). Limbah cair hasil proses pencucian, pewarnaan, pelorodan malam (wax), dan pelarutan bahan kimia dalam produksi batik biasanya dibuang langsung ke saluran air atau sungai di sekitar sentra batik. Karakteristik air limbah produksi batik yaitu sebagai berikut:

a. Karakteristik fisik

1) Warna

Pewarna yang biasa digunakan dalam proses produksi batik yaitu naphtol, remasol, indigosol, dan rapid. Warna ini sulit terurai secara alami sehingga membuat air limbah tampak gelap (Effendi, 2024).

2) Total Suspended Solid (TSS)

TSS pada limbah batik terdiri dari berbagai partikel padatan tidak larut yang berasal dari proses produksi. Kandungan ini bisa berupa bahan organik maupun anorganik yang terbawa ke aliran limbah (Effendi, 2024). Adapun penjelasannya yaitu sebagai berikut:

a) Bahan organik

Bahan-bahan organik yang ada di dalam air limbah batik diantaranya yaitu pertama sisa lilin malam yang berasal dari proses pelorodan. Lilin yang tidak terlarut membentuk partikel tersuspensi. Kedua, sisa zat pewarna organik yang tidak terfiksasi akan berikatan dengan partikel padat. Ketiga, pati/kanji dan minyak yang digunakan dalam proses pencantigan

atau pelorodan, sebagian ikut terbawa dalam air limbah. Keempat, serat kain halus yang berasal dari kain yang digunakan (Effendi, 2024).

b) Bahan anorganik

Bahan anorganik yang terkandung di dalam air limbah produksi batik meliputi garam anorganik seperti natrium sulfat (Na_2SO_4), soda abu (Na_2CO_3). Kemudian, logam berat seperti kromium (Cr), tembaga (Cu), kadang timbal (Pb) atau merkuri (Hg) yang berasal dari pewarna berbasis logam dapat terikat pada partikel padatan. Selain itu, adanya oksida/hidroksida logam yang terbentuk dari reaksi bahan kimia dan bisa mengendap sebagai padatan tersuspensi (Effendi, 2024).

3) Bau

Bau yang menyengat pada air limbah produksi batik disebabkan oleh dekomposisi bahan organik dan sisa bahan kimia (Effendi, 2024).

4) Suhu

Suhu air limbah lebih tinggi dibandingkan dengan air normal karena proses pencelupan dan pencucian yang menggunakan air panas (Effendi, 2024). Suhu mempengaruhi laju reaksi dengan meningkatkan energi kinetik partikel sehingga frekuensi dan efektivitas tumbukan meningkat. Oleh karena itu, peningkatan suhu dapat mempercepat laju reaksi. Dalam sistem fitoremediasi, suhu

dapat mempengaruhi aktivitas mikroorganisme di akar, metabolisme tanaman, proses adsorpsi dan degradasi sehingga penurunan TSS menjadi lebih efektif (Muchendu, 2024).

b. Karakteristik kimia

1) pH

Air limbah hasil produksi batik menghasilkan pH yang bervariasi tergantung pada proses tahapannya. Pada proses pencelupan air limbah cenderung bersifat basa karena menggunakan soda abu dan natrium sulfat. Sedangkan, pada proses fiksasi warna air limbah cenderung bersifat asam karena mengandung asam sulfat dan natrium sulfat (Effendi, 2024).

2) *Biological Oxygen Demand* (BOD) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD)

BOD dan COD yang tinggi menunjukkan kandungan bahan organik dan kimia yang sulit diuraikan, hal ini dapat menyebabkan oksigen terlarut di perairan menjadi berkurang (Effendi, 2024).

3) Logam berat

Logam berat seperti kromium (Cr), tembaga (Cu), dan merkuri (Hg) bersifat toksik bagi biota dan berpotensi menumpuk dalam rantai makanan (Effendi, 2024).

4) Surfaktan/Detergen

Surfaktan/detergen yang berasal dari proses pencucian kain dapat mempengaruhi respirasi organisme akuatik (Effendi, 2024).

5) Zat warna sintesis

Penggunaan pewarna sintesis yang mengandung senyawa aromatik, azo, antrakuinon yang *recalcitrant* atau sulit diuraikan, bahkan bersifat toksik/karsinogenik (Effendi, 2024).

c. Karakteristik biologi

Kandungan mikroorganisme (bakteri, jamur) yang muncul akibat bahan organik dalam limbah (malam, sisa pati, zat pewarna). Tidak semua mikroba dapat bertahan, hanya spesies resisten terhadap bahan kimia toksik (misalnya *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp.) yang sering ditemukan pada limbah batik. Potensi pertumbuhan alga berlebih (eutrofikasi) jika limbah dibuang langsung ke sungai karena tingginya nutrisi (N dan P dari zat kimia) (Sasdika *et al.*, 2022).

4. Dampak Pencemaran Air Limbah Produksi Batik

Apabila air telah tercemar maka kehidupan manusia akan terganggu. Beberapa masalah yang akan terjadi apabila air tercemar diantaranya sebagai berikut (Wardhana, 2001; Sugiharto, 2008).

a. Air menjadi tidak bermanfaat lagi

Air yang tidak bisa dimanfaatkan lagi oleh manusia karena tercemar merupakan kerugian yang terasa secara langsung oleh manusia. Kerugian langsung ini pada umumnya disebabkan oleh terjadinya pencemaran air oleh berbagai macam komponen pencemar air. Bentuk kerugian langsung ini antara lain berupa air tidak dapat digunakan lagi

untuk keperluan rumah tangga, industri, dan pertanian (Wardhana, 2001).

b. Air menjadi penyebab penyakit

Pencemaran air dapat menimbulkan kerugian yang lebih jauh lagi, yaitu kematian. Kematian dapat terjadi karena pencemaran yang terlalu parah sehingga air telah menjadi penyebab berbagai penyakit. Tingginya nilai *Total Suspended Solid* (TSS) pada air limbah batik tidak secara langsung menyebabkan penyakit, namun TSS berperan sebagai media pembawa (*carrier*) bagi berbagai polutan berbahaya. Partikel padatan tersuspensi dapat mengikat logam berat (misalnya Cr, Pb, Cu, dan Zn), zat warna sintetis (seperti azo dye, naphtol, indigosol), senyawa organik dari lilin maupun minyak, serta mikroba patogen. Polutan yang terbawa TSS ini dapat menimbulkan dampak kesehatan serius, diantaranya yaitu gangguan kulit seperti dermatitis, iritasi, gatal, dan ruam (Wardhana, 2001).

