

TUGAS AKHIR

**Efektivitas Konsorsium Bakteri *Bacillus sp* Dan
Stenotrophomonas maltophilia Terhadap Performa
Wetland Dalam Mendegradasi Logam Berat (Pb Dan Cd)
Pada Air Limbah Tenun**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana (S1) Teknik Lingkungan**



**RAIKHAN MAULANA HAFIZHULLOH
20513273**

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2024**

TUGAS AKHIR

Efektivitas Konsorsium Bakteri *Bacillus sp* Dan *Stenotrophomonas maltophilia* Terhadap Performa Wetland Dalam Mendegradasi Logam Berat (Pb Dan Cd) Pada Air Limbah Tenun

Diajukan kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi persyaratan
Memperoleh Derajat Sarjana Strata Satu (S1) Teknik Lingkungan



Disusun Oleh:

Raikhana Maulana Hafizhulloh
20513273

Disetujui,
Dosen Pembimbing:


Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng.
Tanggal:


Annisa Nur Lathifah, S.Si., M.Biotech.,
M.Agr., Ph.D.
Tanggal: 22.10.2024


Mengetahui,
Ketua Bodi Teknik Lingkungan FTSP UII
Anv Juliani, S.T., M.Sc.(Res.Eng.), Ph.D.
Tanggal:

HALAMAN PENGESAHAN

Efektivitas Konsorsium Bakteri *Bacillus sp* Dan *Stenotrophomonas maltophilia* Terhadap Performa Wetland Dalam Mendegradasi Logam Berat (Pb Dan Cd) Pada Air Limbah Tenun

Telah diterima dan disahkan oleh Tim Penguji

Hari : Selasa
Tanggal : 15 Oktober 2024

Disusun oleh:

Raikhana Maulana Hafizhulloh

20513273

Tim Penguji:

Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng.

Annisa Nur Lathifah, S.Si., M.Biotech., M.Agr., Ph.D.

Dr. Eng. Awaluddin Nurmiyanto, S.T., M.Eng.



(
22.10.2024
)

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini adalah merupakan gagasan, rumusan dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan Dosen Pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Program Program *software* komputer yang digunakan dalam penelitian ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya, bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 16 Juli 2024

Yang membuat pernyataan,


Raikhan Maulana Hafizhulloh

20513273

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Efektivitas Konsorsium Bakteri *Bacillus sp* dan *Stenotrophomonas maltophilia* Terhadap Performa *Wetland* Dalam Mendegradasi Logam Berat (Pb dan Cd) Pada Air Limbah Tenun”**. Penyusunan laporan tugas akhir ini dilakukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program Pendidikan Strata satu (S1) pada Program Pendidikan Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini tidak mungkin terselesaikan tanpa adanya dukungan, bantuan, bimbingan, dan nasihat dari berbagai pihak selama penyusunan Tugas Akhir ini. Maka dari itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmatnya, kesehatan dan kelancaran sehingga penulis bisa mengerjakan dan menyelesaikan penyusunan laporan Tugas Akhir ini dengan lancar.
2. Bapak Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng. selaku dosen yang turut memberikan bimbingan dan dukungan penuh kepada penulis untuk segera menyelesaikan Tugas Akhir ini, baik secara materiil maupun nonmateriil.
3. Ibu Annisa Nur Lathifah, S.Si., M.Biotech., M.Agr., Ph.D. selaku dosen pembimbing 2 atas segala bimbingan, arahan serta saran yang diberikan kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
4. Bapak Dr. Eng. Awaluddin Nurmiyanto, S.T., M.Eng. selaku dosen penguji yang turut memberikan arahan dan masukan terhadap penyusunan laporan tugas akhir.
5. Bapak Sukarsono dan Ibu Ida Ratnaningsih selaku kedua orang tua penulis. Terima kasih atas segala kasih sayang dan pengorbanannya yang diberikan dalam membesarkan dan membimbing penulis sehingga penulis sudah

mencapai di titik ini. Kesuksesan dan segala yang baik yang kedepannya akan penulis dapatkan itu adalah dari dan untuk kalian berdua.

6. Adik tercinta Hirfi, yang selalu memberikan do'a, semangat, dan bantuan kepada penulis sehingga laporan ini selesai.
7. Rekan seperjuangan *wetland* yaitu Mba Lisa, Daru, Nafis, dan Maul. Terima kasih atas bantuan, saran, dan kerjasamanya.
8. Saudara-saudara Nolep Wir sekalian atas canda tawa gilanya, makian, grebegan, dukungan, doa, dan semua yang sudah kita lakukan sangatlah luar biasa. Semoga dimanapun kalian berada dan kapanpun tali persaudaraan gila ini tidak terputus sampai disini. Semangat BUMN-nya, wir.
9. Semua pihak yang telah membantu hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Demikian Tugas Akhir yang penulis buat, semoga dapat bermanfaat bagi penulis, dan pembaca pada umumnya. Dengan segala kerendahan hati penulis memohon maaf kepada semua pihak atas segala kekurangan dan kesalahan yang pernah diperbuat. Semoga Allah *Subhanahu Wa Ta'ala* selalu memberikan rahmat dan karunia-Nya kepada kita semua. Aamiin.

Yogyakarta, 16 Juli 2024

Penulis

Raikhana Maulana Hafizhulloh

20513273

ABSTRACT

RAIKHAN MAULANA HAFIZHULLOH. Effectiveness of *Bacillus* sp and *Stenotrophomonas maltophilia* bacterial consortium on wetland performance in degrading heavy metals (Pb and Cd) in weaving wastewater. Supervised by DR. JONI ALDILLA FAJRI, S.T., M.ENG and ANNISA NUR LATHIFAH, S.SI., M.BIOTECH., M.AGR., PH.D.

Textile wastewater from the woven fabric industry in Troso Village, Jepara Regency has the potential to pollute the environment. Many businesses directly dispose of their waste into rivers and drainage without prior treatment. As a result, unpleasant odors arise, water changes color, and soil is contaminated. This research aims to see how effective the consortium of *Bacillus* sp and *Stenotrophomonas maltophilia* bacteria is on wetland performance in degrading heavy metals in the form of lead (Pb) and cadmium (Cd). Types of wetland used were floating treatment wetland (FTW) and constructed treatment wetland (CTW). The system was operated in batches for 1 month with 25% and 50% effluent variations. The study with 25% wastewater concentration was conducted during day 14 and continued using 50% concentration until day 28. The results showed that FTW without and with bacteria were able to degrade Pb, in order, up to 22% & 50% and Cd up to 27% & 43%. While CTW without and with bacteria were able to degrade Pb, in order, up to 21% & 16% and Cd up to 45% & 24%. This study shows that wetland with a combination of *Vetiveria zizanioides* plant and bacterial consortium has the potential to treat weaving wastewater.

Keywords: Bacterial consortium, Constructed Treatment Wetland, Floating Treatment Wetland, Weaving wastewater, *Vetiveria zizanioides*

ABSTRAK

RAIKHAN MAULANA HAFIZHULLOH. Efektivitas Konsorsium bakteri *Bacillus* sp dan *Stenotrophomonas maltophilia* Terhadap Performa *Wetland* Dalam Mendegradasi Logam Berat (Pb dan Cd) Pada Air Limbah Tenun. Dibimbing oleh DR. JONI ALDILLA FAJRI, S.T., M.ENG dan ANNISA NUR LATHIFAH, S.SI., M.BIOTECH., M.AGR., PH.D.

Air limbah tekstil yang bersumber dari industri kain tenun di Desa Troso, Kabupaten Jepara memiliki potensi dalam mencemari lingkungan. Banyak pelaku usaha langsung membuang limbahnya ke sungai maupun drainase tanpa diolah terlebih dahulu. Akibatnya timbul bau tidak sedap, air berubah warna, dan tanah mengalami kontaminasi. Penelitian kali ini bertujuan untuk melihat seberapa efektif konsorsium bakteri *Bacillus* sp dan *Stenotrophomonas maltophilia* terhadap performa *wetland* dalam mendegradasi logam berat berupa timbal (Pb) dan kadmium (Cd). Jenis *wetland* yang digunakan berupa *floating treatment wetland* (FTW) dan *constructed treatment wetland* (CTW). Sistem dioperasikan secara *batch* selama 1 bulan dengan variasi limbah 25% dan 50%. Pengolahan dengan konsentrasi air limbah 25% dilakukan sampai hari ke-14 dan dilanjutkan menggunakan konsentrasi 50% sampai hari ke-28. Hasil penelitian menunjukkan bahwa baik FTW maupun CTW mampu mendegradasi logam Pb (0,17-1,08 mg/L) dan Cd (0,04-0,12 mg/L). Pada FTW, penambahan konsorsium bakteri dapat meningkatkan efektivitas degradasi Pb dan Cd pada reaktor F3 (18-50%) dibandingkan reaktor F2 (19-27%) yang tanpa bakteri. Namun pada reaktor CTW, penambahan konsorsium bakteri pada reaktor C3 (0-24%) tidak terlalu berpengaruh jika dibandingkan dengan reaktor C2 (0-45%) yang tanpa bakteri.

Kata kunci: Air limbah tenun, *Constructed Treatment Wetland*, *Floating Treatment Wetland*, Konsorsium bakteri, *Vetiveria zizanioides*

DAFTAR ISI

LEMBAR PERNYATAAN	i
KATA PENGANTAR	ii
ABSTRACT.....	iv
ABSTRAK	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Limbah Cair Tenun	5
2.2 Bioremediasi	6
2.3 Fitoremediasi.....	7
2.3.1 Fitoremediasi FTW (<i>Floating Treatment Wetland</i>).....	7
2.3.2 Fitoremediasi CTW (<i>Constructed Treatment Wetland</i>).....	9
2.4 Tanaman <i>Vetiveria zizanioides</i>	9
BAB III METODE PENELITIAN.....	13
3.1 Waktu dan Lokasi	13
3.2 Preparasi Air Limbah	14

3.3	Kulturasasi Bakteri	15
3.4	Reaktor Wetland.....	16
3.4.1	Persiapan Pembuatan Reaktor FTW (<i>Floating Treatment Wetland</i>)...	16
3.4.2	Pembuatan Reaktor CTW (<i>Constructed Treatment Wetland</i>)	17
3.4.3	Aklimatisasi Tanaman <i>Vetiveria zizanioides</i>	18
3.4.4	Running Reaktor <i>Wetland</i>	19
3.5	Sampling Reaktor dan Pengujian.....	19
3.6	Pertumbuhan Tanaman.....	20
3.7	Analisis Data	20
3.8	Analisis Statistik.....	21
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		22
4.1	Karakteristik Limbah	22
4.2	Karakteristik Bakteri Endofit	22
4.3	Pengaruh Variasi Beban Air Limbah Terhadap Parameter Logam Berat Pada Reaktor <i>Floating Treatment Wetland</i> (FTW).....	24
4.4	Pengaruh Variasi Beban Air Limbah Terhadap Parameter Logam Berat Pada Reaktor <i>Constructed Treatment Wetland</i> (CTW)	27
4.5	Reduksi Parameter Logam Berat Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd).....	29
4.6	Persentase <i>Removal</i> Logam Berat Pada <i>Floating Treatment Wetland</i> (FTW).....	30
4.7	Persentase <i>Removal</i> Logam Berat Pada <i>Constructed Treatment Wetland</i> (CTW)	31
4.8	Pertumbuhan dan Kematian Tanaman	32
4.9	Derajat Keasaman (pH) Air	36
BAB V KESIMPULAN.....		39
5.1	Kesimpulan	39

5.2 Saran.....	40
DAFTAR PUSTAKA	41
LAMPIRAN.....	46

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Daftar Penelitian Terdahulu	11
Tabel 3. 1 Variasi Perlakuan Reaktor FTW	17
Tabel 3. 2 Variasi Perlakuan Reaktor CTW.....	18
Tabel 4. 1 Karakteristik Logam Berat Pb dan Cd Limbah Tenun	22
Tabel 4. 2 Hasil Uji Morfologi.....	23
Tabel 4. 3 Nilai Reduksi Logam Pb dan Cd (mg/L)	29
Tabel 4. 4 Efisiensi <i>Removal</i> Logam Timbal (Pb) dan Logam Kadmium (Cd) Pada <i>Floating Treatment Wetland</i> (FTW).....	30
Tabel 4. 5 Efisiensi <i>Removal</i> Logam Timbal (Pb) dan Logam Kadmium (Cd) Pada <i>Constructed Treatment Wetland</i> (CTW).....	32
Tabel 4. 6 Tingkat Kematian Tanaman <i>Vetiveria zizanioides</i>	34

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Kerangka Berpikir	3
Gambar 2. 1 Proses Pembuatan Kain Tenun	5
Gambar 2. 2 Ilustrasi <i>Floating Wetland</i>	8
Gambar 2. 3 Ilustrasi <i>Constructed Wetland</i>	9
Gambar 3. 1 Diagram Alir Perencanaan	13
Gambar 3. 2 Proses Pembuatan Limbah Buatan	14
Gambar 3. 3 Tahapan Kulturasasi Bakteri	16
Gambar 3. 4 Proses Kulturasasi Bakteri	16
Gambar 3. 5 Desain Reaktor FTW	17
Gambar 3. 6 Desain Reaktor CTW	18
Gambar 3. 7 Kondisi Aklimatisasi Tanaman Vetiver (a), Hari Ke-0 Aklimatisasi (b), Hari Ke-90 Aklimatisasi	19
Gambar 4. 1 Konsentrasi Logam Pb Pada FTW. K (Kontrol Air Limbah), F2 (Tanaman + Air Limbah), F3 (Tanaman + Air Limbah + Bakteri), 25% dan 50% (Konsentrasi Limbah)	24
Gambar 4. 2 Konsentrasi Logam Cd Pada FTW. K (Kontrol Air Limbah), F2 (Tanaman + Air Limbah), F3 (Tanaman + Air Limbah + Bakteri), 25% dan 50% (Konsentrasi Limbah)	26
Gambar 4. 3 Konsentrasi Logam Pb Pada CTW. K (Kontrol Air Limbah), C2 (Tanaman + Air Limbah), C3 (Tanaman + Air Limbah + Bakteri), 25% dan 50% (Konsentrasi Limbah)	27
Gambar 4. 4 Konsentrasi Logam Cd Pada CTW. K (Kontrol Air Limbah), C2 (Tanaman + Air Limbah), C3 (Tanaman + Air Limbah + Bakteri), 25% dan 50% (Konsentrasi Limbah)	28
Gambar 4. 5 Tinggi Tanaman Vetiver Pada Hari Ke-0 dan 28	33
Gambar 4. 6 Kondisi Tanaman Vetiver Pada Hari Ke-0	35
Gambar 4. 7 Kondisi Tanaman Vetiver Pada Hari Ke-28	35
Gambar 4. 8 Panjang Akar Tanaman Vetiver Pada Hari Ke-0 dan 28	36
Gambar 4. 9 Hasil Pengukuran pH Pada Reaktor FTW	37

Gambar 4. 10 Hasil Pengukuran pH Pada Reaktor CTW	37
---	----

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di Indonesia, Industri Tekstil merupakan salah satu industri yang penting dalam pembangunan ekonomi dan penyerapan tenaga kerja. Kementerian Perindustrian menjadikan Industri Tekstil dan Produk Tekstil sebagai salah satu prioritas pengembangan dalam tujuan *Making* Indonesia 4.0 yang bertujuan meningkatkan daya saing industri tekstil dalam negeri yang memanfaatkan teknologi dan digitalisasi (Kemenperin). Salah satu dampak negatif semakin majunya sektor perindustrian adalah semakin banyak juga limbah hasil dari sektor perindustrian tersebut. Air limbah yang dihasilkan dapat mencemari air dan tanah karena kandungan berbagai bahan kimia seperti logam berat, zat warna, deterjen, garam, dan lain-lain. Bahan-bahan kimia tersebut dapat mempengaruhi kesehatan karena sifatnya beracun, mutagenik, dan karsinogenik. Dampak lainnya adalah dapat menyebabkan degradasi lingkungan dimana permukaan air yang tercemar dapat mengganggu penetrasi cahaya sehingga kondisi oksigen dalam air buruk dan juga dapat menurunkan nilai estetika pada lingkungan (Hussain dkk., 2018).

