

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Limbah Batik

Kota Yogyakarta ditetapkan sebagai Kota Batik Dunia pada 18 Oktober 2014 di Tiongkok. Industri batik dimulai dari budaya kraton yang digunakan untuk mendukung kegiatan yang dilaksanakan di kraton. Sentra industri batik di Kota Yogyakarta terdapat pada daerah kraton, Prawirotaman, Mergangsan, dan Tirtodipuran (Indrayani, 2018). Batik merupakan salah satu budaya atau seni yang dimiliki oleh Indonesia. Batik berdasarkan teknik terbagi menjadi 2 yakni batik tulis yang dilakukan dengan menggunakan tangan membutuhkan waktu kurang lebih 2 hingga 3 bulan dan batik cap yang dihias dengan motif terbentuk oleh cap, dimana teknik batik cap membutuhkan waktu 2 hingga 3 hari (Trixie, 2020).

Industri batik adalah suatu cara penerapan corak di atas kain melalui proses celup dan rintang warna dengan lilin. Batik salah satu produk kebanggaan Indonesia yang umumnya diproduksi oleh usaha kecil menengah (UKM). Peningkatan permintaan batik mendorong adanya peningkatan jumlah UKM batik dan jumlah limbah cair batik yang dihasilkan. UKM batik masih banyak yang melakukan pembuangan limbah cair batik langsung ke lingkungan karena tidak memiliki fasilitas pengolahan limbah yang baik dan kurangnya pengetahuan pengrajin batik dalam mengolah limbah cair batik (Hidayat *et al.*, 2021).

Bahan baku yang digunakan untuk batik adalah malam, pewarna sintetis, dan pewarna alami. Malam batik terbuat dari campuran bahan sintetis dan bukan sintetis sebagai bahan yang digunakan pada proses pembatikan. Pewarna sintetis adalah pewarna buatan yang dibuat dari hidrokarbon, aromatik, dan naftalena yang berasal dari batubara. Pewarna sintetis banyak digunakan karena zat pewarna ini mudah didapatkan dengan komposisi yang tetap, mempunyai warna banyak, pemakaiannya mudah, harga relatif tinggi. Penggunaan zat warna jenis ini menghasilkan limbah yang berpotensi mencemari lingkungan (Apriyani, 2018)

Kegiatan industri batik akan menimbulkan air limbah yang melewati beberapa proses seperti pewarnaan, penghilangan lilin, dan pencucian (Dini *et al.*, 2023). Air bersih yang digunakan untuk pembuatan batik sebanyak 85% berubah menjadi limbah cair batik dengan jumlah yang banyak, warna yang pekat, dan bau yang menyengat. Limbah cair batik memiliki suhu, pH, *Biological Oxygen Demand* (BOD) dan *Total Suspended Solid* (TSS) yang tinggi. Oksigen terlarut yang ada di dalam air akan mengalami penurunan akibat suhu yang tinggi, dimana oksigen terlarut yang mengalami penurunan akan mengakibatkan organisme mati dan limbah organik akan mengalami peningkatan kadar nitrogen menjadi senyawa nitrat sehingga muncul bau busuk (Indrayani, 2018)

Pembuatan batik menggunakan pewarna kimia seperti soda kaustik (NaOH), soda abu (Na₂CO₃), soda kue (NaHCO₃), asam sulfat, sulfit, dan nitrit. Zat warna yang digunakan dalam pembuatan batik yakni asam, basa,

direk, reaktif, naftol, dan bejana. Komponen pengunci warna batik dalam proses fiksasi menggunakan zat kimia seperti tawas, tunjung, boraks, air kapur, kalsium hidroksida, asam sitrat, tembaga sulfat, besi sulfat, dan kalium dikromat (Indrayani, 2018). Pewarna yang digunakan pada industri batik memiliki kandungan logam berat seperti kadmium (Cd), kromium (Cr), timbal (Pb), tembaga (Cu), dan seng (Zn). Pewarna yang mengandung logam berat digunakan sebagai katalis selama proses pembuatan pewarna (Astuti *et al.*, 2023).

Tindakan yang dapat dilakukan untuk mendegradasi kandungan limbah batik yang berbahaya yakni dengan melakukan pengolahan limbah. Pengolahan limbah dapat dilakukan dengan tiga cara yakni secara kimia, fisika, dan biologis. Salah satu metode biologis yang sering digunakan untuk mengolah limbah batik yakni menggunakan tanaman.. Metode pengolahan limbah dengan menggunakan tanaman dikenal dengan fitoremediasi (Oktavia *et al.*, 2016).

