TA/TL/2024/1882

TUGAS AKHIR

Efektivitas Konsorsium Bakteri *Bacillus cereus*, *Bacillus spizizeni,* dan *Stenotrophomonas malthophilia* Terhadap Performa *Wetland* dalam Mereduksi COD pada Air Limbah Tenun

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

MUHAMMAD NAFIS YASSAR
20513140

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

TUGAS AKHIR

Efektivitas Konsorsium *Bacillus cereus, Bacillus spizizeni,* dan *Stenotrophomonas malthophilia* Terhadap Performa *Wetland* Dalam Mereduksi COD Pada Air Limbah Tenun

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

Disusun Oleh:

Muhammad Nafis Yassar
20513140

Disetujui,
Dosen Pembimbing:

Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng.
Tanggal: 23/10/24

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

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Lingkungan FTSP UII

Any Juliani, S.T., M.Sc.(Res.Eng.), Ph.D.
Tanggal: 23/10/24

HALAMAN PENGESAHAN

Efektivitas Konsorsium Bakteri *Bacillus cereus, Bacillus spizizeni,* dan *Stenotrophomonas malthophilia* Terhadap Performa *Wetland* dalam Mereduksi COD pada Air Limbah Tenun

Telah diterima dan disahkan oleh Tim Penguji

Hari : Selasa
Tanggal : 15 Oktober 2024

Disusun oleh:

Muhammad Nafis Yassar
20513140

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. ( )

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 *software* komputer yang digunakan dalam penelitian ini sepenuhnya menjadi tanggungjawab saya, bukan tanggungjawab 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 sangsi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh, serta sangsi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 23 Oktober 2024

Yang membuat pernyataan,

Muhammad Nafis Yassar

NIM. 20513140

PRAKATA

Assalammu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Dengan mengucapkan syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya penulis telah diberi kemampuan untuk menyelesaikan penulisan laporan Tugas Akhir tentang "Efektivitas Konsorsium Bakteri *Bacillus cereus, Bacillus spizizeni, dan Stenotrophomonas malthophilia*" Terhadap Performa *Wetland* dalam Mereduksi COD pada Air Limbah Tenun".

Penyusunan laporan ini bertujuan untuk memenuhi syarat akademik untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik bagi Mahasiswa Program S1 Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Dalam penyusunan laporan ini penulis banyak mendapatkan semangat, dukungan, dorongan dan bimbingan serta bantuan dari berbagai pihak, sehingga pada kesempatan ini perkenankan penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT yang selalu memberikan kemudahan dalam menjalani dan menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua saya yang senantiasa mendukung dan mendoakan untuk menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
3. Pembimbing Tugas Akhir, Bapak Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng. dan Ibu Annisa Nur Lathifah, S.Si., M.Biotech., M.Agr., Ph.D. yang telah banyak meluangkan waktunya untuk membantu dan membimbing agar tugas akhir diselesaikan.
4. Bapak Dr. Eng. Awaluddin Nurmiyanto, S.T., M.Eng. sebagai dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan.
5. Ketua Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia, Ibu Any Juliani, S.T., M.Sc. (Res. Eng)., Ph.D.
6. Koordinator Tugas Akhir, Bapak Adam Rus Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.
7. Teman kelompok tugas akhir, kak Lisa, Daru, Raikhan dan Maul yang banyak membantu selama tugas akhir berjalan.

8. Grup Nolep dan Zep-zep yang sudah menemani dari awal mahasiswa baru dan saling menyemangati selama berjalannnya tugas akhir.
9. Teman-teman seperjuangan di Jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia khususnya Angkatan 2020 yang telah membantu banyak hal dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
10. Pihak-pihak terkait yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan ini masih banyak terdapat kekurangan. Oleh sebab itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan penulis demi menyempurnakan laporan tugas akhir ini. Penulis berharap semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi para pembacanya dan dapat ditindaklanjuti dengan pengimplementasian saran.

Yogyakarta, 23 Oktober 2024

ABSTRAK

Industri tenun di Desa Troso, Kecamatan Pecangaan, Kabupaten Jepara, adalah sektor produksi yang sangat produktif, menghasilkan sekitar 37.322.128 meter kain pada tahun 2017. Namun, produksi tinggi ini juga menyebabkan peningkatan volume limbah cair yang tidak dikelola dengan baik, dengan sebagian besar pengrajin membuang limbah langsung ke selokan dan sungai. Ini dapat menyebabkan berbagai penyakit seperti kanker, tumor, gangguan saraf, mental, serta penyakit menular seksual. Penelitian ini menggunakan sistem pengolahan limbah *Constructed Treatment Wetland* (CTW) dan *Floating Treatment Wetland* (FTW) untuk mengatasi masalah tersebut. Tujuannya adalah mengevaluasi efektivitas konsorsium bakteri *Bacillus cereus, Bacillus spizizeni, dan Stenotrophomonas malthopilia* dalam mereduksi *Chemical Oxygen Demand* (COD). Limbah dengan konsentrasi 25% dan 50% diolah selama 28 hari dalam sistem *batch*. Variasi konsentrasi air limbah dijalankan selama 14 hari, dimulai dari 25% dan kemudian 50%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada reaktor FTW, konsentrasi 25% dengan dan tanpa bakteri mampu mereduksi COD masing-masing sebesar 74% dan 63%, sedangkan pada reaktor CTW masing-masing sebesar 41% dan 64%. Ini menunjukkan bahwa reaktor CTW dan FTW dengan tanaman *Vetiveria zizanioides* efektif dalam mereduksi COD dalam pengolahan air limbah tenun.

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

ABSTRACT

The weaving industry in Troso Village, Pecangaan Subdistrict, Jepara Regency, is a highly productive sector, producing approximately 37,322,128 meters of fabric in 2017. However, this high production also results in increased volumes of liquid waste that are not properly managed, with most artisans disposing of the waste directly into drains and rivers. This can lead to various diseases such as cancer, tumors, nervous and mental disorders, as well as sexually transmitted infections. This study employs Constructed Treatment Wetland (CTW) and Floating Treatment Wetland (FTW) systems to address this issue. The objective is to evaluate the effectiveness of a bacterial consortium of Bacillus cereus, Bacillus spizizeni, and Stenotrophomonas maltophilia in reducing Chemical Oxygen Demand (COD). Wastewater with concentrations of 25% and 50% was treated for 28 days in a batch system. The variations in wastewater concentration were applied for 14 days, starting from 25% and then 50%. The study results indicated that in the FTW reactor, 25% concentration with and without bacteria reduced COD by 74% and 63%, respectively, while in the CTW reactor, the reduction was 41% and 64%, respectively. This demonstrates that CTW and FTW reactors with Vetiveria zizanioides plants are effective in reducing COD in textile wastewater treatment.

Keywords: *Constructed Treatment Wetland, Floating Treatment Wetland, Textile wastewater, Vetiveria zizanioides, Bacterial consortium, Chemical Oxygen Demand.*

DAFTAR ISI

PERNYATAAN i
PRAKATA ii
ABSTRAK iv
ABSTRACT v
DAFTAR ISI vi
DAFTAR TABEL viii
DAFTAR GAMBAR ix
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Rumusan Masalah 4
1.3. Tujuan Penelitian 5
1.4. Manfaat Penelitian 5
1.5. Ruang Lingkup 6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 7
2.1 Limbah Cair Tenun Troso 7
2.2 Bioremediasi 9
2.3 Fitoremediasi 11
2.4 *Floating Treatment Wetland* 14
2.5 *Constructed Treatment Wetland* 15
2.6 Tanaman *Vetiveria zizanioides* 18
2.7 COD 20
2.8 Bakteri Endofit 21
2.9 Bakteri Endogen 22
2.10 Penelitian Terdahulu 23
BAB III METODE PENELITIAN 26
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian 26
3.2 Prosedur Penelitian 27
3.3 Pelaksanaan Penelitian 29
3.3.1 Persiapan Alat dan Bahan 29

3.3.2 Preparasi Air Limbah 29
3.3.3 Kulturisasi Bakteri 30
3.3.4 Pembuatan Reaktor *Floating Treatment Wetland* (FTW) 31
3.3.5 Pembuatan Reaktor *Constructed Treatment Wetland* (CTW) 32
3.3.6 Aklimatisasi Tanaman *Vetiveria zizanioides* 33
3.3.7 *Running* Reaktor *Wetland* 34
3.3.8 Sampling Reaktor dan Pengujian 35
3.4 Analisis Data 37
3.5 Analisis Statistik 37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 38
4.1 Karakteristik Influen Air Limbah 38
4.2 Karakterisasi dan Identifikasi Konsorsium Bakteri 39
4.3 Pengaruh Variasi Beban Air Limbah Terhadap Parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD) pada Reaktor *Floating Treatment Wetland* (FTW) 42
4.4 Pengaruh Variasi Beban Air Limbah Terhadap Parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD) pada Reaktor *Constructed Treatment Wetland* (CTW) 46
4.5 Persentase *Removal* pada Parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD) dalam Reaktor *Floating Treatment Wetland* (FTW) 50
4.6 Persentase *Removal* pada Parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD) dalam Reaktor *Constructed Treatment Wetland* (CTW) 51
4.7 Reduksi Parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD) 53
4.8 Parameter Fisik (ORP) 55
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 58
5.1 Kesimpulan 58
5.2 Saran 58
DAFTAR PUSTAKA 60
LAMPIRAN 67
RIWAYAT HIDUP 79

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Jenis Reaktor *Wetland*.....34
Tabel 3. 2 Interval Sampling COD Konsentrasi 25%.....36
Tabel 3. 3 Interval Sampling COD Konsentrasi 50%.....36
Tabel 4. 1 Karakterisitik Awal Parameter COD 38
Tabel 4. 2 Baku Mutu Parameter COD.....39
Tabel 4. 3 Hasil Uji Morfologi Koloni Bakteri Terpilih.....40
Tabel 4. 4 Hasil Uji Pewarnaan Gram Koloni Bakteri Terpilih.....41
Tabel 4. 5 Hasil Uji Morfologi Sel Bakteri Terpilih.....42
Tabel 4. 8 Besaran Reduksi *Chemical Oxygen Demand* (COD) 53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Kerangka Berfikir Penelitian 4
Gambar 2.1 Pewarnaan pada Industri Tenun Troso.....8
Gambar 2. 2 Mekanisme degradasi pencemar pada tumbuhan.....12
Gambar 2. 3 *Floating Treatment Wetland* 15
Gambar 2. 4 *Free Water Surface* 17
Gambar 2. 5 (a) *Subsurface flow* Aliran Vertikal & (b) Aliran Horizontal 18
Gambar 2. 6 Tanaman *Vetiveria zizanioides* 18
Gambar 3 . 1 Lokasi Tempat Penelitian.....26
Gambar 3. 2 Alur Pengerjaan Penelitian.....28
Gambar 3. 3 Pembuatan Limbah Buatan (*Artificial*) 30
Gambar 3. 4 Tahapan Kulturisasi Bakteri.....31
Gambar 3. 5 Reaktor *Floating Treatment Wetland* 32
Gambar 3. 6 Reaktor *Constructed Treatment Wetland*.....32
Gambar 3. 7 Aklimatisasi Tanaman *Vetiveria zizanioides* 33
Gambar 3.8 Tahapan Pengujian COD.....36
Gambar 4. 1 Grafik Hasil Pengujian *Chemical Oxygen Demand* (COD) Pada *Floating Treatment Wetland* (FTW). K (Kontrol Air Limbah), F2 (Tanaman + Air Limbah), F3 (Tanaman + Air Limbah + Bakteri), 25% dan 50% (Konsentrasi Limbah). Setiap nilai adalah rata-rata dari tiga ulangan dan rata-rata yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 5% 43
Gambar 4. 2 Grafik Hasil Pengujian *Chemical Oxygen Demand* (COD) Pada *Constructed Treatment Wetland* (FTW). K (Kontrol Air Limbah), C2 (Tanaman + Air Limbah), C3 (Tanaman + Air Limbah + Bakteri), 25% dan 50% (Konsentrasi Limbah). Setiap nilai adalah rata-rata dari tiga ulangan dan rata-rata yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 5% 46
Gambar 4. 3 Grafik Perbandingan Efisiensi *Removal Chemical Oxygen Demand* (COD) Pada *Floating Treatment Wetland* (FTW). K (Kontrol Air Limbah), F2

(Tanaman + Air Limbah), F3 (Tanaman + Air Limbah + Bakteri), 25% dan 50% (Konsentrasi Limbah) 50
Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan Efisiensi *Removal Chemical Oxygen Demand* (COD) Pada *Constructed Treatment Wetland (CTW)*. K (Kontrol Air Limbah), C2 (Tanaman + Air Limbah), C3 (Tanaman + Air Limbah + Bakteri), 25% dan 50% (Konsentrasi Limbah) 52
Gambar 4. 5 Grafik Pengukuran ORP Pada Reaktor (a) *Floating Treatment Wetland* (FTW), (b) *Constructed Treatment Wetland*. 56

BAB I
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Berjalan dengan kemajuan industri yang terus meningkat di Indonesia memberikan dampak pada pemenuhan kebutuhan beragam bagi masyarakat Indonesia. Pertumbuhan sektor industri seperti industri migas, pertanian, dan industri non-migas lainnya telah berkontribusi pada peningkatan pencemaran lingkungan, termasuk pencemaran air, tanah, dan udara (Mulyani & Rijal, 2018). Pencemaran air menjadi perhatian utama masyarakat karena air dianggap sebagai sumber kehidupan yang krusial. Di antara tiga jenis limbah industri yaitu limbah cair, gas, dan padat, limbah cair dari industri menjadi permasalahan yang sering muncul di lingkungan. Jika limbah cair tidak dikelola atau diolah dengan benar, dampak negatifnya terhadap lingkungan perairan, terutama terhadap sumber daya air, dapat menjadi serius (Naslimuna *et al.,* 2018).

Limbah cair dari industri tekstil merupakan salah satu jenis limbah cair yang sering dijumpai dan memiliki potensi besar untuk mencemari lingkungan. Tingginya beban air limbah organik yang dihasilkan mencapai sekitar 883 ton per hari, dengan 29% dari total beban tersebut berasal dari sektor industri tekstil. Limbah cair yang dihasilkan oleh industri tekstil umumnya berasal dari proses pewarnaan yang menggunakan berbagai bahan kimia yang larut dalam air sebagai pelarut, sehingga menghasilkan limbah cair yang berwarna dengan tingkat COD yang tinggi selain itu kandungan parameter yang ada seperti BOD (*Biochemical Oxygen Demand*), COD (*Chemical Oxygen Demand*), pH, suhu, kekeruhan, salinitas, warna yang pekat serta konsentrasi bahan kimia toksik yang tinggi dan berfluktuatif (Priya, 2011).

Industri tenun di Desa Troso, Kecamatan Pecangaan, Kabupaten Jepara merupakan sektor produksi yang sangat produktif, menghasilkan sekitar 37.322.128 meter kain pada tahun 2017 dengan partisipasi sekitar 11.332 pekerja

menurut laporan dari Dinas Perindustrian dan Perdagangan Kabupaten Jepara pada tahun 2017. Meskipun produksinya tinggi, hal ini juga menyebabkan peningkatan volume limbah cair yang dihasilkan (Sa'adah, 2020). Hasil pengujian karakteristik limbah cair dari industri tenun Troso menunjukkan bahwa kadar *Total Suspended Solid* (TSS) mencapai 520 mg/l, kromium total sebesar 0,003 mg/l, *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) mencapai 1935 mg/l, *Chemical Oxygen Demand* (COD) mencapai 5593 mg/l, kandungan fenol sebesar 2,348 mg/l, dan nilai pH mencapai 8. Dimana parameter TSS, BOD, COD dan Fenol kadarnya melebihi baku mutu menurut Perda Provinsi Jateng No. 5 Th 2012, sehingga jika tidak diolah, kandungan tersebut berpotensi membahayakan lingkungan. Data diatas menunjukkan sebagian besar pengrajin belum berhasil mengelola limbah secara tepat dimana masih ada perlakuan membuang secara langsung ke selokan dan sungai (Agus Ulin Nuha *et al.*, 2016).

Air limbah tekstil yang dibuang tanpa pengolahan apapun mengandung bahan pewarna dan zat pendukung hasil proses pewarnaan sehingga menimbulkan kontaminasi yang sulit dihindari. Penurunan kualitas air akibat meningkatnya kekeruhan air akibat kontaminasi pewarna menghalangi masuknya cahaya ke dalam air, sehingga menyebabkan berkembangnya efek mutagenik dan karsinogenik dari pewarna tersebut (Priyadi & Nanik, 2019). Pada industri tekstil, proses pewarnaan dan pembilasan menghasilkan air limbah berwarna dengan *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang tinggi karena adanya zat organik dalam air limbah. Warna air limbah tersebut disebabkan oleh kontaminan serat yang berasal dari serat alami yang dapat bersifat racun dan sulit terurai jika masuk ke dalam air (Agusdin & Setiorini, 2020). Selain itu adanya logam berat seperti Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, dan Zn dalam bentuk garam ionik dapat diserap langsung oleh organisme sungai, atau meresap ke dalam tanah. Baik melalui pencemaran air tanah maupun konsumsi makanan secara langsung, gangguan dapat mengakibatkan berbagai penyakit seperti kanker, tumor, gangguan saraf, mental, serta penyakit menular seksual dan lainnya (Imtiazuddin *et al.*, 2012).

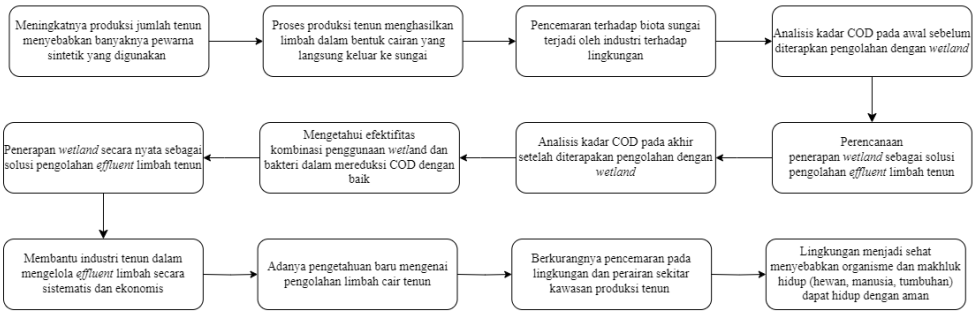
Sebagai langkah preventif yang berkelanjutan, dilakukan pembangunan instalasi pengolahan air limbah skala kecil dengan teknologi reaktor *Continuous*

Wetlands mencakup *Floating Wetland* serta *Constructed Wetland* yang memanfaatkan rumput *vetiver* (*Vetiveria zizanioides*) dan bakteri (Afzal 2018). Tanaman *Vetiveria zizanioides*, dianggap ideal karena memiliki biomassa yang besar serta kemampuan akumulasi kontaminan fisika kimia, remediasi hidrokarbon dan air limbah tekstil (Tambunan *et al.*, 2018). Rumput ini mudah dikelola, memiliki kemampuan adaptasi ekologis yang kuat dan dapat bertumbuh di beragam kondisi tanah untuk mengatasi pencemaran lingkungan (Purwani 2010). Teknologi *Wetland* ini dapat mengurangi tingkat COD sebesar 89,61% (M.H. Sayadi, 2012), 86% untuk BOD, dan 73% untuk amonia (NH3) (Mander *et al.*, 2007). Sementara itu menurut penelitian Tara *et al.,* 2019 penggunaan teknologi *Wetland* dapat mendegrasi warna sebesar 86%, BOD sejumlah 92%, dan 91% untuk COD.

Penggunaan metode bioremediasi dengan bakteri saat ini sedang dikembangkan karena dianggap sebagai strategi pengolahan limbah yang efektif, hemat biaya, dan ramah lingkungan (Nafisah, 2020). Penggunaan bakteri endofit sangat dianjurkan karena dapat menguraikan polutan dan meningkatkan perkembangan tanaman. Inokulan bakteri endofit meningkatkan serapan hara untuk pertumbuhan tanaman dan biomassa, mengurangi stres tanaman, mengontrol mekanisme resistensi logam, dan mengurangi akumulasi logam berat pada tanaman melalui fitoekstraksi dan fitostabilisasi (Fajri *et al.*, 2024). Menurut Sastrawidana (2008) pada Sistem Pencampuran Anaerobik dan Aerobik Konsorsium Lumpur Limbah Tekstil untuk Pengolahan Limbah Tekstil Menggunakan Biofilm Bakteri, hasil dari pengolahan limbah dengan sistem pencampuran anaerobik dan aerobik adalah terjadi penurunan warna, diperoleh efisiensi sebesar 95,72 % dan pengurangan TDS sebesar 80,87%, TSS 95,72%, penurunan BOD dan COD sebesar 87,50% dan 98,38%.

Berdasarkan informasi tersebut, karena efektivitasnya yang terbukti dalam mengurangi kandungan polutan dalam aliran limbah industri, penelitian ini akan menggunakan konsorsium bakteri *Bacillus spizizeni, Bacillus cereus* dan *Stenotrophomonas maltophilia* untuk mengurangi kandungan polutan *Chemical Oxygen Demand* (COD) (Mukherjee & Roy, 2016).

Berlandaskan pada data yang telah ada, dilakukan penelitian dengan perbedaan yang telah direncanakan. Penggunanaan teknik bioremediasi menggunakan Tanaman *Vetiver* (*Vetiveria zizanioides*) dengan metode *Floating Treatment Wetland* dan *Constructed Treatment Wetland* menggunakan konsorium tiga bakteri endofit dan endogen (*Bacillus cereus, Bacillus spizizeni, Stenotrophomonas malthophilia*) dengan skala besar untuk mereduksi polutan *Chemical Oxygen Demand* (COD). Penelitian dilakukan dengan mengambil sampel air limbah tenun di Desa Troso, Kabupaten Jepara.



Gambar 1. 1 Kerangka Berfikir Penelitian

1.2. Rumusan Masalah

Dari isu pencemaran air limbah tenun di Sungai Troso, muncul pertanyaan-pertanyaan sebagai berikut ini:

1.) Bagaimana pengaruh konsentrasi COD dengan konsorsium bakteri endofit *Bacillus cereus* dan bakteri endogen *Stenotrophomonas maltophilia* dan *Bacillus spizizeni* dalam meningkatkan performa sistem *Wetland* pada limbah cair industri tenun ?

2.) Sejauh mana efektivitas konsorsium bakteri endofit *Bacillus cereus* dan bakteri endogen *Stenotrophomonas maltophilia* dan *Bacillus spizizeni* dalam memperbaiki kualitas air limbah tenun dengan mengurangi kandungan COD melalui sistem *Wetland* ?

1.3. Tujuan Penelitian

1.) Menjelaskan pengaruh konsentrasi COD dengan konsorsium bakteri endofit *Bacillus cereus* dan bakteri endogen *Stenotrophomonas maltophilia* dan *Bacillus spizizeni* dalam meningkatkan performa sistem *Wetland* pada limbah cair industri tenun.

2.) Memaparkan efektivitas konsorsium bakteri endofit *Bacillus cereus* dan bakteri endogen *Stenotrophomonas maltophilia* dan *Bacillus spizizeni* dalam memperbaiki kualitas air limbah tenun dengan mengurangi kandungan COD melalui sistem *Wetland*.

1.4. Manfaat Penelitian

Peneltian ini memiliki manfaat diantaranya adalah :

1.) Memberikan kontribusi sebagai penelitian baru (rujukan) dalam bidang pengolahan air limbah industri tenun dengan fokus pada efektivitas konsorsium bakteri endofit *Bacillus cereus* dan bakteri endogen *Stenotrophomonas maltophilia* dan *Bacillus spizizeni* dalam meningkatkan performa sistem *Wetland* dalam Mereduksi COD.

2.) Menambah pemahaman (referensi) mengenai peran bakteri endofit *Bacillus cereus* dan bakteri endogen *Stenotrophomonas maltophilia* dan *Bacillus spizizeni* dalam proses degradasi COD pada air limbah tenun melalui penggunaan teknologi *Wetland*, yang dapat membantu meningkatkan efisiensi pengolahan limbah di industri tekstil.