Industri tenun ikat di Desa Troso, terletak di Kabupaten Jepara, Jawa Tengah, terkenal akan kerajinan tenun tradisionalnya. Desa ini memiliki sejarah panjang dalam produksi kain, khususnya kain tenun ikat dan lurik. Di Desa Troso, Jepara, terdapat sekitar 448 pengrajin tenun yang aktif dalam industri tenun. Selain itu, ada juga 26 pengusaha yang terlibat dalam usaha tenun di daerah tersebut (Anisah & Na'am, 2021). Dimana industri tenun di desa tersebut terus melakukan produksi setiap harinya namun masih banyak pelaku usaha yang tidak melakukan pengolahan pada limbah yang mereka hasilkan sebelum dibuang ke lingkungan. Semakin banyak produk yang dihasilkan, maka semakin banyak pula air limbah yang dihasilkan. Pencemaran dari air limbah tenun Troso dapat dilihat dari warna air sungai yang berubah sesuai dengan warna air limbah yang dibuang yang dialirkan pada daerah pertemuan antara saluran pembuangan dan saluran air sungai. Selain warna yang berubah, air sungai juga menimbulkan bau yang

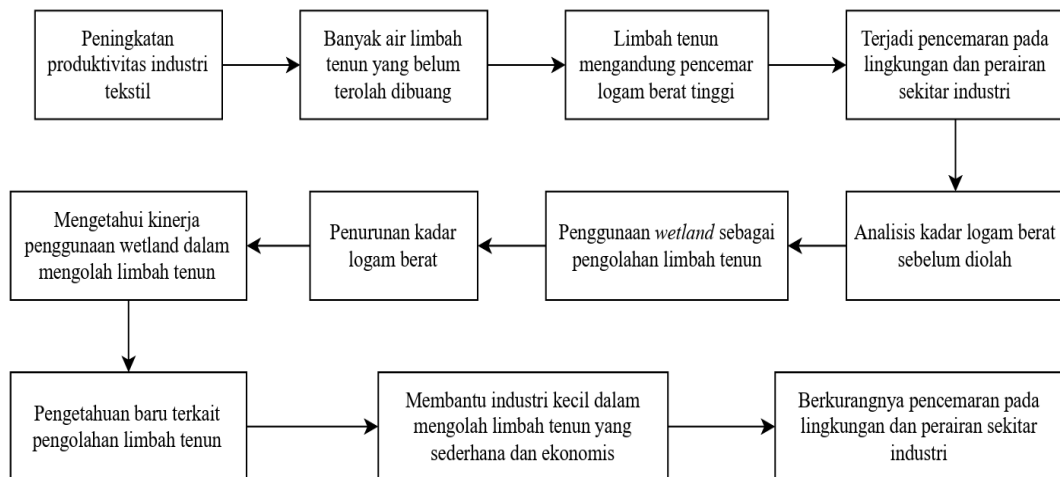
menyengat dan juga keruh. Karena pencemaran terjadi melalui saluran air ataupun selokan, menyebabkan air limbah tersebut mengalir sampai area persawahan warga. Salah satu pencemar yang terkandung dan dapat berdampak buruk ialah berupa logam berat (Nurun, 2020). Logam berat cukup berbahaya bagi kesehatan apabila dikonsumsi secara terus menerus sehingga terakumulasi berlebihan di dalam tubuh manusia (Fadirubun dkk., n.d.). Logam berat juga memberikan dampak buruk terhadap tanaman yaitu dengan cara menghambat pertumbuhan dan aktivitas metabolisme pada tanaman (Nagajyoti dkk., 2010).

Salah satu cara yang dapat diterapkan dalam mengolah limbah cair tenun adalah pengolahan secara biologis menggunakan sistem *wetland* (*floating* dan *constructed treatment wetland*) dengan inokulasi bakteri endofit (Tara dkk., 2019). Banyaknya kandungan racun pada limbah tekstil dapat berdampak pada terhambatnya pertumbuhan tanaman dan perkembangan mikroba sehingga berpengaruh pada efisiensi pengolahan. Dikarenakan hal tersebut, maka bakteri pendegradasi kontaminan diaplikasikan pada tanaman di sistem *wetland*. Dalam *treatment* ini akan digunakan konsorsium bakteri *Bacillus sp* dan *Stenotrophomonas maltophilia*. Penambahan bakteri endofit pada reaktor *wetland* mampu meningkatkan reduksi terhadap pencemar yang terkandung dalam air limbah tenun (Fajri dkk., 2024).

Bacillus cereus dan *Bacillus spizizenii* merupakan jenis bakteri *Bacillus*. Bakteri *Bacillus sp* merupakan salah satu bakteri yang berkemampuan untuk bioremediasi, termasuk meremediasi limbah tekstil. Penelitian yang dilakukan oleh Rizka Oktavia dan kolaboratornya menunjukkan bahwa *Bacillus sp* dapat mengurangi kadar logam berat, seperti Pb, pada tekstil (Oktavia & Sumardi, 2022). Selain *Bacillus* terdapat juga *Stenotrophomonas maltophilia* yang merupakan bakteri gram negatif yang dapat juga digunakan untuk bioremediasi. Dalam bioremediasi, *Stenotrophomonas maltophilia* memiliki potensi yang multifaset (Mukherjee & Roy, 2016). Dalam sebuah penelitian disebutkan bahwa konsorsium bakteri endofit alami yang berbeda tidak menjadikan fungsinya terhambat, namun justru hal tersebut memberikan dampak positif terhadap pertumbuhan tanaman dan degradasi polutan. Konsorsium bakteri-bakteri tersebut mengurangi tekanan pada

air limbah tersebut dengan cara meningkatkan biomassa tanaman di akar dan daun (Fajri dkk., 2024).

Berdasarkan permasalahan diatas maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai kemampuan konsorsium *Bacillus sp* (*Bacillus cereus* dan *Bacillus spizizenii*) dan *Stenotrophomonas maltophilia* dalam meningkatkan performa *wetland* dengan tanaman *Vetiveria zizanioides* untuk mendegradasi logam berat (Pb dan Cd) yang terkandung dalam air limbah tenun.



Gambar 1. 1 Kerangka Berpikir

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Bagaimana efektivitas konsorsium bakteri *Bacillus cereus*, *Bacillus spizizenii*, dan *Stenotrophomonas malthopilia* dalam meningkatkan performa *wetland* untuk degradasi logam berat Pb dan Cd pada limbah cair tenun?
- 2) Seberapa besar penurunan konsentrasi logam berat Pb dan Cd dalam air limbah setelah perlakuan dengan *wetland* yang diinokulasi dengan konsorsium bakteri?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian kali ini bertujuan untuk:

- 1) Menganalisis efektivitas konsorsium bakteri *Bacillus cereus*, *Bacillus spizizenii*, dan *Stenotrophomonas maltophilia* dalam meningkatkan performa *wetland* untuk mendegradasi logam berat Pb dan Cd yang terkandung dalam air limbah tenun.
- 2) Mengukur penurunan konsentrasi logam berat Pb dan Cd dalam air limbah tenun setelah diolah.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan diperoleh dari penelitian ini adalah:

- 1) Sebagai studi literatur tentang efisiensi pengolahan air limbah tenun dengan sistem *wetland* yang ditambahkan konsorsium bakteri *Bacillus cereus*, *Bacillus spizizenii*, dan *Stenotrophomonas malthopilia*.
- 2) Sebagai referensi untuk menentukan alternatif pengolahan limbah cair tenun yang sederhana dan ekonomis pada industri tenun Troso sehingga pencemaran lingkungan dapat dikendalikan.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini yaitu:

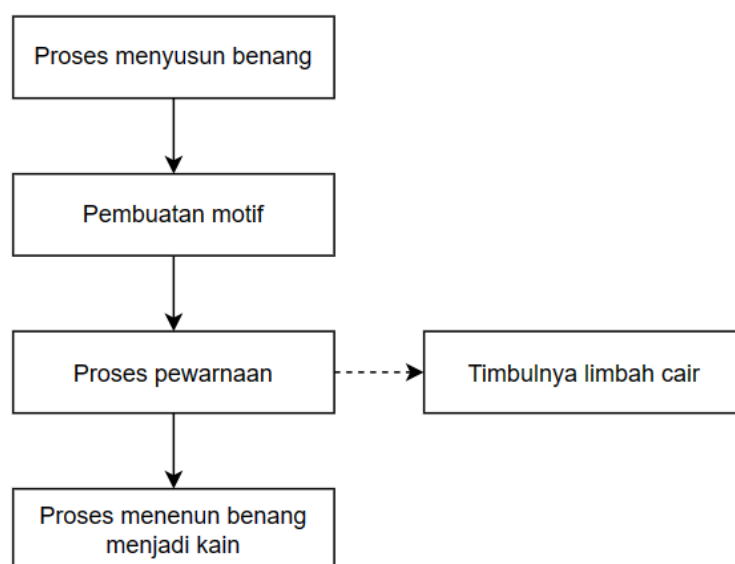
- 1) Aklimatisasi tanaman *Vetiveria zizanioides* untuk diterapkan pada *wetland*.
- 2) Kulturasasi konsorsium bakteri *Bacillus cereus*, *Bacillus spizizenii*, dan *Stenotrophomonas malthopilia*.
- 3) Pengolahan limbah yang digunakan yaitu sistem *floating treatment wetland* dan *constructed treatment wetland*.
- 4) Parameter yang diuji setiap sampling adalah logam berat (Pb dan Cd).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah Cair Tenun

Secara garis besar berikut proses pembuatan kain tenun (Sa'dah, 2020):



Gambar 2. 1 Proses Pembuatan Kain Tenun

Untuk tahap pertama yaitu proses ngeteng, proses menyusun benang pada alat segi empat yang disebut plangkan. Setelah tersusun selanjutnya adalah pembuatan motif. Motif digambarkan pada plangkan dengan tinta, kemudian plangkan diikat dengan tali rafia sesuai motif yang diinginkan. Tahap selanjutnya adalah pewarnaan pada benang yang sudah diikat sebelumnya yang biasa disebut proses menter. Pada proses ini, sebagian besar pengrajin menggunakan pewarna sintetis seperti naptol, direct, sulfur, dan lain-lain. Proses menter dilakukan dengan cara mencelupkan benang ke dalam pewarna. Pencelupan dilakukan berulang tergantung sesuai warna yang diinginkan. Pada proses inilah limbah cair tenun yang berpotensi mencemari dihasilkan. Setelah proses menter selesai, benang dijemur dengan posisi tali rafia sudah dilepas ikatannya. Proses terakhir yaitu proses menenun benang dengan alat tenun bukan mesin (ATBM) menjadi kain.

Limbah cair pencelupan zat warna reaktif memiliki pH yang tinggi (>9), berwarna tua dan COD yang cukup tinggi. Digunakannya alkali untuk proses fiksasi warna, menyebabkan pH larutan menjadi tinggi. Sedangkan warna limbah yang masih pekat disebabkan karena tidak semua zat yang digunakan dapat berdisosiasi dengan serat. Sedangkan untuk COD yang tinggi disebabkan karena terkandungnya zat-zat organik dalam limbah tersebut (Hidayat, 2014).

Beberapa jenis zat warna yang biasa digunakan dalam Industri Tenun yaitu naftol, direct, sulfur, dan lain-lain. Pewarna naftol merupakan zat warna yang dapat dipakai mencelup warna secara cepat dan memiliki warna yang kuat. Zat ini juga tidak larut dalam air dan terdiri dari dua komponen dasar berupa golongan naftol AS (*Anilic acid*) (naftol itu sendiri) dan komponen basa naftol (biasa disebut amina aromatik promoter), dan komponen pembangkit warna (golongan diazonium yang biasa disebut garam). Jika sudah dilarutkan, kedua komponen tersebut bergabung menjadi senyawa berwarna. Zat warna naftol tidak larut dalam air karena senyawa yang terjadi mempunyai gugus azo (Laksono, 2012).

Pewarna yang paling penting dan dominan (80%) digunakan dalam industri tekstil yaitu pewarna azo. Adanya pewarna azo ini dan produknya yang terdegradasi di reservoir alami atau buatan dapat menyebabkan pencemaran lingkungan dan bahkan bisa berdampak pada kesehatan (Tara dkk., 2019).

2.2 Bioremediasi

Bioremediasi merupakan teknik remediasi pengendalian pencemaran yang memanfaatkan proses biologi didalamnya. Bioremediasi memanfaatkan mikroorganisme, seperti bakteri, fungi, alga, dan enzim-enzim yang dihasilkan oleh mikroba tersebut, untuk menurunkan kadar polutan pada air limbah atau media lainnya yang dapat tercemar dengan cara menumbuhkan mikroorganisme tersebut pada polutan (Priadi dkk., 2012). Terdapat beberapa mikroorganisme yang mampu melakukan remediasi logam berat diantaranya ada khamir (*Saccharomyces cerevisiae*), bakteri (*Bacillus sp*, *Pseudomonas sp*, dan *Escherichia coli*), dan kapang (*Penicillium chrysogenum*, *Rhizopus stolonifer*, dan *Aspergillus oryzae*) (Suhendrayatna, 2001).