c. Gangguan terhadap kehidupan biotik

Dengan banyaknya zat pencemar yang ada di dalam air limbah, maka akan menyebabkan menurunnya kadar oksigen yang terlarut di dalam air limbah. Dengan demikian akan menyebabkan kehidupan di dalam air yang membutuhkan oksigen akan terganggu, dalam hal ini akan mengurangi perkembangannya. Selain kematian kehidupan di dalam air disebabkan karena kurangnya oksigen di dalam air juga dapat disebabkan karena adanya zat beracun yang berada di dalam air limbah

tersebut. Selain matinya ikan dan bakteri-bakteri di dalam air juga dapat menimbulkan kerusakan pada tanaman atau tumbuhan air. Sebagai akibat matinya bakteri-bakteri, maka proses penjernihan sendiri yang harusnya bisa terjadi pada air limbah menjadi terhambat. Sebagai akibat selanjutnya adalah air limbah akan sulit untuk diuraikan. Selain bahan-bahan kimia yang dapat mengganggu kehidupan di dalam air, maka kehidupan di dalam air juga dapat terganggu dengan adanya pengaruh fisik seperti adanya temperatur tinggi yang dikeluarkan oleh industri yang memerlukan proses pendinginan. Panasnya air limbah ini dapat mematikan semua organisme apabila tidak dilakukan pendinginan terlebih dahulu sebelum dibuang ke dalam saluran air limbah (Wardhana, 2001).

d. Gangguan terhadap keindahan

Dengan semakin banyaknya zat organik yang dibuang oleh industri batik, maka setiap hari akan dihasilkan air limbah yang berupa bahan-bahan organik dalam jumlah yang sangat besar. Ampas yang berasal dari pabrik ini perlu dilakukan pengendapan terlebih dahulu sebelum dibuang ke saluran air limbah, akan tetapi memerlukan waktu yang sangat lama. Selama waktu tersebut air limbah mengalami proses pembusukan dari zat organik di dalamnya. Sebagai akibat selanjutnya adalah timbulnya bau hasil penguraian dari zat organik yang sangat menusuk hidung (Sugiharto, 2005).

e. Gangguan terhadap kerusakan benda

Apabila air limbah itu adalah air limbah yang berkadar pH rendah atau bersifat asam maupun pH tinggi yang bersifat basa. pH yang rendah maupun yang tinggi akan mengakibatkan timbulnya kerusakan pada benda-benda di sekitarnya (Wardhana, 2001).

Lemak yang merupakan bagian dari komponen air limbah mempunyai sifat yang menggumpal pada suhu udara normal, dan akan berubah menjadi cair apabila berada pada suhu yang lebih panas. Lemak yang berupa benda cair pada saat dibuang ke saluran air limbah akan menumpuk secara kumulatif pada saluran air limbah karena mengalami pendinginan dan lemak ini akan menempel pada dinding saluran air limbah yang pada akhirnya akan dapat menyumbat aliran air limbah. Selain penyumbatan akan dapat juga terjadi kerusakan pada tempat di mana lemak tersebut menempel yang bisa berakibat timbulnya kebocoran (Wardhana, 2001).

B. Fitoremediasi sebagai Penanggulangan TSS Limbah Produksi Batik

1. Definisi Fitoremediasi

Fitoremediasi didefinisikan sebagai teknik rehabilitasi melalui penggunaan tanaman untuk mengekstrak dan merombak bahan pencemar. Konsepsi fitoremediasi merupakan pencucian polutan yang meliputi penghancuran, inaktivasi, atau imobilisasi polutan menuju bentuk yang tidak berbahaya. Proses ini dimediasi oleh tanaman, termasuk pohon, rumput-rumputan, dan tanaman air. Fitoremediasi merupakan metode yang

sangat sederhana, relatif murah, efektif, dan tidak menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan. Berbagai jenis tanaman telah diketahui memiliki potensi sebagai fitoremediasi sebab kemampuannya dalam menyerap kontaminan (Putra *et al.*, 2021). Istilah fitoremediasi adalah kombinasi dari dua kata yaitu fito yang berasal dari kata *greekphyto* yang berarti tanaman dan media yang berasal dari kata lain *medium* yang artinya memperbaiki. Tanaman memiliki kemampuan yang sangat besar untuk menyerap polutan dari lingkungan dan melakukan detoksifikasi dengan berbagai mekanismenya. Fitoremediasi merupakan teknologi yang relatif baru dengan studi penelitian yang dilakukan selama dua dekade (Titah *et al.*, 2022). Jadi, fitoremediasi adalah penggunaan tumbuhan untuk menghilangkan polutan dari tanah atau perairan yang terkontaminasi. Fitoremediasi sendiri dipilih karena dalam pengolahannya tidak membutuhkan biaya yang besar. Biaya pengolahan dengan fitoekstraksi lebih rendah daripada pengolahan lainnya. Selain biaya yang rendah, fitoremediasi sangat mudah diterapkan secara in situ (langsung ditempat) dan proses yang digunakan adalah secara alamiah.

Fitoremediasi merupakan salah satu cara yang dapat digunakan untuk mengolah limbah cair dengan memanfaatkan tumbuhan sebagai media untuk menyerap dan mendegradasi kadar pencemar yang terdapat pada limbah cair. Dalam pengaplikasiannya, fitoremediasi aktif sebagai alternatif pengolah limbah, baik zat pencemar organik maupun anorganik. Pada dasarnya, tumbuhan atau tanaman memiliki kemampuan untuk menyerap,

menampung serta menyimpan zat organik, anorganik maupun logam (Puspita and Mirwan, 2023).

2. Jenis fitoremediasi

Pada fitoremediasi, terdapat enam jenis mekanisme tumbuhan dalam mereduksi berbagai zat pencemar atau polutan, antara lain (Mangkoedihardjo and Samudro, 2010):

a. Fitostabilisasi

Fitostabilisasi (istilah lain: inaktivasi tempat, atau hiper akumulasi) sebagai proses imobilisasi kontaminan dalam tanah. Naiknya kontaminan disebabkan terbawa aliran air tanah melalui proses kapiler, pada zona vadose lapisan atas tanah (zona tanah tidak jenuh air), terutama pada saat musim kemarau. Demikian juga kontaminan terbawa aliran air tanah saat musim penghujan, ketika air tanah naik mendekati permukaan tanah. Di samping itu, kontaminan naik menuju zona akar disebabkan proses transpirasi tumbuhan. Ketiga proses naiknya kontaminan ke zona akar menghasilkan kontaminan terakumulasi (hiper akumulasi) sehingga tidak bergerak (imobile) keluar zona akar. Tempat kontaminan semula menjadi media non-aktif kontaminan (inaktivasi tempat). Berdasarkan proses pergerakan kontaminan, maka secara umum semua jenis kontaminan menjalani proses fitostabilisasi. Bahan-bahan yang dapat dilakukan dengan metode ini yaitu TSS, COD, BOD, pH, logam (Ar, Cd, Cr, Hg, Pb, Zn, Cu), dan pewarna (Adams *et al.*, 2000).

