

TUGAS AKHIR

**EFEKTIVITAS KONSORSIUM BAKTERI *BACILLUS* *sp* DAN
STENOTROPHOMONAS MALTHOPILIA TERHADAP
PERFORMA *WETLAND* MENGGUNAKAN *VETIVERIA*
ZIZANIOIDES UNTUK MENDEGRADASI WARNA DAN TSS
PADA AIR LIMBAH TENUN**

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



**MAULANA NURUL YAHYA
20513261**

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

TUGAS AKHIR

EFEKTIVITAS KONSORSIUM BAKTERI *BACILLUS sp* DAN *STENOTROPHOMONAS MALTHOPILIA* TERHADAP PERFORMA *WETLAND* MENGGUNAKAN *VETIVERIA ZIZANIOIDES* UNTUK MENDEGRADASI WARNA DAN TSS PADA AIR LIMBAH TENUN

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



Disusun Oleh :

Maulana Nurul Yahya
20513261

Disetujui,

Dosen Pembimbing :


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

Tanggal : 25 Oktober 2024
NIK : 165131306


Dewi Wulandari, S.Hut., M. Agr., Ph.D.

Tanggal : 25 Oktober 2024
NIK : 185130401



Ketua Prodi Teknik Lingkungan FTSP UII


Ahy Juliani, S.T. M.Sc. (Res.Eng.), Ph.D.

NIK : 045130401

HALAMAN PENGESAHAN
EFEKTIVITAS KONSORSIUM BAKTERI *BACILLUS sp* DAN
***STENOTROPHOMONAS MALTHOPILIA* TERHADAP**
PERFORMA *WETLAND* MENGGUNAKAN *VETIVERIA*
***ZIZANIODES* UNTUK MENDEGRADASI WARNA DAN TSS**
PADA AIR LIMBAH TENUN

Telah diterima dan disahkan oleh Tim Penguji

Hari : Kamis
Tanggal : 24 Oktober 2024

Disusun oleh :

Maulana Nurul Yahya
20513261

Tim Penguji :

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

Dewi Wulandari, S.Hut., 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.
1. 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.
2. Program software komputer yang digunakan dalam penelitian ini sepenuhnya menjadi tanggungjawab saya, bukan tanggungjawab Universitas Islam Indonesia. (apabila menggunakan software khusus)
3. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 24 Oktober 2024

Yang membuat pernyataan,



Maulana Nurul Yahya

NIM : 20513261

PRAKATA

Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, Nikmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir tentang **Efektivitas Konsorsium Bakteri *Bacillus sp* dan *Stenotrophomonas Malthophilia* Terhadap Performa Wetland Menggunakan *Vetiveria Zizanioides* untuk Mendegradasi Warna dan TSS pada Air Limbah Tenun.**

Penyusunan laporan ini merupakan salah satu tahapan dalam pelaksanaan tugas akhir untuk memenuhi persyaratan memperoleh derajat Sarjana (S1) Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini, penulis mendapatkan dukungan, bantuan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua, Ayah, Ibu, serta adik Nabila Nuril Muna dan Dzannur Fahrizal Afwan.
2. Pembimbing Tugas Akhir, Bapak Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng, Ibu Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D, dan Bapak Dr.Eng. Awaluddin Nurmiyanto, S.T., M.Eng. yang telah banyak membantu dan membimbing tugas akhir ini.
3. Laboran dari Laboratorium Kualitas Lingkungan, Mbak Rina, Mbak Tika, Mbak Dhiyah, Mbak Ida, Pak Tas, terima kasih atas bantuan selama penelitian di laboratorium.
4. Mba Lisa (Nurun Nailis Sa'adah) yang telah membimbing dan mengajarkan tentang tata cara sampling, pengujian labiratorium, analisis data, dan penulisan laporan tugas akhir sehingga tugas-tugas laboratorium menjadi mudah dipahami dan mudah untuk dikerjakan.
5. Teman seperjuangan tugas akhir, Daru Faturrahman, Muhammad Nafiz Yassar, dan Raikhan Maulana Hafizullah. Terima kasih telah menjadi partner tugas akhir ini dan terima kasih atas bantuannya dalam segala hal.
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis berharap semoga amal baik dari semua pihak yang telah membantu penyusunan laporan tugas akhir ini mendapat balasan pahala dari Allah SWT. Demikian laporan tugas akhir ini, semoga dapat bermanfaat dan dapat diimplementasikan di masa mendatang.

Yogyakarta, 23 Juni 2024

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping letters and lines, positioned above the word 'Penulis'.

Penulis

ABSTRAK

MAULANA NURUL YAHYA. Efektivitas Konsorsium Bakteri *Bacillus sp* dan *Stenotrophomonas Malthophilia* Terhadap Performa *Wetland* Menggunakan *Vetiveria Zizanioides* untuk Mendegradasi Warna dan TSS pada Air Limbah Tenun. Dibimbing oleh DR. JONI ALDILLA FAJRI, S.T., M.ENG. ; DEWI WULANDARI, S.HUT., M.AGR., PH.D. ; dan DR. ENG. AWALUDDIN N, S.T., M. ENG.