Bioremediasi memiliki berbagai macam keunggulan jika dibandingkan dengan metode remediasi yang lain. Beberapa diantaranya yaitu sederhana (tidak membutuhkan banyak alat), biaya dikeluarkan minim, dan tentunya ramah lingkungan (Deshmukh dkk., 2016). Salah satu mikroorganisme yang dapat dimanfaatkan untuk untuk bioremediasi adalah jamur. Dalam meremediasi, jamur melibatkan mekanisme reduksinya, baik secara ekstraseluler maupun intraseluler (Kurniawan & Ekowati, 2016). Salah satu jenis jamur yang memiliki kemampuan remediasi yaitu *Aspergillus fumigatus*. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Jalili dkk, menyebutkan bahwa *Aspergillus fumigatus* mampu mendegradasi kandungan logam berat pada tanah yang tercemar oleh air limbah tambang emas. Asam oksalat yang dihasilkan *Aspergillus fumigatus* mampu menyisihkan timbal (Pb) pada tanah yang terkontaminasi tersebut (Seh-Bardan dkk., 2012).

2.3 Fitoremediasi

Fitoremediasi berasal dari kata dalam bahasa Inggris *phytoremediation*. Kata fitoremediasi sendiri tersusun dari dua kata, *phyto* berasal dari bahasa Yunani *phyton* yang berarti tumbuhan dan *remediation* berasal dari kata latin *remedium* yang berarti menyembuhkan, dalam hal ini berarti menyelesaikan masalah dengan cara memperbaiki kesalahan atau kekurangan yang ada. Dengan demikian fitoremediasi dapat didefinisikan sebagai pemanfaatan tanaman untuk menghilangkan, memindahkan, menstabilkan, atau menghancurkan bahan pencemar baik itu senyawa organik maupun anorganik (Purakayastha & Chonkar, 2010). Fitoremediasi merupakan upaya dekontaminasi limbah dan masalah pencemaran lingkungan lain dengan menggunakan tanaman baik secara ex situ maupun in situ (Morel dkk., 2006).

2.3.1 Fitoremediasi FTW (*Floating Treatment Wetland*)

Merupakan sistem remediasi oleh makrofita akuatik yang ditanam pada rakit apung buatan sehingga memungkinkan tanaman untuk tetap tumbuh secara hidroponik pada badan air. Akar tanaman menggantung pada zona pelagik di kolom air dan terdapat penyaringan secara mekanis maupun biologis. Penyaringan mekanis terjadi melalui proses fisik dari akar tanaman seperti sedimentasi, filtrasi,

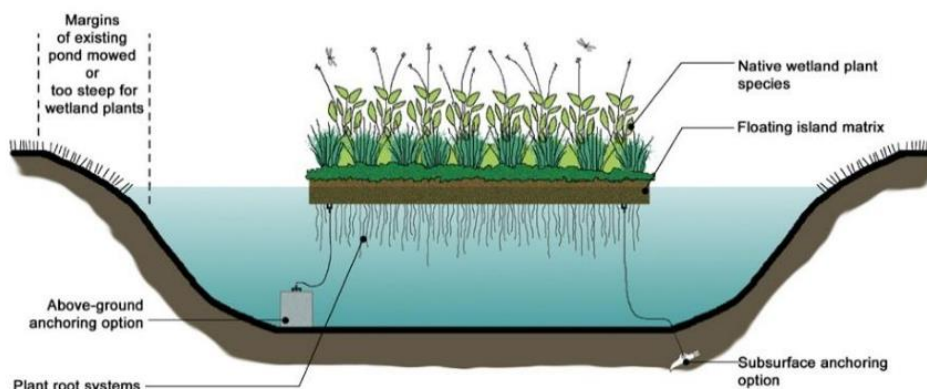
dan lain-lain. Sedangkan untuk penyaringan biologis yaitu hasil degradasi bakteri dan penyerapan tanaman (Tara dkk., 2019).

Berikut mekanisme reduksi polutan oleh FTW:

- 1) Proses serapan biologis, yaitu proses tanaman langsung menyerap polutan terutama nutrisi dari air.
- 2) Mikroorganisme tumbuh di rakit apung dan akar tanaman yang mengkonsumsi bahan organik di air melalui dekomposisi mikroba.
- 3) Sistem akar menyaring sedimen dan polutan (David J, n.d.).

Secara tradisional FTW digunakan untuk mengolah berbagai air limbah (air hujan, limbah domestik, dan lain-lain). Namun, sistem ini memiliki beberapa kelemahan seperti stabilitas yang kurang dan kurang efisien dalam proses pemurnian. Kurang efisiensinya bakteri dalam degradasi senyawa organik beracun dan lemahnya metabolisme tanaman merupakan masalah utama bagi FTW. Agar efisiensi pengolahan FTW meningkat, terdapat tambahan pendekatan yang direkomendasikan seperti inokulasi *plant growth promotig* (PGP) dan bakteri pendegradasi polutan (Tara dkk., 2019).

Kelebihan dari FTW yaitu makrofit dapat menghambat dari tumbuhnya alga karena perebutan dalam peroleh nutrisi dan sinar matahari yang menguntungkan dari segi estetika, biomassa tersedia dalam jumlah besar untuk kebutuhan bioenergi, biaya perawatan rendah dan konsumsi energi juga rendah, serta dapat meremediasi polutan secara in situ tanpa butuh lahan yang luas (Rehman dkk., 2019).



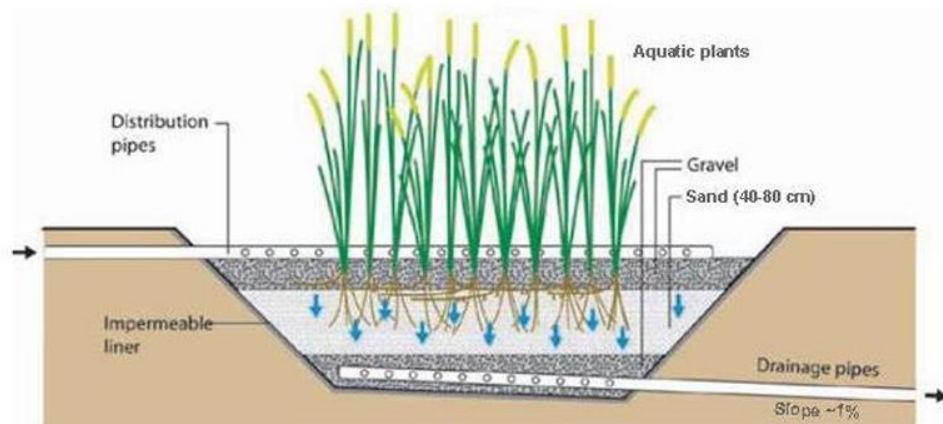
Gambar 2. 2 Ilustrasi *Floating Wetland*

(Sumber: Texas Community Watershed Partners)

2.3.2 Fitoremediasi CTW (*Constructed Treatment Wetland*)

Constructed wetland merupakan lahan basah buatan yang dirancang untuk mengolah air limbah, *grey water*, limpasan air hujan, dan bahkan air limbah industri. Menurut Tempura dkk, *Constructed wetland* adalah suatu rekayasa lahan basah yang digunakan sebagai sistem pengolahan limbah yang melibatkan peran tanaman, tanah, air, dan mikroba (Tempura dkk., 2007).

CTW dirancang dengan perlakuan yang terus dipantau, misalnya dengan adanya pengaturan *Hydraulic Retention Time* (HRT) dan *Hydraulic Loading Rate* (HLR) (Vymazal, 2005) agar dapat menentukan dimensinya. Dari segi hidraulis, CTW dibagi menjadi CTW permukaan air bebas dan aliran air di bawah permukaan. Sedangkan berdasarkan pola alirannya, CTW dapat digolongkan menjadi arah aliran vertikal dan horizontal (Vymazal, 2005).



Gambar 2. 3 Ilustrasi *Constructed Wetland*

(Sumber: Morel and Diener, 2006)

2.4 Tanaman *Vetiveria zizanioides*

Vetiveria zizanioides merupakan tanaman yang memiliki sistem akar berlimpah, kompleks, panjang, dan vertikal. Akarnya tumbuh nyaris lurus ke bawah dengan sedikit akar permukaan lateral, sehingga dalam pertumbuhannya tidak mengganggu tanaman lain. Pada tahun pertama, *Vetiveria zizanioides* dapat tumbuh

3-4 meter. Terdapat penelitian menyebutkan bahwa setelah 36 bulan akar dapat tumbuh hingga 7 meter (Lavania, 2004). Kekuatan tarik akar bisa mencapai 75 dan 85 Mpa. Memiliki daun tipis disertai tepi yang tajam, dan mampu tumbuh hingga 2 meter. Ketika dewasa, rumput *Vetiveria zizanioides* memiliki daun yang kuat dan kasar sehingga mampu membuatnya di tempat yang sama selama bertahun-tahun (Oshunsanya & Aliku, 2017).

Beberapa karakteristik yang membuat tanaman *Vetiveria zizanioides* menjadi tanaman ideal untuk mengolah limbah:

- a) Batangnya kaku dan tegak yang membentuk pagar apabila ditanam berdekatan. Sehingga mampu bertahan terhadap aliran air yang relatif dalam dan bisa juga sebagai perangkap sedimen.
- b) Resistensi tinggi terhadap penyakit.
- c) Toleransi tinggi terhadap keasaman, alkalinitas, salinitas, sodisitas, dan magnesium.
- d) Toleransi tinggi terhadap Al, Mn, As, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, Se, dan Zn di dalam tanah.
- e) Toleransi tinggi terhadap herbisida dan pestisida.
- f) Efisiensi tinggi dalam menyerap N, P, Hg, Cd, dan Pb terlarut dalam air tercemar.
- g) Kemampuan untuk tumbuh kembali dengan sangat cepat setelah dipengaruhi oleh kondisi buruk dan pertumbuhan tanaman membaik setelah amelioran tanah ditambahkan (Siagian, 2018).

2.4 Bakteri Endofit

Untuk berkembang dengan baik, tanaman bekerjasama dengan ekosistem disekitarnya. Salah satunya adalah bekerjasama dengan mikroorganisme seperti bakteri ataupun fungi yang menjadikan tanaman inangnya dan beri perlindungan baik faktor biotik maupun abiotik yang bisa mengancam tanaman (Miliute dkk., 2015). Untuk bakteri yang hidup di dalam inangnya disebut sebagai bakteri epifit. Biasanya dapat ditemukan pada permukaan tanaman ataupun daun. Sedangkan untuk bakteri yang hidup dan berkembang di dalam tanaman disebut sebagai bakteri

endofit. Bakteri endofit, atau biasa juga disebut *rhizobacteria*, memiliki bisa memacu pertumbuhan pada tanaman (Hardoim dkk., 2015).

Tahap awal dari bakteri endofit dimulai ketika bakteri menginfeksi tanaman dan membuat hubungan yang mutualistik yang erat dengan tanaman. Hal tersebut membuat saat ini bakteri endofit disebut sebagai bakteri yang diisolasi dari jaringan tanaman yang disterilkan permukaannya (Santoyo dkk., 2016). Tanaman digunakannya oleh bakteri sebagai tempat tinggal dan perlindungan agar tidak dapat diganggu oleh bakteri yang lain terutama bakteri epifit. Sebagian besar siklus hidup bakteri endofit adalah bifasik. Maksudnya adalah tempat tinggal atau hidupnya dapat berpindah antara tanaman dan tanah (Afzal dkk., 2019).

2.5 Penelitian Terdahulu

Berikut paparan penelitian terdahulu tentang penggunaan bakteri pada pengolahan air limbah tekstil dengan sistem *wetland*.

Tabel 2. 1 Daftar Penelitian Terdahulu

Penulis	Bakteri	Fitoremediasi	Performa
Dino Rinaldi, 2019	<i>Pseudomonas sp</i>	<i>Continuous Wetland</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ammonia: 2,69-95,02% • COD: 20,55-65,38% • BOD: 1-59,60%
Fauzan Anwaruddin, 2019	<i>Pseudomonas sp</i>	<i>Continuous Wetland</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Oil and grease</i>: 73-98% • <i>Total petroleum hydrocarbon (TPH)</i>: 77-99% • <i>Oil content</i>: 67-94%
Fajri dkk, 2024	Bakteri belum teridentifikasi dan	<i>Vetiveria sp.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • COD: 74% • Warna: 91%

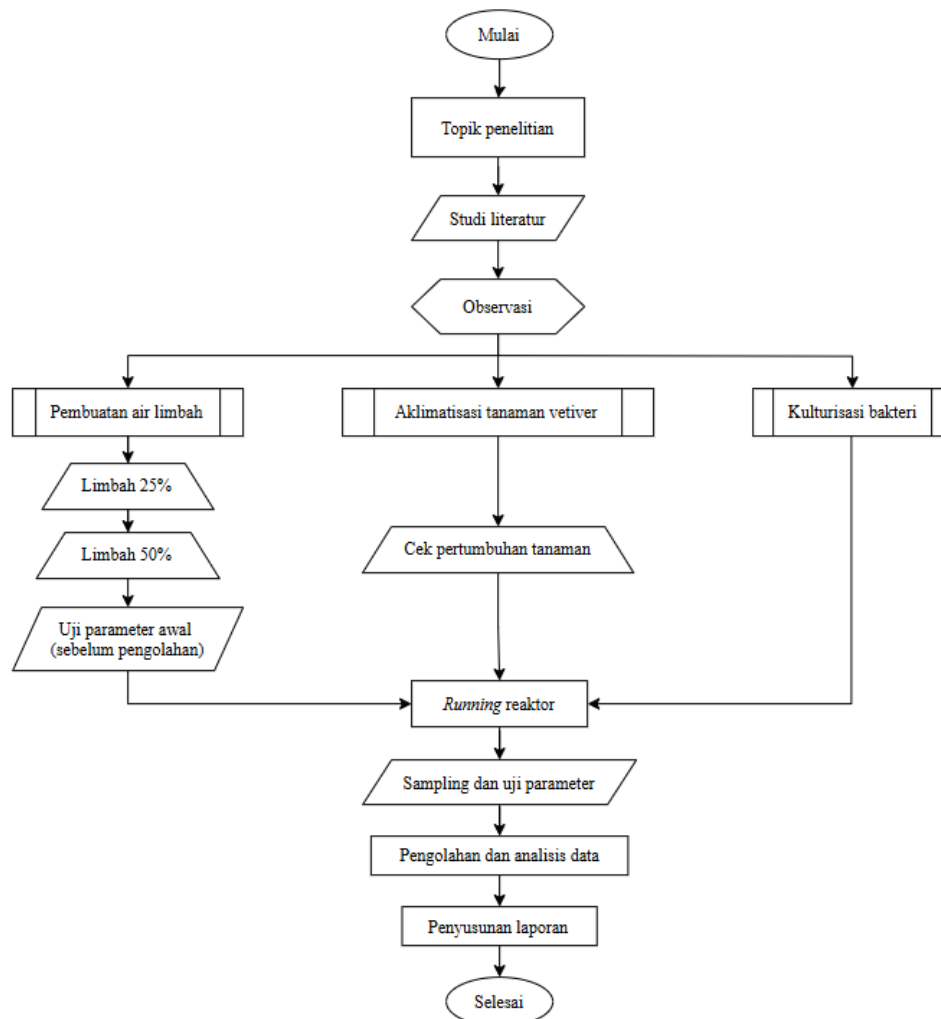
	terisolasi tanaman: - <i>Oryza sativa</i> - <i>Colocasia esculenta</i> - <i>Alternanthera philoxeroides</i>		<ul style="list-style-type: none"> • Pb: 52% • Cd: 33%
--	--	--	--

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi

Penelitian dikerjakan di *Green House* FTSP dan pengujian dilakukan Laboratorium Kualitas Lingkungan, Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia. Penelitian dimulai dari bulan Januari 2024 hingga Agustus 2024. Alur pengerjaan penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Perencanaan

3.2 Preparasi Air Limbah

Sampel yang digunakan berasal dari air limbah tenun. Akan digunakan air limbah dengan konsentrasi 25% dan 50%. Sampel merupakan limbah buatan (*artificial*) yang dibuat mirip seperti aslinya di pabrik baik dari segi bahan maupun cara pembuatan dan akan dibuat di laboratorium.