3.) Memberikan wawasan praktis (bahan studi) bagi industri tekstil dalam mengidentifikasi dan menerapkan solusi pengolahan limbah yang ramah lingkungan dan ekonomis, dengan demikian berpotensi mengurangi dampak negatif industri terhadap lingkungan hidup.

1.5. Ruang Lingkup

Penelitian ini memiliki ruang lingkup diantaranya :

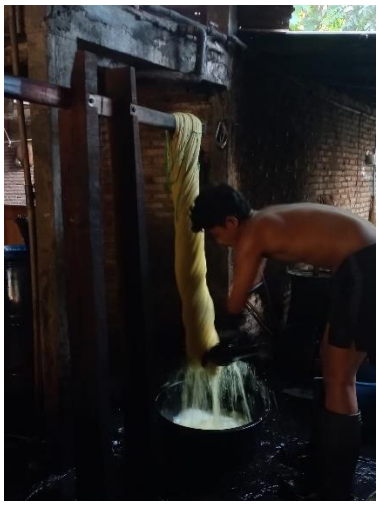
1.) Air limbah tenun yang diambil sebagai sampel berasal dari hasil *effluent* proses produksi tenun.
2.) Isolat bakteri endofit dari akar tanaman *Vetiveria zizanioides.*
3.) Isolat bakteri endogen dari tanah reaktor.
4.) Konsorium bakteri yang dipakai yaitu *Bacillus cereus, Bacillus spizizeni*, *Stenotrophomonas malthophilia*.
5.) Reaktor yang dipakai berjenis *Floating Treatment Wetland* dan *Constructed Treatment Wetland*.
6.) Parameter yang akan diuji yaitu *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang diujikan di Laboratorium Kualitas Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
7.) Acuan yang dipakai untuk menganalisis parameter yaitu :
    - SNI 6989.2:2009 – Air dan air limbah : Cara Uji Kebutuhan Oksigen Kimiawi *Chemical Oxygen Demand* (COD) dengan refluks tertutup secara Spektrofotometer UV-Vis.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah Cair Tenun Troso

Tenun troso sudah berkembang sejak tahun 1935 hingga saat ini. Kreativitas dari Desa Troso pun semakin berkembang ditandai dengan warna, motif dan bahan yang digunakan sangat bervariatif. Tenun troso tidak hanya dibuat dalam bentuk pakaian, namun terdapat banyak produk yang dihasilkan seperti, selendang, sajadah, taplak meja, tas, dan lain sebagainya (Ramadhani, 2015). Pada tahapan proses pembuatan tenun dari bahan mentah hingga menjadi tenun utuh, melewati beberapa tahapan yang cukup memakan waktu.

Pada tahap pertama yaitu proses ngeteng, dimana benang disusun pada plangkan, yang merupakan bentangan benang pada figura. Selanjutnya, motif dibuat pada plankan dengan tinta dan benang diikat dengan tali rafia untuk membentuk motif. Kemudian, dalam proses pewarnaan, bahan pewarna sintetis seperti direct, sulfur, naptol, dan sebagainya di gunakan untuk mencelupkan benang berulang kali untuk mendapatkan warna yang diinginkan. Setelah pewarnaan selesai, benang dijemur hingga kering dan tali rafia dilepaskan. Akhir dari proses ini, benang ditenun menjadi kain menggunakan Alat Tenun Bukan Mesin (ATBM). Sebelumnya masyarakat troso menggunakan alat tenun gendong, yang menghasilkan lurik dan mori kasar sebagai produk akhirnya (Sa’adah, 2020).



Gambar 2.1 Pewarnaan pada Industri Tenun Troso
(Sumber : Dokumentasi Lapangan)

Zat perwarna naftol merupakan zat yang dapat dicelup dengan cepat dan memiliki warna yang kuat yang sering digunakan dalam industri tenun troso. Zat warna naftol adalah senyawa yang tidak larut dalam air yang terdiri dari dua komponen utama: golongan naftol AS (*Anilis acid*), yang terdiri dari naftol itu sendiri, dan komponen basa naftol yang disebut amina aromatik primer; dan golongan diazonium, yang biasanya disebut garam. Jika keduanya dilarutkan, mereka bergabung menjadi senyawa berwarna. Karena senyawa yang terjadi memiliki gugus azo, zat warna naftol tidak larut dalam air (Laksono, 2012).

Industri tenun Troso memiliki banyak tahapan yang harus diikuti dengan cermat sebelum memulai proses pewarnaan. Pada awalnya, TRO (*Turkish Red Oil*) dibuat dalam air panas dengan zat pelarut, Naphtol, dan kaustik (NaOH). Setelah larutan teepol atau sabun telah dibasahi, benang diambil dan direndam dalam larutan TRO + Naphtol + NaOH selama beberapa menit sebelum diperas. Selanjutnya, air dingin digunakan untuk membuat larutan garam diazo, yang berfungsi sebagai pembangkit warna naphtol. Larutan garam diazo kemudian direndam kembali dalam benang, menghasilkan benang berwarna dengan cepat (Mukti, 2020).

Zat pewarna sintetis biasanya digunakan dalam industri tenun karena memiliki struktur yang kompleks dan sulit terurai di lingkungan (Hussain *et al.*, 2018). Jika limbah industri dibuang langsung ke badan air tanpa diproses sebelumnya, dapat meningkatkan kadar *Chemical Oxygen Demand* (COD) di

dalamnya, yang dapat menyebabkan kematian organisme. Menurut Andre (2017), tingginya konsentrasi senyawa organik juga dapat menyebabkan badan air memiliki bau yang tidak sedap. Sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 16 tahun 2019, standar kualitas air limbah tenun menetapkan nilai COD berada di rentang 115 – 150 mg/L, BOD pada 35 – 60 mg/L, debit limbah tidak boleh melebihi 100 m^3 per ton produk tekstil, dan kadar warna pada 200 Pt-Co.

2.2 Bioremediasi

Bioremediasi, dinilai sebagai salah satu strategi pengelolaan limbah yang menggunakan agen biologis untuk membersihkan bahan kimia berbahaya. Menurut *United States Environmental Protection Agency*, proses ini merupakan cara alami untuk membersihkan limbah dan dianggap sebagai alternatif ramah lingkungan dalam pengolahan air limbah tekstil jika dibandingkan dengan metode lainnya (Priyanka *et al.,* 2022). Dalam bioremediasi, baik polutan organik maupun anorganik dipecah atau dinetralkan menggunakan agen biologis seperti tumbuhan, bakteri, atau jamur (Saravanan *et al.,* 2023).

Ketika menggunakan tumbuhan, proses bioremediasi disebut sebagai fitoremediasi, hal ini melibatkan tumbuhan yang mampu hidup di lingkungan yang tercemar. Limbah atau polutan diubah menjadi senyawa anorganik seperti karbon dioksida, air, dan metana (Palma-Cruz *et al.,* 2016). Keberhasilan biodegradasi tergantung pada aktivitas enzim, sehingga mikroorganisme yang memiliki kemampuan untuk mereduksi hidrokarbon mesti dioptimalkan aktivitasnya melalui pengaturan kondisi lingkungan dan penambahan suplemen yang sesuai. Faktor lingkungan seperti kondisi limbah, suhu, oksigen, dan nutrisi dapat memengaruhi proses bioremediasi (Kang, 2014).

Praktik bioremediasi terdiri dari dua jenis: (a) bioremediasi yang menggunakan mikroba, dan (b) bioremediasi yang didasarkan pada lokasi (Wang *et al.,* 2021).

a. Bioremediasi yang Melibatkan Mikroba

Teknologi bioremediasi yang menggunakan mikroorganisme untuk merangsang pertumbuhan mikroba dilakukan melalui tiga metode, yaitu:

1.) Biostimulasi

Biostimulasi ialah proses yang menambah sumber energi tertentu yang dibutuhkan mikroorganisme, seperti nutrisi dan oksigen, atau menciptakan kondisi lingkungan yang lebih baik, seperti dengan memberikan aerasi agar mikroorganisme dapat tumbuh dan beraktivitas dengan lebih baik. Untuk meningkatkan pertumbuhan dan aktivitas bakteri, nutrisi dan oksigen dalam bentuk cair dan gas ditambahkan ke dalam air yang tercemar. Namun, mikroba tersebut dapat tumbuh dengan lambat atau mati jika kondisi yang diperlukan tidak terpenuhi.

2.) Bioaugmentasi

Bioaugmentasi dikenal sebagai pengembangan atau pengenalan berbagai jenis mikroorganisme, baik yang alami maupun yang telah dimodifikasi secara genetik, untuk meningkatkan kinerja mereka. Dalam membersihkan kontaminan tertentu, mikroorganisme yang telah dipilih dengan hati-hati dimasukkan ke dalam air yang tercemar. Namun, dalam proses ini terdapat kelemahan dimana sulit mengontrol kondisi lingkungan yang tercemar agar mikroorganisme dapat berkembang secara optimal, dan mikroorganisme yang diperkenalkan ke lingkungan baru mungkin mengalami kesulitan untuk beradaptasi. Dalam beberapa situasi tertentu, teknik *Bioaugmentasi* dapat dikombinasikan dengan penyediaan nutrisi tambahan.

3.) Bioremediasi Intrinsik

Bioremediasi alami jenis ini terjadi di dalam air yang tercemar secara spontan tanpa adanya intervensi manusia di dalam air yang tercemar.

b. Bioremediasi Berdasarkan Lokasi

Bioremediasi limbah tenun dapat dilakukan baik secara *in-situ* maupun *ex-situ*. Metode pertama menggunakan mikroorganisme yang sudah ada di lingkungan tercemar untuk mereduksi limbah di lokasi asalnya *in-situ*. Metode kedua mengambil limbah dari lokasi asalnya dan diproses di tempat lain *ex-situ*. Metode ini mampu menangani berbagai jenis kontaminan dan tanah, dan lebih cepat dan mudah dikontrol daripada bioremediasi *in-situ*.

2.3 Fitoremediasi

Fitoremediasi merupakan sebuah sistem di mana tanaman air tertentu bekerja sama dengan mikroorganisme dalam berbagai media seperti tanah, koral, dan air untuk mengurangi kontaminan menjadi bahan yang tidak berbahaya atau bahkan berguna secara ekonomi (Lestari *et al.,* 2020). Keunggulan fitoremediasi menggunakan tanaman termasuk kemampuan untuk dilakukan baik secara insitu maupun eksitu, kemudahan penerapannya, dan biaya yang relatif rendah.

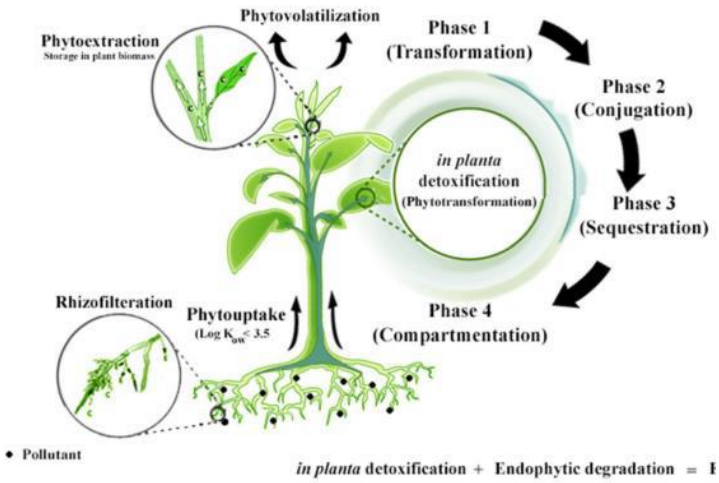
Selain itu, tanaman lebih tahan lama daripada mikroorganisme pada konsentrasi kontaminan yang tinggi dan mampu menyerap serta mengurangi toksisitas logam berat dengan lebih cepat tanpa mengganggu pertumbuhan tanaman. Metode fitoremediasi ini telah mengalami perkembangan pesat karena dianggap lebih ekonomis dibandingkan dengan metode lainnya.

Tidak semua tanaman cocok untuk digunakan dalam fitoremediasi karena tidak semua tanaman memiliki kemampuan yang sama dalam melakukan metabolisme, volatilisasi, dan akumulasi polutan. Tanaman yang dipilih sebagai fitoremediator harus memiliki beberapa karakteristik khusus, termasuk pertumbuhan yang cepat, kemampuan untuk menyerap air dalam jumlah besar dalam waktu singkat, kemampuan untuk meremediasi lebih dari satu jenis polutan, dan tingkat toleransi yang tinggi terhadap polutan (Akhsin Zulkoni, 2017).

Faktor-faktor yang memengaruhi keberhasilan fitoremediasi meliputi kemampuan tanaman untuk mengakumulasi berbagai jenis polutan dan konsentrasi yang berbeda, serta karakteristik fisik dan iklim, dan sifat fisiologi tanaman. Jumlah bahan kimia berbahaya, mekanisme akumulasi dan hiperakumulasi dianalisis dari segi fisiologi, biokimia, dan molekuler, sementara penggunaan konsentrasi limbah yang tepat juga sangat penting dalam menentukan keberhasilan proses fitoremediasi (Razikin *et al.,* 2015). Tanaman mengambil logam berat dari lingkungan dengan menggunakan beragam cara seperti fitoekstraksi, *fitofiltrasi*, fitostabilisasi, *Fitovolatilisasi*, dan *rhizodegradasi* (Rezania *et al.,* 2015; Shen *et al.,* 2022).

a.) Fitoekstraksi

Fitoekstraksi adalah proses di mana akar tanaman menyerap kontaminan dari lingkungan dan mengakumulasikannya di bagian atas tanaman, seperti pucuk. Pendekatan ini, juga dikenal sebagai fitoakumulasi atau fitoabsorpsi, merupakan metode yang efektif dan ramah lingkungan untuk menghilangkan logam berat terutama dari tanah yang terkontaminasi, tanpa merusak kesuburan dan struktur tanah (Khan *et al.,* 2014). Tanaman fitoekstraktor memiliki beberapa karakteristik yang memungkinkannya untuk mentolerir dan mengekstraksi logam berat dari lingkungan yang terkontaminasi, yaitu pertumbuhan cepat dengan produksi biomassa yang tinggi, sistem akar yang panjang, mudah dibudidayakan, adaptasi yang baik terhadap berbagai kondisi lingkungan, dan resistensi terhadap serangan herbivora (Singh *et al.,* 2022).



Gambar 2. 2 Mekanisme degradasi pencemar pada tumbuhan
Sumber : (Ijaz *et al.*, 2016)

b.) Fitofiltrasi

Fitofiltrasi, yang juga dikenal sebagai rhizofiltrasi, melibatkan penyerapan polutan oleh akar tumbuhan dari aliran air, merupakan salah satu metode untuk menghilangkan logam berat. Dalam fitoremediasi menggunakan tanaman air, baik yang mengapung, terendam, atau muncul, logam berat diserap oleh tumbuhan, yang mengurangi mobilitas kontaminan ke dalam air tanah (Olguin & Sanchez-Galvan, 2012).. Untuk mencapai ekstraksi logam berat yang optimal, tanaman *fitofiltrasi* harus ditanam secara hidroponik dan memiliki sistem perakaran yang kuat.

Efisiensi *fitofiltrasi* sangat dipengaruhi oleh sifat biokimia tanaman tersebut (Thakur *et al.,* 2016).

c.) Fitostabilisasi

Fitostabilisasi ialah suatu proses dalam mengurangi pergerakan logam berat di lingkungan dengan menyerap dan mengumpulkannya di dalam jaringan akar, mengendapkannya di zona akar, atau mengubah valensi logam di rizosfer, sehingga mengurangi risiko toksisitasnya dan mencegah penyebarannya ke dalam rantai makanan dan air tanah (Khan *et al.,* 2014). Tumbuhan yang melakukan fitostabilisasi mampu mengubah logam berat menjadi bentuk yang kurang beracun melalui penggunaan enzim redoks tertentu. Tumbuhan fitostabilisator mempunyai akar yang luas sehingga mampu menyebar luas di tanah dan secara efektif berinteraksi dengan logam berat (Pérez-Sanz *et al.,* 2012).

d.) Fitovolatilisasi

Fitovolatilisasi adalah jenis fitoekstraksi, dimana logam berat tidak terakumulasi secara permanen dalam biomassa, melainkan diubah menjadi bentuk volatil yang kurang beracun, dan dilepaskan ke atmosfer (Canales-Pastrana & Paredes, 2013). Proses *fitovolatilisasi* memiliki keunggulan dibandingkan teknik fitoremediasi lainnya, karena menghilangkan logam (metaloid) dari lingkungan yang terkontaminasi tanpa perlu memanen dan membuang tumbuhan yang terakumulasi logam berat.

e.) Rizodegradasi

Rizodegradasi merujuk pada pengurangan atau perubahan ion logam berat di sekitar akar tanaman oleh mikroorganisme di rizosfer. Akar tanaman memberikan sumber karbon dan nitrogen bagi mikroorganisme di rizosfer, menciptakan lingkungan yang kaya akan nutrisi, sehingga meningkatkan aktivitas mikroba. Mikroorganisme di rizosfer memiliki kemampuan untuk menghasilkan berbagai senyawa seperti siderofor, biosurfaktan, asam glukonat, asam oksalat, dan asam sitrat, yang berperan penting dalam melarutkan dan mengubah bentuk logam berat (Ilhardt *et al.,* 2019).

2.4 *Floating Treatment Wetland*

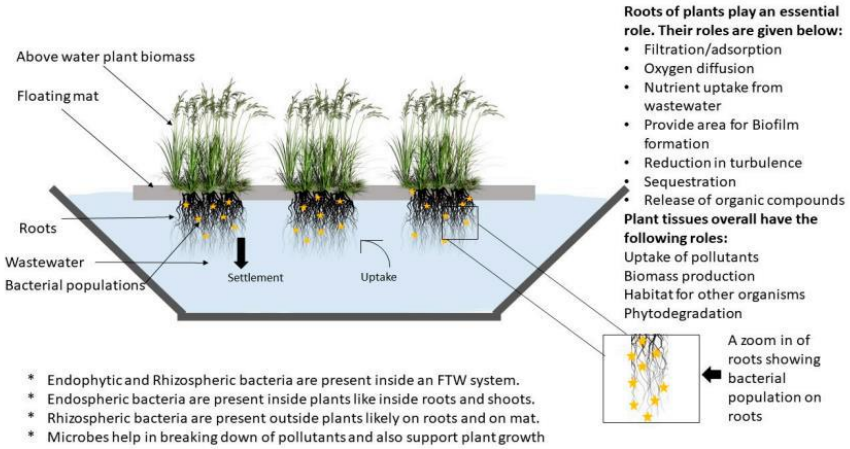
FTW (*Floating Treatment Wetland*) adalah sebuah teknologi pengolahan air limbah yang fektif dan berkelanjutan. Dalam sistem FTW, tanaman ditanam di atas platform yang mengapung di permukaan air, dengan akarnya menjangkau ke dalam air yang tercemar untuk bertindak sebagai filter biologis. Akar tanaman menyerap logam atau elemen pencemar di alam air, sementara bahan organik didegradasi oleh mikroorganisme yang membentuk biofilm di sekitar akar dan permukaan platform (Shahid et al, 2019).

Meskipun FTW secara tradisional digunakan untuk mengolah berbagai jenis limbah cair seperti limbah industri, limbah kota, dan limbah asam tambang, namun sistem ini memiliki beberapa keterbatasan seperti stabilitas yang rendah dan kinerja pemurnian yang kurang efisien. Salah satu keunggulan dari pendekatan *Floating Wetland* adalah ketidakpekaannya terhadap fluktuasi air serta kemampuannya untuk diterapkan langsung di atas badan air tanpa memerlukan banyak lahan. Selain itu, *Floating Wetland* juga menyediakan manfaat tambahan seperti menciptakan habitat baru bagi fauna, serta meningkatkan estetika lingkungan (David et al, 2012 ; Kamble et al, 2012, Huang et al, 2013).

Ketika *Floating Wetland* diterapkan di daerah pesisir, ia dapat mengurangi gelombang, mengurangi erosi, dan menjadi habitat bagi satwa liar. Beberapa masalah yang muncul adalah kurang optimalnya bakteri asli dalam menguraikan senyawa organik beracun dan rendahnya kemampuan metabolik tanaman. Oleh karena itu, pendekatan tambahan seperti inokulasi dengan *Plant Growth Promoting* (PGP) atau bakteri pendegradasi polutan dilakukan untuk meningkatkan efisiensi pengolahan dalam sistem FTW (Tara et al, 2019).

Untuk menjaga daya apung di FTW, penting untuk menggunakan tanaman dengan kepadatan rendah pada material atau tanaman yang memiliki jaringan parenkim. Struktur terapung dapat dibuat menggunakan berbagai material konstruksi seperti lembaran poliester, pipa PVC, dan anyaman bambu. Tanaman helofit lebih disukai dalam perancangan FTW karena kemampuannya untuk mengapung di atas permukaan air dengan menyerap udara di dalam akarnya. Beberapa faktor yang harus dipertimbangkan dalam merancang struktur terapung

termasuk daya tahan, fungsionalitas, berat, sensitivitas lingkungan, penahan, fleksibilitas, dan biaya (Shahid et al, 2019).



Gambar 2. 3 *Floating Treatment Wetland*
(Sumber : Wei *et al*, 2020)

2.5 *Constructed Treatment Wetland*

CW merupakan suatu struktur cekungan dangkal yang diisi dengan material substrat seperti kerikil atau pasir, serta ditanami dengan jenis vegetasi yang mampu bertahan dalam kondisi air yang jenuh. Air limbah yang dialirkan ke dalam cekungan ini dapat mengalir di atas permukaan substrat atau meresap melalui media tersebut, kemudian dibuang keluar dari cekungan melalui suatu struktur yang mengatur kedalaman air di dalam CW. Sistem CW didesain khusus untuk melakukan pengolahan air limbah, sehingga umumnya lebih efisien dalam prosesnya dibandingkan dengan lahan basah alami (Sudarsan *et al.*, 2015). CW menggunakan substrat, tanaman, dan mikroorganisme untuk mengolah kontaminan baik yang bersifat organik, anorganik, maupun nutrisi yang berlebihan. Air limbah yang melewati CW diolah secara terkendali dengan pengawasan manual (Fan *et al.*, 2021).

CW telah digunakan dalam mengelola berbagai jenis air limbah, termasuk air limbah domestik, pertanian, industri, lindi dari Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), perkotaan, pengolahan makanan, petrokimia, kimia, tekstil, dan penyamakan kulit. Proses penghilangan polutan dalam CW bergantung pada akar tanaman dan keragaman mikroba dalam komunitasnya. Proses dasar dalam CW mencakup

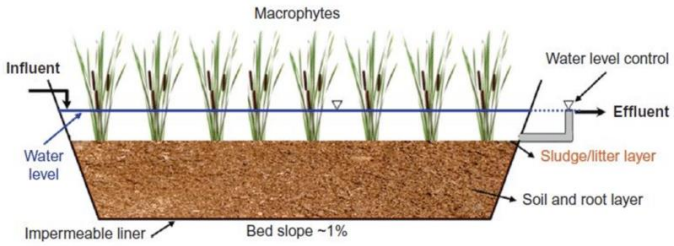
penyerapan, penyaringan, dan metabolisme zat terlarut maupun tersuspensi (Ravikumar, 2022). Prinsip dasar CW melibatkan proses respirasi pada tanaman hydrophyte yang mampu menyerap oksigen dari udara melalui daun, batang, dan akar, kemudian mengeluarkannya kembali ke sekitar akar tanaman (*rhizosphere*), sehingga tanaman tersebut dapat bertahan hidup dalam kondisi anaerobik (Kasman *et al.*, 2018).