B. Fitoremediasi

Fitoremediasi berasal dari bahasa Yunani yaitu *phyto* yang artinya tumbuhan dan *remedium* yang artinya memperbaiki atau menghilangkan kejahatan. Fitoremediasi merupakan sebuah teknologi alternatif yang digunakan untuk menggantikan teknologi pembersihan konvensional yang sering memerlukan biaya dan energi yang tinggi. Fitoremediasi adalah teknologi remediasi in-situ yang memanfaatkan kemampuan tumbuhan hidup. Metode fitoremediasi tidak membutuhkan biaya yang mahal namun memiliki keefektifan untuk mengurangi polutan sangat baik (Sukono *et al.*, 2020)

Fitoremediasi adalah sebuah upaya dengan menggunakan tanaman untuk menghilangkan dan menghancurkan bahan pencemar. Fitoremediasi merupakan alternatif teknologi yang digunakan untuk mengolah limbah cair (Djo *et al.*, 2017). Prinsip fitoremediasi yakni tanaman yang ditanam memiliki kemampuan untuk menyerap, mengimobilisasi, dan mendegradasi bahan pencemar yakni logam berat (Masganti *et al.*, 2019). Kelebihan fitoremediasi yakni proses dapat dilakukan dengan cara insitu dan eksitu, mudah untuk diterapkan, harga relatif murah, serta dapat mereduksi kontaminan dalam jumlah yang besar. Kekurangan fitoremediasi yakni waktu yang diperlukan relatif lama, tergantung keadaan cuaca, dapat menyebabkan terjadinya akumulasi logam berat, dan dapat mempengaruhi keseimbangan rantai makanan pada ekosistem (Zulkoni *et al.*, 2017). Menurut Prasetyo (2021) mekanisme kerja fitoremediasi memiliki beberapa tahapan yang terdiri dari fitoekstraksi, fitodegradasi, fitohidrolik, fitovolatilisasi, rhizofiltrasi, fitostabilisasi, dan rizodegradasi sebagai berikut:

1. Fitoekstraksi

Fitoekstraksi merupakan tahapan tanaman menyerap zat pencemar seperti logam berat. Zat pencemar yang diserap terjadi dari tanah hingga ke bagian tanaman di atas permukaan tanah. Tujuan pembersihan yaitu menghilangkan bagian tanaman yang mengandung kontaminan.

2. Fitodegradasi

Fitodegradasi merupakan tahapan pemecahan senyawa kontaminan. Pemecahan ini akan terjadi melalui proses metabolik dengan enzim. Enzim

yang terlibat pada proses ini adalah *nitrilase*, *nitroductase*, *laccase*, dan *dehalogenase*.

3. Fitohidrolik

Fitohidrolik merupakan tahapan tanaman akan menarik atau memompa air tercemar dalam volume yang besar. Proses ini merupakan bagian dari proses respirasi yang mengakibatkan berkurangnya zat kontaminan atau pencemar.

4. Fitovolatilisasi

Fitovolotilisasi merupakan tahapan penyerapan dan pelepasan kontaminan menuju atmosfer. Proses fitovolotilisasi terjadi melalui proses transpirasi oleh tanaman.

5. Rhizofiltrasi

Rhizofiltrasi merupakan tahapan tanaman untuk membersihkan polutan atau zat pencemar. Proses ini dilakukan oleh tanaman dengan cara penguapan dan penguapan zat kontaminan melalui akar.

6. Fitostabilisasi

Fitostabilisasi merupakan tahapan tanaman akan mengurangi atau mendegradasi zat kontaminan. Proses ini dilakukan melalui penyerapan dan akumulasi untuk mencegah zat kontaminan berpindah ke air.

Tanaman hiperakumulator merupakan tanaman yang memiliki kemampuan mengurangi tingkat pencemaran logam berat pada perairan yang tercemar (Ni'mah dkk., 2019). Karakteristik tumbuhan hiperakumulator yakni tahan dengan kadar logam konsentrasi tinggi pada jaringan akar dan tajuk,

tingkat laju penyerapan tinggi dibanding dengan tanaman lain, dan memiliki kemampuan mentranslokasi serta mengakumulasi unsur logam dari akar ke tajuk dengan laju tinggi. Faktor genetik dan jenis tumbuhan dapat menentukan penyerapan logam pada zona perakaran pada tingkat yang bervariasi. Faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilan fitoremediasi yakni kemampuan daya akumulasi dari berbagai jenis tanaman untuk berbagai jenis polutan dan zat pencemaran, jumlah zat kimia berbahaya, mekanisme akumulasi, dan penggunaan konsentrasi limbah yang tepat dapat menentukan keberhasilan pada proses fitoremediasi (Sari *et al.*, 2019). Faktor lain yang dapat mempengaruhi fitoremediasi adalah pH dan suhu karena dapat mempengaruhi pertumbuhan dan kinerja tanaman dalam proses fitoremediasi (Pratiwi *et al.*, 2022).