Limbah buatan dibuat dengan memakai 2 jenis warna, merah dan hitam. Limbah dibuat mengacu pada proses pewarnaan pembuatan tenun di tempat aslinya, Troso. Langkah pembuatan sebagai berikut:

- Pewarna naptol hitam
 - 1) BO (30 g) + ASG (20 g) + kostik (25 g) dilarutkan dengan air panas sebanyak 12,5 L.
 - 2) Garam biru (100 g) dilarutkan dengan air sebanyak 12,5 L.
 - 3) Larutan pada langkah 1 dan 2 disatukan dalam wadah yang sama dan diaduk hingga tercampur rata.
- Pewarna naptol merah
 - 1) BO (50 g) + kostik (25 g) dilarutkan dengan air panas sebanyak 12,5 L.
 - 2) Garam R (100 g) dilarutkan dengan air sebanyak 12,5 L.
 - 3) Larutan pada langkah 1 dan 2 disatukan dalam wadah yang sama dan diaduk hingga tercampur rata.

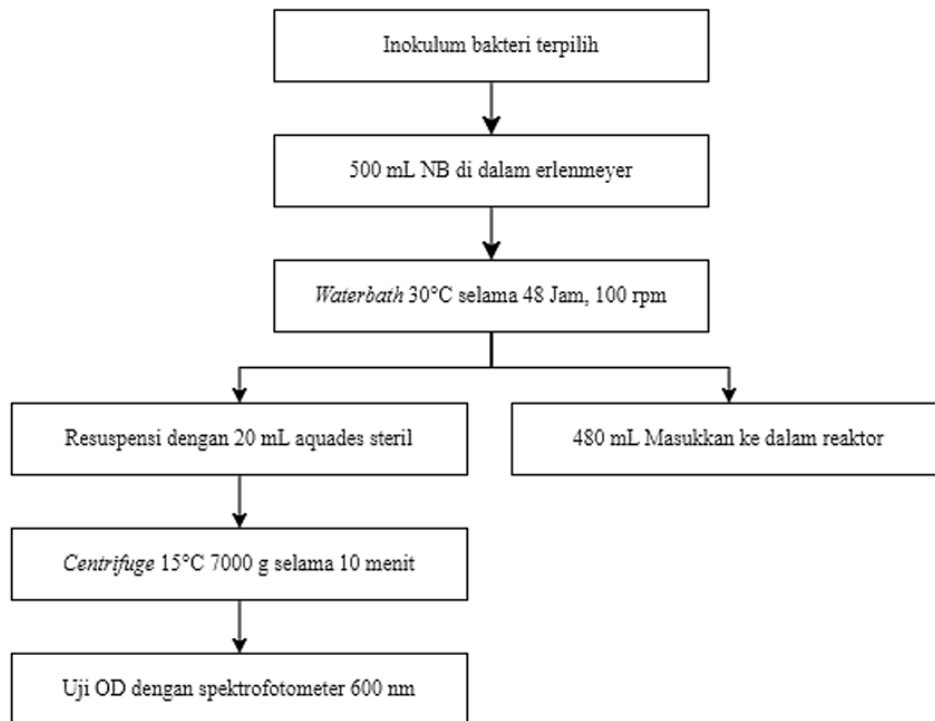


Gambar 3. 2 Proses Pembuatan Limbah Buatan

Untuk limbah dengan konsentrasi 25%, limbah cair yang telah dibuat diencerkan menggunakan air kran dengan perbandingan limbah dan air sebesar 1:3. Sedangkan untuk limbah dengan konsentrasi 50%, limbah yang telah dibuat diencerkan menggunakan limbah konsentrasi 25% yang telah diolah sebelumnya dengan perbandingan limbah dan air sebesar 1:1.

3.3 Kulturasasi Bakteri

Bakteri yang digunakan merupakan bakteri yang telah teridentifikasi pada penelitian sebelumnya. Konsorsium bakteri *Bacillus cereus*, *Bacillus spizizenii*, dan *Stenotrophomonas maltophilia*, bakteri yang tumbuh dan menghasilkan *single colony* pada penelitian sebelumnya, dimasukkan pada 500 mL *Nutrient Broth* (NB) di dalam erlenmeyer. Setelah terisi dengan media kultur dan bakteri, erlenmeyer dimasukkan ke dalam *waterbath* selama 48 jam dengan suhu 30°C dan kecepatan pengadukan sebesar 100 rpm. Kultur bakteri disisihkan sebanyak 20 mL untuk dilakukan pengukuran *Optical Density* (OD) pada spektrofotometer dengan panjang gelombang 600 nm. Sisanya, kultur bakteri dimasukkan ke dalam reaktor sebanyak 10% dari total air limbah yang ada di dalam reaktor (Fajri dkk, 2024). Langkah-langkah pemindahan bakteri dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Tahapan Kulturasasi Bakteri



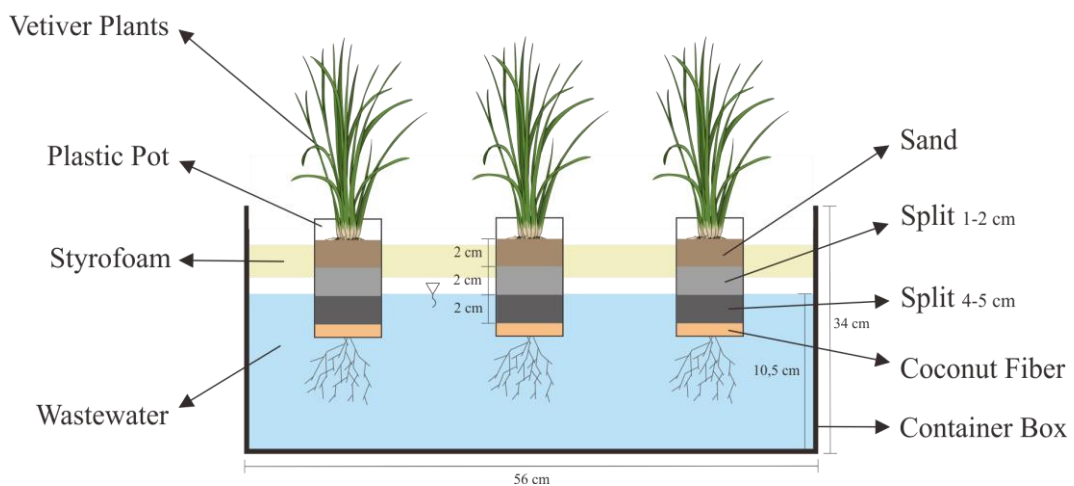
Gambar 3. 4 Proses Kulturasasi Bakteri

3.4 Reaktor Wetland

3.4.1 Pembuatan Reaktor FTW (*Floating Treatment Wetland*)

Pada sistem pengolahan FTW menggunakan tanaman *Vetiveria zizanioides* (Akar wangi). FTW dibuat menggunakan box kontainer 55 L dan juga styrofoam

sebagai media untuk mengapungkan tanaman. Masing-masing reaktor terdiri dari 6 pot dengan diameter 10 cm yang mana masing-masing pot berisi 3-4 batang *Vetiveria zizanioides*. Media yang digunakan dalam pot secara berurutan dari bawah ke atas adalah sabut kelapa, kerikil (2 cm), batu kecil (2 cm), dan pasir (2 cm). Air limbah dimasukkan ke dalam reaktor sejumlah 20 liter.



Gambar 3. 5 Desain Reaktor FTW

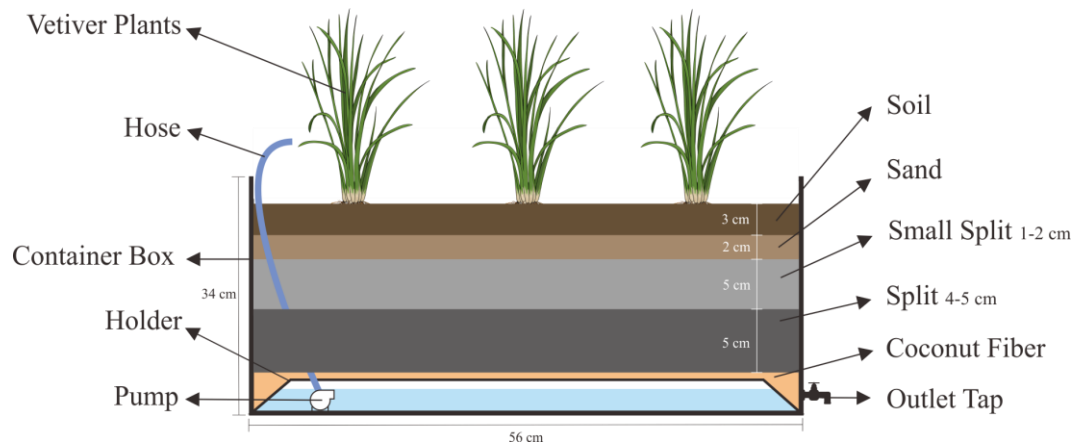
Tabel 3. 1 Variasi Perlakuan Reaktor FTW

Reaktor	Kode	Jumlah	Volume
Kontrol Air Limbah	K	3	20 Liter
Tanaman + Air Bersih	F1	3	
Tanaman + Air Limbah	F2	3	
Tanaman + Air Limbah + Bakteri	F3	3	

3.4.2 Pembuatan Reaktor CTW (*Constructed Treatment Wetland*)

Pada sistem pengolahan *Constructed Treatment Wetland* (CTW) menggunakan jenis tanaman dan box kontainer yang sama. Masing-masing reaktor terdiri dari 9 rumpun yang setiap rumpun terdapat 3-4 batang *Vetiveria zizanioides*. Terdapat pompa pada dasar box kontainer yang fungsinya agar air bersirkulasi terus

menerus di dalam reaktor. Bagian dasar dilapisi dengan sabut kelapa, kemudian disusun di atasnya kerikil (5 cm), batu kecil (5 cm), pasir (2 cm), dan tanah sudah disterilisasi (3 cm). Air limbah dimasukkan ke dalam reaktor sejumlah 15 liter.



Gambar 3. 6 Desain Reaktor CTW

Tabel 3. 2 Variasi Perlakuan Reaktor CTW

Reaktor	Kode	Jumlah	Volume
Kontrol Air Limbah	K	3	20 Liter
Kontrol Tanaman + Air Bersih	C1	3	15 Liter
Kontrol Tanaman + Air Limbah	C2	3	
Kontrol Tanaman + Air Limbah + Bakteri	C3	3	

3.4.3 Aklimatisasi Tanaman *Vetiveria zizanioides*

Setelah reaktor dibuat, selanjutnya adalah melakukan aklimatisasi. Aklimatisasi dilakukan agar tanaman dapat beradaptasi pada media dan lingkungan baru. Aklimatisasi dilakukan ± 3 bulan pasca ditanam. Pada awal ditanam, daun dipotong hingga menyisakan ± 15 cm. Semua tanaman diperlakukan sama. Untuk seminggu sekali pada 1 bulan pertama selalu rutin diberi pupuk. Aklimatisasi dimulai dari 11 Januari 2024 hingga 1 Mei 2024. Proses aklimatisasi dirasa cukup ketika batang dan daun sudah mulai hijau dan juga akar mulai lebat sehingga dianggap tanaman sudah mampu beradaptasi dengan lingkungan barunya.



(a)



(b)

Gambar 3. 7 Kondisi Aklimatisasi Tanaman Vetiver (a), Hari Ke-0 Aklimatisasi (b), Hari Ke-90 Aklimatisasi

3.4.4 Running Reaktor *Wetland*

Reaktor dijalankan setelah proses kulturisasi bakteri dan aklimatisasi selesai. Reaktor dijalankan selama 2 bulan, 6 Mei 2024 – 6 Juli 2024. Running reaktor menggunakan 3 jenis bakteri yang telah dipilih pada uji OD sebelumnya dengan jumlah 500 mL/ jenis bakteri. Sebelum dan sesudah reaktor dijalankan, dilakukan evaluasi pertumbuhan bakteri menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC) untuk menentukan jumlah bakteri yang akan diinokulasi pada reaktor. Pengujian TPC awal dilaksanakan pada hari ke-0, sedangkan pengujian akhir dilaksanakan pada hari ke-60 dengan sampel diambil dari kultur bakteri.

3.5 Sampling Reaktor dan Pengujian

Sampel yang diujikan berupa air limbah dari tenun dan tanaman *Vetiveria zizanioides* yang digunakan dalam pengolahan secara *wetland*. Untuk sampel air limbah dilakukan 2 kali pengujian, pada saat awal dan akhir selama proses pengolahan air limbah di reaktor pada masing-masing konsentrasi (25% dan 50%). Sedangkan untuk sampel tanaman, pengujian hanya dilakukan 1 kali, pada akhir saja. Pengujian kandungan logam berat berupa Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) pada sampel air limbah dilakukan dengan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA)-

nyala yang mengacu pada SNI 6989.-84:2019.