Komponen utama dari CW terdiri dari substrat dan makrofita. Substrat memegang peranan yang sangat penting dalam proses penghilangan polutan melalui berbagai reaksi fisik, biologis, dan kimia seperti filtrasi, penyerapan, penguburan, pengendapan, pertukaran ion, degradasi oleh mikroorganisme, dan lain sebagainya. Dalam pemilihan substrat, beberapa aspek yang harus dipertimbangkan meliputi biaya dan ketersediaan substrat lokal, kelayakan hidrolik dan teknik, kemampuan dalam menghilangkan kontaminan, dukungan pertumbuhan tanaman dan mikroorganisme, keamanan, risiko penyumbatan substrat, masa pakai substrat, proses pemulihan, pembuangan, dan faktor-faktor lainnya.

Berdasarkan pola aliran airnya, CW dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu *free water surface* (FWS) dan *subsurface flow* (SSF). SSF sendiri terbagi lagi menjadi dua jenis, yakni SSF dengan aliran vertikal dan SSF dengan aliran horizontal (Zidan dan Mohammed, 2018).

1.) *Free Water Surface* (FWS)

FWSCW dengan aliran permukaan air bebas merupakan jenis CW di mana air mengalir di atas permukaan media. Pada tipe CW ini, vegetasi air tumbuh di atas permukaan air, dan air mengalir melalui CW secara perlahan-lahan di atas permukaan media. CW tipe FWS umumnya digunakan untuk mengolah air limbah perkotaan, air hujan yang tergenang, dan air drainase tambang. FWSCW dapat dilihat pada gambar berikut :

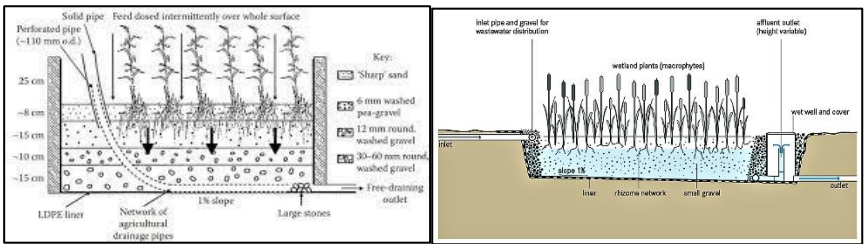


Gambar 2. 4 *Free Water Surface*
(Sumber: Zidan dan Mohammed, 2018)

2.) *Subsurface flow* (SSF)

SSFCW dengan aliran di bawah permukaan adalah jenis CW di mana air mengalir di bawah atau melalui media dengan adanya penghalang rembesan alami atau buatan di struktur saluran masuk dan keluar. CW dengan aliran di bawah permukaan ini memiliki kemampuan penghilangan pencemar yang sama atau bahkan lebih baik daripada CW dengan aliran permukaan bebas, namun memanfaatkan luas lahan yang lebih kecil. CW dengan aliran di bawah permukaan juga memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan CW aliran permukaan, seperti mengurangi risiko bau yang dihasilkan oleh air limbah dan mencegah munculnya serangga kecil sebagai vektor penyakit.

Selain itu, air limbah langsung berinteraksi dengan akar tanaman, yang memainkan peran penting dalam penguraian bahan organik dan mengurangi kelebihan nutrisi. Proses ini didukung oleh sistem akar tanaman dan media seperti tanah dan batu, serta peran biofilm dalam menjaga proses penguraian. Dari segi efektivitasnya, CW memiliki efisiensi penyisihan TSS hingga 97% (Rahmawati dkk., 2022). CW dengan aliran di bawah permukaan juga mampu mengurangi polutan minyak dan lemak sebesar 84,2%, BOD 59,0-93,3%, COD 50,7-95,2%, dan nitrat 85,4% (Loshinta dkk., 2020). CW dengan aliran di bawah permukaan terbagi menjadi dua jenis, yaitu CW dengan aliran horizontal dan CW dengan aliran vertikal dapat dilihat pada gambar berikut :



(a) (b)

Gambar 2. 5 (a) *Subsurface flow* Aliran Vertikal & (b) Aliran Horizontal

(Sumber: Zidan dan Mohammed, 2018)

2.6 Tanaman *Vetiveria zizanioides*

*Vetiver*a merupakan tanaman hiperakumulator logam berat sehingga dapat menghilangkan polutan dari tanah atu perairan yang terkontaminasi. Akar wangi dari tanaman ini dapat ditanam secara hidroponik sehingga dapat digunakan sebagai proses remediasi tanah dan air (Hidayah *et al.,* 2018). Klasifikasi akar wangi menurut Greenfield (1989) adalah sebagai berikut.

Kingdom *: Plantae*
Divisi *: Magnoliophyta*
Kelas *: Liliopsida*
Ordo *: (Poales) Cyperales*
Famili *: (Poaceae) Graminiae*
Genus *: Vetiveria Roberty*
Spesies *: Vetiveria zizanioides L. Nash.*

Gambar 2. 6 Tanaman *Vetiveria zizanioides*

Menurut Darajeh *et al.* (2014), *Vetiveria zizanioides* termasuk dalam keluarga rumput (*Graminiae*) yang sama dengan tanaman seperti jagung, sorgum, dan tebu. Tanaman ini ditemukan tumbuh liar atau dibudidayakan di India utara dan digunakan untuk tujuan konservasi tanah dan air oleh Bank Dunia. Selain itu, tanaman ini tersebar luas di daerah tropis dan subtropis di seluruh dunia, termasuk di Afrika, Asia, Amerika, Australia, dan Eropa.

Vetiveria zizanioides berkembang biak dengan menggunakan tunas dan memiliki kemampuan berbunga tanpa menghasilkan biji, sehingga tidak menimbulkan risiko ekologis. Akar wangi, yang merupakan jenis rumput dengan tinggi 0,5-1,5m, sangat toleran terhadap pH yang ekstrem antara 3-11,5, serta terhadap toksisitas Al dan Mn, serta toleran terhadap berbagai macam logam seperti As, Cd, Cu, Cr, dan Ni (Purwani, 2010).

Tanaman *Vetiveria zizanioides* memiliki perakaran yang rimbun sehingga dapat digunakan sebagai penahan erosi, akar wangi di tanam sebagai tanaman pagar yang berguna sebagai penanaman kontur, pengendalian banjir, reklamasi tanah (Truong *et al.* 2011). Selain itu, tanaman ini memiliki adaptasi ekologi yang kuat, produktivitas biomassa yang besar, mudah dalam perawatan, dan dapat tumbuh di berbagai kondisi lingkungan yang tercemar serta mempnyai daya adaptasi yang tinggi. Suhu yang dapat menyebabkan kematian tanaman ini berada dalam kisaran -15°C hingga -20°C (Gurnita *et al*, 2017).

Karakteristik tanaman *vetiver* yang membuatnya menjadi tanaman pelindung lingkungan meliputi:

a. Sangat toleran terhadap tingkat keasaman, alkalisitas, salinitas, sodisitas, dan magnesium yang tinggi.
b. Memiliki toleransi yang tinggi terhadap logam-logam berat seperti Al, Mn, As, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, Se, dan Zn dalam tanah.
c. Mampu menyerap unsur hara seperti nitrogen, fosfor, dan logam berat seperti merkuri, kadmium, dan timbal yang larut dalam air tercemar.
d. Kemampuan untuk tumbuh kembali dengan cepat di lingkungan yang buruk dan pulih kembali setelah tanah diperbaiki.

e. Batang yang tegak dan kokoh membentuk pagar saat ditanam berdekatan, sehingga dapat bertahan terhadap aliran air yang kuat dan berfungsi sebagai penjebak sedimen (Siagian, R., Maryudi, M., and Purba, 2018).

2.7 COD

Chemical Oxygen Demand (COD) adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik yang terlarut dalam air (Hammer dan Hammer, 2008).. Penggunaan COD masih relevan dalam menetapkan standar kualitas air limbah karena dapat memberikan perkiraan terhadap jumlah bahan organik yang mencemari badan air dan dampaknya terhadap penurunan oksigen terlarut (Atima, 2015). Pengujian COD merupakan salah satu cara yang umum digunakan untuk menilai apakah air tercemar atau tidak karena lebih mudah dilakukan dibandingkan dengan parameter kualitas air lainnya (Marlisa,2012).

Proses pengujian COD melibatkan penambahan kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) dan asam sulfat (H_2SO_4) ke dalam sampel air, kemudian larutan tersebut dipanaskan dan dikondensasi menggunakan thermoreaktor selama dua jam pada suhu 150^0 C, setelah itu dibaca menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Senyawa organik dalam air akan teroksidasi selama proses tersebut. Metode pengukuran COD dapat dilakukan menggunakan titrasi kalium dikromat atau spektrofotometer UV-Vis (Li *et al.*, 2018). Meskipun metode titrasi lebih cepat dan ekonomis, keakuratannya dapat dipengaruhi oleh kemampuan oksidasi zat organik dan adanya pencemaran sekunder oleh garam kromium.

Metode spektrofotometer UV-Vis, yang pertama kali diperkenalkan pada tahun 1965, merupakan metode tidak langsung yang lebih cepat karena tidak memerlukan proses pencernaan sampel dengan reagen kimia (Li *et al.*, 2018). Standar kualitas air limbah untuk industri tekstil atau tenun, menurut Peraturan Daerah Jawa Tengah Nomor 5 tahun 2012, menetapkan kadar maksimum COD sebesar 150 mg/l. Jika limbah cair dari industri tenun tidak diolah dan langsung dibuang ke lingkungan, dapat menyebabkan pencemaran lingkungan. Parameter utama yang menentukan tingkat pencemaran adalah *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Chemical*

Oxygen Demand (COD), Dissolved Oxygen (DO), TSS, pH, minyak, amonia, sulfida, fenol, dan MLSS (Moertinah, 2010).

2.8 Bakteri Endofit

Bakteri endofit, secara terminologi, merujuk pada jenis bakteri yang menghuni bagian dalam tumbuhan, biasanya di akar, tanpa menimbulkan dampak negatif pada tanaman inang. Bahkan, interaksi antara bakteri endofit dan tanaman dapat membentuk simbiosis mutualisme yang menguntungkan kedua belah pihak. Dalam konteks ini, tumbuhan menyediakan tempat tinggal dan nutrisi bagi bakteri endofit, sementara bakteri endofit membantu menurunkan toksisitas dan mengurangi evapotranspirasi polutan melalui aktivitas degradasi polutan tersebut (Shezadi *et al.*, 2016).

Bakteri endofit biasanya memasuki tanaman melalui akar, tetapi juga dapat memasuki melalui bunga, batang, dan kotiledon. Mereka dapat berada di dalam berbagai bagian tanaman seperti pembuluh vaskular, ruang antar sel, akar, batang, daun, dan buah. Meskipun jumlahnya sulit ditentukan secara pasti, bakteri endofit dapat diidentifikasi dengan mengisolasi mereka pada media agar (Desriani *et al.*, 2014).Kemampuan bakteri endofit dalam menyerap logam berat membuat teknologi fitoremediasi menjadi solusi yang menjanjikan untuk mengurangi paparan logam berat di lingkungan (Abedinzadeh *et al.*, 2019). Penelitian juga menunjukkan bahwa bakteri endofit dapat membantu tanaman bertahan hidup dalam lingkungan ekstrem dan meningkatkan daya tahan tanaman terhadap zat pencemar lingkungan (Hardoim *et al.*, 2008).

Kelompok bakteri endofit ini juga bermanfaat bagi tanaman sebagai agen biokontrol, melindungi tanaman dari infeksi patogen dengan merangsang produksi senyawa-senyawa pertahanan tanaman seperti asam salisilat, peroksidase, fitoaleksin, PR-protein, dan senyawa fenolik (Pradana dan Munif, 2016). Bakteri endofit menunjukkan potensi besar dalam fitoremediasi karena tidak hanya memiliki aktivitas degradasi polutan tetapi juga meningkatkan pertumbuhan tanaman (Afzal *et al.*, 2014). Populasi bakteri endofit dapat bervariasi, mencapai 10^7-10^9 CFU/g di rhizosfer dan 10^5-10^7 CFU/g di rhizoplane. Populasi

mikroba ini dapat membantu dalam penghilangan polutan dari air limbah (Ijaz *et al.*, 2015) dan juga meningkatkan pertumbuhan tanaman dengan produksi senyawa seperti IAA, solubilisasi fosfor, deaminase ACC, dan siderophore (Shehzadi *et al.*, 2016).

2.9 Bakteri Endogen

Bakteri indigenous adalah mikroorganisme yang hidup secara alami di lingkungan tertentu seperti tanah, air, atau limbah. Bakteri ini memiliki beragam manfaat, baik bagi manusia maupun lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bakteri indigenous mampu mendegradasi limbah organik, berfungsi sebagai pengendali hayati tanaman, dan bahkan menghasilkan senyawa antibiotik. Selain itu, bakteri ini berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem dengan memecah zat organik menjadi senyawa yang lebih sederhana, sehingga dapat dimanfaatkan dalam pengolahan limbah (Batubara *et al.*, 2015).

Bakteri indigenous juga dikenal sebagai pengurai serat yang penting dalam teknologi pertanian mikrobiologi. Beberapa isolat bakteri indigenous terbukti efektif dalam proses bioremediasi limbah, menunjukkan potensi besar untuk pengembangan teknologi pengolahan limbah. Mereka berperan sebagai agen biologis yang mampu mempercepat proses dekomposisi bahan organik dan senyawa berbahaya, membantu mengurangi pencemaran lingkungan secara alami (Octavia, 2010).

Selain itu, kemampuan bakteri indigenous dalam bioremediasi juga didukung oleh produksi enzim-enzim tertentu, seperti enzim lignolitik. Enzim ini mampu mendegradasi zat pewarna dan senyawa aromatik, serta mengubah senyawa kimia kompleks menjadi karbon dioksida dan air melalui reaksi oksidasi-reduksi. Kemampuan ini menjadikan bakteri indigenous agen bioremediasi yang sangat efektif dalam pengolahan limbah yang mengandung zat pewarna toksik (Siswanto *et al.*, 2007; Martani *et al.*, 2003).

Penggunaan bakteri indigenous dalam bioremediasi juga lebih efisien karena bakteri ini sudah beradaptasi dengan lingkungan asalnya, sehingga dapat tumbuh dan berkembang dengan baik tanpa memerlukan proses adaptasi yang panjang.

Misalnya, bakteri yang diisolasi dari air limbah lebih mudah digunakan dalam pengolahan air limbah dibandingkan dengan bakteri komersial yang perlu penyesuaian lebih lanjut (Arief *et al.*, 2010). Proses enzimatik yang dilakukan oleh bakteri indigenous menjadi kunci dalam penguraian senyawa organik yang terdapat dalam limbah, yang akhirnya mengurangi kadar polutan secara signifikan (Sutanto, 2012).

Keunggulan lain dari bakteri indigenous adalah biayanya yang lebih murah dibandingkan dengan bakteri komersial. Bakteri ini dapat dimanfaatkan secara luas dalam proses pengolahan limbah karena kemampuannya yang tinggi dalam mendegradasi bahan organik dan menghilangkan polutan. Hal ini menjadikan bakteri indigenous sebagai pilihan yang lebih ekonomis dan efisien dalam aplikasi bioteknologi pengolahan limbah, terutama pada limbah yang mengandung senyawa beracun dan berwarna (Martiningsih dan Rahmi, 2019).

2.10 Penelitian Terdahulu

Berikut paparan penelitian terdahulu tentang pengolahan limbah cair tekstil menggunakan sistem FTW dan CTW menggunakan tanaman *Vetivera zizanioides*.

Tabel 2. 1 Daftar Penelitian Terdahulu

No	Nama Peneliti	Tahun Penelitian	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil
1	Rahmadyanti & Audina	2020	*The Performance of Hybrid Constructed Wetland System for Treating the Batik Wastewater*	Penelitian ini menggunakan sistem *Hybrid Construction Wetland* dengan tanaman *Canna indica*, yang dianalisis menggunakan *Multivariate Analysis of Variance* (MANOVA).	Penggunaan HCWS dengan menggunakan Tanaman *Canna indica* mampu mencapai efisiensi penghilangan COD dan FOG sebesar 89,61% dan 89,53% pada hari ke-3, sementara efisiensi penghilangan TSS pada hari ke-5 mencapai 98,74%. Namun, sistem ini tidak efektif dalam mengolah air limbah industri batik. Dikarenakan, hasilnya tidak memenuhi standar kualitas untuk limbah tekstil dan klasifikasi kualitas air (kelas I, II, III, dan IV).

2	Rizki Amalia Priska Tampubolon, Laila Febrina, Ira Mulyawati	2020	*Reduction of BOD, COD and TSS Levels in Domestic Wastewater with Constructed Wetland System Using Apu Wood Plant (Pistia Stratiotes L.)*	Penelitian dilakukan dengan menggunakan Metode *Constructed Wetland* (CWs) untuk mengolah limbah domestik, dengan fokus pada Tanaman Kayu Apu (*Pistia stratiotes L.*) sebagai fitoremediator.	Penelitian ini mengindikasikan bahwa sistem *Constructed wetlands* yang memanfaatkan tanaman Kayu Apu (*Pistia stratiotes L.*) mampu secara efektif menurunkan kadar BOD, COD, dan TSS dalam air limbah domestik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah tanaman yang paling efisien adalah 12 tanaman, dengan waktu kontak optimal pada hari ke-12, menghasilkan penurunan BOD sebesar 95,83%, COD sebesar 95,01%, dan TSS sebesar 96,09%.
3	Alma Rizky Aurellya	2022	Unjuk Kerja *Hybrid Constructed Wetland* Kombinasi Dengan Konsorsium Bakteri Untuk *Removal* Kandungan BOD, COD, Dan Amonia (*NH3*)	Penelitian ini menggunakan metode sistem *Hybrid Constructed Wetland* dengan tanaman akar wangi (*Vetiver* zizanioides) dan bantuan konsorsium bakteri Endofit dan bakteri Endogen sebagai bioremediator dalam mengolah air limbah tenun.	Didapatkan hasil bahwa reaktor *Hybrid Constructed Wetland* dengan tanaman akar wangi (*Vetiver zizanioides*) dan konsorsium bakteri endofit dan endogen dapat mengurangi BOD hingga 84,30%, COD hingga 95,18%, dan amonia hingga 96,71%. Sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 5 Tahun 2014, efluen yang dihasilkan telah memenuhi standar mutu untuk BOD dan amonia, tetapi beberapa hasil untuk COD tidak memenuhi standar.
4	Zahra Hanantia Puteri	2022	Potensi Tanaman Pangan Dan Bakteri Endofit Indigenous Untuk Remediasi Greywater Dengan Sistem *Floating Treatment Wetland*	Penelitian dilaksanakan memakai metode *Floating Treatment Wetland* berkombinasi dengan tanaman kangkung air (*Ipomoea aquatica*) dan sawi (*Brassica juncea L*) menggunakan bioremediasi dengan bantuan bakteri endofit indigenous dalam menurunkan	Hasil penelitian mengungkapkan bahwa efisiensi penyisihan parameter COD, fosfat, surfaktan, EC, dan pH pada kedua jenis tanaman yang ditambah dengan bakteri endofit indigenous hampir sama dengan efisiensi pada kolam kontrol yang hanya menggunakan tanaman tanpa bakteri. Penambahan bakteri endofit indigenous pada kedua jenis tanaman tidak memberikan manfaat tambahan dalam meningkatkan biomassa.

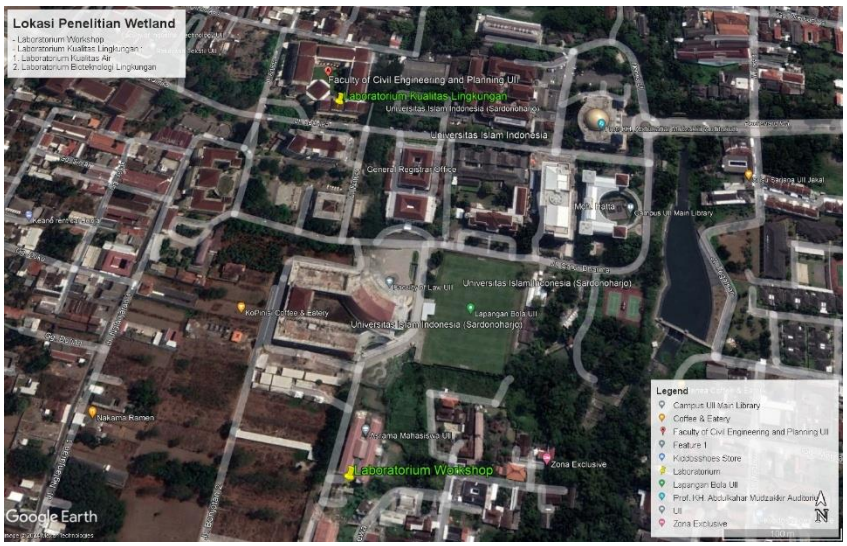
				polutan organik dan anorganik.	
5	Risti Ristianingsih Badu	2018	Pengolahan Air Limbah Pencucian PT.KAI Yogyakarta Menggunakan *Floating Treatment Wetland* Kombinasi Dengan Tanaman *Vetiveria zizanioides* Dan Bakteri	Penelitian ini dilaksanakan dengan konsep media *Floating Treatment Wetland* dalam mengurangi berkombinasi dengan tanaman *Vetiveria zizanioides* dengan atau tanpa bakteri untuk proses pengolahannya.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada hari ke-14, parameter BOD telah memenuhi BMAL sesuai Pergub DIY No. 7 Tahun 2010, sedangkan parameter COD dan minyak serta lemak masih melebihi batas yang ditetapkan. Pengolahan limbah cair dengan menggunakan tanaman dan bakteri mampu mengurangi COD sebesar 40-55%, BOD sebesar 30-91%, minyak dan lemak sebesar 50-87%, serta kandungan minyak sebesar 22-64%. Sementara itu, pengolahan limbah cair menggunakan tanaman tanpa bakteri dapat mengurangi COD sebesar 13-36%, BOD sebesar 42-82%, minyak dan lemak sebesar 3-80%, dan kandungan minyak sebesar 27-80%.
6	Tito Naufal Bhyantoro	2023	Isolasi Bakteri Endogen dan Endofit dari Tanah dan Akar Tanaman Terkontaminasi Air Lindi	Penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan konsep bioremediasi dan fitoremediasi menggunakan *batch* reaktor bersama dengan konsorsium bakteri endofit dan endogen dari tanah dan akar tanaman yang terkontaminasi air lindi dalam mengolah limbah air lindi.	Hasil penelitian menjelaskan bahwa reaktor T4 (gram positif, *Bacillus*) memiliki kinerja terbaik dalam mengolah amonia, dengan penurunan kadar amonia sebesar 54,59 mg/L (*removal* 98%). Demikian pula, reaktor T4 juga unggul dalam mengolah COD, dengan penurunan kadar COD sebesar 202,5 mg/L (94% *removal*). Sementara itu, untuk parameter warna, reaktor T5 (gram negatif, *Bacillus*) menunjukkan kemampuan terbaik, dengan penurunan kadar warna sebesar 77,5 Pt-co (94% *removal*).

BAB III
METODE PENELITIAN

Penelitian fitoremediasi dengan tanaman *Vetiveria zizanioides* dilakukan menggunakan metode eksperimen analisis kuantitatif dengan mengukur kadar degradasi COD dengan tanaman berkombinasi dengan bakteri endofit & endogen terhadap air limbah. Teknik fitoremediasi ini di uji coba untuk mengetahui nilai efisiensi *removal* parameter COD.

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan selama 120 hari, dimulai sejak Bulan Januari 2024 – Mei 2024 meliputi pembuatan reaktor *Wetland*, aklimatisasi tanaman, kulturisasi bakteri, sampling *Wetland*, pengujian dan analisis. Kegiatan pembuatan reaktor *Wetland*, aklimatisasi tanaman, sampling *Wetland*, inokulasi bakteri endofit & endogen ke *Wetland* dan *Running Wetland* dilakukan di Laboratorium Workshop yang berlokasi di belakang Fakultas Hukum, Universitas Islam Indonesia dengan titik koordinat 7°41'14.48"S & 110°24'46.12"E.