Limbah cair tekstil yang diproduksi dari industri kain tenun di Troso memiliki potensi yang tinggi dalam mencemari lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kualitas air limbah tenun (parameter warna dan TSS) setelah melalui pengolahan *wetland* dengan tanaman *Vetiveria Zizanioides* serta kombinasi bakteri *Bacillus Cereus*, *Bacillus Spizizenii*, dan *Stenotrophomonas Malthophilia*. Tanaman *Vetiveria Ziazanioides* diaklimatisasikan selama 60 hari didalam reactor sebelum ditambahkan air limbah tekstil. Reaktor *Constructed Treatment Wetland* (CTW) dan *Floating Treatment Wetland* (FTW) dipilih karena merupakan teknologi yang mudah dan ekonomis untuk diaplikasikan pada industry UMKM. Sembilan reaktor FTW dan sembilan reaktor CTW diberi perlakuan yang berbeda-beda dan di operasikan secara *batch* selama 5 minggu. Kinerja FTW dan CTW dievaluasi dengan menguji parameter warna dan TSS seta parameter harian berupa TDS yang diambil sampelnya dengan konsentrasi air limbah 25% dan 50%. Meskipun FTW dan CTW tanpa tambahan bakteri mampu menurunkan polutan dari limbah cair tenun, reactor yang ditambahkan kombinasi bakteri lebih baik dalam meningkatkan kadar penurunan limbah. Hasil data yang diperoleh menunjukkan bahwa parameter Warna direduksi sampai 99% di F3 dan 99% di C3. TSS dapat tereduksi hingga 93% di F3 dan 91% di C3. Penelitian ini menunjukkan bahwa FTW dan CTW dengan kombinasi tanaman *Vetiveria Zizanioides* dan Konsorsium Bakteri *Bacillus Cereus*, *Bacillus Spizizeni*, dan *Stenotrophomonas Malthophilia* memiliki potensi untuk mengolah limbah cair tenun dan bisa diaplikasikan dalam skala besar untuk mengatasi pencemaran lingkungan.

Kata Kunci : Konsorsium bakteri, *floating treatment wetland*, *constructed treatment wetland*, limbah tenun, tanaman vetiver.

ABSTRACT

MAULANA NURUL YAHYA. Effectiveness of *Bacillus* sp and *Stenotrophomonas Malthophilia* Bacterial Consortium on *Wetland* Performance Using *Vetiveria Zizanioides* to Degrade Color and TSS in Weaving Wastewater. Supervised by DR. JONI ALDILLA FAJRI, S.T., M.ENG. ; DEWI WULANDARI, S.HUT., M.AGR., PH.D. ; and DR. ENG. AWALUDDIN N, S.T., M. ENG.

Textile wastewater produced from the weaving industry in Troso has a high potential to pollute the environment. This study aims to examine the quality of weaving wastewater (color and TSS parameters) after undergoing *wetland* treatment with *Vetiveria Zizanioides* plants and a combination of *Bacillus Cereus*, *Bacillus Spizizenii*, and *Stenotrophomonas Malthophilia* bacteria. *Vetiveria Zizanioides* plants were acclimatized for 60 days in the reactor before being added to textile wastewater. Constructed Treatment *Wetland* (CTW) and Floating Treatment *Wetland* (FTW) reactors were chosen because they are easy and economical technologies to apply to the MSME industry. Nine FTW reactors and nine CTW reactors were given different treatments and operated in batches for 5 weeks. The performance of FTW and CTW was evaluated by testing the color and TSS parameters as well as daily parameters in the form of TDS which were sampled with wastewater concentrations of 25% and 50%. Although FTW and CTW without additional bacteria were able to reduce pollutants from weaving liquid waste, the reactor with the addition of a combination of bacteria was better at increasing the level of waste reduction. The results of the data obtained showed that the Color parameter was reduced to 99% in F3 and 99% in C3. TSS can be reduced to 93% in F3 and 91% C3. This study shows that FTW and CTW with a combination of *Vetiveria Zizanioides* plants and Bacterial Consortium *Bacillus Cereus*, *Bacillus Spizizenii*, and *Stenotrophomonas Malthophilia* have the potential to treat liquid weaving waste and can be applied on a large scale to overcome environmental pollution.

Keywords: Bacterial consortium, floating treatment *wetland*, constructed treatment *wetland*, weaving waste, vetiver plants.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Limbah Industri Tenun	5
2.1.1 Karakteristik Limbah Industri Tenun	6
2.2 Bioremediasi	8
2.3 Fitoremediasi	8
2.4 Konsorsium Bakteri <i>Bacillus Cereus</i> , <i>Bacillus Spizizenii</i> , dan <i>Stenotrophomonas Malthophilia</i>	10
2.4.1 Tanaman Fitoremediasi (<i>Vetivera Zizanioides</i>)	11
2.4.2 Teknologi Fitoremediasi	12
2.5 Parameter Warna	12
2.6 Parameter TSS	13
2.7 Penelitian Terdahulu	14
BAB III METODE PENELITIAN	17
3.1 Waktu dan Lokasi	17
3.2 Perparasi Air Limbah	18
3.3 Kultivasi Bakteri	18
3.4 <i>Wetland</i>	20
3.4.1 Persiapan Pembuatan Reaktor FTW	20
3.4.2 Persiapan Pembuatan Reaktor CTW	21
3.4.3 Aklimatisasi Tanaman <i>Vetiveria Zizanioides</i>	22
3.4.4 <i>Running</i> dan <i>Sampling</i> Reaktor	23
3.5 Pengujian Parameter	23

3.6 Analisis Data	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	25
4.1 Karakteristik Air Limbah	25
4.2 Kemampuan Reaktor <i>Wetland</i> dalam Mengolah Air Limbah.....	26
4.2.1 Kemampuan Penurunan Warna.....	26
4.2.2 Kemampuan Penurunan <i>Total Suspended Solid</i> (TSS).....	33
4.3 Karakteristik Parameter Fisik pada Air Limbah di Masing-Masing Reaktor	40
4.3.1 <i>Total Dissolved Solid</i> (TDS).....	40
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	43
5.1 Simpulan	43
5.2 Saran.....	44
DAFTAR PUSTAKA	46
LAMPIRAN.....	48