b. Rizofiltrasi

Rizofiltrasi (istilah lain: fitofiltrasi, atau fitoimobilisasi), yang merujuk proses adsorpsi atau presipitasi kontaminan pada akar atau penyerapan ke dalam akar. Proses adsorpsi adalah ikatan ionik, karena itu proses ini terjadi untuk kontaminan yang mempunyai perbedaan muatan ion dengan ion akar. Ion akar, misalnya bikarbonat HCO_3^- akan mengikat kation kontaminan, misalnya logam-logam berat. Proses sedimenasi dapat terjadi karena koagulasi kontaminan dan juga kondisi pH air tanah. Dengan demikian, kontaminan yang dapat mengendap dan terikat dalam zona akar adalah zat-zat yang dapat mengalami penggumpalan dan kondisi tanah basa. Bahan-bahan yang dapat diekstraksi dengan metode rizofiltrasi meliputi TSS, COD, BOD, pH, logam (Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Cr), dan pewarna (Adams *et al.*, 2000).

c. Rizodegradasi

Rizodegradasi (istilah lain: penguatan biodegradasi rizosfer). Proses yang terjadi adalah penguraian kontaminan dalam tanah oleh aktivitas mikroba. Mikroba hidup dalam zona akar dari pasokan sumber karbon organik dari tumbuhan ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), asam amino, protein, alkohol, vitamin; yang dikenal sebagai eksudat akar tumbuhan. Kontaminan yang menjalani proses mikrobiologis adalah kontaminan organik yang mudah terurai mikrobiologis, yang dapat terukur sebagai BOD, dan kontaminan anorganik misalnya amonium (NH_4^+) dan nitrit (NO_2^-) serta logam berat.

Proses rizodegradasi berhubungan dengan asosiasi antara aktivitas mikroba pengurai pencemar dan aktivitas akar tumbuhan penyalur eksudat. Banyak peneliti sejak tahun 1983 sampai 2003 yang dihimpun badan kesehatan dunia (WHO) menunjukkan bahwa kehidupan mikroba patogen dalam media tumbuhan dapat hidup lebih pendek dibanding dalam tanah dan dalam air tawar maupun air limbah. Penyebab waktu pendek mikroba patogen dalam media tumbuhan adalah mutu eksudat yang mampu mengeliminasi mikroba patogen namun tidak memberi efek bagi mikroba yang hidup dalam akar. Di samping itu, mikroba patogen adalah masukan luar (air limbah) ke dalam irigasi tumbuhan, sehingga tidak adaptif dalam kondisi akar tumbuhan. Fakta ini memperkuat penggunaan tumbuhan untuk mengolah air limbah dan remediasi lingkungan tanah tercemar. Di samping tumbuhan mampu mengeliminasi zat kimia, tumbuhan juga mampu mengeliminasi mikroba patogen; dan penting dalam perencanaan waktu detensinya. Kontaminan berikut ini dapat diuraikan melalui rhizodegradasi yaitu TSS, COD, BOD, pH, pewarna (Adams *et al.*, 2000).

d. Fitoekstraksi

Fitoekstraksi (istilah lain: fitoakumulasi, fitoabsorpsi, atau fitoserapan). Fitoekstraksi adalah proses penyerapan kontaminan dari medium tumbuhnya. Kontaminan terserap tumbuhan selanjutnya terdistribusi ke dalam berbagai organ tumbuhan (translokasi). Proses penyerapan kontaminan berlangsung sejalan dengan aliran transpirasi

(*transpiration stream*) saat kejadian proses transpirasi. Kontaminan terserap ke dalam tumbuhan pada umumnya untuk kontaminan terlarut air. Namun beberapa zat sulit larut air dapat terserap tumbuhan, misalnya minyak, yang disebabkan oleh pelarutan eksudat tumbuhan. Dengan demikian eksudat berfungsi sebagai pelarut organik dan ikut menentukan pelarutan kontaminan. Bahan-bahan yang dapat diekstraksi dengan metode fitoekstraksi meliputi logam berat (Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn) (Adams *et al.*, 2000).

e. Fitodegradasi

Fitodegradasi (istilah lain: fitolignifikasi, atau fitotransformasi) sebagai penguraian kontaminan yang terserap melalui proses metabolik dalam tumbuhan. Contoh kontaminan karbondioksida udara diserap melalui stomata daun dan di dalam sel tumbuhan terurai menjadi karbohidrat. Fitodegradasi juga merupakan penguraian kontaminan di luar tumbuhan melalui proses ensimatik yang dihasilkan tumbuhan. Jadi, fitodegradasi terjadi dari sumber tumbuhan, baik di dalam tumbuhan maupun di luar tumbuhan. Keseluruhannya adalah penguraian kontaminan yang dapat diikat tumbuhan, atau bahkan sebagian menjadi nutrisi tumbuhan. Senyawa organik merupakan kategori utama kontaminan yang mengalami fitodegradasi. Fitodegradasi dapat menurunkan kadar COD, BOD, pH, pewarna. Secara umum, senyawa organik dengan nilai log k_{ow} antara 0,5 dan 3,0 dapat mengalami fitodegradasi di dalam tanaman. Nutrisi anorganik

juga diatasi melalui penyerapan dan metabolisme tanaman (Adams *et al.*, 2000).

f. Fitovolatilisasi

Fitovolatilisasi yang merupakan proses pelepasan kontaminan ke udara setelah terserap tumbuhan. Kontaminan terserap bisa berubah struktur kimianya sebelum lepas ke udara. Semua zat mempunyai tekanan uap dengan tingkat berbeda, yang menentukan banyak sedikitnya tingkat fitovolatilisasi. *Volatile organic carbon* (VOC) misalnya alkohol lebih banyak mengalami fitovolatilisasi dibanding logam berat (yang mempunyai tekanan uap < 10 atm) untuk konsentrasi zat yang sama. Dalam hal pengolahan air limbah yang mengandung zat organik atau fitoremediasi minyak, maka kekhawatiran akumulasi minyak dalam tumbuhan adalah kecil, namun perlu kewaspadaan lepasannya ke udara. Demikian juga pengolahan air limbah berkontaminasi logam berat atau fitoremediasi tanah tercemar logam berat, maka kekhawatiran lepasan logam berat ke udara adalah sangat kecil, namun perlu diwaspadai akumulasi logam berat dalam tumbuhan. Kontaminan yang dapat dilakukan dengan metode ini yaitu logam berat seperti Se dan Hg, bersama dengan As, dapat membentuk spesies volatil yang volatil (Adams *et al.*, 2000).