C. Melati Air

Melati air adalah tanaman akuatik yang memiliki nama latin *Echinodorus palaefolius*. Melati air dalam bahasa Inggris disebut dengan *Mexican sword plant*. Melati air tersebar di Amerika Tengah, Lembah Missisipi, dan Venezuela. Melati air adalah tanaman air yang memiliki kemampuan mereduksi konsentrasi logam yang tinggi (Rahmaisianti *et al.*, 2022). Tanaman melati air dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Tanaman Melati Air

Adapun klasifikasi dari tanaman melati air sebagai berikut:

Kerajaan : *Plantae*
 Divisi : *Magnoliophyta*
 Kelas : *Liliopsida*
 Bangsa : *Alismatales*
 Suku : *Alismataceae*
 Marga : *Echinodorus*
 Spesies : *Echinodorus palaefolius*

Melati air memiliki jaringan akar tanaman yang memiliki laju penyerapan dan translokasi yang tinggi untuk mengakumulasi logam. Melati air mampu menyerap 96,46% kandungan kadar logam pada limbah cair. Melati air dapat digunakan untuk menurunkan nilai BOD, COD, dan fosfat pada limbah cair (Rahmaisyanti *et al.*, 2022).

Tanaman melati air memiliki sistem perakaran di dalam air yang adaptif atau dapat menyesuaikan kondisi dengan lingkungannya, memiliki akar yang kuat, panjang, dan menjalar sehingga efektif untuk memperluas area tempat mikroorganisme menempel. Melati air memiliki kemampuan untuk menghisap

oksigen dari daun, akar, dan batang yang akan dilepas kembali pada daerah perakaran (Sari *et al.*, 2021). Ciri-ciri melati air yakni memiliki bentuk daun bulat kaku dengan pangkal berlekuk berwarna hijau muda, daun tunggal dengan tangkai bersegi hingga membulat ke arah pangkal daun, panjang tangkai sekitar 50 hingga 100 cm, diameter 1 hingga 3 cm, dan berbintik putih dengan warna dasar daun hijau muda. Daun berbentuk bulat telur, pangkal berlekuk, ujung membulat, tulang daun menjari, permukaan atas tidak halus, tepi daun rata, dan anak tulang daun menyatu dari pangkal hingga ujung daun. Bunga muncul di tengah tangkai daun tersusun seperti untaian payung, bunga berkelopak hijau keras dan berukuran kecil, bermahkota putih tipis, putik serta benang sari memiliki warna kuning (Afiyah *et al.*, 2020)

Melati air memiliki kelebihan dan kekurangan dalam mengurangi kadar logam di dalam air. Kelebihan melati air terdiri dari memiliki kemampuan mengurangi kadar logam berat dalam air, pertumbuhan cepat, dan mampu menyerap kontaminan sehingga dapat meningkatkan kualitas air. Kekurangan melati air terdiri dari membutuhkan waktu yang lama, karena pertumbuhan melati air lambat dan keterbatasan efisiensi untuk mengurangi beberapa jenis pencemaran (Leka *et al.*, 2024).

Morfologi melati air jika terpapar logam berat yang berlebihan akan mengalami perubahan. Perubahan yang terjadi yakni helai daun serta batang berwarna kuning/kecoklatan, daun mengering, dan kondisi akar berwarna coklat pekat. Perubahan warna daun terjadi karena adanya toksisitas yang diakibatkan oleh aktivitas zat pencemar. Pertumbuhan tunas bisa terjadi karena

melati air merupakan tanaman air yang membutuhkan air untuk mendukung pertumbuhannya (Ramadhani *et al.*, 2023).

Kondisi akar pada tanaman ketika fitoremediasi akan mengalami perubahan. Perubahan yang terjadi yakni awalnya akar berwarna putih akan berubah menjadi warna coklat atau sesuai dengan warna limbah. Perubahan ini terjadi karena akar tanaman menyerap zat warna yang terdapat pada limbah, dimana semakin lama waktu kontak tanaman dengan air limbah maka akarnya akan semakin kotor (Jamil *et al.*, 2016).

Melati air mempunyai kemampuan yang sangat baik dalam menyerap dan mengurangi polutan sehingga dapat mereduksi kandungan polutan tersebut. Sistem perakaran melati air terletak di dasar perairan, karakter produksinya fleksibel, panjang, kuat, dan mampu mengembang sehingga efektif dalam memperluas area tempat menempel mikroorganisme yang terdapat pada akar. Faktor lain yang dapat mempengaruhi hasil fitoremediasi melati air yakni tidak melakukan seleksi seperti jumlah daun, jumlah batang, umur tanaman, dan tidak mengkondisikan pH dan suhu (Ramadhani *et al.*, 2023).