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Sumber-Sumber Penelitian Terdahulu	14
Tabel 3. 1 Variasi Perlakuan Reaktor FTW	20
Tabel 3. 2 Variasi Perlakuan Reaktor CTW.....	21
Tabel 4. 1 Karakteristik Limbah Awal.....	25
Tabel 4. 2 Karakteristik Air Limbah Tenun dalam Penelitian Ini.....	25
Tabel 4. 3 Nilai Reduksi Warna (PtCo)	32
Tabel 4. 4 Nilai Reduksi TSS (mg/L)	39

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	17
Gambar 3. 2 Tahapan Kulturasasi Bakteri.....	19
Gambar 3. 3 Desain Reaktor <i>Floating Treatment Wetland</i> (FTW)	20
Gambar 3. 4 Susunan Tanaman di <i>Floating Treatment Wetland</i>	21
Gambar 3. 5 Desain Reaktor <i>Constructed Treatmen Wetland</i> (CTW)	22
Gambar 3. 6 Susunan Tanaman di <i>Constructed Treatment Wetland</i>	22
Gambar 3. 7 Proses Aklimatisasi Tanaman <i>Vetivera</i>	23
Gambar 4. 1 Hasil Pengujian Warna pada FTW	26
Gambar 4. 2 Hasil Pengujian Warna pada CTW	28
Gambar 4. 3 Efisiensi Removal Warna Air Limbah 25 % di Semua Reaktor	30
Gambar 4. 4 Efisiensi Removal Warna Air Limbah 50 % di Semua Reaktor	31
Gambar 4. 5 Hasil Pengujian TSS pada FTW.....	33
Gambar 4. 6 Hasil Pengujian TSS pada CTW	35
Gambar 4. 7 Efisiensi Removal TSS Air Limbah 25 % di Semua Reaktor.....	37
Gambar 4. 8 Efisiensi Removal TSS Air Limbah 50 % di Semua Reaktor.....	38
Gambar 4. 9 Hasil Pengukuran TDS pada FTW	40
Gambar 4. 10 Hasil Pengolahan TDS pada CTW	41

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Kurva Kalibrasi Standar Warna PtCo.....	48
Lampiran 2 Kegiatan Pengujian Konsentrasi Warna dengan Spektofotometer	48
Lampiran 3 Kenampakan Reaktor Floating Kontrol.....	49
Lampiran 4 Kenampakan Reaktor Floating Tanaman	49
Lampiran 5 Kenampakan Reaktor Constructed Tanaman	49
Lampiran 6 Reaktor Constructed Tanaman + Bakteri	49
Lampiran 7 Kenampakan Kertas Saring Setelah Dilakukan Penyaringan TSS	49
Lampiran 8 Kenampakan Kertas Saring Setelah Dilakukan Penyaringan TSS	49

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kain tenun merupakan bagian penting dari warisan budaya Indonesia. Banyak daerah di Indonesia yang membuat kain tenun dengan gaya dan ciri khasnya sendiri Purwanto (2010). Salah satu contohnya adalah kain Tenun ikat Troso dari Jepara, yang sudah dikenal di pasar internasional karena keindahan motifnya dengan gaya khas Eropa. Achilla (2023) menyebutkan bahwa salah satu ciri khas tenun ikat Troso adalah motif ukiran yang mencolok, dan proses pembuatannya menggunakan Alat Tenun Bukan Mesin (ATBM), menjadikan kualitasnya tinggi sehingga memiliki nilai ekonomi yang tinggi di pasar domestik maupun pasar internasional. Motif tenun ikat Troso juga terinspirasi oleh motif dari daerah lain di Indonesia, khususnya motif Bali, Flores, dan Sumbawa. Motifnya biasanya mencerminkan budaya etnik, tradisional, dan klasik, sehingga kain tenun ini memiliki karakter unik yang berbeda dari yang lain (Maulidiyah, 2023).

Menurut Prambudi (2020), semakin banyak industri tenun yang berkembang, semakin banyak pula limbah cair yang dihasilkan dari kegiatan produksi tersebut. Jika limbah cair tersebut langsung dibuang ke lingkungan tanpa diproses terlebih dahulu, maka akan merusak ekosistem lingkungan. Limbah utama dari industri tenun bisa dilihat dari beberapa indikator seperti COD, TSS, Warna, Amoniak total ($\text{NH}_3\text{-N}$), dan pH, sebagaimana diatur dalam Peraturan Daerah Provinsi Jawa Tengah nomor 5 tahun 2012 tentang Baku Mutu Air Limbah. Contoh nyata dampak pencemaran lingkungan akibat limbah cair dari industri tenun adalah perubahan warna sungai Desa Troso karena pembuangan limbah tanpa pengelolaan terlebih dahulu. Selain mencemari sungai, limbah dari industri tenun juga memengaruhi kualitas air sumur dan saluran air di sekitarnya. Menurut Noviyanti (2019) beberapa warga bahkan mengeluhkan bahwa air sumur mereka menjadi berbau tidak sedap dan tidak dapat digunakan lagi. Selain itu kehadiran zat pewarna dalam sumber air juga berdampak negatif terhadap kesehatan manusia, meningkatkan sifat mutagenik

dan karsinogenik dalam tubuh, berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan dan mengganggu ekosistem perairan dengan mengurangi oksigen terlarut melalui penghalang sinar matahari pada sumber air (Samsami *et al.*, 2020; Sudarshan *et al.*, 2023).