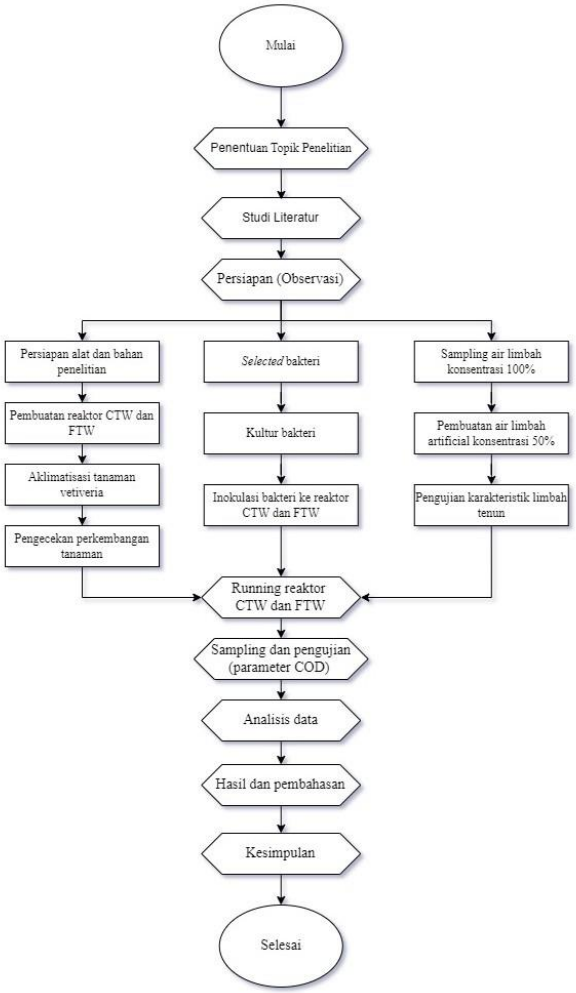
Gambar 3 . 1 Lokasi Tempat Penelitian

Sementara, untuk persiapan, pengujian, dan analisis COD, dilakukan di Laboratorium Kualitas Air, Laboratorium Kualitas Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia. Sampel air limbah yang digunakan berupa air limbah tenun yang diambil dari Industri Tenun yang berada di Desa Troso, Kecamatan Pecangaan, Kabupaten Jepara, Jawa Tengah. Berkenaan itu, aktivitas kulturisasi bakteri dilakukan di Laboratorium Bioteknologi Lingkungan, Laboratorium Kualitas Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta dengan titik koordinat 7°41'26.71"S & 110°24'46.89"E.

3.2 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium melalui metode eksperimental dan dianalisis menggunakan metode kuantitatif dengan melakukan percobaan untuk dapat melihat pengaruh dari variabel yang ditargetkan. Metode ini dilakukan dengan beberapa tahapan dimulai dengan tahapan persiapan tanaman, tahapan pembuatan reaktor *Wetland* (FTW & CTW), tahapan aklimatisasi tanaman *vetiver*, tahapan kultur bakteri endofit, tahapan *Running Wetland* (FTW & CTW), tahapan pengujian COD dengan menggunakan Spektrofotometer UV-Vis dan tahapan analisis reduksi COD.

Tahapan penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 3.2 dibawah ini:



Gambar 3. 2 Alur Pengerjaan Penelitian

Hasil yang diperoleh dianalisis secara statistik untuk mengetahui pengaruh perlakuan bakteri endofit terhadap kemampuan tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides*) dalam mereduksi COD pada limbah cair industri tenun. Variabel bebas yang digunakan adalah perbedaan konsentrasi COD. Parameter yang akan dianalisis pada penelitian ini adalah Nilai COD berupa kadar COD dan efisiensi *removal*-nya.

3.3 Pelaksanaan Penelitian

3.3.1 Persiapan Alat dan Bahan

Alat yang digunakan selama penelitian skala reator *Wetland* yaitu pompa akuarium, gabus 4 cm, box *Wetland*, sok drat (ring toren), kran, solder, gunting, penggaris, pulpen, pisau, selang puso & spiral, serta kontainer *Wetland* 55 L. Sementara itu, alat yang digunakan yang berhubungan dengan laboratorium yaitu spektrofotometer UV-Vis, kuvet COD, tabung refluks, *thermoreactor* COD, labu ukur 10 mL, 50 mL, 100 mL, pipet ukur 5 mL, 10 mL, gelas beaker 50 mL, 100 mL, *magnetic stirrer*, timbangan analitik, corong kaca, *waterbath*, *laminar air flow*, inkubator, cawan petri, mikropipet, dan *colony counter*.

Sedangkan bahan yang digunakan diantaranya air limbah tenun (*textile greywater*), *coco fiber*, tanaman *vetiver*, pupuk, tanah subur, larutan KHP, kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$), asam sulfat (H_2SO_4), *merkuri* (II) sulfat (Ag_2SO_4), *silver* sulfat (Ag_2SO_4), isolat bakteri endofit, media Nutrient Agar, Nutrient Broth, dan akuades.

3.3.2 Preparasi Air Limbah

Dalam penelitian ini, air limbah yang digunakan berasal dari limbah tenun dengan konsentrasi 25% dan 50%. Air limbah ini dibuat secara buatan di laboratorium dengan menyesuaikan bahan dan metode dari proses pewarnaan kain tenun. Limbah cair tenun buatan dibuat dengan dua jenis warna, yaitu merah dan hitam, mengikuti proses pewarnaan tenun Troso di lokasi aslinya.

Untuk pewarna hitam, terdiri dari Napthol BO (30 g) dan Napthol ASG (20 g) dicampur dengan kostik (NaOH) (25 g) dan dilarutkan dalam 12,5 L air panas, kemudian garam biru (100 g) dilarutkan dalam 12,5 L air, lalu kedua larutan ini dicampur dan diaduk hingga merata. Untuk pewarna merah, Napthol BO (50 g) dicampur dengan kostik (NaOH) (25 g) dan dilarutkan dalam 12,5 L air panas, kemudian garam R (100 g) dilarutkan dalam 12,5 L air, lalu kedua larutan ini dicampur dan diaduk hingga tercampur rata.

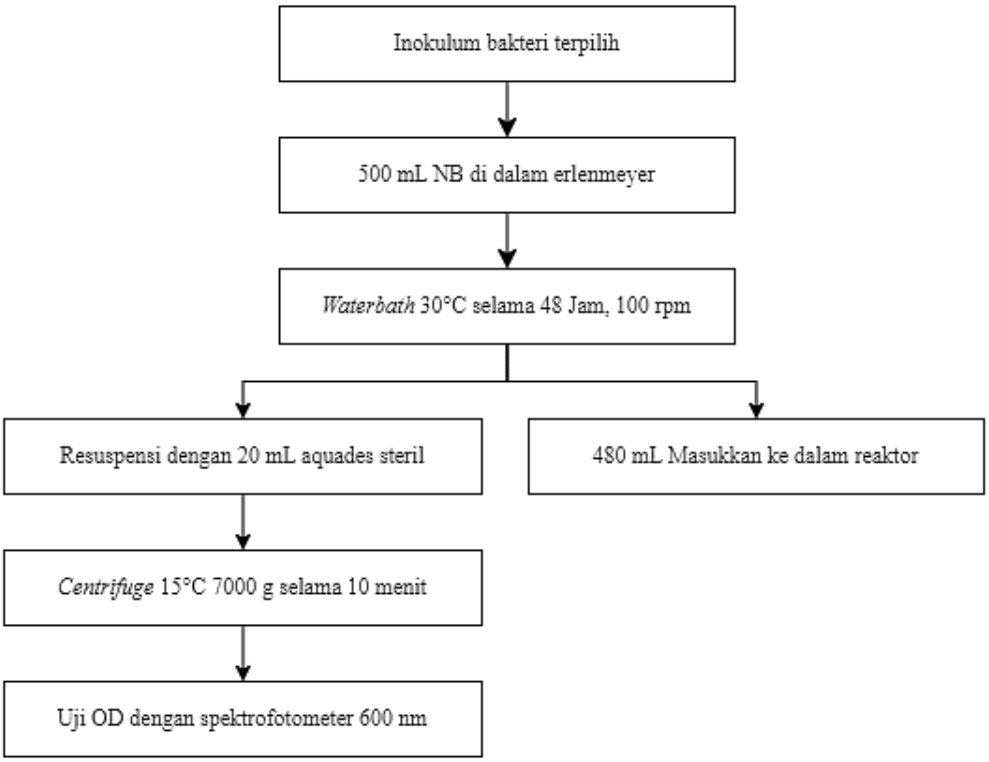
Gambar 3. 3 Pembuatan Limbah Buatan (*Artificial*)

(Sumber: dokumentasi lapangan)

Limbah cair yang sudah dibuat kemudian diencerkan menjadi konsentrasi 25% dengan perbandingan komposisi limbah cair dan air kran sebesar 1:3. Pada tahap pengujian limbah cair tenun konsentrasi 50%, limbah dibuat dengan cara yang sama namun pengencer yang digunakan berasal dari hasil pengolahan limbah cair tenun konsentrasi 25% dari masing-masing reaktor pada hari ke-14 dengan perbandingan limbah cair tenun buatan dan air kran sebesar 1:1.

3.3.3 Kulturisasi Bakteri

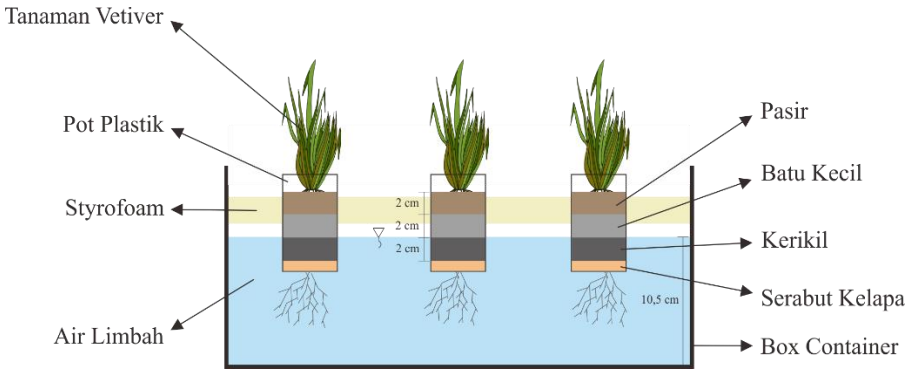
Bakteri yang telah diidentifikasi pada penelitian sebelumnya, yaitu konsorsium bakteri *Bacillus cereus*, *Bacillus spizizeni*, dan *Stenotrophomonas malthophilia* dimasukkan ke dalam 500 mL Nutrient Broth (NB) dalam erlenmeyer. Erlenmeyer yang berisi media kultur dan bakteri kemudian ditempatkan di dalam waterbath pada suhu 30°C selama 48 jam dengan kecepatan pengadukan 100 rpm. Setelah 48 jam, 480 mL kultur bakteri dimasukkan ke dalam reaktor, sementara 20 mL kultur bakteri disisihkan untuk pengukuran *Optical Density (OD)* menggunakan spektrofotometer dengan panjang gelombang 600 nm. Berikut adalah langkah-langkah pemindahan bakteri:



Gambar 3. 4 Tahapan Kulturisasi Bakteri

3.3.4 Pembuatan Reaktor *Floating Treatment Wetland* (FTW)

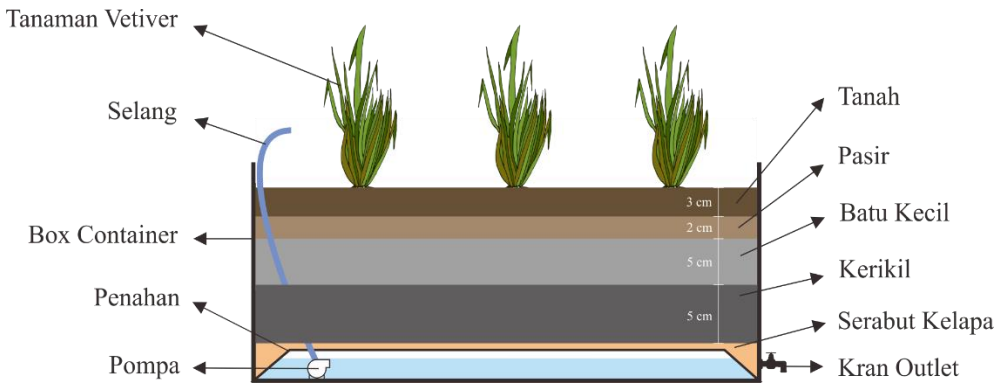
Tanaman *vetiver* adalah pilihan utama untuk pengolahan air limbah menggunakan sistem *Floating Treatment Wetland* (FTW). FTW dibuat dengan box kontainer ukuran sedang dengan volume 55 liter yang diisi *styrofoam* untuk menjaga tanaman tetap mengapung dengan ukuran panjang (58 cm), lebar (40 cm), serta tinggi (34 cm). Setiap unit reaktor terdiri dari enam pot berbentuk bulat dengan diameter (10 cm) di mana 3 hingga 4 batang tanaman *vetiver* ditanam dalam setiap pot. Media dalam pot diatur dari bawah ke atas yang terdiri dari serabut kelapa (1 cm), kerikil (2 cm), batu kecil (2 cm), dan pasir (2 cm).



Gambar 3. 5 Reaktor *Floating Treatment Wetland*

3.3.5 Pembuatan Reaktor *Constructed Treatment Wetland* (CTW)

Sistem *Constructed Treatment Wetland* (CTW) menggunakan jenis tanaman dan kotak kontainer yang sama dengan FTW. Setiap reaktor CTW terdiri dari sembilan rumpun tanaman *vetiver* dengan tiga hingga empat batang tanaman per rumpun. Untuk menjamin sirkulasi air yang konsisten di dalam reaktor, pompa ditempatkan di dasar kotak kontainer. Kerikil (5 cm), batu kecil (5 cm), pasir (2 cm), dan tanah yang telah dibersihkan menggunakan *autoclave* (3 cm) disusun di atas struktur dasar dengan serabut kelapa.

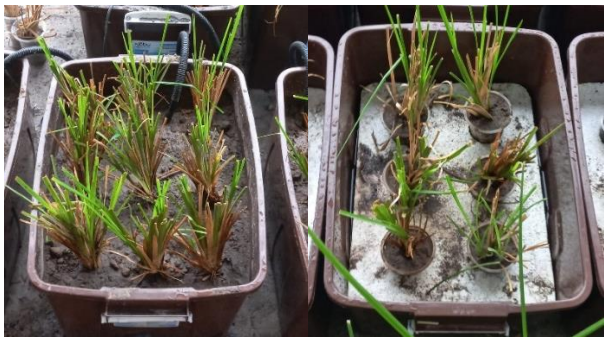


Gambar 3. 6 Reaktor *Constructed Treatment Wetland*

3.3.6 Aklimatisasi Tanaman *Vetiveria zizanioides*

Setelah menyelesaikan persiapan reaktor CTW dan FTW, langkah berikutnya adalah melakukan aklimatisasi tanaman *vetiver* selama sekitar 90 hari mulai dari 1 Januari 2024 - 21 April 2024. Tujuan dari proses ini adalah untuk memungkinkan tanaman beradaptasi dengan media dan lingkungan sehingga dapat memaksimalkan pertumbuhan akar, sebagai wujud pengimplementasian tanaman dalam pengolahan air limbah industri tekstil (tenun). Menurut Rehman dkk. (2018), aklimatisasi pada tanaman *Vetiveria zizanioides* bertujuan untuk meningkatkan jumlah akar dan pertumbuhan tanaman secara keseluruhan.

Proses aklimatisasi tanaman melibatkan pemangkasan batang tanaman sehingga tingginya sekitar 15 cm, dan semua tanaman diperlakukan dengan cara yang seragam. Selain itu, tanaman *vetiver* juga diberi pupuk hidroponik setiap minggu selama bulan pertama, dan air dalam FTW diganti seminggu sekali untuk menjaga kebersihan reaktor. Tanda bahwa tanaman telah beradaptasi dengan baik adalah pada daun dan batang menjadi sehat (daun lebih hijau), serta pertumbuhan akar yang subur (Jayaweera, 2008; Karuzaman, 2011). Pada tanggal 29 April 2024, konsorsium bakteri dimasukkan ke dalam masing-masing reaktor. Penambahan bakteri ini dilakukan beberapa minggu sebelum memulai proses operasi reaktor, sehingga memberi waktu bagi bakteri untuk beradaptasi dengan kondisi dalam reaktor.



(a) (b)

Gambar 3. 7 Aklimatisasi Tanaman *Vetiveria zizanioides*

Ket : (a) *Vetiver* (CTW) sebelum diaklimatisasi, (b) *Vetiver* (FTW) sebelum diaklimatisasi

3.3.7 *Running* Reaktor *Wetland*

Running reaktor FTW dan CTW dilakukan setelah proses kultur bakteri dan aklimatisasi tanaman selesai. *Running* reaktor dilakukan selama 2 bulan yang dimulai dari tanggal 1 Mei 2024 sampai 26 Juni 2024. *Running* reaktor dilakukan dengan meletakkan 3 jenis bakteri terpilih yang telah diuji OD sebelumnya sebanyak 250 mL (1 jenis bakteri) ke dalam masing-masing reaktor FTW dan CTW yang telah diisi air limbah. Sebelum menjalankan reaktor, evaluasi pertumbuhan bakteri dilakukan untuk menentukan jumlah bakteri yang akan diinokulasi ke dalam reaktor. Evaluasi pertumbuhan bakteri ini menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC). Pengujian TPC awal dan akhir dilakukan pada hari ke-0 dan ke-60 dengan mengambil sampel dari kultur bakteri.

Reaktor yang digunakan berjumlah 21 buah (CTW dan FTW) untuk 6 jenis reaktor dengan bakteri dan 15 reaktor sebagai kontrol dengan detail seperti tabel di bawah ini :

Tabel 3. 1 Jenis Reaktor *Wetland*

No	Jenis Reaktor	Kode	Jumlah	Volume
1	**Reaktor Kontrol**			
2	Kontrol Limbah	K	3	20 L
3	*Constructed Wetland* + Air Bersih	C1	3	15 L
4	*Floating Wetland* + Air Bersih	F1	3	20 L
5	*Constructed Wetland* + Air Limbah	C2	3	15 L
6	*Floating Wetland* + Air Limbah	F2	3	20 L
7	**Reaktor dengan Bakteri**			
8	*Constructed Wetland* + Air Limbah + Bakteri	C3	3	15 L
9	*Floating Wetland* + Air Limbah + Bakkteri	F3	3	20 L
Total			**21**	**125 L**

3.3.8 Sampling Reaktor dan Pengujian

Pada saat pengambilan dengan sampling dilakukan sebanyak tiga kali selama proses pengolahan air limbah di reaktor pada hari ke-0, ke-7, dan ke-14. Sampel yang diuji terdiri dari air limbah dari industri tenun dan tanaman *vetiver* yang digunakan dalam proses pengolahan *Wetland*. Untuk sampel air limbah, pengujian sama dilakukan tiga kali setelah proses sampling hari ke-0, ke-7, dan ke-14. Terdapat dua konsentrasi yang diuji, yaitu 25% dan 50%, dengan jumlah sampel masing-masing konsentrasi sebanyak 24 sampel per reaktor. Disini akan dilakukan 3 kali percobaan pada keseluruhan reaktor dengan total 5 jenis reaktor yang diuji sehingga t otal akhir sebesar 168 sampel untuk parameter COD.

Pengujian *Chemical Oxygen Demand* (COD) pada sampel akan dilakukan dalam kurun waktu 1 minggu dengan pengujian secara berkala pada konsentrasi 25% dan 50% dengan menggunakan metode refluks tertutup yang mengikuti standard pengujian SNI 6989.2:2009. Dalam penelitian ini, rentang nilai COD dari 100 mg/L hingga 900 mg/L dipilih dengan panjang gelombang 600 nm karena konsentrasi sampel melebihi kisaran tersebut. Larutan standar digunakan pada konsentrasi 300 ppm, 400 ppm, 700 ppm, 800 ppm, dan 900 ppm, sementara sampel yang akan diuji direfluksi tertutup pada panjang gelombang 600 nm. Data absorbansi dari larutan standar dan sampel dimasukkan ke dalam persamaan regresi linear yang dihasilkan dari kurva kalibrasi. Nilai COD kemudian ditentukan berdasarkan pembacaan dari kurva kalibrasi menggunakan rumus berikut:

- Nilai Kadar COD :

$$Kadar\ \text{COD}\ (mg\ O_2/L) = C\ x\ f$$

Ket :

C = nilai COD contoh uji, dinyatakan dalam milligram per liter (mg/L)

f = factor pengenceran

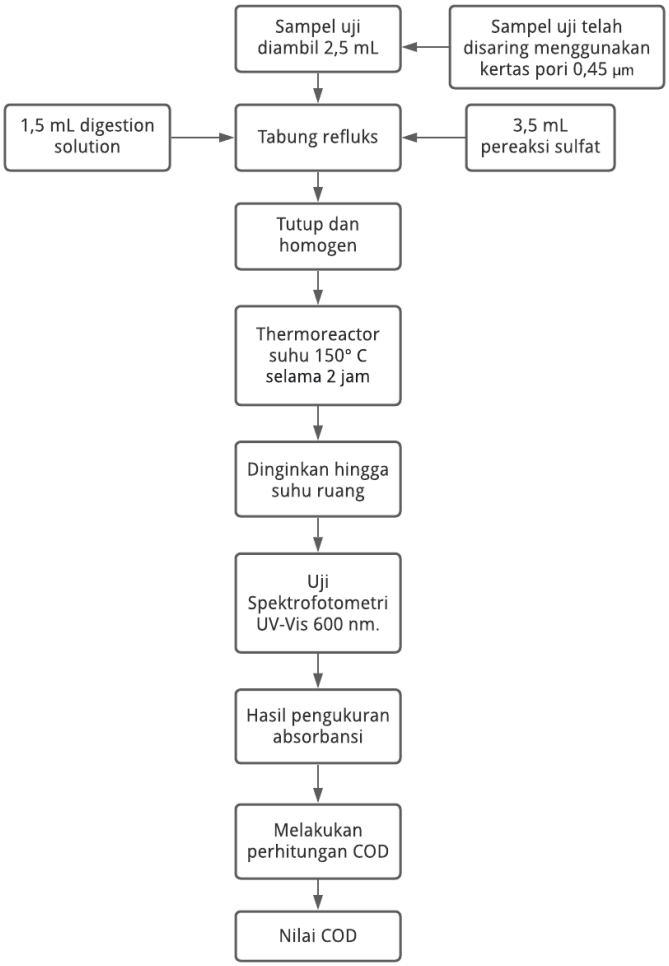
Interval sampling *Chemical Oxygen Demand* (COD) dapat dilihat di tabel 3.2 & 3.3 di bawah. Adapun tahapan pengujian COD pada sampel dapat dilihat pada Gambar 3.8 yaitu sebagai berikut:

Tabel 3. 2 Interval Sampling COD Konsentrasi 25%

Air limbah konsentrasi 25%			
Hari ke-	0 Hari	7 Hari	14 Hari
Sampling *Chemical Oxygen Demand* (COD)	√	√	√

Tabel 3. 3 Interval Sampling COD Konsentrasi 50%

Air limbah konsentrasi 50%			
Hari ke-	0 Hari	7 Hari	14 Hari
Sampling *Chemical Oxygen Demand* (COD)	√	√	√



Gambar 3.8 Tahapan Pengujian COD

3.4 Analisis Data

Tingkat efisiensi dari berbagai metode pengolahan limbah cair tenun dapat dievaluasi melalui analisis persentase pengurangan parameter limbah dan kondisi tanaman sebagai data validasi. Data uji diolah dalam bentuk grafik untuk mengevaluasi perkembangan proses pengolahan. Hasil pengujian juga dapat dibandingkan dengan peraturan yang mengatur standar mutu air limbah tekstil yang berlaku.