3. Kayu apu sebagai Fitoremediator

Fitoremediasi pada umumnya menggunakan tumbuhan yang memiliki sifat hiperakumulator. Tumbuhan hiperakumulator merupakan tumbuhan

yang memiliki tingkat laju penyerapan tinggi dibandingkan dengan tumbuhan yang lain. Biasanya tumbuhan hiperakumulator yang digunakan untuk proses fitoremediasi adalah tumbuhan non pangan atau tidak dapat dikonsumsi oleh manusia (Roni, 2020).

Tumbuhan yang digunakan pada proses fitoremediasi akan mengalami perubahan morfologi dan fisiologi yang disebabkan oleh tumbuhan tersebut telah aktif menyerap polutan di dalam air. Pada saat menyerap polutan di dalam air, tumbuhan beradaptasi untuk dapat hidup. Adaptasi yang dilakukan tumbuhan secara morfologi dapat dilihat dari warna daun, ukuran daun, serta akar tumbuhan setelah proses fitoremediasi. Sedangkan, adaptasi secara fisiologi dilihat dari kemampuan genetis tumbuhan terhadap tingkat toleransi terhadap unsur-unsur kimia. Tumbuhan fitoremediator apabila ditempatkan pada limbah dengan konsentrasi tinggi, dengan waktu yang lama maka tumbuhan akan lebih cepat mati dan efektivitas dalam penyerapan limbah pun menjadi rendah (Oktaviani, Nilandita and Suprayogi, 2020). Kayu apu atau *Pistia stratiotes* adalah salah satu jenis tumbuhan air yang mudah berkembang biak di air. Kayu apu menjadi salah satu tumbuhan yang dapat digunakan sebagai fitoremediator air limbah karena memiliki kemampuan dalam mengolah polutan dalam air, baik polutan berupa zat organik, non-organik, maupun logam berat sehingga merupakan salah satu tumbuhan fitoremediator (Alis Resti, Anita Dewi and Prehatin Trirahayu, 2021). Kayu apu merupakan salah satu tumbuhan air yang memiliki sifat sangat toleran terhadap kontaminan air dan kandungan

nutrisi yang tinggi pada air limbah industri maupun air limbah lainnya (Oktaviani, Nilandita and Suprayogi, 2020).

Penyerapan tumbuhan kayu apu berlangsung secara alami antara lain melalui proses fitostabilisasi, rizofiltrasi, dan rizodegradasi. Fitostabilisasi dengan mengurangi mobilitas atau penyebaran polutan. Kemudian, rizofiltrasi merupakan salah satu proses penting pada fitoremediasi yaitu proses saat zat kontaminan diendapkan oleh akar (Oktaviani, Nilandita and Suprayogi, 2020). Sedangkan, rizodegradasi pemecahan (degradasi) senyawa organik berbahaya di zona akar tanaman, terutama oleh mikroorganisme yang hidup di dekat akar (rhizosphere). Polutan maupun bahan organik, amonia, nitrogen yang telah diserap oleh akar tumbuhan kayu apu akan menjadi sumber nutrisi untuk pertumbuhan tanaman. Sedangkan bahan anorganik yang ada pada air limbah yang diserap oleh tumbuhan akan didegradasi oleh mikroba *Bacillus subtilis* menjadi senyawa yang lebih sederhana yaitu menjadi asam amino dan asam lemak yang dapat dimanfaatkan dalam pertumbuhan kayu apu (Roni, 2020).

Kayu apu adalah tumbuhan yang dapat hidup di sungai, danau, dan air yang tergenang. Suhu air yang optimal untuk pertumbuhannya adalah 22 – 30°C dengan suhu pertumbuhan maksimal 35°C. Sedangkan pH untuk kayu apu dapat tumbuh dengan baik yaitu pada pH 6-7. Kayu apu hidup dengan cara menyerap unsur hara di dalam air dengan akarnya. Tumbuhan ini memiliki akar yang panjang, lebat, dan bercabang halus, dengan memanfaatkan akarnya kayu apu dapat menyerap zat organik dan anorganik

di dalam air (Dieta and Hendrasarie, 2019). Kayu apu memiliki kemampuan untuk mengolah limbah karena dibantu oleh bakteri aktif *rhizosfer*. Bakteri rhizosfer ini merupakan kelompok bakteri yang dapat hidup pada akar dan hidup bersimbiosis pada tumbuhan (Rubianti and Amir, 2022).

Klasifikasi tumbuhan Kayu Apu adalah sebagai berikut (Oktaviani, Nilandita and Suprayogi, 2020):

<i>Kingdom</i>	:	<i>Plantae</i>
<i>Sub Kingdom</i>	:	<i>Tracheobionta</i>
<i>Super Division</i>	:	<i>Spermatophyta</i>
<i>Division</i>	:	<i>Magnoliophyta</i>
<i>Class</i>	:	<i>Liliopsida</i>
<i>Sub Class</i>	:	<i>Arecidae</i>
<i>Ordo</i>	:	<i>Arales</i>
<i>Family</i>	:	<i>Araceae</i>
<i>Genus</i>	:	<i>Pistia L.</i>
<i>Species</i>	:	<i>Pistia stratiotes</i>

Tumbuhan kayu apu atau apu-apu memiliki daun berwarna hijau dan berubah menjadi kuning kecokelatan saat tua. Ukuran daun tumbuhan kayu apu yaitu panjang 2 – 10 cm dan lebar daun 2 – 6 cm dengan tepi daun yang berlekuk-lekuk serta terdapat bulu-bulu halus pada permukaan daunnya. Daun pada tumbuhan kayu apu ini membentuk seperti mahkota pada bunga

mawar dengan pertulangan daun sejajar. Daun-daun ini tersusun roses di dekat akar sehingga membentuk bagian seperti batang tumbuhan. Akar pada tumbuhan kayu apu ini memiliki panjang hingga 80 cm yang berwarna putih. Akar tersebut terletak menggantung pada bawah roset dan memiliki stolon. Kayu apu dapat mengapung pada air karena rambut-rambut akar tumbuhan tersebut membentuk suatu struktur seperti keranjang dan dikelilingi oleh gelembung udara (Soheti, Sumarlin and Marisi, 2020).

4. Mekanisme Fitoremediasi untuk TSS pada Air Limbah Produksi Batik

Mekanisme yang terjadi dalam fitoremediasi untuk mengurangi kadar TSS pada produksi air limbah, dijelaskan sebagai berikut:

a. Mekanisme biologi

1) Adsorpsi/penyerapan partikel pada permukaan akar dan biofilm

Akar kayu apu menyediakan permukaan kasar dan luas dimana partikel tersuspensi dapat menempel. Lapisan biofilm (bakteri, jamur, alga) yang terbentuk pada akar meningkatkan kemampuan penyerapan partikel organik atau anorganik yang melekat pada matriks biofilm sehingga tidak lagi tersuspensi. Proses ini mengurangi konsentrasi TSS di air meskipun partikel itu sendiri tetap berada di sistem (terikat pada akar/biofilm) (Lu *et al.*, 2011; Sharma, 2022).