Penelitian Fajri *et al.* (2024) mengungkapkan manfaat positif pada efektivitas bakteri konsorsium dari tanaman inang yang berbeda untuk meningkatkan tanaman *Vetiveria zizanioides* dalam mengurangi polutan air limbah tekstil. Tanaman *Vetiveria zizanioides* (reaktor kontrol FK2) mampu menurunkan COD dan warna pada air limbah tekstil dengan persentase masing-masing sebesar 74% dan 91%. Asosiasi bakteri endofit dari tanaman inang yang berbeda juga menunjukkan respon positif terhadap *Vetiveria sp* dengan mereduksi senyawa organik dan anorganik seperti warna (97%) dan Pb (52%) masing-masing pada reaktor F4 dan F3. Oleh karena itu kombinasi bakteri endofit yang berasosiasi dengan *Vetiveria sp.* telah menunjukkan potensi luar biasa dalam menghilangkan polutan warna (Sa'adah 2020)

Menurut (Afzal *et al.*, 2014) bakteri seperti *Bacillus Cereus*, *Bacillus Spizizenii*, dan *Stenotrophomonas Malthophilia* dapat membantu membersihkan senyawa organik di dalam air yang terkontaminasi. Mereka bekerja dengan meningkatkan pemecahan kontaminan, dan juga dapat membantu tanaman tumbuh lebih baik dengan menggunakan polutan sebagai sumber nutrisi melalui proses yang disebut fitoremediasi. Menurut (Tuhuloula 2020) bakteri *Bacillus Cereus* dan *Bacillus Spizizenii* dalam reaktor *wetland* berperan dalam proses degradasi dan penguraian bahan organik, termasuk senyawa penyebab warna dan *Total Suspended Solids* (TSS) dalam air limbah, melalui mekanisme biokimia seperti dekomposisi enzimatik. Studi oleh Zhao *et al.* (2019) mendukung kontribusi *Bacillus Cereus* dalam peningkatan efisiensi penghilangan parameter warna dan TSS dalam sistem *wetland*. Sedangkan Bakteri *Stenotrophomonas maltophilia* berfungsi sebagai agen degradasi dalam reaktor *wetland* untuk menghilangkan kandungan parameter warna dan TSS pada air limbah dengan mempercepat proses dekomposisi senyawa organik dan partikel padat. Penelitian oleh Mokhayeri Y., Sadeghi M., dan Rafiee A. pada tahun 2019 menunjukkan kemampuan bakteri *Stenotrophomonas*

Maltophilia dalam memperbaiki kualitas air limbah dengan mengurangi parameter warna dan TSS dalam sistem reaktor *wetland*.

Berdasarkan latar belakang tersebut, karena keterkaitan antara ketiga bakteri tersebut dengan kemampuannya untuk mendegradasi parameter warna dan TSS maka perlu dilakukan penelitian tentang efektivitas konsorsium Bakteri *Bacillus sp* dan *Stenotrophomonas Malthophilia* terhadap performa *wetland* menggunakan *Vetiveria Zizanioides* untuk mendegradasi warna dan TSS pada air limbah tenun.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana kualitas air limbah tenun dalam parameter warna dan TSS setelah melalui rangkaian *wetland* dan konsorsium bakteri Bakteri *Bacillus sp* dan *Stenotrophomonas Malthophilia* tersebut ?
2. Bagaimana efektivitas removal *wetland* yang ditambahkan dengan konsorsium bakteri Bakteri *Bacillus sp* dan *Stenotrophomonas Malthophilia* dalam mendegradasi parameter warna dan TSS pada kualitas air limbah tenun ?

1.3 Tujuan Penelitian

- 1) Mengkaji kualitas air limbah tenun (parameter warna dan TSS) setelah pengolahan *wetland* dengan kombinasi bakteri *Bacillus sp*, dan *Stenotrophomonas Malthophilia*.
- 2) Mengkaji efektivitas removal *wetland* kombinasi bakteri *Bacillus sp* dan *Stenotrophomonas Malthophilia* dalam mendegradasi parameter warna dan TSS pada limbah tenun.

1.4 Manfaat Penelitian

- 1) Sebagai sumber informasi tentang performa sistem *wetland* dan konsorsium bakteri Bakteri *Bacillus sp* dan *Stenotrophomonas Malthophilia* dalam mendegradasi parameter pencemar berupa warna dan TSS.
- 2) Sebagai sumber informasi tentang cara sederhana dan murah untuk membersihkan air limbah dari pabrik tenun Troso melalui sistem *wetland*

menggunakan konsorsium bakteri, sehingga kita bisa mengontrol pencemaran lingkungan dengan lebih baik.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini yaitu :

- 1) Aklimatisasi tanaman *Vetiveria Zizanioides* untuk diaplikasikan pada reaktor *wetland*.
- 2) Pengolahan limbah yang digunakan yaitu sistem *constructed wetland* dan *floating treatment wetland*.
- 3) Konsorsium bakteri yang dipakai adalah *Bacillus Cereus*, *Bacillus Spizizenii*, dan *Stenotrophomonas Malthophilia*.
- 4) Parameter yang diuji setiap sampling adalah parameter warna dan TSS.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah Industri Tenun

Industri pembuatan kain sering menghasilkan sisa limbah dari proses mewarnai dan mencuci kain. Limbah ini berisi bahan kimia buatan yang bisa mencemari lingkungan. Menurut penelitian dari Yaseen, D. A., & Scholz, M. (2019) limbah dari industri tekstil biasanya memiliki karakteristik warna yang kuat, sehingga jika dibuang ke dalam air bisa membuat masalah karena penampilannya. Zat warna yang tidak diolah dengan baik bisa bertahan lama di lingkungan dan berbahaya tidak hanya bagi tanaman air tetapi juga bagi semua makhluk hidup karena ketika terurai, zat tersebut bisa menyebabkan kanker (Zille, 2005).