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, kadar *Chemical Oxygen Demand* (COD) sebelum dan sesudah proses pengolahan limbah tenun menggunakan bakteri endofit terus dipantau dan dianalisis untuk mengevaluasi keberhasilan bakteri yang telah dipilih untuk pengolahan limbah industri tenun. Selain itu, kadar COD setelah pengolahan limbah tenun dibandingkan dengan standar mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Daerah Jawa Tengah No.5 Tahun 2012, di mana kadar maksimum untuk parameter COD dalam limbah tenun adalah 150 mg/l.

Pada pengujian parameter COD dilakukan dengan menganalisis data menggunakan nilai kadar COD (mg O_2/L) dan metode persentase *removal* (%) dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

- *Efisiensi Removal* COD :

$$\%\ Removal\ \text{Effluent} = \frac{Cons\ 1 - Cons\ Sampel}{Cons\ 1} x\ 100\% = \cdots \%$$

3.5 Analisis Statistik

Uji analisis statistik pada penelitian ini menggunakan IBM SPSS Statistics 23 untuk menguji perbedaan signifikansi (p < 0,05). Perbedaan signifikan pada parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD) antara hari (*day*) dan perlakuan (*treatment*) dianalisis dengan One ANOVA dan uji Tukey untuk menentukan perlakuan mana yang memiliki perbedaan secara signifikan.

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Influen Air Limbah

Langkah awal sebelum dimulainya proses *Running*, dilakukan proses pengukuran karakteristik air limbah terlebih dahulu. Tujuan yang dicari yaitu untuk mengetahui kadar air limbah awal (asli) untuk parameter COD dan parameter fisik yang terkandung pada 5 variasi yang berbeda pada 2 jenis reaktor. *Running* reaktor dilakukan selama 1 bulan dimulai dari hari ke 0 yaitu pada 01 Mei 2024 hingga 31 Mei 2024, penggunaan reaktor yang digunakan yaitu dengan sistem *batch*. Sampling untuk COD dilakukan selama seminggu sekali, sementara untuk parameter fisik dilakukan setiap hari selama seminggu terkecuali hari ahad.

Dalam penelitian sebelumnya, yang menggunakan limbah pewarna batik dengan konsentrasi amonia (NH_3) sebesar 180,92 mg/L, COD 3855 mg/L, TSS 1180 mg/L, dan warna 152,83 Pt-Co, ditemukan bahwa konsentrasi limbah mempengaruhi tingkat kematian tanaman. Konsentrasi air limbah 10% dan 20% tidak berdampak pada kematian tanaman, sementara konsentrasi air limbah 30%, 40%, dan 50% menyebabkan kematian tanaman masing-masing sebesar 25%, 50%, dan 87,5% (Ningsih, 2017). Maka dari itu, penelitian ini menggunakan air limbah cair tenun dengan konsentrasi 25% dan 50% dimana konsentrasi limbah cair tenun 25% dan 50% diolah selama 14 hari. Berikut adalah tabel data hasil pengujian karakteristik limbah cair tenun untuk masing-masing konsentrasi :

Tabel 4. 1 Karakterisitik Awal Parameter COD

Konsentrasi Limbah Cair Tenun	COD (mg/L)
25%	5,781.20
50%	5,364.01

Pada setiap konsentrasi limbah cair tenun terdapat perbedaan yang signifikan. Setiap peningkatan konsentrasi limbah cair tenun diiringi oleh peningkatan kadar COD. Limbah cair tenun dengan konsentrasi 25% dan 50% diolah selama 14 hari. Hal ini dilakukan untuk mengetahui tingkat perbedaan efisiensi remediasi air limbah dari kedua konsentrasi yang berbeda. Dimana hasilnya diharapkan dapat memenuhi baku mutu yang diperbolehkan yaitu pada PermenLHK Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 tentang Perubahan Kedua Atas PERMENLH Nomor 5 TAHUN 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah. Tabel dibawah merupakan baku mutu yang diperbolehkan untuk parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD).

Tabel 4. 2 Baku Mutu Parameter COD

Bagi Industri Tekstil Periode Peralihan			
Parameter	Debit (m^3/ton) produk tekstil	Kadar Paling Tinggi (mg/L)	Beban Pencemaran Paling Tinggi (kg/Ton)
COD	100	150	15
Bagi Industri Tekstil			
Parameter	Debit (m^3/hari)		
	<100	100 < x < 1000	>1.000
COD	150	125	115

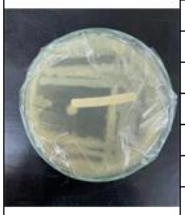
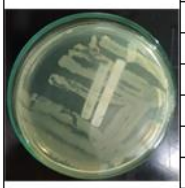
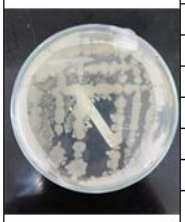
4.2 Karakterisasi dan Identifikasi Konsorsium Bakteri

Pada penelitian ini menggunakan jumlah koloni bakteri yang terpilih dan terpakai yaitu sebanyak 3 koloni bakteri. Bakteri yang digunakan merupakan hasil bakteri terpilih pada tugas akhir yang dilakukan oleh (Amanda, 2022), bakteri tersebut ialah *Stenotrophomonas maltophilia* (Sb-6) yang dapat mereduksi COD sebesar 79% dan warna sebesar 65%, selain itu ada juga bakteri *Bacillus spizizeni, Bacillus cereusizizeni* (Sc-1) yang mereduksi COD sebesar 69% dan warna sebesar 62%. Sedangkan menurut (Nuzula, 2022) pada bakteri *Bacillus cereus* (Ra-4) dapat mereduksi parameter COD sebesar 87% dan 48,8% pada parameter warna.

Bakteri yang digunakan di atas merupakan hasil isolasi dari akar tanaman *Vetiveria zizanioides* dan sumber tanah terdekat tempat pembuangan limbah. Hasil isolasi tersebut didapatkan 14 bakteri yang mana akan dilakukan uji

morfologi dan pewarnaan gram kemudian dipilih 10 bakteri yang memiliki morfologi dan warna gram yang berbeda (Nuzula, 2022). Namun pada penelitian ini, digunakan 3 bakteri yang telah terpilih kemudian sampel tersebut diamati dan didapatkan hasilnya dengan mengacu pada buku *Introduction to Microbiology* yang diterbitkan oleh ATCC 2021. Adapun ciri-ciri morfologi yang perlu diidentifikasi pada penelitian ini yaitu *shape, margin, elevation, size, appearance, optical property, texture*, dan *pigmentation*. Berikut ini merupakan hasil pengamatan identifikasi morfologi koloni bakteri :

Tabel 4. 3 Hasil Uji Morfologi Koloni Bakteri Terpilih

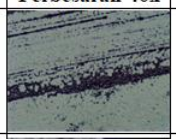
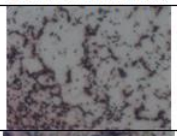
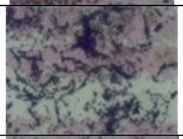
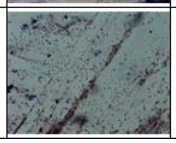
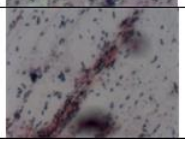
No	Kode Sampel	Gambar	*Colony Morfology*	
1	Sb-6		*Shape*	*Irregular*
			Margin	*Entire*
			Elevation	*Convex*
			Size	*Moderate*
			Apperance	*Glistening*
			Optical property	*Transparant*
			Texture	*Smooth*
			Pigmentation	*Non pigmented (off white)*
2	Ra-4		*Shape*	*Irregular*
			Margin	*Lobate*
			Elevation	*Raise*
			Size	*Moderate*
			Apperance	*Dull*
			Optical property	*Tranparant*
			Texture	*Smooth*
			Pigmentation	*Non pigmented (off white)*
3	Sc-1		*Shape*	*Filamentous*
			Margin	*Rhizoid*
			Elevation	*Flat*
			Size	*Moderate*
			Apperance	*Dull*
			Optical property	*Translucent*
			Texture	*Rough*
			Pigmentation	*Non pigmented (cream color)*

Sumber : (Nuzula, 2022) & (Amanda, 2022)

Proses identifikasi morfologi bakteri dibutuhkan untuk melihat kekerabatan antar bakteri isolat menggunakan konsep similaritas yang dilihat dari segi morfologi koloni, morfologi sel dan fisiologi kimianya (Mata, 2002). Hasil identifikasi morfologi bakteri diatas terpilih dengan morfologi shape

filamentous dengan 1 bakteri dan irregular oleh 2 bakteri. Dari bakteri tersebut juga didapat margin yang berbeda ada yang berupa entire, lobate, dan rhizoid. Setelah didapat hasil morfologi dari bakteri terpilih selanjutnya dilakukan pewarnaan gram untuk mengetahui apakah ada bakteri yang sama atau tidak. Pewarnaan gram dilakukan untuk menentukan bentuk sel *basil* atau *coccus* dan warna gram bakteri positif atau negatif. Berikut ini merupakan hasil pembacaan pewarnaan gram koloni bakteri terpilih:

Tabel 4. 4 Hasil Uji Pewarnaan Gram Koloni Bakteri Terpilih

No	Sampel	Perbesaran 40x	Perbesaran 100x	Sifat Gram	Bentuk Sel
1	Sb-6			Positif	*Bacillus*
2	Ra-4			Negatif	*Coccus*
3	Sc-1			Positif	*Bacillus*

Sumber : (Nuzula, 2022) & (Amanda, 2022)

Pada jenis morfologi koloni bakteri yang telah terpilih di atas, kemudian dilakukan identifikasi spesies untuk menentukan jenis sel tiap bakterinya. Proses pelaksanaan dilakukan dengan melewati beberapa tahapan, diantaranya: ekstraksi dan isolasi DNA genom, amplifikasi gen 16S rRNA dengan PCR, visualisasi produk PCR dengan elektroforesis, pengiriman sampel untuk analisis Sanger Sequensing . Berikut adalah hasil uji morfologi sel bakteri terpilih :

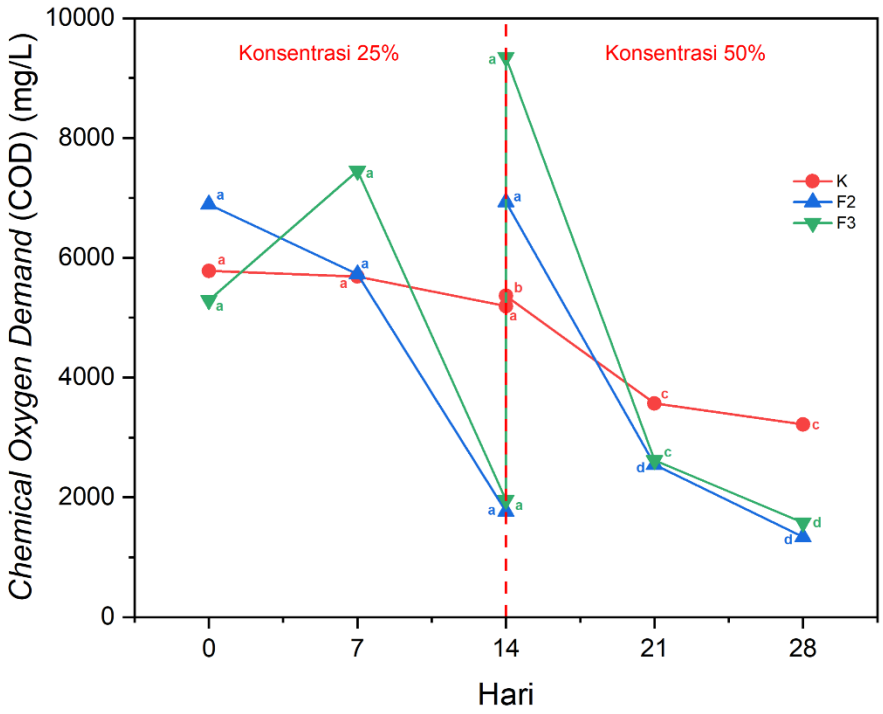
Tabel 4. 5 Hasil Uji Morfologi Sel Bakteri Terpilih

No	Kode Sampel	*Cell Morfology*	
1	Sb-6	*Bentuk*	*Medium basil rods*
		Deskripsi	*Single cell*
2	Ra-4	*Bentuk*	*Coccus-shape cell*
		Deskripsi	*Thin rods and grouped in four to five rods*
3	Sc-1	*Bentuk*	*Short and round rod*
		Deskripsi	*Single cell*

Sumber : (Nuzula, 2022) & (Amanda, 2022)

4.3 Pengaruh Variasi Beban Air Limbah Terhadap Parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD) pada Reaktor *Floating Treatment Wetland* (FTW)

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi secara kimia zat organik dan anorganik seperti amonia dan nitrat dalam air limbah. Nilai COD yang tinggi menunjukkan adanya bahan organik baik yang dapat terbiodegradasi maupun yang tidak dapat terbiodegradasi dalam air limbah. Hal ini menjadikan parameter COD sebagai indikator pencemaran organik pada air limbah (Islam et l., 2109).



Gambar 4. 1 Grafik Hasil Pengujian *Chemical Oxygen Demand* (COD) Pada *Floating Treatment Wetland* (FTW). K (Kontrol Air Limbah), F2 (Tanaman + Air Limbah), F3 (Tanaman + Air Limbah + Bakteri), 25% dan 50% (Konsentrasi Limbah). Setiap nilai adalah rata-rata dari tiga ulangan dan rata-rata yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 5%

Pada hari ke-0 penelitian, kadar COD di 5 jenis reaktor diuji terlebih dahulu untuk mengetahui kadar nilainya yang digunakan sebagai acuan utama. Hasil yang didapat cukup beragam dengan rentang 5,287.70 hingga 9,349.97 mg/L. Hal ini menunjukkan senyawa organik yang terkandung dalam air limbah cukup tinggi. Didukung oleh (Tchobanoglous, 2003), yang mengatakan bahwa pengujian awal pada uji *Chemical Oxygen Demand* (COD) dapat berbeda-beda karena perbedaan karakteristik limbah yang masuk ke dalam sistem pengolahan pada setiap waktu pengambilan sampel. Variasi ini bisa disebabkan oleh fluktuasi dalam aktivitas industri yang menghasilkan limbah, perubahan komposisi bahan baku, atau variasi dalam proses produksi yang dapat mempengaruhi konsentrasi bahan organik dan anorganik dalam air limbah.

Berdasarkan data hari ke-7 pengujian di reaktor *Floating* terjadi peningkatan dan penurunan nilai COD. Namun, secara garis besar penurunan lebih banyak terjadi daripada peningkatan. Seperti yang terjadi pada konsentrasi 50% reaktor FTW dengan bakteri dimana terjadi penurunan sebesar 6,729.85 mg/L menjadi 2,620.12 mg/L. Berbeda dengan reaktor FTW dengan bakteri pada konsentrasi 25% terjadi peningkatan sebesar 2,164.2 mg/L menjadi 7,451.90. Peningkatan yang terjadi disebabkan oleh bakteri yang memerlukan waktu lebih untuk tumbuh pada air limbah dan terjadinya persaingan antar bakteri sehingga berpengaruh dalam Mereduksi parameter COD cukup berkurang (Miwada, Lindawati dan Tatang, 2006).

Proses pengujian di hari terakhir yaitu hari ke-14 keseluruhan reaktor bekerja cukup baik dalam mereduksi COD. Hal tersebut dapat dibuktikan pada konsentrasi 25% dan 50% tepatnya pada reaktor FTW dengan bakteri, masing-masing mampu mengurangi polutan organik sebesar 5,496.36 mg/L dan 1,044.33 menjadi 1,955.54 dan 1,575.79. Hal tersebut membuktikan bahwa kombinasi ampuh bakteri dengan tanaman mampu mereduksi COD secara tepat. Didukung oleh Kabra et al, (2012) bahwa dengan perpaduan antara bakteri dengan tanaman *Vetiveria* dapat menghilangkan zat organik pada limbah tekstil secara optimal. Hal itu karena adanya kombinasi aktivitas enzim bakteri dan tumbuhan yang mengubah bahan organik menjadi metabolit sederhana.

Pada reaktor *Floating Treatment Wetland* (FTW), mekanisme fitoremediasi oleh tanaman *vetiver* (*Vetiveria zizanioides*) melibatkan beberapa proses interaksi fisik, kimia, dan biologis. Seperti halnya proses fisik dimana penyerapan oleh akar *vetiver* yang mampu menyerap dan mengadsorpsi senyawa organik dari air limbah . Senyawa organik ini kemudian dimetabolisme oleh tanaman atau dimanfaatkan oleh mikroorganisme yang ada di zona perakaran sehingga berpengaruh terhadap reduksi konsentrasi COD (Suelee *et al.*, 2017). Di sisi lain, tanaman *vetiver* dapat meningkatkan transfer oksigen dari udara ke air di sekitar perakaran. Hal ini dapat memperbaiki kondisi aerasi, yang mendukung degradasi aerobik senyawa organik oleh bakteri aerob.

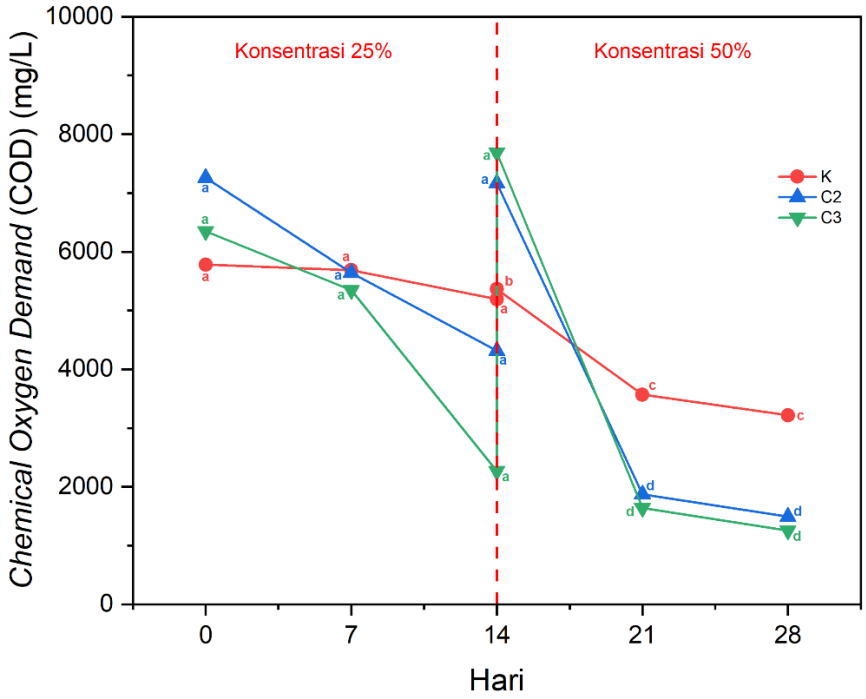
Faktor yang lain berpengaruh adalah dengan penambahan bakteri endofit dalam reaktor FTW meningkatkan pengurangan polutan dibandingkan dengan reaktor tanpa penambahan bakteri endofit (Rehman *et al.*, 2018). Penelitian ini mengungkapkan bahwa tanaman inang yang berbeda dari bakteri endofit dapat berasimilasi dengan tanaman lain dalam air limbah tekstil yang terkontaminasi. Bakteri endofit konsorsium yang diisolasi memberikan kontribusi pengurangan senyawa organik, yang menunjukkan bahwa bakteri endofit menguraikan senyawa organik dan memanfaatkannya untuk metabolit dan sumber nutrisi tanaman (Yousaf *et al.*, 2010).

Pada pengujian kali ini menunjukkan degradasi pada reaktor FTW pada konsentrasi air limbah 50% lebih baik dari pada 25% dengan bakteri dan tanpa bakteri. Namun, sedikit perbedaan terjadi pada reaktor tanpa bakteri yang memiliki nilai COD lebih kecil daripada dengan bakteri. Hal tersebut disebabkan karena tanaman masih perlu untuk beradaptasi terhadap air limbah yang masuk dengan meningkatnya konsentrasi COD pada reaktor FTW dengan bakteri. Menurut penelitian oleh (Dorafshan *et al.*, 2023) menunjukkan bahwa penggunaan *vetiver* pada sistem FTW dapat mengurangi COD secara signifikan. Sebagai contoh, dalam penelitian yang dilakukan pada limbah pabrik minyak sawit, pengurangan COD mencapai hingga 65% dalam waktu 14 hari menggunakan sistem ini. Efisiensi ini dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, seperti densitas tanaman, ketersediaan oksigen, dan konsentrasi nutrien di dalam air.

Berdasarkan hasil pengujian COD diatas dapat dikaitkan dengan Baku Mutu Air Limbah Industri Tekstil PermenLHK Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 untuk baku mutu parameter COD yaitu sebesar 150 mg/L. Pada hasil pengujian COD yang didapat, untuk nilai COD tertinggi yaitu sebesar 9,349.97 mg/L dan nilai COD terendah sejumlah 1,338.53 mg/L. Dapat disimpulkan bahwa kedua nilai COD tidak memenuhi baku mutu yang ada, sehingga air limbah tidak boleh dibuang sembarang dan masih perlu ekstra *treatment* yang lebih lagi.

4.4 Pengaruh Variasi Beban Air Limbah Terhadap Parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD) pada Reaktor *Constructed Treatment Wetland* (CTW)

Gambar di bawah menunjukkan pengaruh variasi konsentrasi air limbah terhadap parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD) dalam reaktor *Constructed Treatment Wetland* (CTW) dengan dua konsentrasi berbeda, yaitu 25% dan 50%, serta pengamatan dilakukan selama beberapa waktu. Penurunan COD yang signifikan terjadi setelah hari ke-14, terutama pada reaktor yang menggunakan kombinasi metode fitoremediasi dengan tanaman dan bioremediasi menggunakan bakteri endofit, dibandingkan dengan reaktor kontrol. Kombinasi kedua metode ini terbukti lebih efektif dalam mereduksi senyawa organik dalam limbah, menunjukkan bahwa bakteri endofit memiliki peran penting dalam meningkatkan degradasi polutan organik (Imfeld *et al.*, 2009).



Gambar 4. 2 Grafik Hasil Pengujian *Chemical Oxygen Demand* (COD) Pada *Constructed Treatment Wetland* (FTW). K (Kontrol Air Limbah), C2 (Tanaman + Air Limbah), C3 (Tanaman + Air Limbah + Bakteri), 25% dan 50% (Konsentrasi Limbah). Setiap nilai adalah rata-rata dari tiga ulangan dan rata-rata yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 5%

Pada tabel 4.2 dapat diketahui nilai pengujian COD pada pengujian awal (Hari ke-0) menunjukkan nilai yang fluktiatif yang tidak terlalu signifikan. Hal ini didominasi oleh kenaikan nilai COD dibandingkan penurunan, dibuktikan pada reaktor CTW konsentrasi 50%. Nilai yang dapat dilihat yaitu pada reaktor CTW sebesar 7,167.19 mg/L mengalami kenaikan sejumlah 1,803.18 mg/L dan reaktor CTW mengalami kenaikan sebesar 7,689.16 menjadi 7,167.19 mg/L. Ini menunjukkan karena adanya perbedaan karakteristik limbah yang masuk ke dalam sistem pengolahan pada setiap waktu pengambilan sampel. Perbedaan nilai konsentrasi COD dapat disebabkan karena adanya karakteristik air limbah tekstil yang semakin tinggi, maka nilai konsentrasi COD yang dihasilkan juga akan meninggi.

Pengujian hari ke-7 menunjukkan kinerja yang baik dari reaktor CTW dengan atau tanpa bakteri. Pada konsentrasi 25% di reaktor CTW mengalami penurunan menjadi 5,638.85 mg/L dari hari ke-0 yaitu 7,261.70 mg/L, berlanjut di reaktor CTW dengan bakteri penurunan terjadi sebesar 1,006.37 menjadi 5,344.25 mg/L. Penurunan kadar COD ini disebabkan oleh adanya kinerja metabolisme oleh bakteri dalam CTW yang digunakan dengan memanfaatkan senyawa organik yang berada dalam air limbah tekstil tersebut (Patria, 2011). Sedangkan pada reaktor CTW dengan konsentrasi 50% dengan bakteri maupun tidak mengalami penurunan yang signifikan, hasil yang didapat pada reaktor CTW non-bakteri sebesar 1,870.12 mg/L dan dengan bakteri sebesar 1,642.36 mg/L, degradasi yang dilakukan menyentuh angka 5,297.07 mg/L dan 6,046,8 mg/L. Hal tersebut membuktikan bahwa bakteri perlu waktu dalam penyesuain dengan air limbah untuk Mereduksi kadar COD secara optimal.