2) Degradasi biologi fraksi organik oleh mikroba rhizosphere

Sebagian TSS merupakan fraksi organik (detritus, residu lilin/minyak, sel mikroba mati). Mikroba yang hidup pada biofilm

dan zona akar (rhizosphere) menguraikan bahan organik tersebut melalui enzim (protease, lipase, cellulase, dsb.) dan respirasi aerob/anaerob. Hasilnya fraksi organik berubah menjadi CO₂, H₂O, biomassa mikroba, atau produk terlarut sehingga massa padatan tersuspensi berkurang. Studi eksperimental menunjukkan penurunan BOD/COD bersamaan dengan penurunan TSS ketika *Pistia stratiotes* digunakan (Lu *et al.*, 2011; Kumar *et al.*, 2017).

- 3) Flokulasi/koagulasi biologis oleh eksopolisakarida mikroba dan eksudat akar

Mikroorganisme pada biofilm dan eksudat akar melepaskan polisakarida dan senyawa lengket exopolysaccharides (EPS). EPS ini memicu penggumpalan partikel halus (koloid) menjadi flok yang lebih besar. Flok yang lebih besar menjadi lebih cepat mengendap atau lebih mudah tertahan pada akar/biofilm. Mekanisme flokulasi biologis ini penting untuk menghilangkan fraksi halus dari TSS yang sulit mengendap secara fisik (Sharma, 2022; Hairolnizam *et al.*, 2024).

- 4) Peningkatan oksigen yang mempercepat proses biologis aerob

Daun mengapung *Pistia stratiotes* melakukan fotosintesis sehingga meningkatkan oksigen terlarut (DO) di permukaan dan zona akar ketika ada transfer ke dalam air. DO yang lebih tinggi mendukung mikroba aerob efisien menguraikan bahan organik tersuspensi, sehingga konversi partikel organik dapat terlarut/CO₂

lebih cepat dan TSS turun. Beberapa studi konstruksi wetland melaporkan adanya korelasi antara vegetasi fotosintetik, kenaikan DO di rhizosphere, dan pengurangan polutan organik serta TSS (Ali *et al.*, 2024; Sharma, Rawat and Rautela, 2024).

5) Biokonversi menjadi biomassa mikroba dan akumulasi di akar (*sequestration*)

Sebagian material organik yang terdegradasi dimanfaatkan untuk pertumbuhan mikroba; biomassa mikroba ini dapat menyatu dengan partikel atau menempel pada akar sehingga “memindahkan” padatan dari fase tersuspensi ke fase yang terikat/*sequestered* (akar/biofilm). Dengan panen biomassa (misal pembuangan tanaman/biofilm), material TSS yang terbiokonversi dapat diangkut keluar dari sistem (Lu *et al.*, 2011; Kumar *et al.*, 2017).

6) Seleksi dan aktivitas enzimatik spesifik di rhizosphere

Komunitas mikroba rhizosphere *Pistia stratiotes* menghasilkan enzim-enzim yang memecah komponen kompleks seperti lignoselulosa, lemak, protein dalam partikel TSS. Aktivitas enzim ini mempercepat mineralisasi fraksi organik padat sehingga partikel hilang sebagai TSS setelah diubah menjadi bentuk terlarut/gas atau biomassa (Kumar *et al.*, 2017; Sharma, 2022).

- 7) Interaksi antarmikroba (kompetensi dan predasi mikroba) yang mereduksi fragmen seluler tersuspensi

Dalam biofilm ada interaksi kompleks (kompetisi, predasi protozoa) yang mengatur populasi mikroba. Protozoa dan mikro-predator memangsa sel mikroba tersuspensi sehingga menurunkan jumlah partikel seluler dalam fraksi TSS. Proses ekologi mikro-skalanya berkontribusi pada penurunan padatan organik hidup di dalam air (Sharma, 2022).

b. Mekanisme kimia

- 1) Adsorpsi elektrostatis oleh gugus fungsional akar

Akar *Pistia stratiotes* memiliki dinding sel kaya lignin, selulosa, dan hemiselulosa dengan gugus fungsional ($-OH$, $-COOH$). Gugus ini bermuatan negatif sehingga dapat mengikat partikel bermuatan positif (misalnya logam berat yang terikat pada TSS). Interaksi elektrostatis ini menyebabkan partikel menempel pada akar, sehingga berkurang dari kolom air (Lu *et al.*, 2010).

- 2) Pertukaran ion dengan logam pada partikel TSS

Komponen kimia pada akar (misalnya Ca^{2+} , Mg^{2+}) dapat bertukar dengan ion logam berat yang menempel pada partikel tersuspensi. Proses ini mengurangi mobilitas partikel karena logam berat yang dilepaskan kemudian terikat di akar. Partikel yang kehilangan muatan pengikatnya akan lebih mudah mengendap (Kumar *et al.*, 2017).

3) Eksudat akar yang menyebabkan pengasaman dan kompleksasi

Kayu apu melepaskan eksudat berupa asam organik (misalnya asam sitrat, malat) dan senyawa fenolik. Senyawa ini dapat menyebabkan penggumpalan partikel halus dengan cara menurunkan pH lokal sehingga mempercepat koagulasi partikel, mengikat logam sehingga membentuk kompleks organo-metal yang tidak larut sehingga mengendap bersama TSS (Sharma, 2022).

4) Proses oksidasi-reduksi di rhizosfer

Fotosintesis kayu apu meningkatkan oksigen terlarut (DO) di sekitar akar. Oksigen ini berperan dalam oksidasi senyawa organik/anion (misalnya $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$). Besi teroksidasi membentuk $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang tidak larut, ikut mengendapkan partikel TSS yang terikat pada logam. Di sisi lain, kondisi anaerob di bagian akar tertentu juga mendukung reduksi senyawa sehingga partikel mengendap (Ali *et al.*, 2024).

5) Koagulasi alami via EPS dan senyawa tanaman

Eksopolisakarida (EPS) yang dilepaskan mikroba di rhizosphere dan senyawa kimia eksudat tanaman bekerja sebagai koagulan alami. EPS bermuatan dapat mengikat partikel koloid halus sehingga membentuk flok besar. Secara kimia, ini mirip proses koagulasi/flokulasi buatan tapi terjadi secara biologis-kimiawi (Machado *et al.*, 2023).

6) Kompleksasi logam dengan chelator organik

Eksudat akar seperti asam humat, flavonoid, dan asam amino tertentu dapat membentuk kompleks dengan logam berat (Pb, Cu, Cr) yang sering melekat pada partikel TSS limbah batik. Kompleks ini umumnya tidak larut sehingga akan menggumpal dan mengendap bersama TSS (Yuliasni *et al.*, 2023).

c. Mekanisme fisika

1) Filtrasi oleh sistem akar

Akar serabut kayu apu yang panjang dan lebat berfungsi sebagai filter alami. Partikel tersuspensi (TSS) akan terperangkap secara mekanis di antara akar (Lu *et al.*, 2010).