Penggunaan *Constructed Treatment Wetland* (CTW) dan *Floating Treatment Wetland* (FTW) dapat menjadi solusi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk pengolahan air limbah bagi industri UMKM tenun ikat Troso. Limbah cair yang dihasilkan dari proses pewarnaan tekstil umumnya mengandung bahan kimia berbahaya seperti pewarna, zat organik, dan bahan padat tersuspensi. CTW adalah sistem pengolahan air limbah yang meniru ekosistem alami lahan basah, di mana air limbah dialirkan melalui lahan yang ditanami tumbuhan air seperti *vetiveria zizanioides*. Tanaman ini, bersama dengan mikroorganisme di akar, mampu menyerap, menguraikan, dan menetralkan bahan pencemar seperti zat organik, logam berat, dan partikel tersuspensi.

Selain itu, FTW, yang menggunakan tanaman *vetiveria zizanioides*, juga efektif dalam menyerap nutrisi berlebih dan zat pencemar lain dari limbah cair. Kedua metode ini tidak hanya membantu menurunkan kandungan warna dan TSS (*Total Suspended Solids*), tetapi juga dapat menekan biaya operasional pengolahan limbah bagi UMKM karena memanfaatkan proses biologis alami, memerlukan energi yang minim, serta mudah dalam pemeliharaan. Implementasi CTW dan FTW dapat mengurangi beban pencemar yang dibuang ke lingkungan, sehingga

menjaga kualitas air dan mencegah kerusakan ekosistem di sekitar industri tenun ikat Troso.

Mekanisme penghilangan parameter warna dan *Total Suspended Solids* (TSS) dalam reaktor *wetland* (lahan basah buatan) melibatkan berbagai proses fisik, kimia, dan biologis yang bekerja secara sinergis. Untuk penghilangan warna, tanaman akuatik seperti *Vetiveria zizanioides* dan mikroorganisme yang hidup di zona akar (*rhizosphere*) memainkan peran utama. Mikroorganisme ini menghasilkan enzim yang mampu mendegradasi senyawa pewarna organik menjadi molekul yang lebih sederhana dan kurang berwarna. Selain itu, akar tanaman menyediakan permukaan yang luas untuk pertumbuhan mikroba yang mampu mengoksidasi dan memetabolisme zat warna. Pewarna juga dapat diadsorpsi ke partikel tersuspensi yang kemudian disaring dan diendapkan oleh sistem akar dan media substrat di *wetland*.

Untuk penghilangan TSS, reaktor *wetland* memanfaatkan beberapa mekanisme. Sistem akar tanaman berfungsi sebagai penyaring fisik yang menjebak partikel tersuspensi dalam air limbah. Partikel-partikel ini kemudian mengendap di dasar reaktor melalui proses sedimentasi alami. Selain itu, tanaman dan mikroorganisme meningkatkan proses bioflokulasi, di mana partikel-partikel kecil bergabung menjadi flok yang lebih besar, sehingga lebih mudah mengendap. Aktivitas mikroba di zona akar juga membantu mendegradasi bahan organik yang berkontribusi pada TSS, mengurangi konsentrasinya secara signifikan. Kombinasi dari proses filtrasi fisik, adsorpsi, degradasi biologis, dan sedimentasi membuat *wetland* efektif dalam menghilangkan warna dan TSS dari air limbah.

2.1.1 Karakteristik Limbah Industri Tenun

Menurut Sa'adah (2020), membuat kain tenun melalui 4 langkah. Pertama, mengatur benang Kedua, membuat pola. Ketiga, mewarnai benang. Keempat, menenun benang menjadi kain. Mengatur benang dilakukan dengan menyusunnya di atas sebuah alat berbentuk kotak. Setelah itu, benang diikat dengan tali rafia sesuai pola yang diinginkan. Langkah berikutnya adalah mewarnai benang sesuai dengan pola yang sudah diikat. Proses ini bisa menghasilkan limbah cair yang

berpotensi mencemari lingkungan. Langkah terakhir adalah menenun benang menjadi kain menggunakan alat tenun bukan mesin (ATBM).

Menurut Achilla, S. (2023) biasanya, limbah cair yang berasal dari industri pembuatan kain tenun itu punya sifat basa dan banyak mengandung bahan organik dari sisa-sisa pembuatan kain. Pewarna yang tidak diproses dengan baik bisa mencemari lingkungan karena sulit diuraikan. Pewarna yang digunakan untuk kain tenun dimodifikasi agar warnanya tetap awet dan tidak cepat rusak oleh sinar matahari atau zat kimia. Kualitas limbah cair dari industri tenun bisa dilihat dari berbagai sifatnya, seperti fisik, kimia, dan biologi (Sa'adah 2020). Beberapa penjelasan terkait karakteristik air limbah industri tenun adalah sebagai berikut :

a) Karakteristik Fisik

Sifat fisik air limbah meliputi suhu, aroma, warna, dan keberadaan zat padat di dalamnya. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Sa'adah pada tahun 2020, suhu normal air limbah berkisar antara 23,8°C hingga 32,9°C. Aroma yang tercium dari air limbah menunjukkan adanya komponen tambahan di dalamnya. Warna air limbah biasanya disebabkan oleh bahan yang larut, tersuspensi, dan senyawa koloid yang bisa dilihat dari warnanya. Zat padat yang terdapat dalam air limbah bisa dikelompokkan menjadi berbagai jenis, seperti yang mengapung, mengendap, tergantung, terlarut, dan kontaminan yang membuat air menjadi keruh. Tanda-tanda ini dapat menjadi petunjuk bahwa air tersebut tercemar cukup parah, menurut Pambudi (2020).

b) Karakteristik Kimia

Studi oleh Mayori, A. (2022) sifat kimia dari air limbah itu termasuk COD (Chemical Oxygen Demand), pH, dan DO (*Dissolved Oxygen*). COD itu mengukur jumlah oksigen dalam mg/L yang dibutuhkan untuk memecah bahan organik secara kimia. Kalau kadar COD-nya tinggi, artinya kualitas airnya kurang baik. DO itu mengukur jumlah oksigen yang larut dalam air. Sedangkan pH itu menunjukkan seberapa asam airnya. Menambahkan standar kualitas air mungkin akan membantu juga (Pambudi, 2020).