3.6 Pengukuran Tanaman

Untuk *constructed treatment wetland*, batang diukur pada masa akhir aklimatisasi (pertumbuhan) dan hari ke-14 pada setiap konsentrasi limbah. Pengukuran dengan cara mengukur tinggi tanaman yang rendah, sedang, dan tinggi pada masing-masing rumpun. Tanaman diukur dari pangkal batang hingga ujung daun. Sedangkan untuk *floating treatment wetland*, tidak hanya tinggi tanaman, tapi juga panjang akar pada tiap rumpun. Untuk pengukuran panjang akar, pengukuran dilakukan dengan cara mengukur panjang akar yang rendah, sedang, dan tinggi pada masing-masing rumpun. Akar diukur dari pangkal akar hingga ujung. Untuk pengukuran batang, sama metodenya dengan *constructed treatment wetland*.

3.7 Analisis Data

Tingkat efisiensi dari masing-masing jenis pengolahan dalam mengolah limbah cair tenun dapat dianalisa dari persentase removal hasil pengujian parameter dan kondisi tanaman sebagai data pendukung. Data hasil pengujian diolah dalam bentuk grafik untuk melihat tren dari proses pengolahan. Hasil pengujian juga dapat dibandingkan dengan peraturan yang berlaku tentang baku mutu air limbah tekstil.

Analisa menggunakan alat SSA untuk mengetahui kandungan logam berat berupa timbal (Pb) dan kadmium (Cd). SSA digunakan pada sampel berupa air limbah tenun dan juga tanaman dari *wetland* yang digunakan untuk pengolahan dengan pengujian dibuat dengan gelombang yang berbeda menyesuaikan jenis logam berat yang akan dianalisis. Perhitungan konsentrasinya adalah sebagai berikut:

$$\text{Konsentrasi logam (mg/L)} = C \times fp$$

Keterangan:

C = Konsentrasi dari hasil pengukuran (mg/L)

Fp = Faktor pengenceran

3.8 Analisis Statistik

Analisis statistik menggunakan IBM SPSS Statistics 25 untuk mengidentifikasi perbedaan signifikan ($p < 0,05$). Pengujian dilakukan untuk mencari perbedaan yang signifikan antara hari dan perlakuan sampel dan dianalisis menggunakan ANNOVA dan Uji Tukey untuk menentukan perlakuan mana yang memiliki perbedaan.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Limbah

Sebelum reaktor dijalankan, perlu diketahui lebih dahulu karakteristik dari limbah yang akan diolah dengan tujuan agar mengetahui kadar awal dari logam Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd). Reaktor dijalankan dengan sistem *batch* selama 2-4 minggu. Konsentrasi limbah cair tenun yang digunakan bervariasi mulai dari 25% hingga 50%. Penggunaan beberapa konsentrasi tersebut mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh (Ningsih & Tangahu, 2016) menunjukkan bahwa pada air limbah dengan konsentrasi 10% dan 20% tidak berpengaruh pada kematian tanaman. Kematian tanaman terlihat pada konsentrasi limbah 30%, 40%, dan 50% dengan masing-masing persentase kematian secara urut yaitu 25%, 50%, dan 87,5%. Untuk konsentrasi 25% dan 50% diolah masing-masing 14 hari. Data hasil pengujian awal karakteristik limbah cair tenun masing-masing konsentrasi dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Karakteristik Logam Berat Pb dan Cd Limbah Tenun

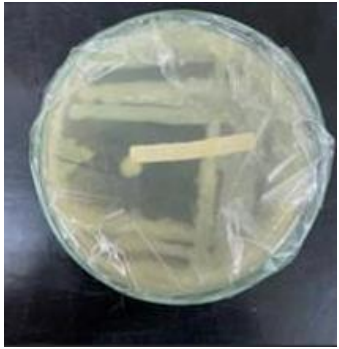
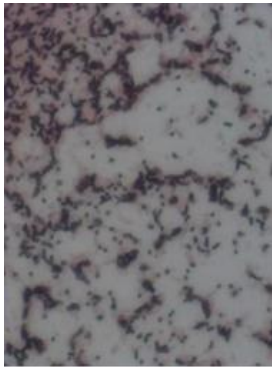
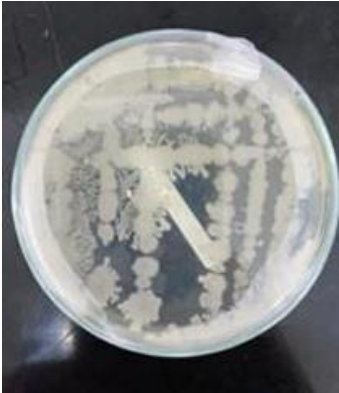
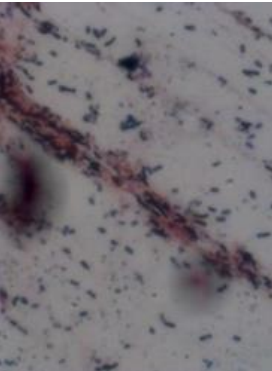
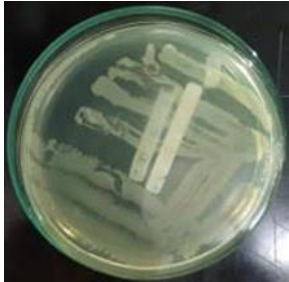
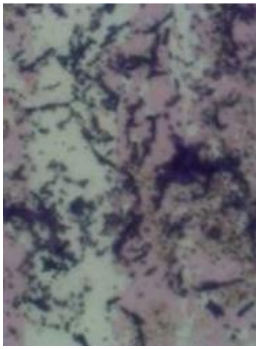
Konsentrasi Limbah Tenun	Logam (mg/L)	
	Pb	Cd
25%	1,20 ± 0,39	0,39 ± 0,00
50%	0,61 ± 0,00	0,14 ± 0,07

4.2 Karakteristik Bakteri Endofit

Bakteri yang digunakan merupakan bakteri yang telah teridentifikasi pada penelitian terdahulu (Fajri dkk, 2024) yang terdiri dari bakteri *Bacillus cereus*, *Bacillus spizizenii*, dan *Stenotrophomonas maltophilia* dengan kode Sb-6, Sc-1, dan Ra-4. Hasil uji morfologi bakteri-bakteri tersebut dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil Uji Morfologi

Sumber: Fajri dkk, 2024

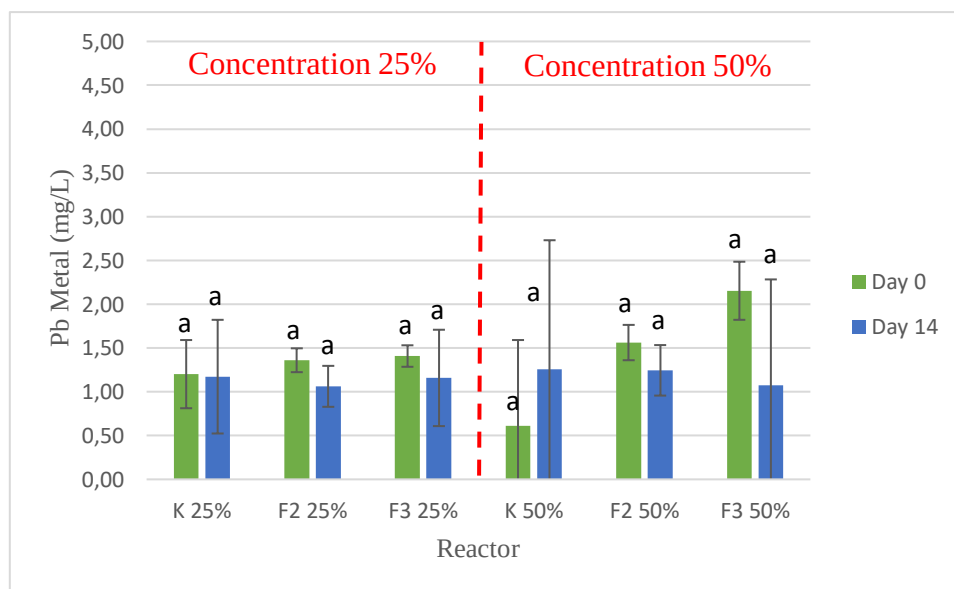
Bacteria			Morfology	
Sb-6			Shape Margin Elevation Size Apperance Optical Property Texture Pigmentation Cell Shape Gram Property	Irregular Entire Convex Punctiform Glistening Transparant Smooth Non pigmented (off white) Bacillus Positive
Sc-1			Shape Margin Elevation Size Apperance Optical Property Texture Pigmentation Cell Shape Gram Property	Filamentous Rhizod Flat Moderate Dull Translucent Rough Non pigmented (off white) Bacillus Positive
Ra-4			Shape Margin Elevation Size Apperance Optical Property Texture Pigmentation Cell Shape Gram Property	Irregular Lobate Flat Moderate Dull Transparant Smooth Non pigmented (off white) Coccus Negative

Bakteri *Bacillus cereus* (Sb-6) mampu menurunkan kadar warna dan *Chemical Oxygen Demand* (COD) secara berurutan sebesar 65% dan 79%. Bakteri *Bacillus*

spizizenii (Sc-1) juga mampu menurunkan kadar COD dan warna (Amanda, 2021). Untuk bakteri *Stenotrophomonas malthophilia* (Ra-4) dipilih karena juga mampu menurunkan COD hingga 87% (Nuzula, 2021). Bakteri-bakteri tersebut terbukti mampu menurunkan kandungan warna dan COD yang terkandung dalam limbah cair tenun dan bahkan memiliki nilai *removal* yang cukup tinggi. Dikarenakan hal tersebut, penelitian kali ini menggunakan ketiga bakteri tersebut dengan harapan mendapat persentase *removal* yang sama besarnya pada reaktor *Floating Treatment Wetland* (FTW) dan *Constructed Treatment Wetland* (CTW) dengan penambahan parameter yang diuji berupa amonia (NH₃), *Total Suspended Solid* (TSS), dan logam berat (Pb & Cd).

4.3 Pengaruh Variasi Beban Air Limbah Terhadap Parameter Logam Berat Pada Reaktor *Floating Treatment Wetland* (FTW)

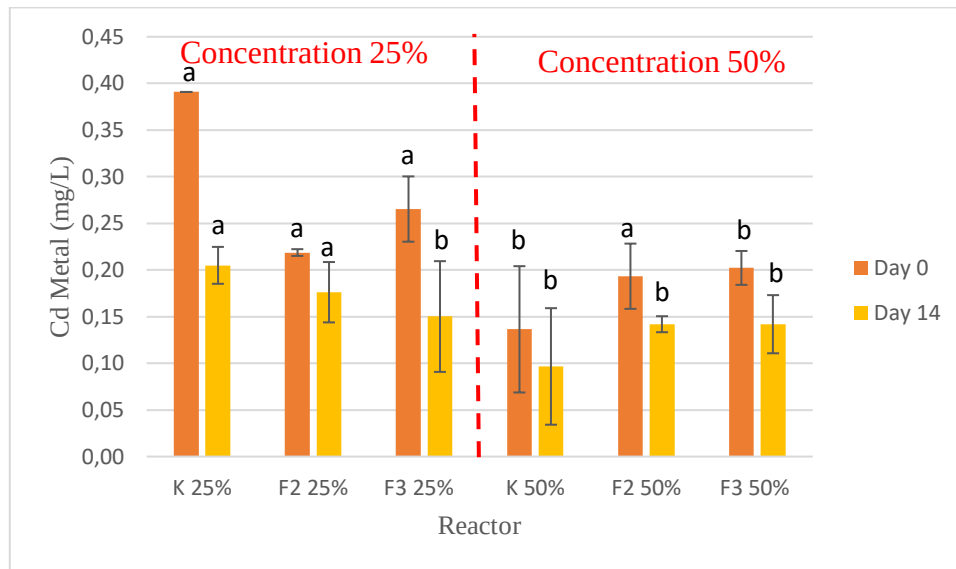
Data hasil pengujian kadar Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) pada limbah cair tenun konsentrasi 25% dan 50% selama pengolahan masing-masing 14 hari dapat dilihat pada gambar 4.1 dan 4.2.



Gambar 4. 1 Konsentrasi Logam Pb Pada FTW. K (Kontrol Air Limbah), F2 (Tanaman + Air Limbah), F3 (Tanaman + Air Limbah + Bakteri), 25% dan 50% (Konsentrasi Limbah). Setiap nilai rerata dari tiga kali pengulangan, dan rata-rata yang disertakan oleh notasi huruf yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan yang signifikan.

Selama proses pengolahan, kadar Pb pada FTW mengalami penurunan pada semua reaktor dengan air limbah konsentrasi 25% maupun 50%, dan serapan logam berat meningkat pada reaktor FTW dengan bakteri endofit alami. Mekanisme bakteri endofit untuk meremediasi logam berat bervariasi dan dekat dengan hubungan mutualistik dengan inang. Umumnya, endofit mengkolonisasi permukaan akar tanaman dan masuk ke dalam jaringan sambil mempertahankan kehidupannya sendiri dengan nutrisi yang tersedia di lingkungan sekitarnya (Afzal dkk., 2019; Hardoim dkk., 2008; Prakash, 2021). Kolonisasi endofit yang menempel pada akar memungkinkan sintesis hormon pertumbuhan pada tanaman, sehingga meningkatkan kemampuan tanaman untuk mereduksi logam berat (Etesami dkk., 2015). Namun, untuk reaktor K 25% juga mengalami penurunan kadar Pb sedangkan untuk K 50% justru mengalami kenaikan. Reaktor K 25% mengalami penurunan disebabkan karena pengujian dilakukan pada ruangan semi tertutup, aman dari hujan, selama 14 hari. Akibatnya logam berat pada perairan akan mengendap dan diserap oleh organisme yang terdapat pada perairan (Sarjono, 2009). Sedangkan untuk reaktor K 50% mengalami kenaikan disebabkan karena akumulasi dari konsentrasi limbah sebelumnya. Penggunaan wadah yang sama menyebabkan kadar Pb terakumulasi pada K 50% meningkat.

Baku mutu mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah dengan kadar Pb maksimum sebesar 1 mg/L. Hasil akhir menunjukkan bahwa hanya pada reaktor F2 50% yang memiliki kadar Pb dibawah baku mutu. Untuk F2 25%, F3 25% dan 50% memiliki kadar diatas baku mutu dengan nilai secara berurutan yaitu 1,06 mg/L, 1,16 mg/L, dan 1,07 mg/L.