2) Sedimentasi karena perlambatan aliran

Biomassa kayu apu yang menutupi permukaan air memperlambat arus, sehingga partikel TSS mengalami pengendapan secara gravitasi (Machado *et al.*, 2023).

3) Adsorpsi fisik pada permukaan akar

Rambut akar memiliki luas permukaan tinggi dan mukilagen yang membuat partikel tersuspensi menempel (Kumar *et al.*, 2017).

4) Flokulasi alami akibat eksudat akar

Eksudat organik (misalnya polisakarida) yang dilepaskan akar dapat menyebabkan aglomerasi/flokulasi partikel tersuspensi, sehingga partikel mudah mengendap (Sharma, 2022).

5) Pembentukan biofilm pada akar

Permukaan akar kayu apu mendukung pertumbuhan biofilm mikroba. Biofilm ini berperan sebagai lapisan lengket yang menangkap partikel tersuspensi (Yuliasni *et al.*, 2023).

5. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Fitoremediasi

Proses fitoremediasi dapat dipengaruhi oleh beberapa kondisi pada lingkungan seperti:

a. Waktu kontak dan waktu tinggal

Secara umum, waktu kontak dan waktu tinggal yang memadai secara langsung mempengaruhi tingkat efektivitas fitoremediasi pada air limbah karena memberikan kesempatan yang cukup bagi tanaman untuk mengeliminasi polutan dalam air limbah tersebut. Waktu kontak dan waktu tinggal pada fitoremediasi air limbah mengacu pada durasi interaksi tanaman fitoremediator dengan air limbah untuk proses penyaringan dan penguraian polutan. Pada penelitian fitoremediasi limbah batik menggunakan tanaman kayu apu (*Pistia stratiotes* L.), waktu kontak yang digunakan adalah sekitar 1 – 10 hari. Waktu kontak ini memungkinkan tanaman menurunkan parameter pencemar seperti BOD, COD, dan TSS serta mengakumulasi polutan seperti kromium secara signifikan. Selain itu, waktu tinggal (*detention time*) atau lamanya air limbah berada dalam sistem fitoremediasi juga menjadi faktor penting, karena semakin lama waktu tinggal, proses biodegradasi dan penyerapan polutan oleh tanaman dan mikroorganisme pendukung

dapat berlangsung secara optimal (Alis Resti, Anita Dewi and Prehatin Trirahayu, 2021; Dewi and Alfiah, 2022).

b. Densitas dan biomassa tanaman

Densitas dan biomassa tanaman merupakan faktor penting dalam fitoremediasi air limbah batik karena mempengaruhi kemampuan tanaman dalam menyerap dan mengeliminasi polutan. Densitas tanaman berperan sebagai indikator jumlah tanaman per satuan luas atau volume tempat fitoremediasi, ini berkaitan langsung dengan kapasitas penyerapan polutan secara total dari limbah. Penelitian pada *constructed wetland* dengan densitas tertentu juga menunjukkan penurunan parameter pencemar seperti BOD dan COD yang signifikan (Alia, Wardhani and Putra, 2023).

Biomassa adalah total massa bahan organik hidup yang ada pada tanaman, yang biasanya diukur dalam bentuk berat basah atau berat kering. Biomassa mencakup seluruh bagian tanaman seperti akar, batang, daun, dan bagian lain yang bisa berupa jaringan hidup atau sisa organik tanaman. Ukuran biomassa sering digunakan untuk menilai jumlah materi hidup dan kandungan energi dalam ekosistem tanaman (Martha, Prihastanti and Haryanti, 2016).

c. Kondisi lingkungan Fisika-Kimia

Parameter-parameter fisika-kimia ini harus dijaga pada rentang yang mendukung aktivitas tanaman dan mikroorganisme agar fitoremediasi dapat berjalan efektif dalam menurunkan pencemar pada air limbah

batik. Kondisi lingkungan fisika-kimia pada fitoremediasi air limbah batik meliputi parameter penting seperti pH, suhu, kadar BOD (Biochemical Oxygen Demand), COD (Chemical Oxygen Demand), total Suspended Solids (TSS), serta konsentrasi logam berat dan bahan kimia berbahaya. pH dan suhu optimal diperlukan untuk menjaga aktivitas metabolisme tanaman fitoremediator dan mikroorganisme yang berperan dalam proses penguraian polutan. Penurunan tingkat BOD, COD, dan TSS menjadi indikator keberhasilan fitoremediasi dalam mengolah limbah batik. Logam berat seperti timbal (Pb), kromium (Cr), dan kadmium (Cd) yang biasanya terkandung dalam limbah batik juga menjadi fokus utama pengurangan selama proses fitoremediasi. Pemantauan dan pengaturan kondisi fisika-kimia ini sangat krusial agar fitoremediasi dapat berjalan efektif dan efisien (Indrayani and Rahmah, 2018; Alis Resti, Anita Dewi and Prehatin Trirahayu, 2021; Dewi and Alfiah, 2022).

d. Karakteristik limbah cair

Karakteristik limbah cair batik berpengaruh signifikan terhadap proses fitoremediasi, karena sifat fisika dan kimia limbah menentukan kemampuan tanaman fitoremediator dalam menyerap dan menguraikan polutan. Limbah cair hasil industri batik biasanya mengandung logam berat seperti kromium (Cr), timbal (Pb), dan kadmium (Cd), serta parameter organik tinggi seperti BOD, COD, dan TSS. Konsentrasi tinggi polutan ini menuntut tanaman fitoremediator harus mampu

beradaptasi dan menyerap secara efektif agar remediasi berhasil (Suhartini *et al.*, 2019; Rahmadanti *et al.*, 2023). Kondisi pH yang asam hingga netral dan suhu yang sesuai sangat diperlukan agar tanaman dan mikroorganisme di sekitar akar bisa hidup optimal dan membantu proses degradasi polutan dalam limbah (Dewi and Alfiah, 2022). Limbah batik mengandung zat warna sintetis, bahan kimia organik dan anorganik yang kompleks, yang dapat mempengaruhi kapasitas penyaringan dan metabolisme tanaman dan mikroorganisme (Apriyani, 2018). Kemudian, Tingginya TSS dapat mempengaruhi penetrasi cahaya dan pergerakan air limbah, sehingga berdampak pada pertumbuhan tanaman dan efektivitas fitoremediasi (Dewi and Alfiah, 2022). Lama waktu dan konsentrasi limbah yang diolah memberikan pengaruh langsung pada kinetika penyisihan polutan oleh tanaman (Jamil, Darundiati and Nikie, 2021).

e. Biologis dan mikrobiologi

Tanaman kayu apu tumbuh mengapung di permukaan air limbah yang memudahkan kontak langsung dengan bahan pencemar sehingga mempercepat proses degradasi dan penyerapan zat berbahaya (Alis Resti, Anita Dewi and Prehatin Trirahayu, 2021; Dewi and Alfiah, 2022). Mikroorganisme yang hidup di akar dan sekitar tanaman *Pistia stratiotes* berperan penting sebagai agen biologis dalam proses biodegradasi polutan. Mikroba aerobik dan anaerobik turut menguraikan bahan organik dan mengubah bentuk kimia logam berat

sehingga memudahkan akumulasi oleh tanaman (Pramita, Prasetyanti and Fauziah, 2020; Dewi and Alfiah, 2022).