Aktivitas fotosintesis pada tanaman melati air dapat mempengaruhi nilai pH. Aktivitas fotosintesis dapat mengakibatkan tanaman melati air mengonsumsi CO₂ yang terdapat pada limbah cair meningkat. Kenaikan nilai pH adalah indikasi yang baik dalam mengolah limbah cair, karena nilai pH dapat mengakibatkan logam berat mengendap akibat perubahan kestabilan karbonat menjadi hidroksida yang membentuk ikatan partikel dengan air

sehingga polutan seperti logam berat mampu dipisahkan dengan air limbah (Rahmaisyanti *et al.*, 2022)

Nilai oksigen terlarut dapat mengalami penurunan selama proses fitoremediasi dengan melati air. Hal ini disebabkan oleh aktivitas respirasi tanaman melati air yang mengonsumsi oksigen di dalam air. Oksigen menjadi energi yang terjadi di dalam tubuh tanaman melati air. Penurunan nilai oksigen terlarut dapat dipengaruhi oleh hasil fotosintesis yang dialami tanaman, dimana aktivitas fotosintesis yang terjadi pada siang hari akan menghasilkan gas oksigen menjadi terlepas ke udara melalui stomata (Rahmaisyanti *et al.*, 2022).

Perubahan pada melati air setelah dilakukan fitoremediasi yakni mengalami gejala klorosis. Gejala klorosis ini terjadi dimana ujung daun mengerut dan warna daun mengalami perubahan menjadi warna kecoklatan. Hal ini diakibatkan karena tanaman mengalami toksisitas akibat pengaruh polutan seperti logam berat (Hidayah, 2020). Perubahan pada batang tanaman melati air dapat terjadi setelah melakukan fitoremediasi. Batang melati air yang awalnya kokoh akan mengalami perubahan menjadi runduk serta layu pada bagian daun (Fatiha *et al.*, 2025).

D. *Ecoenzyme*

Ecoenzyme adalah cairan yang dihasilkan dari fermentasi bahan-bahan organik, air, dan gula. Bahan-bahan organik yang digunakan untuk *ecoenzyme* terdiri dari sisa limbah buah-buahan dan sayuran (Putri *et al.*, 2024). *Ecoenzyme* memiliki banyak manfaat salah satunya pada bidang pertanian,

dimana dapat digunakan sebagai pupuk dan pestisida yang dapat membantu pertumbuhan tanaman. Kandungan *ecoenzyme* terdiri dari air, kulit buah, dan gula dengan perbandingan 10 : 3 : 1. *Ecoenzyme* juga dapat dimanfaatkan pada bidang kesehatan yakni meredakan infeksi atau alergi pada anak dan dapat menyembuhkan luka (Zultaqawa *et al.*, 2023).

Enzim yang terdapat pada *ecoenzyme* yakni enzim amilase dan maltase. Kedua enzim tersebut memiliki peran dalam membantu proses metabolisme tanaman. Kedua enzim tersebut juga berperan untuk menghasilkan energi yang berguna untuk pertumbuhan sel dan pembentukan sel jaringan. *Ecoenzyme* juga memiliki peran untuk meningkatkan penyerapan nutrisi bagi tanaman melalui proses pemecahan bahan organik menjadi unsur hara (Ridwan *et al.*, 2022).

Kulit buah pada *ecoenzyme* memiliki kegunaan untuk membantu pertumbuhan tanaman, karena kulit buah mengandung sebuah enzim. Gula memiliki peran sebagai sumber energi bagi mikroorganisme. Air digunakan sebagai pelarut untuk mengaktifkan mikroorganisme dan enzim. Bahan-bahan yang digunakan bermanfaat untuk menghasilkan enzim alami yang dapat meningkatkan nutrisi bagi tanaman dan mempercepat dekomposisi bahan organik (Surtikanti *et al.*, 2021).

Ecoenzyme memiliki kemampuan menurunkan kadar logam berat sebesar 47-63%. Mikroorganisme di dalam *ecoenzyme* dapat membantu proses dekomposisi, transportasi unsur hara, dan mendegradasi polutan termasuk logam berat. Bakteri yang terdapat setelah dilakukan fermentasi yakni bakteri

asam laktat (*Lactobacillus* dan *Leuconostoc*) dan ragi (*Pichia* dan *Candida*) (Zainudin & Kesumaningwati, 2022).

Bahan *ecoenzyme* yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari kulit jeruk dan kulit nanas. Kulit jeruk memiliki kandungan kaya akan vitamin C dan banyak mengandung pektin. Kulit nanas juga memiliki kandungan yang kaya akan vitamin C dan terdapat enzim bromelin yang dapat ditemukan pada semua jaringan tanaman nanas. *Ecoenzyme* yang terdiri dari bahan kulit jeruk dan nanas akan menghasilkan enzim hidrolitik seperti enzim amilase, protease, dan lipase yang berguna untuk mengurangi kadar air limbah (Gaspersz & Fitrihidajati, 2022).