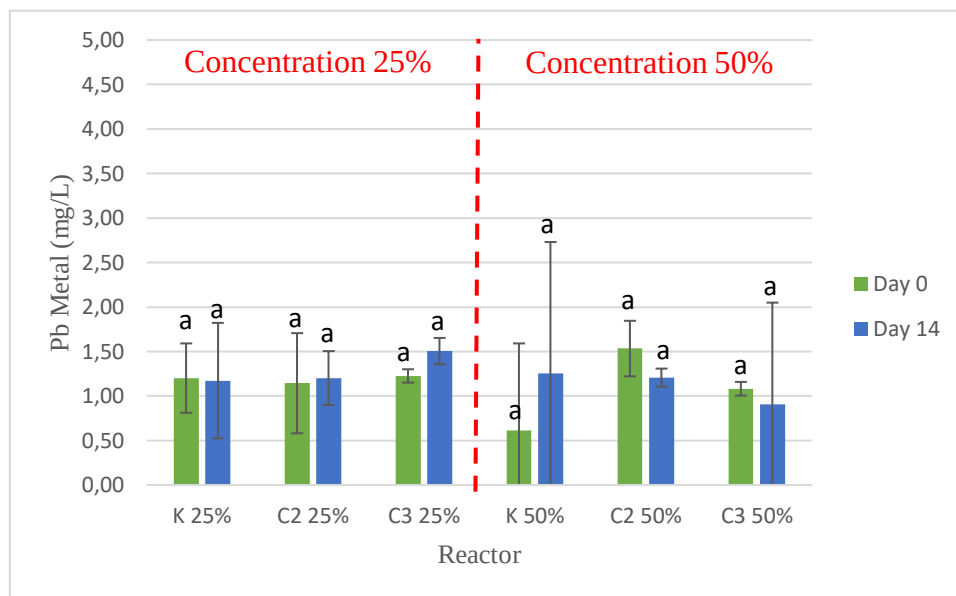
Gambar 4. 2 Konsentrasi Logam Cd Pada FTW. K (Kontrol Air Limbah), F2 (Tanaman + Air Limbah), F3 (Tanaman + Air Limbah + Bakteri), 25% dan 50% (Konsentrasi Limbah). Setiap nilai rerata dari tiga kali pengulangan, dan rata-rata yang disertakan oleh notasi huruf yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan yang signifikan.

Untuk kadar Cd, selama proses pengolahan seluruh reaktor mengalami penurunan kadar baik konsentrasi 25% maupun 50%. Secara keseluruhan reaktor F2 dan F3 bekerja cukup baik dalam menurunkan kadar Cd. Namun, reaktor kontrol untuk konsentrasi (25% dan 50%) juga mengalami penurunan kadar Cd. Reaktor K 25% mengalami penurunan yang signifikan sedangkan untuk reaktor K 50% nilainya masih terbilang konstan. Sama dengan Pb, alasan kadar Cd turun disebabkan karena pengujian dilakukan pada ruangan semi tertutup, aman dari hujan, selama 14 hari. Akibatnya logam berat pada perairan akan mengendap dan diserap oleh organisme yang terdapat pada perairan (Sarjono, 2009).

Baku mutu menggunakan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah dengan kadar maksimum sebesar 0,1 mg/L. Untuk seluruh reaktor setelah pengolahan memiliki kadar Cd diatas baku mutu sedikit dengan nilai rentang 0,14-0,18 mg/L.

4.4 Pengaruh Variasi Beban Air Limbah Terhadap Parameter Logam Berat Pada Reaktor *Constructed Treatment Wetland* (CTW)

Data hasil pengujian kadar Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) pada limbah cair tenun konsentrasi 25% dan 50% selama pengolahan masing-masing 14 hari dapat dilihat pada gambar 4.3 dan 4.4.

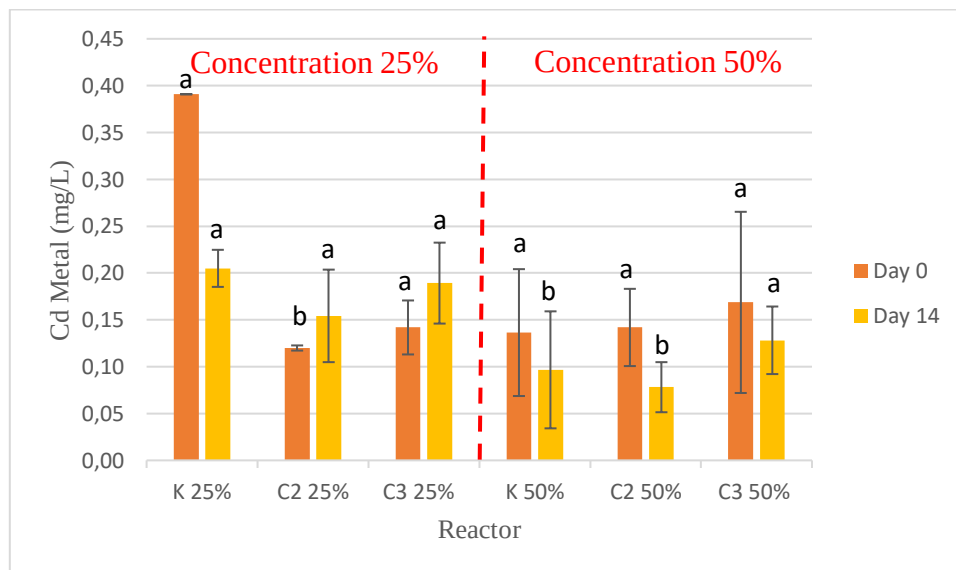


Gambar 4. 3 Konsentrasi Logam Pb Pada CTW. K (Kontrol Air Limbah), C2 (Tanaman + Air Limbah), C3 (Tanaman + Air Limbah + Bakteri), 25% dan 50% (Konsentrasi Limbah). Setiap nilai rerata dari tiga kali pengulangan, dan rata-rata yang disertakan oleh notasi huruf yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan yang signifikan.

Selama proses pengolahan, kadar Pb pada masing-masing reaktor CTW terdapat yang mengalami penurunan maupun yang naik. Untuk limbah konsentrasi 25%, kadar Pb nilainya naik pada reaktor C2 dan C3, kecuali untuk reaktor kontrolnya yang justru mengalami penurunan. Sedangkan untuk limbah konsentrasi 50%, kadar Pb turun pada reaktor C2 dan C3, pada reaktor kontrol justru naik. Untuk reaktor K 25% dan 50% mengalami penurunan dan kenaikan kadar Pb memiliki alasan yang sama dengan pembahasan reaktor kontrol pada pengolahan secara *floating* karena reaktor kontrol disamakan untuk kedua *treatment*. Reaktor K 25% menurun kadar Pb-nya disebabkan oleh mengendapnya logam pada hari ke-

14. Sedangkan untuk reaktor K 50%, naik disebabkan karena akumulasi kadar Pb sebelumnya karena menggunakan wadah yang sama. Pada limbah konsentrasi 25%, C2 dan C3 mengalami kenaikan kadar Pb disebabkan karena tanaman dan bakteri pada reaktor yang masih dalam proses adaptasi sehingga belum mampu mereduksi logam, terutama Pb, dengan baik. Tanaman dapat menyerap logam Pb apabila kandungan bahan organik serta kesuburan tanah rendah (Alloway, 1995). Sedangkan pada limbah 50% seluruh pengolahan menurunkan kadar Pb yang mengindikasikan bahwa reaktor bekerja dengan baik.

Baku mutu mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah dengan kadar Pb maksimum sebesar 1 mg/L. Hasil akhir menunjukkan bahwa hanya pada reaktor C3 50% yang memiliki kadar Pb dibawah baku mutu sebesar 0,91 mg/L. Untuk C2 25%, C2 50%, dan C3 25% memiliki kadar diatas baku mutu dengan nilai secara berurutan yaitu 1,20 mg/L, 1,21 mg/L, dan 1,50 mg/L.



Gambar 4. 4 Konsentrasi Logam Cd Pada CTW. K (Kontrol Air Limbah), C2 (Tanaman + Air Limbah), C3 (Tanaman + Air Limbah + Bakteri), 25% dan 50% (Konsentrasi Limbah). Setiap nilai rerata dari tiga kali pengulangan, dan rata-rata yang disertakan oleh notasi huruf yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan yang signifikan.

Untuk kadar Cd, reaktor C2 dan C3 mengalami kenaikan sama seperti kadar Pb. Proses adaptasi tanaman dan bakteri yang membuat pengolahan belum maksimal sehingga air limbah belum terolah dengan baik. Sedangkan untuk limbah konsentrasi 50%, C2 dan C3 mampu mengolah limbah dengan baik sehingga kadar Cd menurun. Untuk reaktor kontrol baik pada limbah konsentrasi 25% ataupun 50%, keduanya mengalami penurunan kadar Cd. Seperti yang sudah disebutkan di atas bahwa untuk konsentrasi 25% logam berat mengalami pengendapan karena disimpan dalam ruang tertutup, sedangkan untuk konsentrasi 50% kadar logam masih terhitung konstan.

Baku mutu menggunakan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah dengan kadar maksimum sebesar 0,1 mg/L. Hasil akhir menunjukkan bahwa hanya pada reaktor C2 50% yang memiliki kadar Cd dibawah baku mutu sebesar 0,08 mg/L. Untuk C2 25%, C3 25%, dan C3 50% memiliki kadar diatas baku mutu dengan nilai secara berurutan yaitu 0,15 mg/L, 0,19 mg/L, dan 0,13 mg/L.

4.5 Reduksi Parameter Logam Berat Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd)

Berikut merupakan hasil dari pengujian parameter logam berat berupa Pb dan Cd pada masing-masing konsentrasi air limbah selama 14 hari dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Nilai Reduksi Logam Pb dan Cd (mg/L)

Reaktor	Logam Pb		Logam Cd	
	Hari ke-14			
	Konsentrasi 25%	Konsentrasi 50%	Konsentrasi 25%	Konsentrasi 50%
K	0,03	-0,62	0,17	0,04
F2	0,30	0,32	0,04	0,05
F3	0,25	1,08	0,12	0,06
C2	-0,06	0,33	-0,03	0,06
C3	-0,28	0,17	-0,05	0,04

Nilai reduksi logam Pb paling optimal terjadi pada reaktor F3 50% mampu mereduksi hingga 1,08 mg/L. Sedangkan untuk logam Cd, nilai paling optimal terjadi pada reaktor F3 25% mampu mereduksi hingga 0,12 mg/L.

Tanaman dalam menyerap dan mengakumulasi logam berat memiliki 3 proses mekanisme: 1) Penyerapan oleh akar; 2) Translokasi logam dari akar ke bagian tanaman; 3) Lokalisasi logam pada sel dan jaringan (Hardiani, 2009). Walaupun demikian respon tanaman terhadap logam berat juga ditentukan oleh jenis tanaman itu sendiri. Terdapat tanaman yang memiliki kemampuan toleran ataupun intoleran terhadap keracunan unsur logam (Salsibury dan Ross, 1995).

Proses terserapnya logam Pb dan Cd oleh akar biasa disebut dengan rhizofiltrasi. Rhizofiltrasi merupakan proses dari akar tanaman mengabsorpsi, mengkonsentrasi, dan mempresipitasi logam dari lingkungan yang tercemar. Tanaman mengeluarkan enzim dan senyawa organik yang disebut eksudat akar. Sehingga area rhizosfer mampu menjadi lingkungan yang baik untuk pertumbuhan mikroba dalam tanah. Dan mikroba ini lah yang akan mempercepat proses rhizofiltrasi tersebut.

Tanaman juga memiliki mekanisme untuk mencegah keracunan logam terhadap sel dan jaringan yang disebut mekanisme detoksifikasi, misal dengan cara mengakumulasi logam hanya dalam organ tertentu saja seperti akar (Priyanto dan Prayitno, 2004). Penimbunan logam hanya pada organ tertentu merupakan usaha tanaman dalam lokalisasi logam berat (Heriyanto dan Endro, 2011).

4.6 Persentase *Removal* Logam Berat Pada *Floating Treatment Wetland* (FTW)

Data efisiensi *removal* pada pengolahan *floating treatment wetland* (FTW) untuk kadar timbal (Pb) dan kadmium (Cd) selama pengolahan 14 hari dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Efisiensi *Removal* Logam Timbal (Pb) dan Logam Kadmium (Cd) Pada *Floating Treatment Wetland* (FTW)

Treatment	Efisiensi <i>Removal</i> (%)			
	Pb		Cd	
	25	50	25	50
K	2	0	48	29
F2	22	20	19	27
F3	18	50	43	30

Untuk timbal (Pb), berdasarkan tabel menunjukan bahwa FTW dengan penambahan bakteri tidak selalu berpengaruh meningkatkan nilai *removal*. Pada konsentrasi limbah 25%, F3 justru memiliki nilai *removal* lebih kecil yaitu sebesar 18% jika dibandingkan dengan F2 sebesar 22%, selisih 4%. Sedangkan pada konsentrasi limbah 50%, F3 memiliki nilai *removal* yang cukup tinggi jika sebesar 50% dibandingkan dengan F2 yang hanya sebesar 20%. Sedangkan untuk reaktor kontrol masing-masing konsentrasi limbah tidak ada nilai *removal* yang signifikan.

Untuk kadmium (Cd), penambahan bakteri cukup berpengaruh pada kenaikan nilai *removal*. Pada konsentrasi limbah 25%, F3 mampu mendegradasi Cd hingga 43% jika dibandingkan F2 yang hanya 19%. Sedangkan pada konsentrasi limbah 50%, selisih F2 dengan dan tanpa yang menggunakan bakteri tidak terlalu jauh hanya 3% bedanya. F2 memiliki nilai *removal* 27% sedangkan F3 sebesar 30%. Hal ini menunjukkan bahwa bakteri yang ditambahkan mampu meningkatkan efisiensi dari reaktor F2 untuk mengolah logam Cd. Proses biosorpsi pada bakteri yang dapat menyerap logam secara pasif menjadi penyebab utama kenapa nilai efisiensinya lebih tinggi (Chojnacka, 2010). Disisi lain reaktor K yang seharusnya tidak memiliki nilai *removal* yang tinggi justru memiliki nilai sebesar 52% dan 29% pada konsentrasi limbah 25% dan 50% secara urut.