Interaksi biologis antara tanaman dan mikroorganisme ini menciptakan ekosistem mikro yang efisien dalam mengurangi kadar pencemar di limbah. Mikroorganisme mendapatkan habitat dan nutrisi dari tanaman sedangkan tanaman mendapatkan bantuan biologis dalam penyerapan dan detoxifikasi polutan (Pramita, Prasetyanti and Fauziah, 2020). Proses biologis lain seperti fotosintesis oleh *Pistia stratiotes* juga menambah oksigen terlarut di air sehingga mendukung aktivitas mikroba aerobik yang membantu degradasi polutan organik (Dewi and Alfiah, 2022).

f. Lingkungan eksternal

Lingkungan eksternal pada fitoremediasi air limbah batik mencakup beberapa faktor yang mempengaruhi efektivitas proses fitoremediasi, seperti suhu, curah hujan, dan intensitas cahaya matahari mempengaruhi pertumbuhan tanaman fitoremediator dan aktivitas mikroorganisme yang berperan dalam penguraian polutan di lingkungan limbah (Mentari, Soenardjo and Yulianto, 2022). Selain itu, besarnya volume dan konsentrasi limbah batik yang dihasilkan oleh industri mempengaruhi beban pencemar di lingkungan dan kebutuhan desain sistem fitoremediasi agar dapat bekerja optimal di kondisi lapangan (Novie, Thomas Triadi and Angela Ratih Ayu, 2022).

6. Kelebihan dan Kekurangan Fitoremediasi

Fitoremediasi sebagai salah satu teknik dalam mengolah limbah cair tentu memiliki kelebihan dan kekurangan. Keunggulan dari teknik fitoremediasi adalah tidak memerlukan biaya yang besar karena menggunakan tumbuhan yang tersedia di alam dan perawatan serta operasionalnya yang mudah, dapat dikontrol pertumbuhannya dan merupakan cara remediasi yang paling aman bagi lingkungan karena memanfaatkan tumbuhan sekaligus memelihara keadaan alami lingkungan (Sumiyati, Sutrisno and Wicaksono, 2023).

Kekurangan dari teknik fitoremediasi ini adalah salah satunya kemungkinan akibat yang dapat ditimbulkan apabila tumbuhan telah menyerap polutan tersebut dikonsumsi oleh hewan dan serangga. Selain itu, dampak lainnya adalah terjadinya keracunan bahkan kematian pada hewan atau serangga karena terjadinya akumulasi logam pada hewan-hewan jika mengkonsumsi tanaman yang telah digunakan dalam proses fitoremediasi (Bouty, Herawaty and Mangangka, 2022).

C. Batik

1. Pengertian Batik

Batik merupakan salah satu tradisi budaya bangsa yang berkembang sejak abad ke-9 dan kini telah ditetapkan sebagai Warisan Kemanusiaan untuk Budaya Lisan dan Nonbendawi oleh UNESCO pada tahun 2009 (UNESCO Intangible Cultural Heritage, 2009). Menurut BADAN PENGEMBANGAN DAN PEMBINAAN BAHASA (2016), batik

merupakan kain bergambar yang pembuatannya secara khusus dengan menuliskan atau menerakan malam pada kain, kemudian pengolahannya diproses dengan cara tertentu. Secara bahasa, batik berasal dari bahasa Jawa yang berarti menulis. Sedangkan secara harfiah, batik adalah seni menekan atau menuliskan motif dengan menggunakan cairan lilin atau malam pada kain, sebelum kain tersebut dicelupkan ke dalam warna (Nur *et al.*, 2023). Sehingga batik dapat diartikan sebagai kain bermotif yang dalam pembuatannya menggunakan malam atau lilin yang ditulis pada kain kemudian dicelupkan pada warna.

2. Proses membatik

Di Indonesia terdapat enam teknik membatik yaitu batik canting, batik tie-dye, batik blok, batik tritik (jahitan), batik printing, dan batik conteng. Secara umum ada enam proses membatik yaitu (Nur *et al.*, 2023):

a. Proses persiapan kain

Dalam proses persiapan kain, pewarna akan digunakan jika diperlukan. Kain direndam dalam warna yang diinginkan dan dikeringkan di bawah sinar matahari. Kain dicelupkan dalam larutan kanji untuk memberikan efek halus, lalu dibilas dan dikeringkan di bawah sinar matahari lagi. Proses ini menghasilkan limbah cair yang mengandung serat kain dan pewarna (Nur *et al.*, 2023).

b. Proses aplikasi lilin

Dalam proses aplikasi lilin, lilin dalam bentuk mentah dimasak sampai lilin meleleh. Desain blok yang dipilih, dicelupkan ke dalam lilin

kemudian diaplikasikan pada kain. Proses tersebut dilakukan beberapa kali pada kain sehingga diperoleh cap yang maksimal. Selain menggunakan desain blok, terdapat juga menggunakan canting. Penggunaan canting lebih rumit hal ini dikarenakan pada prosesnya dibutuhkan ketekunan, keterampilan, dan waktu yang lama (Nur *et al.*, 2023).

c. Proses pencelupan desain kain

Proses ini dapat dilakukan secara langsung maupun tidak langsung. Proses langsung dengan cara desain dicat dengan warna yang diinginkan dalam proses pencelupan desain kain. Sedangkan proses secara tidak langsung, kain akan diwarnai sebagian warna dengan warna yang lain. Kain akan dikeringkan terlebih dahulu sebelum proses fiksasi warna berlangsung (Nur *et al.*, 2023).

d. Proses fiksasi warna

Pada proses fiksasi warna, kain direndam dalam larutan natrium silikat selama 3 hingga 24 jam. Kemudian akan direndam dalam air, kemudian dibilas, dan dikeringkan. Pewarna yang umum digunakan adalah pewarna sintetik karena mudah didapat juga menghasilkan warna-warna cerah. Sebagai contoh adalah indigosol, naphtol dan indanthrene yang digunakan oleh industri Batik Trusmi (Apriyani, 2018). Pada proses ini air limbah yang dihasilkan bewarna sangat keruh.

e. Proses penghilangan lilin

Pada proses penghilangan lilin, kain direndam dan direbus selama kurang lebih 1-1,5 jam, dilanjutkan dengan pembilasan dan perendaman selama 18 jam sebelum proses pengeringan produk berlangsung. Proses pencucian dan pembilasan berulang pada kain dilakukan untuk menghilangkan minyak, lilin berlebih, dan sisa pewarna (Daud *et al.*, 2023). Pada proses ini dihasilkan air limbah yang sangat keruh dan juga suhu yang tinggi.