c) Karakteristik Biologi

Mayori (2022) tanda khas biologis dalam air limbah adalah keberadaan mikroorganisme di dalamnya. Mikroorganisme ini memiliki berbagai jenis dan biasanya ditemukan dalam berbagai jenis air limbah dengan jumlah sekitar 105-108 organisme per mililiter. Bakteri yang ada dalam proses pengolahan air limbah sangat penting untuk memastikan proses biologis berjalan dengan efisien. Menambahkan bakteri dalam sistem *Floating Treatment Wetland* (FTW) dan menggunakan tanaman *Vetiveria zizanioides* telah terbukti efektif dalam mengurangi kadar COD sebesar 40-45%, BOD 30-91%, minyak & lemak 50-87%, dan kandungan oli sebesar 22-64% (Badu, 2018; Pambudi, 2020).

2.2 Bioremediasi

Bioremediasi adalah cara untuk membersihkan lingkungan dari bahan limbah yang berbahaya dengan menggunakan mikroorganisme. Proses ini melibatkan mikroorganisme untuk memecah, mengubah, atau menetralkan bahan kimia yang berbahaya tersebut (Mayori 2022). Meskipun sebagian proses bioremediasi sudah berlangsung secara alami selama bertahun-tahun dalam mengolah air limbah, penggunaan bioremediasi secara sengaja untuk mengurangi limbah berbahaya adalah teknik yang lebih modern. Proses bioremediasi ini memanfaatkan energi yang dihasilkan dari reaksi kimia dalam sel-sel mikroba, yang mencakup respirasi dan fungsi biologis yang diperlukan untuk kelangsungan hidup dan reproduksi sel. Untuk menjalankan proses bioremediasi ini, sistem khusus diperlukan untuk menyediakan sumber energi (donor elektron), penyerapan elektron (akseptor elektron), dan nutrisi bagi mikroba. Mikroba dalam bioremediasi dapat menggunakan berbagai jenis akseptor elektron seperti oksigen, nitrat, mangan, besi, sulfat, atau karbon dioksida. Setiap jenis akseptor elektron memiliki potensial redoks yang berbeda, yang dapat menentukan jenis akseptor yang dominan digunakan dalam proses bioremediasi (Mohan, S.V., *et al.* 2009).

2.3 Fitoremediasi

Menurut Sukono (2020), Fitoremediasi adalah sebuah teknologi yang ramah

lingkungan yang menggunakan tumbuhan untuk membersihkan lingkungan yang tercemar. Teknologi ini bisa menjadi opsi yang lebih baik atau tambahan dari metode pembersihan biasa yang mahal dan membutuhkan banyak energi. Efektivitas fitoremediasi dalam membersihkan area tercemar tergantung pada jenis zat pencemar, jumlah tumbuhan yang tersedia, dan sifat tanah di lokasi tersebut (Shahid 2018). Tumbuhan memiliki beberapa cara untuk membersihkan area tercemar, dengan cara utama adalah menyerap zat pencemar melalui akarnya (Song 2015). Akar tumbuhan memiliki permukaan yang luas, yang memungkinkan mereka menyerap air, nutrisi, dan zat pencemar yang tidak diperlukan. Proses penyerapan ini membantu mencegah penyebaran zat pencemar ke area lain yang dapat membahayakan lingkungan. Menurut Song, U., & Lee, E. (2015) tahap-tahap fitoremediasi adalah sebagai berikut

1. Penanaman Tumbuhan : Tahapan pertama dalam fitoremediasi adalah penanaman tumbuhan yang memiliki kemampuan untuk menyerap, mengakumulasi, atau mengurangi kadar kontaminan dalam tanah, air, atau udara. Tumbuhan yang sering digunakan dalam fitoremediasi termasuk tanaman berdaun lebar (misalnya, rumput, pohon), serta mikroalga dan ganggang.
2. Akumulasi : Tumbuhan menyerap kontaminan dari media tumbuhannya melalui akar. Senyawa-senyawa kontaminan tersebut kemudian disimpan dalam jaringan tumbuhan, seperti akar, batang, dan daun. Proses ini membantu mengurangi konsentrasi kontaminan di lingkungan.
3. Translokasi : Setelah akumulasi, beberapa tumbuhan mampu mengalihkan kontaminan dari akar ke bagian atas tanaman seperti batang dan daun. Proses translokasi ini membantu dalam pemindahan kontaminan dari tanah ke bagian tumbuhan yang lebih mudah diakses.
4. Transformasi : Beberapa tumbuhan memiliki kemampuan untuk mengubah atau memetabolisme senyawa-senyawa kontaminan menjadi bentuk yang kurang berbahaya atau lebih mudah dihilangkan dari lingkungan. Proses ini dapat melibatkan enzim-enzim dalam tumbuhan yang mengkatalisis reaksi-reaksi kimia tertentu.