Proses reduksi COD pada minggu ke-2 (hari ke-14) mengalami penurunan konsentrasi pada kedua reaktor dan kedua variasi konsentrasi air limbah. Konsentrasi 50% reaktor CTW tanpa bakteri memiliki kadar sebesar 1,490.38 mg/L sementara dengan bakteri sejumlah 1,253.12 mg/L. Sementara pada reaktor CTW dengan konsentrasi air limbah 25% tanpa bakteri memiliki kadar sebesar 4,319.03 mg/L dan dengan bakteri mempunyai nilai sebesar 2,268.85 mg/L. Pada kedua konsentrasi tersebut terjadi penurunan kadar COD secara keseluruhan, namun

konsentrasi 50% mempunyai nilai COD yang lebih rendah dari pada konsentrasi 25%. Hal ini dipengaruhi oleh adanya proses fisik dan biologi pada limbah dimana memanfaatkan tanaman *Vetiveria zizanioides* dengan kombinasi filtrasi dan juga bakteri membuktikan dapat mereduksi kadar COD (Darajeh et al, 2016).

Tanaman *vetiver* menjalankan berbagai mekanisme fitoremediasi dalam reaktor *Constructed Treatment Wetland* (CTW) untuk mengurangi polutan, termasuk degradasi (*rhizo-degradasi*, *fitodegradasi*), akumulasi (*fitoekstraksi*, *rizofiltrasi*), disipasi (*fitovolatilisasi*), dan imobilisasi polutan (Pivets, 2001). Mekanisme ini terjadi melalui interaksi kompleks antara proses fisik, kimia, dan biologis. Sistem akar *vetiver* yang luas dan dalam memainkan peran penting dalam menyerap senyawa organik dan anorganik dari air limbah, yang kemudian dimetabolisme oleh tanaman atau dimanfaatkan oleh bakteri endofit yang hidup di zona perakaran (*rhizosphere*) (Ávila et al, 2015).

Selain itu, akar *vetiver* juga menyediakan habitat yang ideal bagi mikroorganisme yang membantu proses dekomposisi senyawa organik. Dalam lingkungan CTW, kolaborasi antara mikroorganisme ini dan tanaman *vetiver* berperan dalam menguraikan bahan organik yang menjadi penyebab tingginya kadar COD dalam air limbah. Interaksi ini tidak hanya memperbaiki kualitas air, tetapi juga membantu mengurangi konsentrasi polutan secara berkelanjutan (Auvinen et al, 2016).Bakteri endofit yang berasosiasi dengan akar *vetiver* turut berperan dalam meningkatkan efisiensi penurunan COD dengan memanfaatkan senyawa organik sebagai sumber nutrisi, yang pada akhirnya mengurangi konsentrasi COD lebih lanjut.

Selain itu, *vetiver* memiliki kemampuan untuk meningkatkan oksigenasi di sekitar zona perakaran, yang menciptakan lingkungan ideal bagi aktivitas bakteri aerob dalam mendegradasi senyawa organik. Bakteri endofit ini juga dapat mendegradasi senyawa organik kompleks melalui proses ko-metabolisme, di mana senyawa yang sulit diuraikan oleh tanaman dapat dipecah menjadi bentuk yang lebih sederhana (Bao et al, 2019). Bakteri tersebut menghasilkan enzim hidrolitik seperti protease, lipase, dan amilase, yang memecah senyawa organik besar menjadi komponen lebih kecil dan lebih mudah diserap oleh tanaman atau mikroorganisme

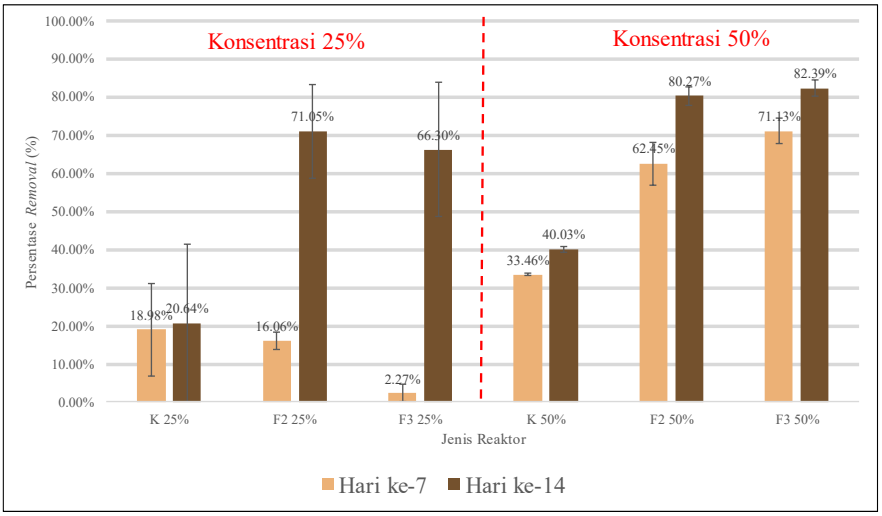
lain di zona perakaran. Hal ini mendukung proses pengurangan COD secara signifikan, menunjukkan bahwa sinergi antara tanaman *vetiver* dan bakteri endofit dalam reaktor CTW sangat efektif untuk pemulihan kualitas air limbah (García et al, 2007).

Menurut penelitian oleh (Stefanakis, 2019) menunjukkan penggunaan reaktor *Constructed Treatment Wetland* (CTW) untuk mengurangi COD dapat dilihat pada penelitian yang dilakukan di Oman. CTW yang digunakan untuk mengolah air limbah yang berasal dari produksi minyak bumi. Hasilnya menunjukkan pengurangan COD hingga 60-90% selama periode pengoperasian lebih dari dua tahun. Efisiensi ini sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti jenis tanaman yang digunakan, desain reaktor, serta kondisi hidrologis dan lingkungan sekitar, seperti suhu dan kadar oksigen dalam air. Sistem ini mampu menahan partikel tersuspensi dan bahan organik di dalam reaktor, yang memberikan waktu lebih lama bagi mikroorganisme dan tanaman untuk memecah senyawa organik kompleks, sehingga menurunkan nilai COD secara signifikan.

Berdasarkan Hasil pengujian COD diatas dapat dikaitkan dengan Baku Mutu Air Limbah Industri Tekstil PermenLHK Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 untuk baku mutu parameter COD yaitu sebesar 150 mg/L. Pada hasil pengujian COD yang didapat, untuk nilai COD tertinggi yaitu sebesar 7,261.70 mg/L dan nilai COD terendah sejumlah 1,253.12 mg/L. Dapat disimpulkan bahwa kedua nilai COD tidak memenuhi baku mutu yang ada, sehingga air limbah tidak boleh dibuang sembarang dan masih perlu ekstra treatment yang lebih lagi.

4.5 Persentase *Removal* pada Parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD) dalam Reaktor *Floating Treatment Wetland* (FTW)

Pengolahan limbah tekstil dengan bakteri endofit merupakan solusi untuk mengatasi kontaminan pada air limbah, khususnya parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD). Oleh karena itu, diperlukan nilai efisiensi *removal* dalam bentuk persentase yang akan digunakan untuk mengetahui tingkat kinerja reaktor dalam mereduksi parameter COD dengan bakteri maupun tanpa bakteri.



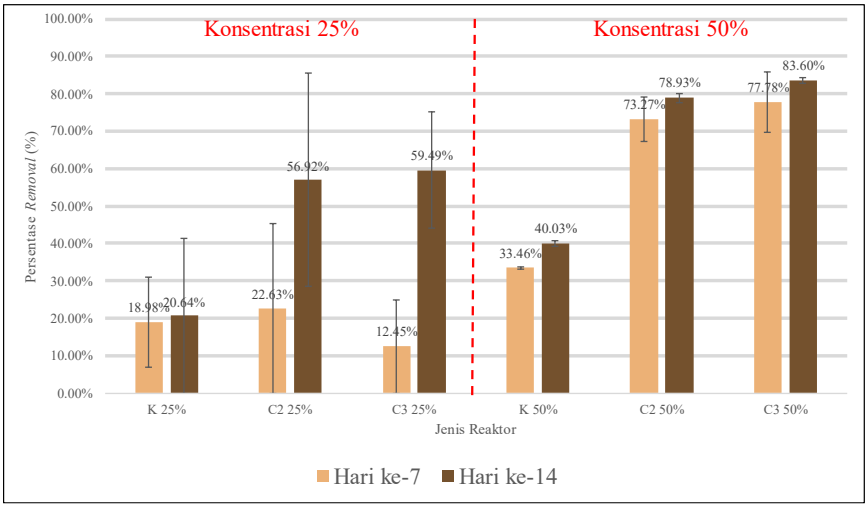
Gambar 4. 3 Grafik Perbandingan Efisiensi *Removal Chemical Oxygen Demand* (COD) Pada *Floating Treatment Wetland* (FTW). K (Kontrol Air Limbah), F2 (Tanaman + Air Limbah), F3 (Tanaman + Air Limbah + Bakteri), 25% dan 50% (Konsentrasi Limbah)

Dapat dilihat pada gambar 4.3, bahwa air limbah konsentrasi 25% mempunyai persen *removal* yang beragam, pada hari ke-7 reaktor kontrol sebesar 2%, reaktor FTW sebesar 17% dan reaktor FTW dengan bakteri sebesar 0%. Pada hari ke-14 pun mempunyai persen yang berbeda, pada reaktor kontrol sebesar 10%, reaktor FTW sebesar 74% dan reaktor FTW dengan bakteri sebesar 63%. Untuk konsentrasi yang lebih tinggi yaitu air limbah 50% mempunyai persen yang jauh lebih tinggi. Pada hari ke-7 reaktor kontrol mempunyai persentase sebesar 18%, reaktor FTW sebesar 67%, dan reaktor FTW dengan bakteri sebesar 72%. Minggu selanjutnya, hari ke-14 persentase untuk reaktor kontrol sebesar 40%, reaktor FTW sebesar 81% dan reaktor FTW dengan bakteri sebesar 83%.

Dari hasil yang telah didapatkan, persentase *removal* yang efisien dimiliki oleh air limbah dengan konsentrasi sebesar 50% dimana reaktor FTW dengan bakteri menjadi pemiliki kadar persentase paling tinggi dengan nilai 83% diikuti dengan reaktor FTW tanpa bakteri sebesar 81% untuk hari ke-14 secara total. Adapun penyebab persentase *removal* air limbah 25% lebih khusus hari ke-14 reaktor FTW dengan bakteri memiliki nilai yang lebih rendah dari pada FTW tanpa bakteri karena konsentrasi COD pada reaktor dengan bakteri berada dalam posisi jenuh atau sudah mati sehingga berperan menambah kandungan organik yang baru dalam air (Ponty, 2018).

4.6 Persentase *Removal* pada Parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD) dalam Reaktor *Constructed Treatment Wetland* (CTW)

Gambar 4.4 memperlihatkan persentase *removal* COD pada sistem *Constructed Treatment Wetland* (CTW) dengan berbagai jenis reaktor dan variasi konsentrasi limbah. Sistem CTW menggunakan kombinasi fitoremediasi dan bioremediasi untuk mengolah air limbah dengan efisiensi yang berbeda-beda, tergantung pada jenis reaktor dan konsentrasi yang digunakan. Penurunan COD dianalisis pada hari ke-7 dan hari ke-14, yang mencerminkan kemampuan sistem untuk mereduksi senyawa organik yang terkandung dalam air limbah. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan konsorsium bakteri dan metode fitoremediasi secara bersamaan dapat meningkatkan efisiensi pengolahan, terutama pada konsentrasi limbah yang lebih tinggi.



Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan Efisiensi *Removal Chemical Oxygen Demand* (COD) Pada *Constructed Treatment Wetland (CTW)*. K (Kontrol Air Limbah), C2 (Tanaman + Air Limbah), C3 (Tanaman + Air Limbah + Bakteri), 25% dan 50% (Konsentrasi Limbah)

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa efisiensi *removal* air limbah dengan konsentrasi 25% berbeda-beda. Pada hari ke 7, reaktor kontrol 2%, reaktor CTW 22%, dan reaktor CTW dengan bakteri 16%. Pada hari ke 14 terdapat perbedaan persentase yaitu 10% pada reaktor kontrol, 41% pada reaktor CTW, dan 64% pada reaktor CTW yang terdapat bakteri. Pada konsentrasi yang lebih tinggi, yaitu 50% air limbah, persentasenya jauh lebih tinggi. Pada hari ke 7 persentase pada reaktor kontrol sebesar 18%, persentase pada reaktor FTW sebesar 74%, dan persentase pada reaktor bakteri FTW sebesar 79%. Pada hari ke 14 minggu berikutnya persentasenya adalah 40% pada reaktor kontrol, 79% pada reaktor FTW, dan 84% pada reaktor FTW yang terdapat bakteri. jnck

Hasil yang didapat pada Reaktor CTW cenderung lebih bagus dibandingkan dengan reaktor FTW, terutama pada air limbah dengan konsentrasi 50%. Dimana reaktor CTW dengan Bakteri memiliki nilai *removal* lebih besar sejumlah 84% dibanding dengan tanpa bakteri sebesar 79%. Menurut penelitian oleh Shehzadi *et al.* (2014) menemukan bahwa kombinasi bakteri endofit dan tanaman *Typha domingensis* dapat menurunkan COD dalam air limbah tekstil hingga 79%. Hal ini disebabkan adanya kombinasi aktivitas enzimatik tumbuhan dan bakteri yang dapat mengubah bahan organik menjadi senyawa yang lebih sederhana, dimana senyawa

ini kemudian digunakan oleh tumbuhan untuk fotosintesis. Hal ini tentunya dapat mengurangi kandungan organik dalam reaktor (Kabra, 2013). Sehingga dengan kombinasi tanaman dengan bakteri cukup untuk meningkatkan *removal* parameter COD menjadi lebih tinggi lagi.

4.7 Reduksi Parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD)

Tabel di bawah ini menunjukkan hasil pengamatan terhadap pengurangan nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) pada berbagai reaktor yang digunakan dalam penelitian. Data ini diambil pada dua konsentrasi limbah yang berbeda, yaitu 25% dan 50%, serta diukur pada hari ke-7 dan hari ke-14 selama proses pengolahan. Beberapa reaktor dalam penelitian ini memanfaatkan kombinasi metode fitoremediasi dengan tanaman dan bioremediasi menggunakan bakteri endofit untuk meningkatkan efisiensi pengurangan COD.

Tabel 4. 6 Besaran Reduksi *Chemical Oxygen Demand* (COD)

Reaktor	Reduksi Nilai COD							
	Konsentrasi 25%				Konsentrasi 50%			
	Hari ke-7		Hari ke-14		Hari ke-7		Hari ke-14	
	Konsentrasi (mg/L)	*Removal* (%)	Konsentrasi (mg/L)	*Removal* (%)	Konsentrasi (mg/L)	*Removal* (%)	Konsentrasi (mg/L)	*Removal* (%)
Kontrol	94.90	18.98%	494.41	20.64%	1,794.85	33.46%	351.53	40.03%
FTW	1,167.32	16.06%	3,958.40	71.05%	4,385.86	62.45%	1,205.54	80.27%
FTW + Bakteri	-2,164.20	2.27%	5,496.36	66.30%	6,729.85	71.13%	1,044.33	82.39%
CTW	1,622.85	22.63%	1,319.81	56.92%	5,297.06	73.27%	379.75	78.93%
CTW + bakteri	1,006.37	12.45%	3,075.40	59.49%	6,046.80	77.78%	389.24	83.60%

Berdasarkan tabel di atas, analisis penurunan COD terbaik pada konsentrasi 25% dan 50% menunjukkan bahwa reaktor dengan *Constructed Treatment Wetland* (CTW) + Bakteri memiliki performa terbaik. Pada konsentrasi 25%, penurunan COD tertinggi pada hari ke-7 terjadi di reaktor CTW dengan reduksi sebesar 1,622.85 mg/L dan *removal* sebesar 22.63%. Pada hari ke-14, reaktor FTW + Bakteri menunjukkan reduksi COD sebesar 5,496.36 mg/L dan *removal* sebesar 66.30%, sedangkan reaktor FTW memiliki *removal* tertinggi sebesar 71.05%. Pada konsentrasi 50%, pada hari ke-7 reaktor FTW + Bakteri memberikan reduksi COD tertinggi sebesar 6,729.85 mg/L dengan *removal* sebesar 71.13%. Namun, pada hari ke-14, reaktor CTW + Bakteri menunjukkan performa paling signifikan dengan *removal* tertinggi 83.60%, meskipun reduksi COD-nya sedikit lebih rendah dibandingkan FTW.

Dari data di atas, kita dapat mengamati bahwa *Floating Treatment Wetland* (FTW) dan *Constructed Treatment Wetland* (CTW), baik dengan maupun tanpa bakteri endofit, memberikan hasil yang sangat baik dalam menurunkan COD pada konsentrasi 50%. CTW + Bakteri pada hari ke-14 untuk konsentrasi 50% menunjukkan efisiensi tertinggi dengan *removal* sebesar 83.60%. Ini menunjukkan bahwa kombinasi metode fitoremediasi dengan tanaman dan bioremediasi dengan bakteri endofit efektif dalam menurunkan nilai COD. Penambahan bakteri endofit seperti *Stenotrophomonas maltophilia* dan *Bacillus spizizeni, Bacillus cereus.* meningkatkan proses degradasi bahan organik yang tercermin dalam nilai *removal* yang lebih tinggi, terutama dalam kondisi konsentrasi yang lebih tinggi (J. Wang *et al.*, 2022).

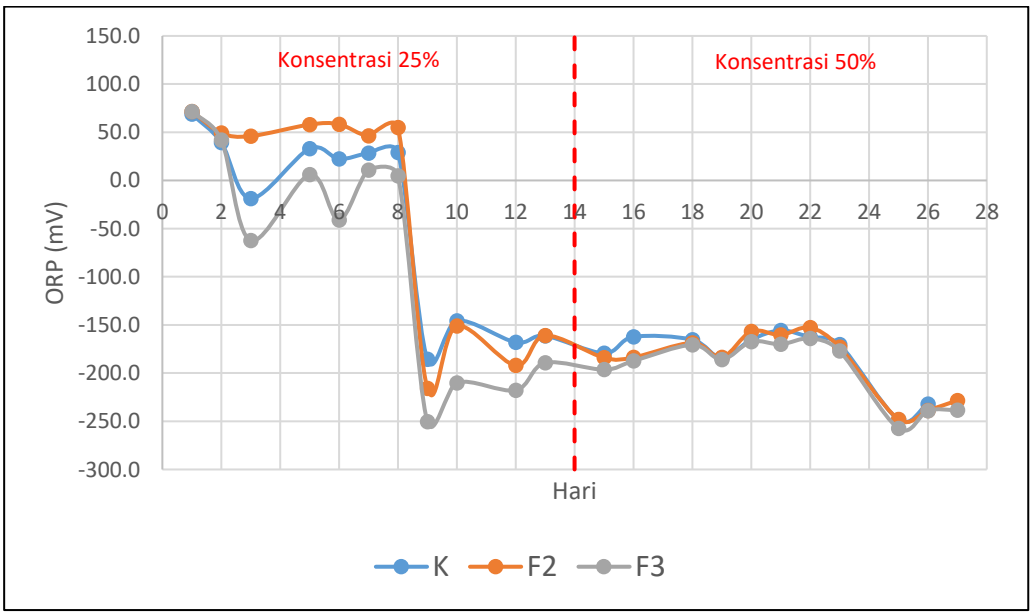
Dalam konteks fitoremediasi, tanaman seperti *Vetiveria zizanioides* yang digunakan dalam sistem CTW dan FTW berperan penting dalam menyerap dan menstabilkan polutan organik dalam air limbah. *Vetiveria* memiliki sistem akar yang luas yang mampu mempercepat proses penyerapan nutrien dan degradasi bahan organik, termasuk senyawa penyebab peningkatan nilai COD (Badejo *et al.*, 2018). Proses ini didukung oleh bakteri endofit yang bekerja dalam sinergi dengan akar tanaman untuk mempercepat degradasi senyawa organik kompleks menjadi senyawa sederhana. CTW + Bakteri mampu meningkatkan proses ini lebih lanjut dengan menyediakan lingkungan anaerob dan aerob yang optimal untuk mikroorganisme untuk melakukan aktivitas degradasi (Suelee *et al.*, 2017).

Penelitian lain juga mendukung efektivitas fitoremediasi dan bioremediasi dengan bakteri endofit dalam mereduksi polutan organik, termasuk COD. Dalam studi oleh Vymazal (2018) tentang *Constructed Wetlands*, dijelaskan bahwa kombinasi tanaman dengan mikroorganisme memiliki peran penting dalam mereduksi COD dalam air limbah. Selain itu, penelitian oleh Liu *et al.* (2021) juga menunjukkan bahwa penggunaan bakteri endofit seperti *Bacillus spizizeni, Bacillus cereus.* dalam sistem *wetland* dapat meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah, terutama pada konsentrasi polutan yang tinggi. Penelitian ini memperkuat temuan bahwa penambahan bakteri endofit pada CTW dan FTW meningkatkan kapasitas degradasi bahan organik.

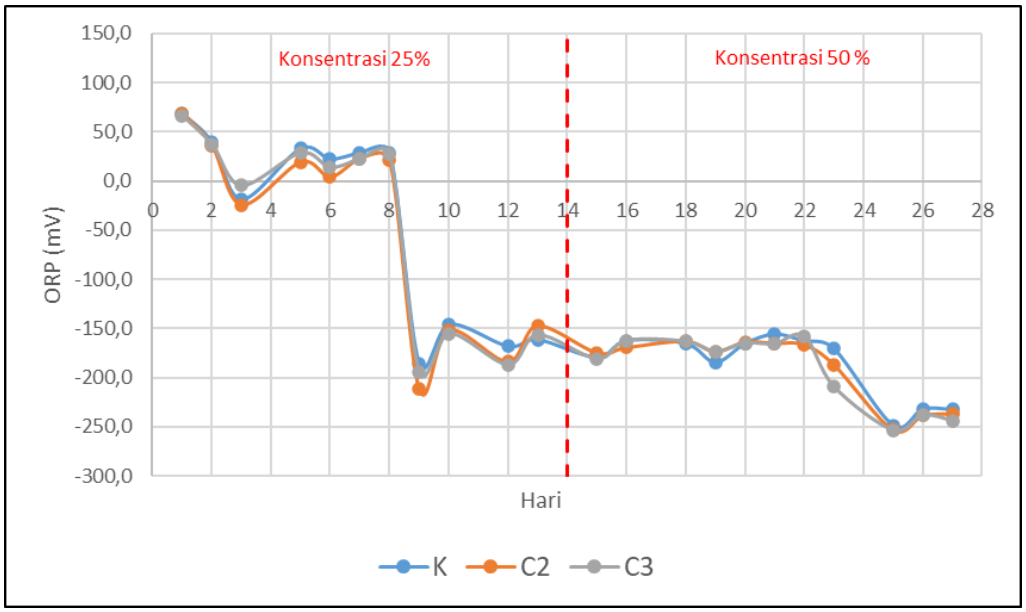
4.8 Parameter Fisik (ORP)

Oxidation-Reduction Potential (ORP) menunjukkan seberapa mengoksidasi atau mereduksi suatu cairan, yang diukur dalam *milivolt* (mV). Oksidasi dan reduksi adalah proses kimia yang saling terkait yang merujuk pada pertukaran elektron dalam suatu reaksi. Oksidasi mengacu pada saat suatu bahan kimia penambahan oksigen, sedangkan reduksi mengacu pada saat suatu bahan kimia pengurangan oksigen (X. Wang *et al.*, 2022). Fase ini disebut reaksi redoks, di mana oksidasi dan reduksi terjadi dalam reaksi yang sama. Lingkungan reduksi ditunjukkan oleh pembacaan negatif, yang merupakan perolehan elektron bersih oleh atom, molekul, atau ion, sedangkan oksidasi adalah kehilangan elektron oleh atom, molekul, atau ion, yang sering kali diikuti oleh penggantian elektron yang hilang oleh oksigen (Venturini *et al.*, 2022). Semakin ekstrem nilai negatif atau positif, semakin mereduksi atau mengoksidasi cairan tersebut.