4.7 Persentase *Removal* Logam Berat Pada *Constructed Treatment Wetland* (CTW)

Data efisiensi *removal* pada pengolahan *constructed treatment wetland* (CTW) untuk kadar timbal (Pb) dan kadmium (Cd) selama pengolahan 14 hari dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Efisiensi *Removal* Logam Timbal (Pb) dan Logam Kadmium (Cd) Pada *Constructed Treatment Wetland* (CTW)

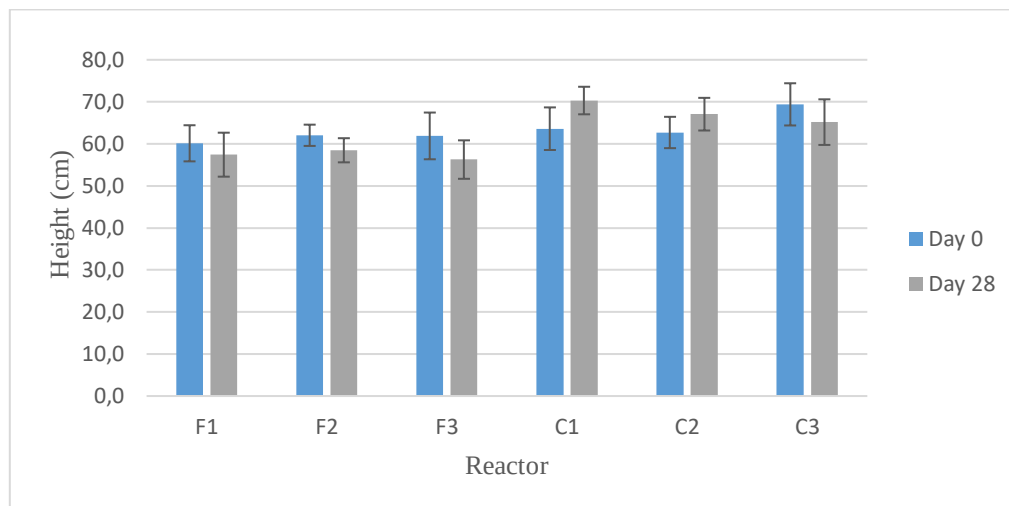
Treatment	Efisiensi Removal (%)			
	Pb		Cd	
	25	50	25	50
K	2	0	48	29
C2	0	21	0	45
C3	0	16	0	24

Untuk timbal (Pb), berdasarkan tabel menunjukkan bahwa pada seluruh reaktor CTW dengan konsentrasi limbah 25% mengalami kenaikan kadar Pb sehingga nilai *removal*-nya tidak ada. Sedangkan pada konsentrasi limbah 50%, penambahan bakteri tidak mempengaruhi nilai *removal*. Nilai *removal* reaktor C2 dan C3 secara berurut yaitu 21% dan 16%. Salah satu faktor yang dapat meningkatkan nilai *removal* adalah luas permukaan yang lebih besar jika dibandingkan dengan akar tanaman untuk proses penyerapan logam pada akar tanaman (Darajah dkk., 2019).

Untuk kadmium (Cd), menunjukkan hasil yang sama pada nilai *removal* Pb. Seluruh reaktor pada konsentrasi 25% mengalami kenaikan sehingga tidak ada nilai efisiensinya. Sedangkan pada konsentrasi 50%, penambahan bakteri juga tidak terlalu berpengaruh. Nilai *removal* pada C2 sebesar 45%, lebih tinggi dari C3 yang hanya 24%.

4.8 Pertumbuhan dan Kematian Tanaman

Selain meneliti kemampuan tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides*) dan bakteri dalam mendegradasi logam berat (Pb dan Cd) pada limbah tenun, juga dilakukan pengamatan terhadap pertumbuhan tanaman akar wangi dihitung dari pertumbuhan batang dan akar tanaman. Reaktor FTW memiliki 6 rumpun setiap reaktor dengan masing-masing rumpun 2-3 tanaman. Sedangkan untuk reaktor CTW memiliki 9 rumpun dengan 2-4 tanaman per-rumpunnya. Perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Tinggi Tanaman Vetiver Pada Hari Ke-0 dan 28

Pada gambar 4.7, tampak grafik pertumbuhan tanaman. Pada reaktor FTW, seluruhnya tidak menunjukkan adanya pertumbuhan tanaman. Berbeda dengan reaktor CTW, dimana pada reaktor C1 (kontrol tanaman) dan C2 (tanaman + limbah) tanaman mengalami penambahan tinggi. Sedangkan untuk reaktor C3 (tanaman + limbah + bakteri) tidak mengalami penambahan tinggi. Reaktor yang tidak mengalami penambahan tinggi pada tanaman kemungkinan disebabkan karena kurangnya kebutuhan nutrisi yang diperlukan oleh tanaman atau karena tanaman sudah mencapai tinggi maksimal.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Erskine (1992) dan Truong (1999), *Vetiveria zizanioides* mampu tumbuh hingga 1,5 meter dengan ciri khas batang kaku, rumpunnya luas dari akar hingga batang, dan cabangnya banyak. Penyerapan nutrisi yang banyak diperlukan oleh tanaman agar tanaman tersebut dapat tumbuh dengan baik. Dalam air limbah, nutrisi yang bersumber dari dekomposisi bahan organik yang dilakukan mikroorganisme, akan diserap oleh tanaman dan dijadikan sebagai sumber pembentukan jaringan yang baru (Romi, 2017). Dalam peran meremediasi logam, tanaman harus memiliki kemampuan menyerap logam yang terbilang tinggi dan mampu memindahkannya ke seluruh jaringan tanaman seperti akar, batang, dan daun. *Vetiveria zizanioides* merupakan tanaman yang memiliki kemampuan menyerap logam dalam jumlah tinggi (Hamzah, 2019).

Tabel 4. 6 Tingkat Kematian Tanaman *Vetiveria zizanioides*

<i>Floating Treatment Wetland</i>		<i>Constructed Treatment Wetland</i>	
Reaktor	Mortalitas	Reaktor	Mortalitas
F1	36,74%	C1	4,31%
F2	56,26%	C2	3,50%
F3	45,22%	C3	1,31%

Catatan: Setiap nilai merupakan rata-rata dari tiga kali pengulangan, dan rata-rata yang disertakan oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 0,05

Selain pertumbuhan tanaman, tingkat kematian tanaman per-reaktor juga dihitung. Data tingkat kematian tanaman dapat dilihat pada tabel 4.6. Reaktor yang telah ditambah dengan bakteri endofit memiliki tingkat kematian yang rendah jika dibandingkan dengan reaktor hanya air limbah tanpa bakteri. Hal ini disebabkan karena peran dari bakteri endofit yang mampu membuat tanaman adaptif di berbagai kondisi lingkungan. Bakteri endofit berperan dalam menjaga kualitas tanah sehingga tanaman dapat tumbuh subur di tanah yang ditinggalinya (Santos dkk, 2018). Keterkaitan antara bakteri endofit dan tanaman berpengaruh pada kondisi tanah, perkembangan dan kesehatan tanaman, serta hasil panen (Compant dkk, 2008). Selain itu, bakteri endofit juga berperan dalam mengecilkan peluang tanaman terserang penyakit seperti jamur, virus, dan lain sebagainya (Santos dkk, 2018).



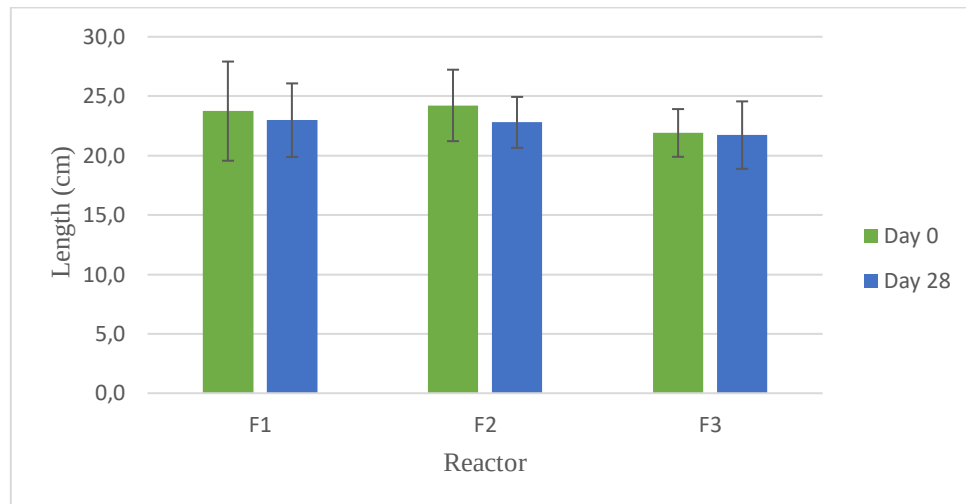
Gambar 4. 6 Kondisi Tanaman Vetiver Pada Hari Ke-0



Gambar 4. 7 Kondisi Tanaman Vetiver Pada Hari Ke-28

Tanaman yang mati ditandai dengan berubah warna menjadi coklat seperti pada gambar 4.6 dan 4.7. Pada hari ke-0, terlihat pada tanaman seluruh daun masih berwarna hijau. Setelah mengalami proses pengolahan selama 28 hari, beberapa daun terlihat menjadi kering dan berwarna kecoklatan. Tanaman yang keracunan logam ditandai dengan terjadinya klorosis (menguningnya daun sebagai tanda kehilangan klorofil) dan nekrosis (daun yang menggulung dan keriput sebagai tanda awal gejala kematian sel tanaman) (Yruela, 2005).

Untuk akar dari tanaman vetiver, mengalami pengurangan panjang, namun tidak terlalu signifikan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Panjang Akar Tanaman Vetiver Pada Hari Ke-0 dan 28

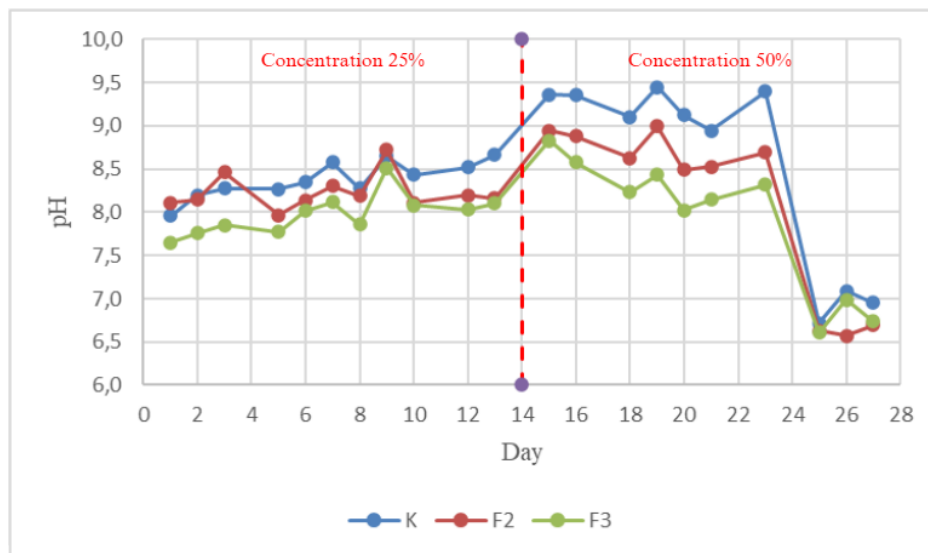
Catatan: Setiap nilai merupakan rata-rata dari tiga kali pengulangan, dan rata-rata yang disertakan oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 0,05

Gambar di atas menunjukkan bahwa tanaman vetiver mampu tetap hidup meskipun tumbuh dan hidup dalam air yang tercemar. Yang menandakan bahwa tanaman tersebut memiliki toleransi dan kapasitas akumulasi konsentrasi yang tinggi terhadap kontaminan (Raskin dkk., 1997). Akar tanaman mampu mendeteksi bahwa logam merupakan unsur yang toksik sehingga akar melakukan mekanisme inaktivasi seperti sekuestrasi unsur tersebut pada vakuola ataupun dinding sel (Gupta & Sinha, 2008).

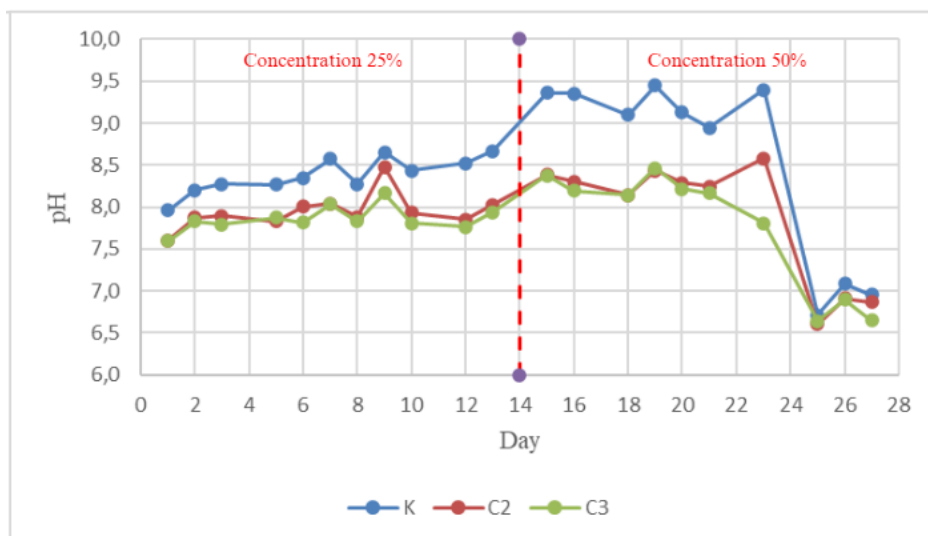
Didasarkan pada data konsentrasi pencemar pada air selama penelitian serta pengamatan secara fisik tanaman, penggunaan tanaman vetiver dalam pengolahan *wetland* serta ditambahkannya konsorsium bakteri dalam mengolah limbah tenun dapat dijadikan sebagai sarana alternatif untuk mengolah limbah tersebut.

4.9 Derajat Keasaman (pH) Air

Setiap harinya dilakukan pengukuran parameter harian berupa derajat keasaman (pH) air pada setiap reaktor selama 28 hari pengolahan. Grafik pengukuran pH pada masing-masing reaktor dapat dilihat pada gambar 4.9 dan 4.10.



Gambar 4. 9 Hasil Pengukuran pH Pada Reaktor FTW



Gambar 4. 10 Hasil Pengukuran pH Pada Reaktor CTW

Pada 14 hari pertama, derajat keasaman (pH) memiliki nilai yang stabil baik pada reaktor FTW maupun CTW. Kedua jenis reaktor memiliki rentang pH yang sama berkisar 7,6 – 8,7, tertinggi pada reaktor kontrol. Sedangkan untuk 14 hari berikutnya, pada penggantian limbah dari konsentrasi 25% menjadi 50%, terjadi kenaikan nilai pH mencapai 9,4. Namun terjadi penurunan yang sangat signifikan pada hari ke-23. Nilai pH menyentuh titik terendahnya, bahkan jika dibandingkan dengan konsentrasi limbah sebelumnya, dengan nilai pH 6,6. Hal tersebut

disebabkan karena terdapat kerusakan pada alat ukur yang mana baru diketahui ketika penelitian akan berakhir.