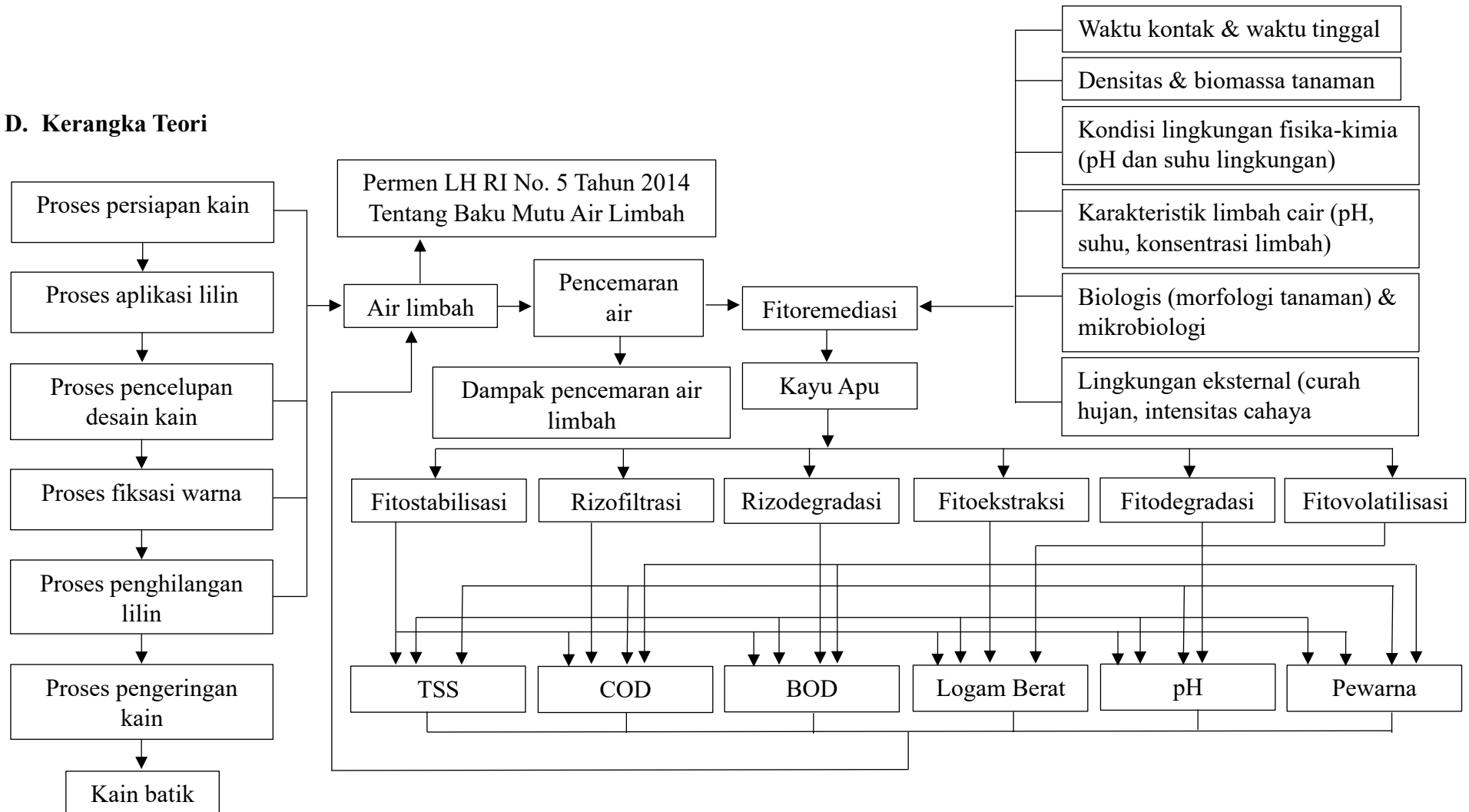
f. Proses pengeringan kain

Pengeringan kain, dapat dilakukan di bawah sinar matahari langsung maupun tidak langsung. Pengeringan di bawah sinar matahari langsung memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihannya adalah kain akan mudah kering dan tidak membutuhkan waktu yang lama. Sedangkan, kelemahannya adalah warna yang ditimbulkan cenderung pucat/luntur sehingga pada proses fiksasi warna perlu dilakukan pengenceran pewarna yang lebih pekat agar diperoleh pewarna sesuai yang diinginkan. Pengeringan di bawah sinar matahari tidak langsung yaitu dengan cara mengeringkan di dalam ruangan dengan penggunaan seng dibagian atapnya. Pengeringan di bawah sinar matahari tidak langsung juga memiliki kelebihan dan kekurangan yang berbanding terbalik dengan pengeringan secara langsung. Akan tetapi pengeringan secara tidak langsung biasanya dilengkapi penggunaan kipas angin sehingga proses pengeringan akan lebih cepat (Nur *et al.*, 2023).

3. Komposisi Air dan Kandungan Air Limbah Batik

Produksi batik menghasilkan limbah cair, limbah gas, dan limbah padat (Apriyani, 2018). Limbah cair industri batik merupakan limbah yang paling banyak dihasilkan dan berpotensi mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Limbah cair ini dihasilkan akibat penggunaan pewarna sintetis dalam industri batik (Apriyani, 2018). Jumlah aliran air limbah yang berasal dari industri sangat bervariasi tergantung dari jenis dan besar-kecilnya industri, pengawasan pada proses industri, derajat penggunaan air, derajat pengolahan air limbah yang ada. Sebagai patokan dapat dipergunakan pertimbangan bahwa 85 – 95% dari jumlah air yang dipergunakan adalah berupa air limbah apabila industri tersebut tidak menggunakan kembali air limbah. Adapun banyaknya pemakaian dari industri batik adalah rata-rata sekitar 200 – 360 m³ (Metcalf dan Edy, 1979) dalam (Sugiharto, 2008).

D. Kerangka Teori



Gambar 2. 1 Kerangka Teori

Sumber: Nur et al, 2023; Dewata & Dahas, 2018; Mangkoedihardjo & Samudro, 2010; Wardhana, 2001; Sugiharto, 2008