Hasil pengukuran parameter fisik *Oxidation Reduction Potential* (ORP) pada air limbah dengan konsentrasi 25% dan 50% setelah pengolahan selama 28 hari ditunjukkan pada gambar 4.5 berikut.



(a)



(b)

Gambar 4. 5 Grafik Pengukuran ORP Pada Reaktor (a) *Floating Treatment Wetland* (FTW), (b) *Constructed Treatment Wetland*.

Hasil yang didapat pada reaktor FTW dan CTW pada gambar 4.6 menunjukkan nilai ORP yang berubah naik dan turun secara keseluruhan. Pada hari ke-0 hingga hari ke-8 tepatnya pada konsentrasi 25% baik CTW maupun FTW menunjukkan nilai ORP mayoritas bernilai positif. Pada reaktor kontrol, dengan bakteri maupun tanpa bakteri dalam FTW berada dalam rentang 71,7 mV – 4,7 mV. Nilai yang berbeda didapat pada konsentrasi 25% tepatnya pada hari ke-9 hingga ke-14 menunjukkan nilai mayoritas negatif pada reaktor CTW. Rentang nilai yang didapat sekitar -147,3 mV hingga -211,3 mV. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin lama nilai ORP yang didapat menunjukkan nilai negatif dimana reaksi reduktif terjadi pada fase tersebut (Sukma *et al.*, 2013).

Nilai ORP yang didapat pada konsentrasi 50% menunjukkan nilai mayoritas cenderung menurun. Pada hari ke-15 hingga hari ke-28 pada reaktor FTW nilai ORP berada pada rentang -179,33 mV hingga -238,33 mV. Reaktor FTW dengan bakteri menunjukkan nilai yang lebih reduktif dibanding dengan FTW tanpa bakteri dan kontrol. Hal ini menunjukkan bakteri berperan dalam penggunaan oksigen dalam mereduksi polutan organik pada COD. Sedangkan pada hari-ke 28

konsentrasi 50% reaktor CTW dengan bakteri menunjukkan nilai ORP dengan minus tertinggi sebesar -243,67 mV dibanding dengan reaktor FTW dengan bakteri sebesar -238,33 mV. Kondisi ini menunjukkan reaktor CTW lebih mudah dalam mereduksi COD dari pada reaktor FTW ditunjukkan dengan nilai negatif yang bermaksud lebih mudah dalam mreduksi suatu zat (Suslow, 2004).

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan diketahui bahwa air limbah tenun mengandung konsentrasi COD yang sangat tinggi dan kinerja pengolahan setiap reaktor yang mengandung bakteri berbeda-beda. Temuan penelitian ini dapat diringkas sebagai berikut:

1. Didapatkan hasil bahwasanya nilai konsentrasi parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD) dengan menggunakan teknik remediasi memakai tanaman *Vetiveria zizanioides* dengan kombinasi bakteri *Stenotrophomonas maltophilia* dan *Bacillus spizizeni*, *Bacillus cereus.* memanfaatkan reaktor *Floating Treatment Wetland* dan *Constructed Treatment Wetland* mampu menurunkan konsentrasi COD, dimana membutikan bahwa pengolahan limbah cair tenun dapat mereduksi polutan organik yang ada dalam air limbah.
2. Efisiensi *removal* untuk parameter COD tepatnya reaktor FTW dengan *removal* tertinggi ada pada reaktor FTW dengan bakteri pada konsentrasi 50% tepatnya hari ke-14 sebesar 83%, sementara untuk reaktor CTW persentase *removal* tertinggi ada pada reaktor CTW dengan bakteri pada hari ke-14 dengan konsentrasi 50% sebesar 84%.

5.2 Saran

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

1. Berdasarkan hasil uji parameter COD selama 28 hari pada air limbah tekstil, perlu dilakukan pengolahan air limbah lebih lanjut untuk menurunkan konsentrasi COD dan memenuhi baku mutu air limbah dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 16 Tahun 2019 tentang Baku Mutu Air Limbah.

2. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides*) atau diperlukan tanaman lain yang mampu mereduksi polutan. Pemilihan isolat bakteri endofit yang lebih efisien dan tahan lama juga dibutuhkan sehingga dapat memaksimalkan penghilangan zat pencemar dari air limbah dan memenuhi baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 16 Tahun 2019 tentang baku mutu air limbah.

DAFTAR PUSTAKA

Abdel Razik Ahmed Zidan, P. And Mohammed Ahmed Abdel Hady, P. (2018) *Constructed Subsurface Wetlands Case Study And Modeling*. Usa: Apple Academic Press Inc.

Afafun Nafisah (2020) *Degradasi Kandungan Chemical Oxygen Demand (Cod) Pada Limbah Tenun Oleh Bakteri Endofit*. Universitas Islam Indonesia.

Afzal, M., Khan, Q.M. And Sessitsch, A. (2014) 'Endophytic Bacteria: Prospects And Applications For The Phytoremediation Of Organic Pollutants', *Chemosphere*. Elsevier Ltd, Pp. 232–242. Available At: Https://Doi.Org/10.1016/J.Chemosphere.2014.06.078.

Agus Ulin Nuha, F. Putut Martin H.B And Ibnul Mubarok (2016) 'Toksisitas Letal Akut Limbah Cair Tenun Troso Terhadap Ikan Mas (Cyprinus Carpio L.)', *Journal Unnes*, Pp. 1–8.

Aida Sukna Yuri (2023) *Perencanaan Constructed Wetland Sebagai Alternatif Pengolahan Air Limbah Domestik Di Perumahan Lam Trieng Madani Kabupaten Aceh Besar*. Universitas Islam Negeri Ar-Raniry .

Amanda, P. D. (2022). *Identifikasi Pengaruh Bakteri Indigen Terhadap Performa Wetland Untuk Pengolahan Limbah Tenun*. Universitas Islam Indonesia .

Amara Mayori (2022) *Unjuk Kerja Aerated Dan Floating Wetland Kombinasi Dengan Konsorsium Bakteri Untuk Removal Kandungan Bod, Cod Dan Amonia Pada Air Limbah Tenun*. Universitas Islam Indonesia .

Andarini Ayu Retnosari And Maya Shovitri (2013) 'Kemampuan Isolat *Bacillus spizizeni, Bacillus cereus*. Dalam Mereduksi Limbah Tangki Septik', *Jurnal Sains Dan Seni Pomits*, 2, Pp. 1–5.

Anders, G.J. And Institute Of Electrical And Electronics Engineers. (2005) *Rating Of Electric Power Cables In Unfavorable Thermal Environment*. Wiley.

Anisah As'ad (2014) *Fitoremediasi Tanah Tercemar Logam Zn Dan Cu Dengan Menggunakan Tanaman Akar Wangi (Vetiveria Zizanioides)*. Universitas Hasanuddin .

Anna Apriani Maniuk Solo And Luqi Khoiriyah Latif (2016) *Analisis Limbah Cair Tekstil*. Malang.

Ardina Sita Ningrum, Syafrudin And Sudarno (2017) *Pengaruh Hydraulic Loading Rate (Hlr) Dan Konsentrasi Influen Terhadap Penyisihan Parameter Bod, Cod Dan Nitrat Pada Pengolahan Air Limbah Domestik*

Campuran (Grey Water Dan Black Water) Menggunakan Reaktor Uasb. Semarang.

Ashri Nur'aini (2019) *Fitoremediasi Tanah Tercemar Logam Berat Kromium (Cr) Oleh Tanaman Akar Wangi (Vetiveria Zizanioides)*. Universitas Brawijaya .

Badejo, A. A., Omole, D. O., & Ndambuki, J. M. (2018). *Municipal wastewater management using Vetiveria zizanioides planted in vertical flow Constructed wetland*. *Applied Water Science*, *8*(4). https://doi.org/10.1007/s13201-018-0756-0

Brader, G. *Et al.* (2014) 'Metabolic Potential Of Endophytic Bacteria', *Current Opinion In Biotechnology*. Elsevier Ltd, Pp. 30–37. Available At: Https://Doi.Org/10.1016/J.Copbio.2013.09.012.

Darajeh N, Idris A, Truong P, Azis Aa, Bakar Ra, Man Hc. 2014. *Phytoremediation Potential Of Vetiver System Technology For Improving The Quality Of Palm Oil Mill Effluent*. Advances In Material Science And Engineering. 2014:1-10.

Dorafshan, M. M., Abedi-Koupai, J., Eslamian, S., & Amiri, M. J. (2023). Vetiver Grass (Chrysopogon Zizanoides L.): A Hyper-Accumulator Crop For Bioremediation Of Unconventional Water. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 4). Mdpi. Https://Doi.Org/10.3390/Su15043529

Erdina Trisna Mukti (2020) *Pengolahan Limbah Cair Tenun Dengan Sistem Constructed Treatment Wetland Menggunakan Kombinasi Tanaman Vetiver Dan Bakteri Indigenous*. Universitas Islam Indonesia .

Fajri, J.A. *Et al.* (2024) 'Effectiveness Of Endophytes Bacteria In Enhancing *Floating Treatment Wetland* To Treat Textile Wastewater', *Journal Of Ecological Engineering*, 25(3), Pp. 12–24. Available At: Https://Doi.Org/10.12911/22998993/177593.

Fareed, A. *Et al.* (2022) 'Decolorization Of Azo Dyes By A Novel Aerobic Bacterial Strain *Bacillus cereus* Strain Roc', *Plos One*, 17(6 June). Available At: Https://Doi.Org/10.1371/Journal.Pone.0269559.

Hussain, Z. *Et al.* (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, Pp. 966–973. Available At: Https://Doi.Org/10.1016/J.Scitotenv.2018.07.163.

Imfeld, G., Braeckevelt, M., Kuschk, P., & Richnow, H. H. (2009). Monitoring and assessing processes of organic chemicals *removal* in *Constructed*

wetlands. In *Chemosphere* (Vol. 74, Issue 3, pp. 349–362). https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.09.062.

Islam, M. M. M., Shafi, S., Bandh, S. A., Shameem, N. 2019. Chapter 3 - Impact Of Environmental Changes And Human Activities On Bacterial Diversity Of Lakes. *Freshwater Microbiology*. 105-136

Kant, R. (2012) 'Textile Dyeing Industry An Environmental Hazard', *Natural Science*, 04(01), Pp. 22–26. Available At: Https://Doi.Org/10.4236/Ns.2012.41004.

Khalfina Maharani (2021) *Tugas Akhir Identifikasi Bakteri Indigeneous Untuk Meningkatkan Degradasi Cod Pada Pengolahan Limbah Tenun Menggunakan Sistem Floating Treatment Wetland (Ftw)*. Universitas Islam Indonesia .

Komarawidjaja, W., Yudhi, D. And Garno, S. (2016) *Peran Rumput Vetiver (Chrysopogon Zizanioides) Dalam Fitoremediasi Pencemaran Perairan Sungai Role Of Vetiver Grass (Chrysopogon Zizanioides) In Phytoremediation Of Contaminated River Waters, Jurnal Teknologi Lingkungan*.

Lestari, T. *Et al.* (2020) 'The Application Of Palm-Oil Waste As Organic Materials On Three Pineapple Accessions Cultivated On Post-Tin Mining Land In Bangka Island, Indonesia', *Nusantara Bioscience*, 12(1). Available At: Https://Doi.Org/10.13057/Nusbiosci/N120107.

Lipi (2008) *Berita Biologi*.

Manajemen, D. *Et al.* (2016) *Ani Munawaroh Fitoremediasi Limbah Minyak Bumi Dalam Air Menggunakan Tanaman Akar Wangi (Vetiveria Zizanioides) Dengan Sistem Floating Wetland*.

Masitoh Kartikawati, S. *Et al.* (2019) *Tumbuhan Pewarna Alami Untuk Tenun Tradisional Di Kabupaten Sintang Dan Kabupaten Sambas Kalimantan Barat (Natural Dye Plants For Traditional Weaving In Sintang And Sambas Regencies, West Kalimantan)*.

Miwada, I., Lindawati, S. And Tatang, W. (2006). *Tingkat Efektivitas ''Starter‖'' Bakteri Asam Laktat Pada Proses Fermentasi Laktosa Susu [The Effectiveness Of Lactic Acid Bacteria On Milk Lactose Fermentation Process]. Journal Of The Indonesian Tropical Animal Agriculture.*

Mukti, E. T. (2020). *Pengolahan Limbah Cair Tenun Dengan Sistem Constructed Treatment Wetland Menggunakan Kombinasi Tanaman Vetiver Dan Bakteri Indigenous*. Universitas Islam Indonesia .

Nur Shinta Dewi, M. And Suseno (2023) ‘Analisis Warna Dan *Chemical Oxygen Demand* (Cod) Pada Air Limbah Industri Tekstil’, *Jurnal Kimia Dan Rekayasa*, 3(2), Pp. 1–7. Available At: Http://Kireka.Setiabudi,Ac.Id.

Nurun Nailis Sa’adah (2020) *Pengolahan Limbah Cair Tenun Dengan Sistem Floating Treatment Wetland Menggunakan Kombinasi Tanaman Vetiver Dan Bakteri Endofit*.

Nuzula, A. M. (2022). *Identifikasi Bakteri Endofit Untuk Meningkatkan Degradasi Cod Pada Pengolahan Limbah Tenun Menggunakan Sistem Floating Treatment Wetland (Ftw)*. Universitas Islam Indonesia .

Patandungan, A., Syamsidar Hs And Aisyah (2015) ‘Fitoremediasi Tanaman Akar Wangi (Vetiver Zizanioides) Terhadap Tanah Tercemar Logam Kadmium (Cd) Pada Lahan Tpa Tamangapa Antang Makassar’, *Al-Kimia*, 4(2), Pp. 1–14.

Patria, K., & Dwi, H. (2011). *Identifikasi Dan Karakterisasi Bakteri Pada Reaktor Wetland Identification And Characterization Of Bacteria Found In Wetland Reactor*. 17(April), 12–22.

Ponty, A. J. 2018. Studi Perbandingan Kemampuan Tanaman Eceng Gondok Dan Kangkung Air Dalam Menurunkan Cod Dan Amonia Dari Pengolahan Lanjut Biofilter Anaerob Media Sarang Tawon. *Tugas Akhir. Universitas Sumatera Utara.*

Pramadisa Dwi Amanda (2022) *Identifikasi Pengaruh Bakteri Indigen Terhadap Performa Wetland Untuk Pengolahan Limbah Tenun*. Universitas Islam Indonesia .

Pratiwi, A. (2021) ‘The Use Of Phytoremediaton With An Up-Flow System To Reduce Pollutants At Anaerobic Pond Outlets Ii Palm Oil Mill Effluent (Elaeis Guineensis Jacq.)’, *Agrosains : Jurnal Penelitian Agronomi*, 23(2), P. 89. Available At: Https://Doi.Org/10.20961/Agsjpa.V23i2.50101.

Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan (2022) *Identifikasi Bakteri Endofit Untuk Meningkatkan Degradasi Cod Pada Pengolahan Limbah Tenun Menggunakan Sistem Floating Treatment Wetland (Ftw)*. Universitas Islam Indonesia .

Purnomo, A.S. *Et al.* (2023) ‘Degradasi Limbah Zat Pewarna Sintetik Kerajinan Tenun Ikat Di Desa Parengan, Kecamatan Maduran, Kabupaten Lamongan Menggunakan Reaktor Fotokatalitik Tio2 Dengan Penambahan Panel Surya’, *Sewagati*, 7(4), Pp. 552–559. Available At: Https://Doi.Org/10.12962/J26139960.V7i4.538.

Rahayu, A. *Et al.* (2021) 'Review: Pengolahan Limbah Cair Industri Dengan Menggunakan Silika A Review: Industrial Liquid Waste Treatment Using Silica', *Open Science And Technology*, 02(01), Pp. 2776–169. Available At: Https://Opscitech.Com/Journal.

Rezania, S. *Et al.* (2015) 'Perspectives Of Phytoremediation Using Water Hyacinth For *Removal* Of Heavy Metals, Organic And Inorganic Pollutants In Wastewater', *Journal Of Environmental Management*. Academic Press, Pp. 125–133. Available At: Https://Doi.Org/10.1016/J.Jenvman.2015.08.018.

Risti Ristianingsih Badu (2018) *Pengolahan Air Limbah Pencucian Pt. Kai Yogyakarta Menggunakan Floating Treatment Wetland Kombinasi Dengan Tanaman Vetiveria Zizanioides Dan Bakteri*. Universitas Islam Indonesia .

Sanjeev Kumar (2016a) 'Isolation And Characterization Of Microbial Strains From Textile Industry Effluents Of Bhilwara, India: Analysis With Bioremediation', *Journal Of Chemical And Pharmaceutical Research*, Pp. 1–9. Available At: Www.Jocpr.Com.

Sanjeev Kumar (2016b) 'Isolation And Characterization Of Microbial Strains From Textile Industry Effluents Of Bhilwara, India: Analysis With Bioremediation', *Journal Of Chemical And Pharmaceutical Research*, 8(4), Pp. 1–9. Available At: Www.Jocpr.Com.

Shahid, M.J. *Et al.* (2018) '*Floating Wetland*s: A Sustainable Tool For Wastewater Treatment', *Clean - Soil, Air, Water*. Wiley-Vch Verlag. Available At: Https://Doi.Org/10.1002/Clen.201800120.

Shehzadi, M. *Et al.* (2014) 'Enhanced Degradation Of Textile Effluent In *Constructed Wetland* System Using Typha Domingensis And Textile Effluent-Degrading Endophytic Bacteria', *Water Research*, 58, Pp. 152–159. Available At: Https://Doi.Org/10.1016/J.Watres.2014.03.064.

Shehzadi, M. *Et al.* (2016) 'Ecology Of Bacterial Endophytes Associated With *Wetland* Plants Growing In Textile Effluent For Pollutant-Degradation And Plant Growth-Promotion Potentials', *Plant Biosystems*, 150(6), Pp. 1261–1270. Available At: Https://Doi.Org/10.1080/11263504.2015.1022238.

Stefanakis, A. I. (2019). *Constructed Wetland*s Case Studies For The Treatment Of Water Polluted With Fuel And Oil Hydrocarbons. In *Phytoremediation: Management Of Environmental Contaminants* (Vol. 6, Pp. 151–167). Springer International Publishing. Https://Doi.Org/10.1007/978-3-319-99651-6_6

Suelee, A. L., Hasan, S. N. M. S., Kusin, F. M., Yusuff, F. M., & Ibrahim, Z. Z. (2017). Phytoremediation Potential Of Vetiver Grass (Vetiveria Zizanioides) For Treatment Of Metal-Contaminated Water. *Water, Air, And Soil Pollution*, *228*(4). Https://Doi.Org/10.1007/S11270-017-3349-X

Sukma, A. W., Seno, B. A., Nurjanah, S., Syakur, A., Sudarto, J. H., & Semarang, T. (2013). *Peningkatan Kualitas Air Pantai Menjadi Air Bersih Dengan Penerapan Teknologi Plasma Non-Thermal Dan Multi-Step Filter*.

Suslow, T. V. (2004). Oxidation-Reduction Potential (Orp) For Water Disinfection Monitoring, Control, And Documentation. In *Oxidation-Reduction Potential (Orp) For Water Disinfection Monitoring, Control, And Documentation*. University Of California, Agriculture And Natural Resources. Https://Doi.Org/10.3733/Ucanr.8149

Sutanto, A. (2012). Degradasi Bahan Organik Limbah Cair Nanas Oleh Bakteri Indigen. *El–Hayah*, *1*(4). Https://Doi.Org/10.18860/Elha.V1i4.1690

Tara, N., Iqbal, M., *Et al.* (2019) 'Bioaugmentation Of *Floating Treatment Wetland*s For The Remediation Of Textile Effluent', *Water And Environment Journal*, 33(1), Pp. 124–134. Available At: Https://Doi.Org/10.1111/Wej.12383.

Tara, N., Arslan, M., *Et al.* (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, Pp. 541–548. Available At: Https://Doi.Org/10.1016/J.Jclepro.2019.01.258.

Tchobanoglous, G., Burton, F.L. And Stensel, H.D. (2003) Wastewater Engineering, Treatment And Reuse. 4th Edition, Mcgraw-Hill, Boston.

Tiara Chandra Kirana (2022) *Potensi Tanaman Pangan Dan Fungi Indigenous Untuk Emediasi Greywater Dengan Sistem Floating Wetland*.

Venturini, M., Rossen, A., Bucci, P., & Silva Paulo, P. (2022). Applying The Nernst Equation To Control Orp In Denitrification Process For Uranium-Containing Nuclear Effluent With High Loads Of Nitrogen And Cod. *Water (Switzerland)*, *14*(14). Https://Doi.Org/10.3390/W14142227

Vymazal, J. (2011) '*Constructed Wetland*s For Wastewater Treatment: Five Decades Of Experience', *Environmental Science And Technology*, 45(1), Pp. 61–69. Available At: Https://Doi.Org/10.1021/Es101403q.

Wang, J., Long, Y., Yu, G., Wang, G., Zhou, Z., Li, P., Zhang, Y., Yang, K., & Wang, S. (2022). A Review on Microorganisms in *Constructed* Wetlands for Typical Pollutant *Removal*: Species, Function, and Diversity. In

Frontiers in Microbiology (Vol. 13). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.845725.

Wang, X., Wu, Y., Chen, N., Piao, H., Sun, D., Ratnaweera, H., Maletskyi, Z., & Bi, X. (2022). Characterization Of Oxidation-Reduction Potential Variations In Biological Wastewater Treatment Processes: A Study From Mechanism To Application. *Processes*, *10*(12). Https://Doi.Org/10.3390/Pr10122607

Wu, S., Kuschk, P., Brix, H., Vymazal, J., & Dong, R. (2014). "*Development Of Constructed Wetlands In Performance Intensifications For Wastewater Treatment: A Nitrogen And Organic Matter Targeted Review.*" Water Research, 57, 40-55

Zahra Hanantia Puteri (2022) *Potensi Tanaman Pangan Dan Bakteri Endofit Indigenous Untuk Remediasi Greywater Dengan Sistem Floating Treatment Wetland*. Universitas Islam Indonesia .