Singh dkk., 2015, menyebutkan bahwa tanaman akar wangi mampu bekerja dengan optimal pada pH rentang 6-9. Keoptimalan akan menurun apabila nilai pH semakin tinggi. Pada penelitian lainnya, menurut Khoiroh, 2014, pH juga mempengaruhi kinerja bakteri dalam mengurai limbah. Semakin netral pH, maka semakin optimal kinerja dari bakteri dalam mendegradasi logam berat.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukannya penelitian, dapat diketahui bahwa air limbah hasil tenun mengandung polutan berupa logam berat timbal (Pb) dan kadmium (Cd) yang cukup tinggi. Dan untuk setiap bak reaktor pengolahan, *floating treatment wetland* (FTW) dan *constructed treatment wetland* (CTW), memiliki kinerja yang bermacam dalam pengolahannya. Berikut kesimpulan dari hasil penelitian:

- 1) Penambahan konsorsium bakteri pada wetland cukup efektif meningkatkan performa reaktor FTW, tapi tidak terlalu berpengaruh pada reaktor CTW. Pada reaktor FTW cukup berpengaruh dengan nilai *removal* F3 mencapai 50% pada parameter Pb dan 43% pada parameter Cd. Dibandingkan F2 yang hanya 20% pada parameter Pb dan 27% pada parameter Cd. Berbeda dengan reaktor FTW, penambahan bakteri tidak terlalu berpengaruh dalam meningkatkan performa *wetland*. Nilai *removal* C3 hanya 16% pada parameter Pb dan 24% pada parameter Cd. Dibandingkan C2 yang bisa mencapai 21% pada parameter Pb dan 45% pada parameter Cd.
- 2) Penggunaan tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides*) menggunakan metode wetland, FTW dan CTW, mampu mendegradasi kandungan logam Pb dan Cd yang terkandung dalam air limbah tenun. Degradasi logam Pb paling tinggi terjadi pada bak F3 50%, mampu mendegradasi hingga 1,08 mg/L. Sedangkan untuk degradasi logam Cd tertinggi terjadi pada bak F3 25% dengan nilai degradasi mencapai 0,12 mg/L. Namun demikian, kadar logam baik Pb dan Cd pada seluruh bak masih belum memenuhi baku mutu. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah, baku mutu untuk Pb dan Cd secara berurutan yaitu 1 mg/L dan 0,1 mg/L.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat diperhatikan:

1. Perlu dilakukan pengujian jumlah bakteri yang masih bertahan hidup setelah penelitian selesai.
2. Perlu memperhatikan metode dalam memasukkan bakteri ke dalam reaktor untuk memastikan bakteri yang dimasukkan beradaptasi dengan baik dalam reaktor.

DAFTAR PUSTAKA

- Afzal, I., Shinwari, Z. K., Sikandar, S., & Shahzad, S. (2019). Plant Beneficial Endophytic Bacteria: Mechanisms, Diversity, Host Range And Genetic Determinants. *Microbiological Research*, 221, 36–49. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.02.001>
- Alloway, B. J. (1995). *Heavy Metals In Soils*. Blackie Academic & Professional.
- Chojnacka, K. (2010). Biosorption And Bioaccumulation – The Prospects For Practical Applications. *Environment International*, 36(3), 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.12.001>
- Darajeh, N., Truong, P., Rezania, S., Alizadeh, H., & Leung, D. (2019). Effectiveness Of Vetiver Grass Versus Other Plants For Phytoremediation Of Contaminated Water.
- David J. (N.D.). What Is A Floating Treatment Wetland? Floating Treatment Wetlands. In Ph.D. Student, Biological Systems Engineering. www.ext.vt.edu
- Deshmukh, R., Khardenavis, A. A., & Purohit, H. J. (2016). Diverse Metabolic Capacities Of Fungi For Bioremediation. *Indian Journal Of Microbiology*, 56(3), 247–264. <https://doi.org/10.1007/s12088-016-0584-6>
- Fadirubun, N. A., Daud, A., Bintara Birawida, A., Lingkungan, B. K., & Masyarakat, K. (N.D.). Kualitas Air Dan Sedimen Ditinjau Dari Parameter Tembaga (Cu) Studi Pada Air Sungai Pangkajene Kabupaten Pangkep Study Of Water And Sediments Quality Evaluated From Copper (Cu) Parameters In Pangkajene River Water In Pangkep District.
- Fajri, J. A., Nurmiyanto, A., Sa'adah, N. N., Nuryana, I., Anfaresi, S. L. N., & Lathifah, A. N. (2024). Effectiveness Of Endophytes Bacteria In Enhancing Floating Treatment Wetland To Treat Textile Wastewater. *Journal Of Ecological Engineering*, 25(3), 12–24. <https://doi.org/10.12911/22998993/177593>

- Gupta, A., & Sinha, S. (2008). Decontamination And/Or Revegetation Of Fly Ash Dykes Through Naturally Growing Plants. *Journal Of Hazardous Materials*, 153(3), 1078–1087. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.062>
- Hardoim, P. R., Van Overbeek, L. S., Berg, G., Pirttilä, A. M., Compant, S., Campisano, A., Döring, M., & Sessitsch, A. (2015). The Hidden World Within Plants: Ecological And Evolutionary Considerations For Defining Functioning Of Microbial Endophytes. *Microbiology And Molecular Biology Reviews*, 79(3), 293–320. <https://doi.org/10.1128/Mmbr.00050-14>
- Hidayat, M. F. (2014). Penurunan Kandungan Zat Warna Pada Limbah Songket Menggunakan Membran Komposit Berbasis Kitosan-Pva Secara Ultrafiltrasi. Doctoral Dissertation, Politeknik Negeri Sriwijaya.
- Hussain, Z., Arslan, M., Malik, M. H., Mohsin, M., Iqbal, S., & Afzal, M. (2018). Treatment Of The Textile Industry Effluent In A Pilot-Scale Vertical Flow Constructed Wetland System Augmented With Bacterial Endophytes. *Science Of The Total Environment*, 645, 966–973. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.163>
- Khoiroh, Z. (2014). Bioremediasi Logam Berat Timbal (Pb) Dalam Lumpur Lapindo Menggunakan Campuran Bakteri (*Pseudomonas Pseudomallei* Dan *Pseudomonas Aeruginosa*).
- Kurniawan, A., & Ekowati, N. (2016). Review: Potensi Mikoremediasi Logam Berat. *Jurnal Bioteknologi & Biosains Indonesia (Jbbi)*, 3(1), 36. <https://doi.org/10.29122/jbbi.V3i1.21>
- Laksono, S. (2012). Pengolahan Biologis Limbah Batik Dengan Media Biofilter. Skripsi. Universitas Indonesia, Depok.
- Lavania, U. C. (2004). Current Science Association Meeting Report: Vetiver System Ecotechnology For Water Quality Improvement And Environmental Enhancement. In *Science* (Vol. 86, Issue 1). <https://about.jstor.org/terms>
- Miliute, I., Buzaitė, O., Baniulis, D., & Stanys, V. (2015). Bakterinių Endofitų Reikšmė Žemės Ūkio Augalų Atsparumui Stresui: Apžvalga. In *Zemdirbystė* (Vol. 102, Issue 4, Pp. 465–478). Lithuanian Institute Of Agriculture. <https://doi.org/10.13080/Z-A.2015.102.060>

- Morel, J.-L., Echevarria, G., & Goncharova, N. (2006). *Phytoremediation Of Metal-Contaminated Soils* (Vol. 68). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/1-4020-4688-X>
- Mukherjee, P., & Roy, P. (2016). Genomic Potential Of *Stenotrophomonas maltophilia* In Bioremediation With An Assessment Of Its Multifaceted Role In Our Environment. *Frontiers In Microbiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00967>
- Nagajyoti, P. C., Lee, K. D., & Sreekanth, T. V. M. (2010). Heavy Metals, Occurrence And Toxicity For Plants: A Review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 8, Issue 3, Pp. 199–216). <https://doi.org/10.1007/S10311-010-0297-8>
- Ningsih, D. A., & Tangahu, B. V. (2016). 128877-Id-Uji-Penurunan-Kandungan-Cod-Bod-Pada-Lim. *Jurnal Sains Dan Teknologi Lingkungan*, 8, 121–130.
- Oktavia, R., & Sumardi, S. (2022). Kemampuan *Bacillus* Sp. Sebagai Bioremediasi Bahan Pencemar. *Jurnal Bioterdidik: Wahana Ekspresi Ilmiah*, 10(2), 110–125. <https://doi.org/10.23960/Jbt.V10i2.23919>
- Oshunsanya, S. O., & Aliku, O. (2017). Vetiver Grass: A Tool For Sustainable Agriculture. In *Grasses - Benefits, Diversities And Functional Roles*. Intech. <https://doi.org/10.5772/Intechopen.69303>
- Priadie, B., Muda Bidang Teknik Lingkungan Sda, P., Litbang Sumber Daya Air, P., & Jl Ir H Juanda, K. P. (2012). Teknik Bioremediasi Sebagai Alternatif Dalam Upaya Pengendalian Pencemaran Air. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 10(1), 38–48. <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/ilmulingkungan>
- Purakayastha, T. J., & Chhonkar, P. K. (2010). *Phytoremediation Of Heavy Metal Contaminated Soils* (Pp. 389–429). https://doi.org/10.1007/978-3-642-02436-8_18
- Raskin, I., Smith, R. D., & Salt, D. E. (1997). *Phytoremediation Of Metals: Using Plants To Remove Pollutants From The Environment*. *Current Opinion In Biotechnology*, 8(2), 221–226. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(97\)80106-1](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(97)80106-1)

- Rehman, K., Imran, A., Amin, I., & Afzal, M. (2019). Enhancement Of Oil Field-Produced Wastewater Remediation By Bacterially-Augmented Floating Treatment Wetlands. *Chemosphere*, 217, 576–583. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.041>
- Santoyo, G., Moreno-Hagelsieb, G., Del Carmen Orozco-Mosqueda, Ma., & Glick, B. R. (2016). Plant Growth-Promoting Bacterial Endophytes. *Microbiological Research*, 183, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.008>
- Sarjono, A. (2009). Analisis Kandungan Logam Berat Cd, Pb, Dan Hg Pada Air Dan Sedimen Di Perairan Kamal Muara, Jakarta Utara. <https://api.semanticscholar.org/Corpusid:129322123>
- Seh-Bardan, B. J., Othman, R., Wahid, S. A., Husin, A., & Sadegh-Zadeh, F. (2012). Bioleaching Of Heavy Metals From Mine Tailings By *Aspergillus Fumigatus*. *Bioremediation Journal*, 16(2), 57–65. <https://doi.org/10.1080/10889868.2012.665958>
- Siagian, R. . (2018). 6th Asian Academic Society International Conferenc (Aasic) A Transformative Community: Asia In Dynamism, Innovation, And Globalization Vetiver Grass As Phytoremediation For Mine Tailing On Tropical Residual Soil At Pongkor Mountain, West Java, Indonesia.
- Singh, V., Thakur, L. S., & Mondal, P. (2015). Removal Of Lead And Chromium From Synthetic Wastewater Using *Vetiveria Zizanioides*. *Clean-Soil Air Water*, 43, 538–543. <https://api.semanticscholar.org/Corpusid:94225565>
- Suhendrayatna. (2001). Bioremoval Logam Berat Dengan Menggunakan Mikroorganisme: Suatu Kajian Kepustakaan. Makalah. Kagoshima University.
- Tara, N., Arslan, M., Hussain, Z., Iqbal, M., Khan, Q. M., & Afzal, M. (2019). On-Site Performance Of Floating Treatment Wetland Macrocosms Augmented With Dye-Degrading Bacteria For The Remediation Of Textile Industry Wastewater. *Journal Of Cleaner Production*, 217, 541–548. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.258>

- Tempra, Ombretta., Somalia Urban Development Programme., & United Nations Human Settlements Programme. (2007). First Steps Towards Strategic Urban Planning. United Nations Human Settlements Programme.
- Vymazal, J. (2005). Constructed Wetlands For Wastewater Treatment. *Ecological Engineering*, 25(5), 475–477. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.002>
- Yruela, I. (2005). Copper In Plants. *Brazilian Journal Of Plant Physiology*, 17(1), 145–156. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100012>

LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Sampling Limbah Cair Tenun



Lampiran 2 Proses Destruksi Sampel



Lampiran 3 Pengujian AAS



Lampiran 4 Hasil Perhitungan Kadar Pb dan Cd

Reaktor	Logam Pb				Logam Cd			
	25%		50%		25%		50%	
	0	14	0	14	0	14	0	14
Kontrol	1,20	1,17	1,59	2,21	0,37	0,20	0,14	0,10
FTW	1,36	1,06	1,56	1,24	0,22	0,18	0,19	0,14
FTW + Bakteri	1,41	1,16	2,15	1,07	0,27	0,15	0,20	0,14
CTW	1,14	1,20	1,53	1,21	0,12	0,15	0,14	0,08
CTW + Bakteri	1,23	1,50	1,08	0,91	0,14	0,19	0,17	0,13

Lampiran 5 Hasil Pengukuran pH

Hari	K	F2	F3	C2	C3
1	8,0	8,1	7,7	7,6	7,6
2	8,2	8,2	7,8	7,9	7,8
3	8,3	8,5	7,9	7,9	7,8
5	8,3	8,0	7,8	7,8	7,9
6	8,4	8,1	8,0	8,0	7,8
7	8,6	8,3	8,1	8,0	8,0
8	8,3	8,2	7,9	7,9	7,8
9	8,7	8,7	8,5	8,5	8,2
10	8,4	8,1	8,1	7,9	7,8
12	8,5	8,2	8,0	7,9	7,8
13	8,7	8,2	8,1	8,0	7,9
15	9,36	8,95	8,83	8,38	8,38
16	9,36	8,88	8,58	8,30	8,19
18	9,10	8,63	8,23	8,14	8,14
19	9,45	8,99	8,43	8,44	8,46
20	9,13	8,49	8,03	8,29	8,22
21	8,94	8,53	8,15	8,25	8,17
23	9,40	8,69	8,32	8,58	7,81
25	6,71	6,63	6,61	6,61	6,64
26	7,09	6,57	6,99	6,91	6,90
27	6,95	6,69	6,74	6,87	6,65