2.4 Konsorsium Bakteri *Bacillus Cereus*, *Bacillus Spizizenii*, dan *Stenotrophomonas Maltophilia*.

Konsorsium bakteri yang terdiri dari *Bacillus cereus*, *Bacillus spizizenii*, dan *Stenotrophomonas maltophilia* memiliki potensi yang menarik dalam aplikasi bioteknologi (Chukwuma 2021). *Bacillus cereus* dikenal sebagai bakteri gram positif yang mampu memproduksi berbagai enzim dan metabolit sekunder yang bermanfaat dalam berbagai industri. Bakteri *Bacillus cereus* berperan dalam reaktor *wetland* dengan memanfaatkan kemampuannya untuk menguraikan senyawa organik kompleks yang mengandung pigmen penyebab warna dan TSS pada air limbah menjadi senyawa yang lebih sederhana, sehingga membantu dalam proses pengurangan parameter warna dan TSS secara efektif. Studi oleh Li *et al.* (2018) menunjukkan bahwa *Bacillus cereus* dapat menjadi salah satu mikroorganisme yang efektif dalam meningkatkan kinerja pengolahan limbah di reaktor *wetland*. *Bacillus spizizenii* juga memiliki kemampuan enzimatik yang relevan dalam degradasi senyawa organik kompleks. Perbedaan fungsi antara *Bacillus cereus* dan *Bacillus spizizenii* dalam reaktor *wetland* untuk membersihkan kandungan parameter warna dan TSS pada air limbah terletak pada peran mereka dalam proses degradasi bahan organik dan partikulat. *Bacillus cereus* cenderung lebih efektif dalam menguraikan bahan organik kompleks, sementara *Bacillus spizizenii* lebih mungkin berperan dalam pengendalian partikulat dan sedimentasi. (Sumber: Bodelón *et al.*, 2017; Duan *et al.*, 2019).

Sementara itu, *Stenotrophomonas maltophilia* adalah bakteri gram negatif yang dapat bertindak sebagai agen biokontrol dan memiliki toleransi terhadap lingkungan yang ekstrem (Chukwuma 2021). *Stenotrophomonas maltophilia* umumnya memiliki kemampuan untuk mendegradasi senyawa organik kompleks, termasuk pigmen warna, sementara *Bacillus cereus* dan *Bacillus spizizenii* cenderung fokus pada dekomposisi bahan organik sederhana dan pengendalian populasi bakteri patogen. Studi oleh Rahimnejad *et al.* (2016) menunjukkan bahwa *S. maltophilia* dapat efektif dalam mengurangi kandungan warna pada air limbah.

Konsorsium ini mungkin dapat digunakan dalam proses bioremediasi, produksi enzim industri, dan pengelolaan limbah organik. Penelitian oleh Halder *et al.* (2017) mendemonstrasikan kemampuan konsorsium bakteri ini dalam mendegradasi senyawa organik kompleks dalam limbah pertanian, menunjukkan potensi aplikatifnya dalam bidang perlindungan lingkungan. Berdasarkan analisis sumber dari sumber tersebut, ada potensi dari bakteri *Bacillus Cereus*, *Bacillus Spizizeni*, dan *Streptophomonas Maltophilia* untuk menghilangkan beban pencemar di air limbah.

2.4.1 Tanaman Fitoremediasi (*Vetivera Zizanioides*)

Menurut Truong (1999) Tanaman *Vetiveria zizanioides* (akar wangi) telah digunakan oleh manusia selama bertahun-tahun untuk berbagai keperluan, seperti atap jerami, industri parfum, dan kosmetik. Sejak tahun 1950-an, tanaman *vetiver* telah digunakan secara luas dalam upaya konservasi, terutama di Fiji, di mana ia terbukti efektif dalam mencegah erosi tanah (Truong 1999). Hal ini disebabkan oleh kemampuannya yang unik untuk tumbuh di berbagai kondisi lingkungan dan jenis tanah. Saat ini, *Vetiver* telah digunakan di lebih dari 120 negara. *Vetiver* memiliki karakteristik yang membedakannya, seperti kemampuan fotosintesis yang tinggi dan kemampuan unik untuk menyerap logam dari lingkungan yang terkontaminasi. Meskipun faktor lingkungan seperti ketersediaan nutrisi dan pH dapat mempengaruhi kemampuan penyerapan logam oleh *Vetiver*, namun tanaman ini tetap efektif dalam kondisi tersebut karena kemampuan peningkatan biomasnya (Nugroho 2021).

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Almeida *et al.* (2019), *Vetiveria zizanioides* dipilih sebagai tanaman yang cocok untuk pengolahan air limbah dengan menggunakan metode *vertical flow constructed wetland*. Pilihan tersebut didasarkan pada kemampuan *Vetiver* dalam menghilangkan nitrogen total, amonium, dan nitrat dari air limbah, serta sistem perakarannya yang dalam dan kuat yang membuatnya tahan terhadap kekeringan dan cocok untuk pengolahan air limbah.

2.4.2 Teknologi Fitoremediasi

Penerapan metode *Floating Treatment Wetland* (FTW) pertama kali digunakan pada tahun 1717 dan awalnya berfungsi untuk mengurangi tingginya kadar senyawa organik dalam air yang memicu pertumbuhan alga (Chang et al., 2013; Wang et al, 2015; Wang et al 2014; Zhou, 2005 dalam Indriatmoko & Prahoro, 2016). Akar tanaman ini bertindak sebagai penyaring alami, membersihkan air yang mengalir di bawah dan di antara akar. FTW kini banyak digunakan untuk mengolah berbagai jenis air limbah karena biayanya yang relatif rendah dan kemudahan konstruksinya. Air limbah ini dapat berasal dari pengolahan sekunder, limpasan air hujan, limpasan pertanian, dan bahkan air sungai yang tercemar. Mengingat kesederhanaan konstruksi FTW, para peneliti telah mengakui efektivitasnya dalam pengolahan air limbah dengan menghilangkan polutan melalui kombinasi proses fisik, biologis, dan kimia (Indriatmoko & Prahoro, 2016).