Zulkoni, A., Rahyuni, D. And Nasirudin, N. (2018) 'Pemangkasan Akar Dan Inokulasi Jma Sebagai Upaya Peningkatan Fitoremediasi Tanah Tercemar Merkuri Akibat Penambangan Emas Oleh Tanaman Jati Di Kokap Kulon Progo Yogyakarta (Under Ground Root Pruning And Jma Inoculation To Improve Phytoremediation Of Soil Contaminated With Mercury Due To Gold Mining By Tectona Grandis In Kokap Kulonprogo Yogyakarta)', *Jurnal Manusia Dan Lingkungan*, 24(1), P. 17.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Pembuatan Reaktor & Sampling Air Limbah

1.1 Persiapan Bahan Baku

Gambar 1.1 Persiapan Bahan Reaktor

1.2 Proses Pembuatan Reaktor

Gambar 1.2 Proses Pembuatan Reaktor FTW dan CTW

1.3 Proses Pengambilan Sampel Air Limbah Industri Tenun

Gambar 1.3 Sampel Air Limbah Industri Tenun

Lampiran 2 Dokumentasi Proses di Tanaman

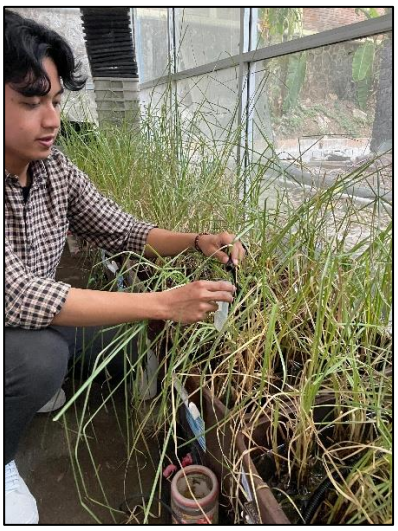
2.1 Proses Aklimatisasi Tanaman

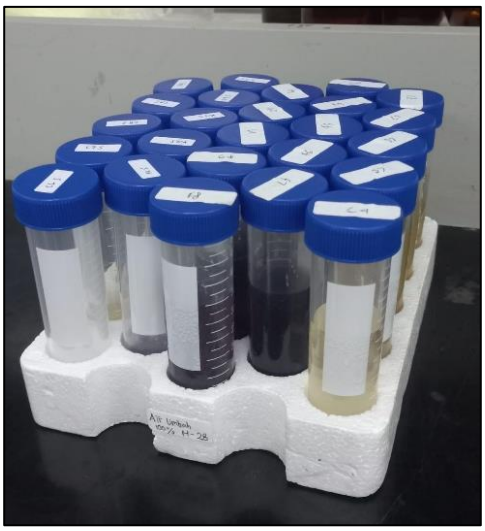
Gambar 2.1 Aklimatisasi Tanaman

2.2 Proses *Running* Reaktor

Gambar 2.2 Proses *Running* Reaktor

2.3 Proses Pengambilan Sampel





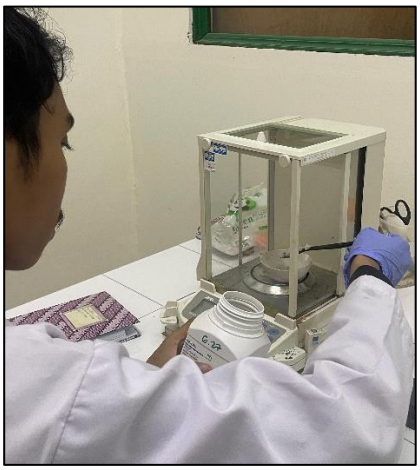
Gambar 2.3 Persiapan Alat Pengujian

Lampiran 3 Dokumentasi Pengujian *Chemical Oxygen Demand* (COD)

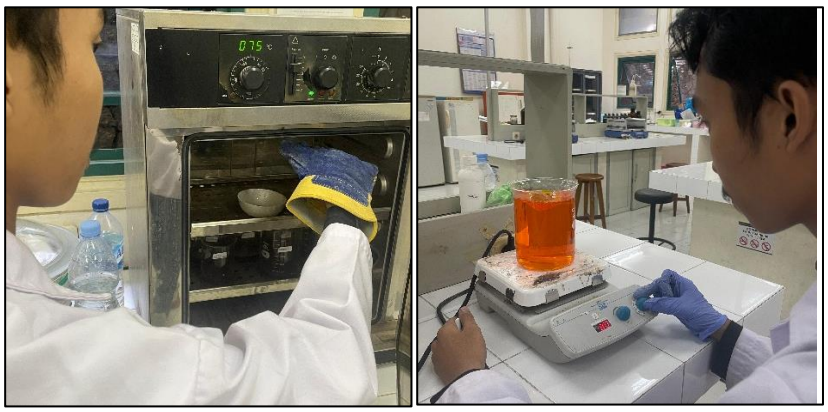
3.1 Persiapan Alat

Gambar 3.1 Persiapan Alat Pengujian

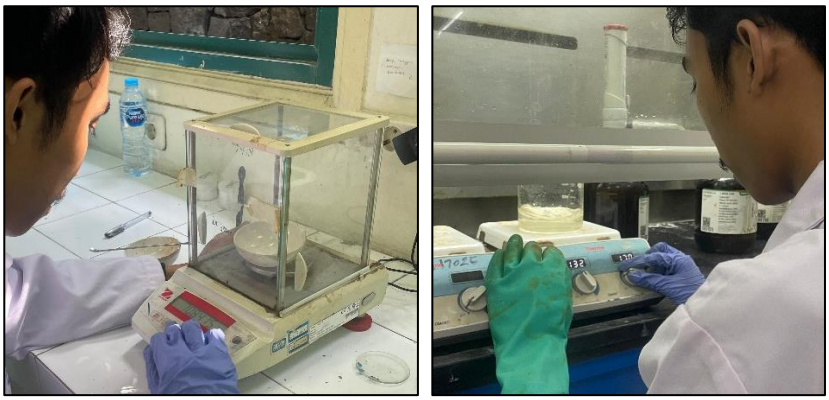
3.2 Persiapan Bahan



Gambar 3.2 Pembuatan Larutan Standar Kalibrasi



Gambar 3.3 Pembuatan Larutan Digestion Tinggi



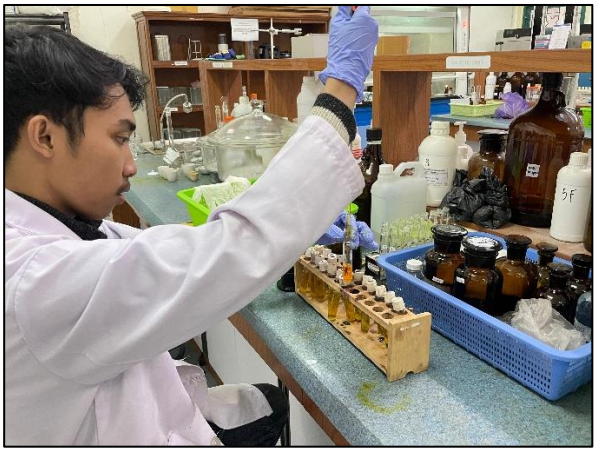
Gambar 3.4 Pembuatan Larutan Pereaksi Asam Sulfat

3.3 Proses Pembuatan Larutan Uji

Gambar 3.5 Pembuatan Larutan Kalium Hidrogen Ftalat

Gambar 3.6 Pembuatan Larutan Sampel dengan Pengenceran

Gambar 3.7 Penambahan Larutan Asam Sulfat pada Sampel COD



Gambar 3.8 Penambahan Larutan Digestion Tinggi pada Sampel COD

3.4 Proses Pengukuran dan Pembacaan Larutan Uji & Larutan Standar Kalibrasi

Gambar 3.9 Pembacaan Larutan Standar Kalibrasi menggunakan Spektrofotometer UV-Vis

Gambar 3.10 Pemanasan Sampel COD menggunakan *Thermoreactor*

Gambar 3.11 Pembacaan Sampel COD menggunakan Spektrofotometer UV-Vis

Gambar 3.12 Analisis Hasil Pembacaan COD

Lampiran 4 Hasil Perhitungan Parameter Limbah Cair Tenun

4.1 Hasil Pembacaan Kurva Kalibrasi *Chemical Oxygen Demand* (COD)

Konsentrasi dalam *Chemical Oxygen Demand* (COD) dapat diukur menggunakan alat spektrofotometer UV-Vis dengan menggunakan pedoman dari SNI 6989.2:2009. Dalam menghitung konsentrasi yang akan dicari, terlebih dahulu dibutuhkan kurva standar / kalibrasi untuk menentukan konsentrasi suatu zat yang tidak diketahui.

Tabel 4.1 Daftar Larutan Standar *Chemical Oxygen Demand* (COD)

Standar	COD (mg/L) (X)	Absorbansi (Y)	XY	X2
Standar 1	0	0	0	0
Standar 2	100	0,0300	3	10000
Standar 3	300	0,0900	27	90000
Standar 4	500	0,1650	82,5	250000
Standar 5	700	0,2320	162,4	490000
Standar 6	900	0,3190	287,1	810000
Total	2500	0,8360	562	1650000

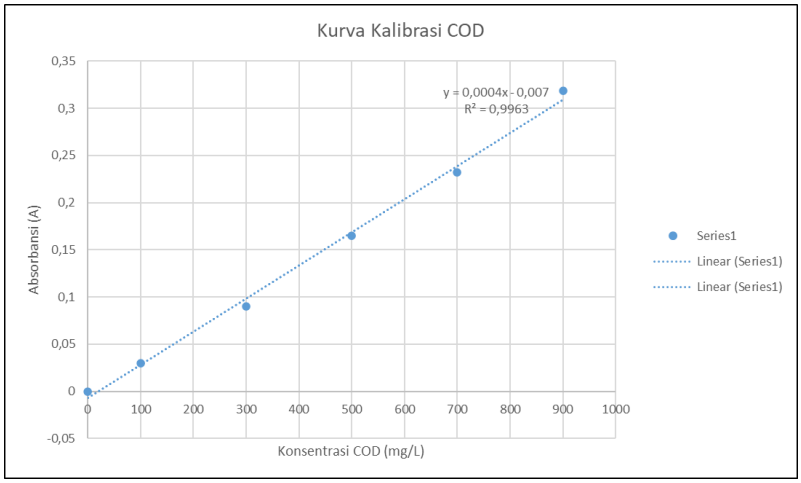
Berdasar hasil standar di atas dapat ditentukan nilai a dan b dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$a = \frac{(\Sigma y)(\Sigma x^2)-(\Sigma x)(\Sigma xy)}{n(\Sigma x^2)-(\Sigma x)^2} = \frac{(\Sigma y)(\Sigma x^2)-(\Sigma x)(\Sigma xy)}{n(\Sigma x^2)-(\Sigma x)^2} = \frac{(0{,}8360)(1.650.000)-(2.500)(562)}{6(1.650.000)-(2.500)^2} =$$

-0,00701

$$b = \frac{n(\Sigma xy)-(\Sigma x)(\Sigma y)}{n(\Sigma x^2)-(\Sigma x)^2} = \frac{n(\Sigma xy)-(\Sigma x)(\Sigma y)}{n(\Sigma x^2)-(\Sigma x)^2} = \frac{6(562)-(2.500)(0{,}8360)}{6(1.650.000)-(2.500)^2} = 0{,}00035$$

Y = bX + a = 0,0004X – 0,007



Gambar 4.1 Kurva Kalibrasi Standar *Chemical Oxygen Demand* (COD)

Berdasarkan hasil kalibrasi di atas diperoleh nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,9963. Hasil tersebut menunjukkan kalibrasi dapat diterima sebab hasil koefisien korelasi yang diperbolehkan yaitu lebih tinggi atau sama dengan 0,995.

4.2 Hasil Pembacaan Konsentrasi & *Removal Chemical Oxygen Demand* (COD)

Tabel 4.2 Hasil Pengukuran *Chemical Oxygen Demand* (COD) Limbah 25%

Sampel	**Konsentasi Kadar COD (mg/L) 25%**		
	Hari ke-		
	0	**7**	**14**
Reaktor Kontrol	5781,20	6891,58	5287,70
Reaktor FTW	5686,30	5724,26	7451,90
Reaktor FTW + Bakteri	5191,89	1765,86	1955,54
Reaktor CTW	5686,30	5638,85	5344,25
Reaktor CTW + Bakteri	5191,89	4319,03	2268,85

Tabel 4.3 Persentase *Removal Chemical Oxygen Demand* (COD) Limbah 25%

Sampel	**Efisiensi Removal COD (mg/L) 25%**	
	Hari ke-	
	7	**14**
Reaktor Kontrol	2%	10%
Reaktor FTW	17%	74%
Reaktor FTW + Bakteri	0%	63%
Reaktor CTW	22%	41%
Reaktor CTW + Bakteri	16%	64%

Tabel 4.4 Hasil Pengukuran *Chemical Oxygen Demand* (COD) Limbah 50%

Sampel	**Konsentasi Kadar COD (mg/L) 50%**		
	Hari ke-		
	0	**7**	**14**
Reaktor Kontrol	5,364,01	6,929,93	9,349,97
Reaktor FTW	3,569,16	2,316,43	2,620,12
Reaktor FTW + Bakteri	3,217,63	1,338,53	1,575,79
Reaktor CTW	3,569,16	1,870,12	1,642,36
Reaktor CTW + Bakteri	3,217,63	1,490,38	1,253,12

Tabel 4.5 Persentase *Removal Chemical Oxygen Demand* (COD) Limbah 50%

Sampel	**Efisiensi Removal COD (mg/L) 50%**	
	Hari ke-	
	7	**14**
Reaktor Kontrol	33%	40%
Reaktor FTW	67%	81%
Reaktor FTW + Bakteri	72%	83%
Reaktor CTW	74%	79%
Reaktor CTW + Bakteri	79%	84%

4.3 Hasil Pengukuran Parameter Fisik (ORP)

Tabel 4.6 Persentase *Removal Chemical Oxygen Demand* (COD) Limbah 50%

Hari	Kontrol	FTW	FTW+Bakteri	CTW	CTW+Bakteri
1	69,0	71,7	71,7	68,7	66,7
2	39,3	49,3	42,0	36,0	37,3
3	-18,7	46,0	-62,3	-24,3	-4,7
5	33,0	58,0	6,0	19,0	28,7
6	22,3	58,3	-41,0	4,0	14,0
7	28,3	46,3	10,7	22,3	22,3
8	29,0	55,0	4,7	21,3	27,7
9	-185,7	-215,7	-250,3	-211,3	-194,3
10	-145,7	-151,0	-210,0	-151,7	-155,0
12	-168,0	-192,0	-217,7	-183,7	-187,0
13	-161,3	-161,0	-189,3	-147,3	-156,7
15	-179,33	-184,00	-196,33	-174,67	-181,00
16	-162,33	-183,67	-187,33	-169,33	-162,33
18	-165,33	-168,67	-170,67	-163,00	-163,33
19	-184,33	-183,67	-186,00	-173,67	-173,33
20	-165,33	-156,67	-167,33	-163,67	-165,00
21	-155,67	-160,33	-170,00	-165,00	-165,67
23	-170,33	-173,00	-177,00	-186,67	-209,33
25	-248,33	-248,00	-257,33	-253,00	-253,67
26	-232,00	-238,67	-239,00	-238,33	-238,33
27	-232,00	-228,33	-238,33	-236,67	-243,67

Lampiran 5 Tabel Uji Statistik

5.1 Nilai Konsentrasi *Chemical Oxygen Demand* (COD) Pada *Floating Treatment Wetland* (FTW)

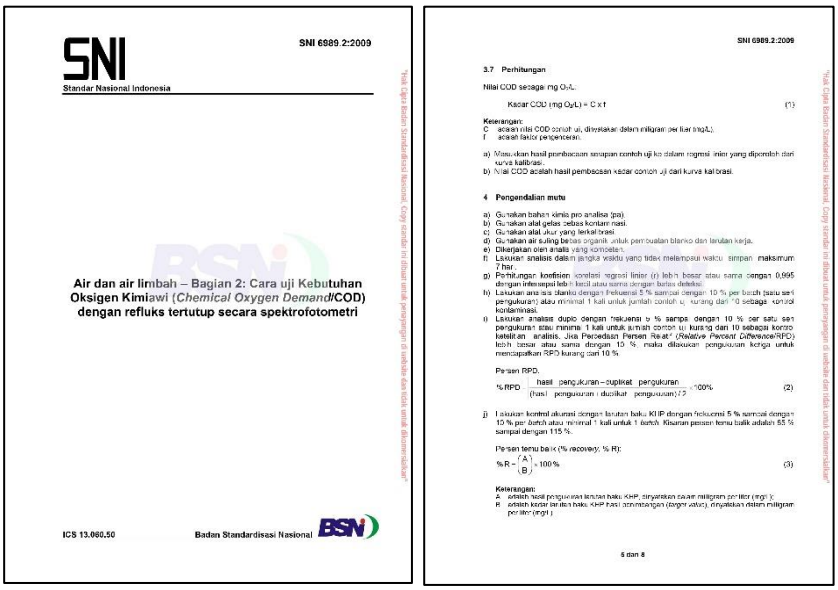
Kadar Nilai COD (mg/L)							
Konsentrasi 25%				**Konsentrasi 50%**			
Hari	**Kontrol**	**FTW**	**FTW + Bakteri**	**Hari**	**Kontrol**	**FTW**	**FTW + Bakteri**
0	5,781.20[a]	6,891.58[a]	5,287.70[a]	**0**	5,364.01[b]	6,929.93[a]	9,349.97[a]
	±878.926	±1291.759	±559.301		±94.904	±659.223	±1602.863
7	5,686.30[a]	5,724.26[a]	7,451.90[a]	**7**	3,569.16[c]	2,316.43[d]	2,620.12[c]
	±1274.737	±942.217	±990.825		±68.436	±75.923	±263.005
14	5,191.89[a]	1,765.86[a]	1,955.54 [a]	**14**	3,217.63[c]	1,338.53[d]	1,575.79[d]
	±1208.540	±1338.53	±1187.452		±91.522	±102.654	±50.218

5.2 Nilai Konsentrasi *Chemical Oxygen Demand* (COD) Pada *Constructed Treatment Wetland* (CTW)

Kadar Nilai COD (mg/L)							
Konsentrasi 25%				**Konsentrasi 50%**			
Hari	**Kontrol**	**CTW**	**CTW + Bakteri**	**Hari**	**Kontrol**	**CTW**	**CTW + Bakteri**
0	5,781.20[a]	7,261.70[a]	6,350.62[a]	**0**	5,364.01[b]	7,167.19[a]	7,689.16[a]
	±878.926	±1535.726	±1125.750		±94.90	±855.451	±641.917
7	5,686.30[a]	5,638.85[a]	5,344.25[a]	**7**	3,569.16[c]	1,870.12[d]	1,642.36[d]
	±1274.737	±1264.799	±675.008		±68.44	±358.128	±517.421
14	5,191.89[a]	4,319.03[a]	2,268.85[a]	**14**	3,217.63[c]	1,490.38[d]	1,253.12[d]
	±1208.540	±3322.803	±609.512		±91.52	± 90.532	±59.267

Lampiran 6 Dokumen Peraturan Pendukung

6.1 Standard Nasional Indonesia (SNI) 6989.2-2019 Uji COD



SNI

Standar Nasional Indonesia

SNI 6989.2:2009

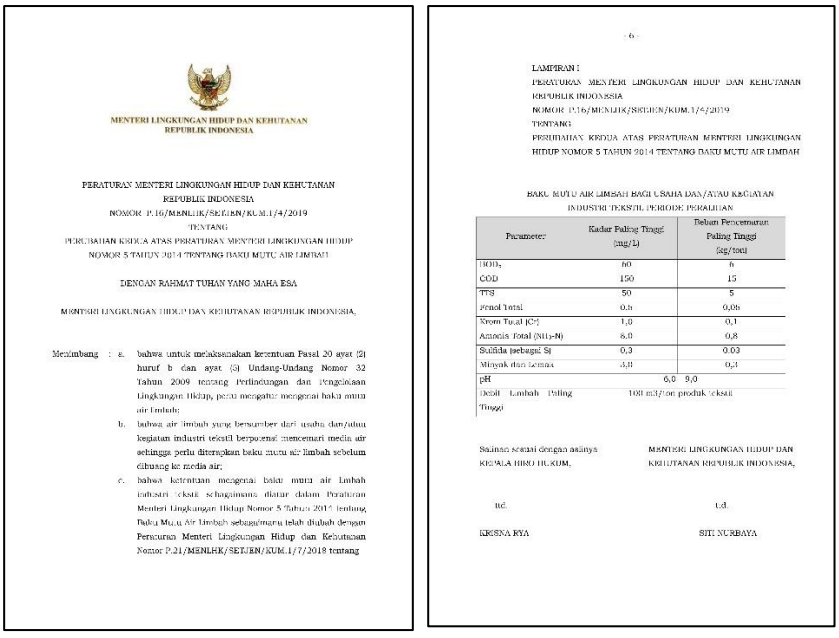
Air dan air limbah – Bagian 2: Cara uji Kebutuhan Oksigen Kimiawi (*Chemical Oxygen Demand*/COD) dengan refluks tertutup secara spektrofotometri

ICS 13.060.50

Badan Standardisasi Nasional

Gambar 5.1 SNI 6989.2-2019 Uji COD

6.2 PerMen LHK Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019



MENTERI LINGKUNGAN HIDUP DAN KEHUTANAN
REPUBLIK INDONESIA

PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP DAN KEHUTANAN
REPUBLIK INDONESIA
NOMOR P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019
TENTANG
PERUBAHAN KEDUA ATAS PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
NOMOR 5 TAHUN 2014 TENTANG BAKU MUTU AIR LIMBAH

DENGAN RAHMAT TUHAN YANG MAHA ESA

MENTERI LINGKUNGAN HIDUP DAN KEHUTANAN REPUBLIK INDONESIA,

Menimbang : a. bahwa untuk melaksanakan ketentuan Pasal 20 ayat (2) huruf b dan ayat (3) Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, perlu mengatur mengenai baku mutu air limbah;

b. bahwa air limbah yang bersumber dari usaha dan/atau kegiatan industri tekstil berpotensi mencemari media air sehingga perlu diterapkan baku mutu air limbah sebelum dibuang ke media air;

c. bahwa ketentuan mengenai baku mutu air Limbah Industri Tekstil sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah sebagaimana telah diubah dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.21/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2018 tentang

- 6 -

LAMPIRAN I
PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP DAN KEHUTANAN
REPUBLIK INDONESIA
NOMOR P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019
TENTANG
PERUBAHAN KEDUA ATAS PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP NOMOR 5 TAHUN 2014 TENTANG BAKU MUTU AIR LIMBAH

BAKU MUTU AIR LIMBAH BAGI USAHA DAN/ATAU KEGIATAN INDUSTRI TEKSTIL PERIODE PERALIHAN

Parameter	Kadar Paling Tinggi (mg/L)	Beban Pencemaran Paling Tinggi (kg/ton)
BOD5	60	6
COD	150	15
TSS	50	5
Fenol Total	0,5	0,05
Krom Total (Cr)	1,0	0,1
Amonia Total (NH3-N)	8,0	0,8
Sulfida (sebagai S)	0,3	0,03
Minyak dan lemak	5,0	0,5
pH	6,0 - 9,0	
Debit Limbah Paling Tinggi	100 m3/ton produk tekstil	

Salinan sesuai dengan aslinya
KEPALA BIRO HUKUM,

ttd.

KRISNA RYA

MENTERI LINGKUNGAN HIDUP DAN KEHUTANAN REPUBLIK INDONESIA,

ttd.

SITI NURBAYA

Gambar 5.2 PerMen LHK Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019

RIWAYAT HIDUP

Muhammad Nafis Yassar, lahir di Jember pada tanggal 24 Maret 2002, adalah anak pertama dari Wahyu Agung Hartiadi Prajitno dan Siti Alawiah, S.Pd. Riwayat pendidikannya meliputi TK Raudlatul Azhar 01 (2006 – 2008), SD Negeri Semboro 04 (2008 – 2014), SMP Negeri 1 Semboro (2014 – 2017), SMA Negeri 2 Jember (2017 – 2020), dan Universitas Islam Indonesia pada Program Studi Sarjana Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (2020 – 2024).

Berikut beberapa kegiatan yang pernah diikuti penulis selama menempuh pendidikan, baik kegiatan akademik maupun non akademik yaitu:

1. Staff *Divisi Research And Development* Laboratorium Mahasiswa (LABMA) Universitas Islam Indonesia.
2. Staff Divisi Kesekretariatan *Student Achievement Mobility Center* Universitas Islam Indonesia.
3. Staff *Organizing Commitee* Divisi Kesekretariatan Kepanitiaan Ospek Lintas Lingkungan 2020.
4. Ketua Divisi I *Internasional Conference Labma Scientific Fair* 2021.
5. Asisten Praktikum Mata Kuliah Praktikum Teknik Lingkungan I, Praktikum Teknik Lingkungan II, dan Praktikum Kimia Dasar.
6. Finalis dalam Acara Pekan Ilmiah Mahasiswa Nasional 2021ke-34 Universitas Sumatera Utara pada Skema PKM-KI.
7. Finalis 10 Besar dalam Lomba Esai Nasional BEM FAI Unismuh Makassar 2022.
8. Juara II (*Silver Medal*) dalam 6^{th} *International Avicenna Youth Science Fair* 2021 by *International Avicenna Research Center in Collaboration with Indonesia Young Scientist Association*.