Bakteri asam laktat adalah mikroorganisme probiotik yang memiliki kemampuan untuk mengurangi biokontaminasi. Ragi memiliki peran sebagai bioremediator untuk mengurangi logam berat seperti Cr, Cu, Zn, dan Cd. Mikroorganisme yang terdapat pada *ecoenzyme* memiliki manfaat seperti membantu proses dekomposisi, transportasi unsur hara, dan mendegradasi polutan tanah (Zainudin & Kesumaningwati, 2022). Menurut Rohyani dkk., tahapan pembuatan *ecoenzyme* terdiri dari:

1. Alat dan bahan yang digunakan dipersiapkan. Alat yang digunakan seperti botol plastik 2 L dan pisau dipersiapkan, lalu bahan seperti gula, kulit buah, dan air dipersiapkan dengan perbandingan 1:3:10.
2. Semua bahan yang telah disiapkan dimasukkan ke dalam botol plastik dengan urutan terdiri dari air terlebih dahulu, gula, dan terakhir kulit buah.

3. Kulit buah dipotong dengan ukuran kecil untuk mempercepat proses pembusukan.
4. Botol ditutup setelah semua bahan telah dimasukkan ke dalam botol plastik.
5. Botol yang telah dimasukkan semua buah disimpan selama 3 bulan dengan suhu ruang.
6. Minggu kedua tutup botol plastik dibuka untuk mengeluarkan gas hasil fermentasi.
7. Minggu ketiga *ecoenzyme* telah dapat digunakan.

Penggunaan *ecoenzyme* memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan menggunakan *ecoenzyme* terdiri dari mengurangi sampah rumah tangga, menghindari penggunaan bahan plastik, menyuburkan tanah, tidak membutuhkan biaya produksi yang besar, dan pembuatan mudah dilakukan (Zultaqawa *et al.*, 2023). Kekurangan *ecoenzyme* terdiri dari membutuhkan waktu fermentasi yang lama dan dapat mengakibatkan tanaman mati karena memiliki kadar asam yang tinggi (Yulistia *et al.*, 2023).

Ciri-ciri *ecoenzyme* yang baik adalah memiliki aroma segar khas fermentasi, nilai pH dibawah 4, fermentasi selama 3 bulan, dan berwarna kecokelatan. *Ecoenzyme* memiliki kandungan enzim seperti protease, lipase, dan amilase. Proses fermentasi akan menghasilkan energi yang dihasilkan oleh mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan ragi. Mikroba yang melakukan fermentasi membutuhkan energi didapatkan dari glukosa. Proses fermentasi yang dilakukan selama 3 bulan akan menghasilkan asam organik seperti asam asetat dan asam laktat (Viza, 2022).

Ecoenzyme memiliki kandungan nutrisi bagi tanaman seperti N, P, K, dan C-organik. Proses fermentasi *ecoenzyme* akan menghasilkan ozon dan oksigen yang setara dengan 10 pohon. Kandungan N pada *ecoenzyme* berfungsi untuk meningkatkan kualitas tanaman dan berwarna lebih hijau. Kandungan P berperan sebagai penyimpan energi untuk aktivitas metabolisme tanaman. Kandungan K berperan sebagai pengaktif enzim dalam proses metabolisme tanaman (Septinar *et al.*, 2024)

Fermentasi bahan organik pada *ecoenzyme* akan menghasilkan aktivitas enzim menghasilkan gas CO₂ dan alkohol. Proses fermentasi dimulai dengan penguraian karbohidrat menjadi asam volatil. Enzim yang terdapat di dalam limbah mampu mengurangi atau menghambat patogen, karena sifat asam akan membantu mengekstraksi enzim dari limbah organik selama proses fermentasi. Pada proses fermentasi glukosa akan diuraikan sehingga menghasilkan asam piruvat. Asam piruvat mengalami penguraian pada keadaan anaerob oleh piruvat dekarboksilase menjadi asetaldehid (Rukmini & Herawati, 2023).

Bakteri *Acetobacter* akan mengubah alkohol menjadi asetaldehid dan air, kemudian asetaldehid akan diubah menjadi asam asetat. Proses *ecoenzyme* terjadi selama 3 bulan. Bulan pertama akan membentuk alkohol sehingga bau alkohol keluar dari larutan *ecoenzyme*. Bulan kedua akan mengeluarkan bau asam yang berasal dari bau asam asetat. Fermentasi *ecoenzyme* memiliki aktivitas mikroba yang tinggi, sehingga mampu digunakan untuk menghambat pertumbuhan mikroba (Rukmini & Herawati, 2023).

Menurut Hemalatha & Visantini (2020), *ecoenzyme* mampu menurunkan kadar limbah dengan parameter pH, TDS, dan BOD. Parameter pH memiliki nilai awal 7,4 namun setelah ditambahkan *ecoenzyme* terjadi penurunan menjadi 7. Parameter TDS memiliki nilai awal 365 ppm, setelah ditambahkan *ecoenzyme* terjadi penurunan menjadi 221,3 ppm. Parameter BOD memiliki nilai awal 80 mg/L, setelah ditambahkan *ecoenzyme* terjadi penurunan menjadi 22,3 mg/L.

E. Logam Berat Zn

Logam berat merupakan salah satu zat kontaminan yang berada di dalam air. Zat kontaminan tersebut tidak dapat dilarutkan dan dihilangkan oleh mikroorganisme di lingkungan sehingga dapat mengendap ke dasar. Logam berat yang ditemukan di dalam air terdiri dari Fe (besi), Ti (titanium), timbal (Pb), seng (Zn), tembaga (Cu), dan kadmium (Cd). Keberadaan logam berat yang terlarut dalam air atau sedimen dapat mengakibatkan dampak buruk pada kondisi airnya. Logam berat yang berada di dalam air mengkhawatirkan karena sifatnya yang toksik sehingga dapat kehidupan biota air yang mampu menyerapnya (Razi *et al.*, 2023).

Logam berat terbagi menjadi dua macam, yakni logam berat esensial dan non esensial. Logam berat esensial seperti Zn, Cu, Fe, Co, Mn, dan Ni dalam jumlah sedikit sangat penting sebagai metabolisme tubuh. Logam berat non esensial seperti Hg, Cd, Pb, dan Cr merupakan logam yang tidak dibutuhkan oleh tubuh dan memiliki sifat yang beracun (Priantoro *et al.*, 2025).

Logam berat yang terdapat di dalam tubuh biota air apabila dikonsumsi dapat berdampak buruk terhadap kesehatan manusia. Bioakumulasi logam berat yang dapat terjadi pada sistem jaringan biota, dimana semakin tinggi konsentrasi logam maka semakin tinggi logam yang terakumulasi di dalam tubuh biota. Keracunan logam berat yang dikonsumsi makhluk hidup akan mengakibatkan kerusakan ginjal dan cacat bawaan. Zat pencemar yang terdapat pada perairan tidak dapat terurai secara alami dan cenderung terakumulasi di dalam perairan dan tubuh organisme (Siringoringo *et al.*, 2022).

Logam berat merupakan unsur kimia yang memiliki nomor atom 22 hingga 92 dan mampu membentuk ikatan kompleks apabila masuk ke dalam tubuh organisme. Sifat logam berat yakni sulit di degradasi, mudah larut dalam air, sedimen, dan dapat terakumulasi di dalam tubuh biota perairan. Keberadaan logam berat di perairan merupakan salah satu ancaman bagi ekosistem yang sekitarnya karena tingkat toksisitasnya tidak dapat diturunkan secara alamiah. Logam berat yang terdapat pada perairan seiring waktu berjalan akan turun dan mengendap pada dasar perairan (Robi *et al.*, 2021).

Polutan logam berat salah satunya yakni Zn terdapat pada perairan. Logam berat Zn yang tercemar pada perairan akan menimbulkan dampak yang berbahaya bagi makhluk hidup. Tingkat kontaminan berbahaya di perairan merupakan salah satu faktor penting karena efek yang ditimbulkan dapat mempengaruhi kesehatan manusia yang memanfaatkannya. Kontaminan kimia dan pestisida pada ikan menimbulkan dampak bahaya untuk kesehatan manusia. Logam berat yang terpapar pada organisme laut seperti ikan, udang,

dan kepiting dapat memberikan efek buruk kepada manusia apabila dikonsumsi (Akbar & Rahayu, 2023).

Logam berat Zn dengan kadar tinggi dapat menghambat kerja mikroorganisme pada perairan. Kadar Zn yang melebihi 10 mg/L akan menghambat mikroorganisme pada sistem pengolahan limbah. Mikroorganisme mampu beradaptasi dengan lingkungan sekitarnya, apabila mikroorganisme telah beradaptasi maka ambang batas logam berat Zn menjadi 50 mg/L. Kadar Zn yang melebihi ambang batas mikroorganisme dapat mengakibatkan toksik sehingga menyebabkan kematian (Wang *et al.*, 2017).

Logam berat yang digunakan pada penelitian ini adalah Zn karena memiliki kadar yang tinggi. Logam berat Zn dapat mengakibatkan keracunan pada makhluk hidup. Keracunan Zn menimbulkan gejala pada manusia seperti muntah, diare, dan mual. Gejala yang dialami apabila tidak ditangani secara cepat dapat menyebabkan kejang, demam, tekanan darah rendah, bahkan kematian (Herbila *et al.*, 2022).

F. Analisis Data SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*)

SPSS adalah sebuah program mengolah data statistik yang paling banyak digunakan dan biasanya digunakan oleh peneliti untuk berbagai keperluan salah satunya menyelesaikan skripsi. Program SPSS dibuat pada tahun 1968 oleh mahasiswa dari *Stanford University*, awalnya SPSS digunakan untuk meneliti ilmu sosial namun seiring perkembangan zaman SPSS mulai digunakan oleh berbagai bidang yakni bisnis, industri, ekonomi, dan lain-lain (Oktofiyani *et al.*, 2016).

SPSS digunakan untuk melihat perbedaan hasil penelitian dan untuk mengetahui pengaruh yang diberikan selama penelitian. Pengolahan data kuantitatif menggunakan SPSS memiliki kelebihan yakni hasil yang didapatkan relatif cepat dan akurat serta penggunaannya sederhana. Nilai signifikansi yang $< 0,05$ menyatakan terdapat pengaruh atau perbedaan nyata perlakuan, sedangkan nilai yang $> 0,05$ menyatakan tidak terdapat pengaruh atau perbedaan nyata perlakuan (Sarassanti *et al.*, 2023).

G. Parameter Kimia

1. BOD (*Biological Oxygen Demand*)

BOD adalah kebutuhan oksigen biologis yang diperlukan oleh mikroorganisme (bakteri) untuk memecah bahan organik secara aerobik. BOD merupakan parameter kimia yang berfungsi untuk mengetahui kualitas perairan. Nilai BOD yang tinggi menandakan oksigen sedikit di dalam perairan. Penyebab tinggi atau rendahnya nilai BOD yakni tergantung dengan kualitas perairan (Daroini & Arisandi, 2020).

Baku mutu limbah cair sebesar 50 mg/L (Rochma & Titah, 2017). Prinsip kerja pengukuran BOD adalah menghitung jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk mengoksidasi polutan melalui reaksi biokimia. Nilai BOD yang semakin tinggi maka mikroorganisme yang terdapat pada air limbah akan semakin banyak sehingga membuat nilai DO turun. Tingginya BOD mencerminkan oksigen terlarut rendah sehingga akan berdampak pada kelangsungan hidup organisme di perairan (Meliana & Dagsy, 2025).

Pencemaran yang sedikit maka akan mempengaruhi nilai BOD menjadi rendah karena oksigen yang dibutuhkan bakteri untuk melarutkan bahan organik sedikit. Senyawa organik yang tinggi di air limbah akan mengakibatkan peningkatan nilai zat padat tersuspensi. Semakin mudah terjadi dekomposisi atau pembusukan maka nilai BOD semakin besar. Nilai BOD yang tinggi akan mengakibatkan biota air mati karena kebutuhan oksigen diserap oleh bakteri untuk mengurai bahan organik (Ramadani *et al.*, 2021).

Aktivitas fotosintesis dapat meningkatkan oksigen terlarut di air limbah. Hal ini disebabkan oleh adanya kondisi aerob yang membantu bakteri aerob bekerja sehingga nilai BOD dapat dikurangi. Tanaman juga berperan sebagai media tumbuh bakteri dan penyedia oksigen sehingga bakteri aerob mampu mendegradasi bahan organik. Oksigen yang dihasilkan melalui tanaman akan berpindah menuju akar untuk mendukung bakteri agar nilai BOD mengalami penurunan. Faktor yang dapat mempengaruhi penurunan nilai BOD yakni konsentrasi limbah cair, waktu, dan jumlah tanaman (Ilmannafian *et al.*, 2020).

2. Derajat Keasaman (pH)

pH adalah derajat keasaman yang digunakan untuk mengetahui tingkat keasaman atau kebasaan yang terdapat pada suatu larutan. Nilai pH yang ideal berada di keadaan yang tidak terlalu asam dan tidak terlalu basa. Nilai pH ideal yakni berada di keadaan netral atau pH 6 hingga 8. Semakin banyak kandungan asam di dalam air maka akan mengakibatkan kesehatan

yang kurang baik karena adanya kandungan zat besi di dalam air dengan nilai pH yang tinggi (Zulius, 2017).

pH memiliki pengaruh terhadap pertumbuhan bakteri karena adanya aktivitas enzim yang dibutuhkan oleh bakteri untuk menunjang pertumbuhan bakteri. pH yang tidak dalam keadaan normal maka akan mengganggu kerja enzim sehingga akhirnya mengganggu pertumbuhan bakteri (Karangan *et al.*, 2019). Nilai pH dapat dipengaruhi oleh beberapa hal yakni adanya kandungan logam yang terdapat di dalam air, suhu, dan aktivitas organisme (Harvyandha *et al.*, 2019).

Menurut Violita *et al.* (2022), nilai pH dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman pada fitoremediasi. Nilai pH yang mengalami kenaikan disebabkan adanya proses fotosintesis. Akibat proses fotosintesis CO₂ akan diserap ke dalam air sehingga kadar oksigen terlarut akan mengakibatkan pH menjadi basa.

Nilai pH yang mengalami kenaikan dapat disebabkan oleh terjadinya pengendapan. Biasanya semakin tinggi nilai pH, maka kestabilan karbonat diubah menjadi hidroksida. Hidroksida dengan partikel yang ada di perairan akan membentuk lumpur sehingga terjadi pengendapan. Faktor lain yang mempengaruhi adalah adanya proses sedimentasi, dimana air dalam keadaan kekurangan oksigen akibat kontaminasi dengan bahan organik sehingga logam berat mengalami pengendapan (Jamil *et al.*, 2016).

H. Parameter Fisika

1. TDS (*Total Dissolved Solid*)

TDS adalah jumlah zat padat yang terlarut berupa senyawa, koloid, dan ion organik yang terdapat di dalam air. Nilai TDS yang semakin tinggi di dalam air maka semakin besar konduktivitas listrik larutan tersebut. Nilai TDS yang melebihi batas ambang dapat mengakibatkan gangguan kesehatan seperti gangguan ginjal, mual, iritasi, dan penyakit paru-paru (Zamora *et al.*, 2015). Nilai TDS dipengaruhi oleh pelapukan batuan, aktivitas domestik, dan kadar limbah. Tingginya nilai TDS dapat mengurangi kejernihan air dan mengakibatkan air menjadi keruh sehingga dapat mempengaruhi penetrasi sinar matahari ke dalam air (Damayanti, 2014).

Bahan-bahan terlarut yang terdapat pada perairan tidak memiliki sifat toksik, namun apabila dalam jumlah yang berlebihan akan meningkatkan nilai kekeruhan. Kekeruhan akan mengganggu penetrasi cahaya matahari sehingga akan mengakibatkan proses fotosintesis pada perairan terganggu. Fitoremediasi menjadi salah satu cara untuk menurunkan nilai TDS yang terlalu tinggi. Penurunan TDS disebabkan oleh adanya aktivitas mikroorganisme dalam media tanam. Mikroorganisme pada akar memiliki kemampuan untuk menguraikan bahan organik maupun bahan anorganik menjadi senyawa yang lebih sederhana, sehingga akar akan menyerap bahan tersebut (Kustiyaningsih & Irawanto, 2020).

2. Suhu

Suhu adalah ukuran satuan panas atau dingin yang terdapat pada air

limbah. Suhu merupakan parameter yang sangat penting karena efek yang ditimbulkan terhadap reaksi kimia, laju reaksi, kehidupan organisme air dan penggunaan air untuk berbagai aktivitas sehari-hari. Suhu sebesar 10°C dapat mengakibatkan kadar oksigen menurun sebesar 10% dan dapat mempengaruhi metabolisme 2 kali lipat. Suhu dapat mempengaruhi nilai DO di dalam air. Aktivitas mikroorganisme dipengaruhi oleh suhu dimana semakin tinggi aktivitas mikroorganisme maka semakin tinggi suhu (Ramadani *et al.*, 2021).

Suhu dapat mempengaruhi proses kimia, fisika, dan biologi saat pengolahan limbah cair dilakukan. Semakin tinggi suhu maka kelarutan oksigen akan berkurang. Peningkatan suhu perairan akan mengakibatkan konsumsi oksigen meningkat sehingga kebutuhan oksigen mengalami peningkatan (Ramadani *et al.*, 2021). Menurut Violita *et al.* (2022), bahwa perubahan suhu dapat disebabkan oleh faktor suhu lingkungan salah satunya perlakuan penelitian dilakukan di luar laboratorium, dimana suhunya tidak stabil cenderung berubah-ubah. Suhu memiliki pengaruh terhadap kemampuan tanaman dalam menyerap logam berat, hal ini terjadi karena suhu dapat mempengaruhi metabolisme dan fotosintesis tanaman. Baku mutu limbah cair batik berdasarkan Peraturan Daerah Istimewa Yogyakarta Nomor 7 Tahun 2016 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Baku Mutu Limbah Cair Batik berdasarkan Peraturan Daerah Istimewa Yogyakarta No. 7 Tahun 2016

Parameter	Proses Basah
BOD	85 mg/L
TDS	2.000 mg/L
Seng (Zn)	5 mg/L
Suhu	$\pm 3^{\circ}\text{C}$ terhadap suhu udara
pH	6,0-9,0

Sumber: Baku Mutu Perda DIY no. 7 Tahun 2016

I. Hipotesis

1. Tanaman melati air, *ecoenzyme*, dan kombinasi keduanya mampu menurunkan kadar pH, BOD, suhu, dan logam berat Zn pada limbah cair batik. Perlakuan tanaman kombinasi *ecoenzyme* merupakan hasil terbaik untuk menurunkan kadar limbah cair batik.
2. Tanaman melati air mengalami klorosis setelah melakukan fitoremediasi.