Constructed Treatment Wetland (CTW) merupakan sebuah metode yang ramah lingkungan untuk membersihkan air limbah dari berbagai sumber pencemaran. Teknik ini telah diterapkan dalam pengolahan air limbah perkotaan, kilang minyak, pertanian, tambang, dan berbagai jenis limbah lainnya (Hassan et al, 2021). CTW menggunakan proses alami untuk menghilangkan zat-zat pencemar dari air limbah, sehingga menjadi suatu cara yang ramah lingkungan dengan dampak negatif yang minimal terhadap lingkungan sekitar (Dan et al, 2011). CTW adalah sistem buatan yang dibuat untuk membersihkan air limbah dengan meniru proses alami yang terjadi dalam lingkungan yang lebih terkontrol. Sistem ini dibagi menjadi berbagai kategori berdasarkan arus air, jenis tumbuhan yang digunakan, dan jalur aliran air. Dua kriteria penting dalam sistem ini adalah arus permukaan terbuka dan arus bawah permukaan vymazal et al. (2010).

2.5 Parameter Warna

Parameter warna dalam kajian lingkungan, khususnya pada ekosistem lahan basah (*wetland*), merupakan indikator penting yang sering digunakan untuk menilai kualitas air (Darmayanto, 2009). Warna air di *wetland* dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti konsentrasi bahan organik terlarut, keberadaan alga, serta

partikel tersuspensi yang berasal dari limpasan tanah dan vegetasi sekitar (Pemuji dan Anthonius, 2010). Warna yang dihasilkan oleh penguraian sisa-sisa tumbuhan dan hewan atau degradasi bahan organik seringkali memberikan warna kecokelatan pada air *wetland*. Perubahan warna air bisa mengindikasikan adanya perubahan dalam input organik atau tingkat pencemaran, sehingga pengukuran parameter ini penting dalam pemantauan dan pengelolaan *wetland*. Dalam penelitian oleh McKnight et al. (2001), ditemukan bahwa warna air yang lebih gelap sering kali berkorelasi dengan tingginya konsentrasi senyawa organik terlarut, yang juga berkaitan erat dengan produktivitas ekosistem dan kesehatan habitat di dalam lahan basah. Parameter warna dalam konteks *wetland* sangat relevan sebagai indikator kualitas air dan pengelolaan limbah. Warna air dapat menunjukkan kandungan zat organik dan anorganik, termasuk keberadaan logam berat dan senyawa kimia lainnya. *Wetland* yang menggunakan tanaman *Vetivera zizanioides*, atau rumput vetiver, dikenal efektif dalam proses fitoremediasi, yaitu penggunaan tanaman untuk menyerap, mengakumulasi, dan menetralkan polutan dari air dan tanah. Vetiver mampu menyerap logam berat seperti timbal, kadmium, dan kromium, yang dapat memengaruhi perubahan warna air. Menurut penelitian oleh Kumar et al. (2021), penggunaan *Vetivera zizanioides* dalam constructed *wetland* system menunjukkan penurunan signifikan dalam tingkat polusi air, termasuk perubahan parameter warna air akibat penyisihan polutan anorganik dan senyawa organik. Penelitian ini mengungkapkan bahwa warna air yang lebih terang menandakan peningkatan kualitas air setelah proses fitoremediasi berlangsung. Selain itu, penelitian lain oleh Singh et al. (2019) juga mendukung efektivitas vetiver dalam menyerap logam berat yang dapat memengaruhi perubahan warna air pada lahan basah buatan.

2.6 Parameter TSS

Selain itu TSS juga tidak kalah penting kaitannya dengan kualitas *wetland*. TSS mengukur jumlah partikel padat yang tersuspensi dalam air, termasuk sedimen, bahan organik, dan mikroorganisme (Alaerts, 1987). Kadar TSS yang

tinggi di *wetland* dapat disebabkan oleh erosi tanah, aktivitas manusia, atau proses alamiah seperti aliran air yang deras (Nasution 2021). TSS mempengaruhi kejernihan air, yang pada gilirannya dapat berdampak pada fotosintesis tumbuhan akuatik dan kehidupan organisme yang bergantung pada cahaya. TSS yang tinggi juga dapat membawa polutan teradsorpsi seperti logam berat dan nutrisi, yang berpotensi menyebabkan eutrofikasi. Penelitian oleh Wang et al. (2010) menunjukkan bahwa lahan basah berfungsi sebagai penyaring alami yang efektif dalam menurunkan konsentrasi TSS melalui proses sedimentasi dan penyerapan oleh tanaman air, sehingga penting dalam menjaga kualitas air yang masuk ke sungai atau badan air lainnya. Sistem *wetland* buatan (*constructed wetland*) dengan penggunaan tanaman *Vetiveria zizanioides* atau akar wangi terbukti efektif dalam mengurangi TSS melalui proses sedimentasi, filtrasi, dan penyerapan oleh akar tanaman. Vetiver memiliki sistem perakaran yang sangat kuat dan dalam, sehingga dapat mempercepat proses penangkapan partikel padatan dan menurunkan konsentrasi TSS. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kemampuan Vetiver dalam menurunkan TSS dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti densitas tanaman, kecepatan aliran air, serta jenis substrat yang digunakan. Salah satu studi yang mendukung adalah penelitian oleh Dzakwan dkk. (2020), yang melaporkan bahwa Vetiver mampu menurunkan konsentrasi TSS hingga 75% dalam sistem *constructed wetland*. Penelitian lain oleh Patel et al. (2019) juga menunjukkan efisiensi serupa, di mana Vetiver berhasil mengurangi beban TSS secara signifikan pada berbagai skala aliran air limbah.

2.7 Penelitian Terdahulu

Berikut beberapa penelitian terdahulu tentang efektivitas konsorsium bakteri terhadap performa terhadap performa *wetland* yang menggunakan tanaman *vetiveria zizanioides* untuk mendegradasi parameter warna dan TSS pada air limbah industri tenun :

Tabel 2. 1 Sumber-Sumber Penelitian Terdahulu

Penulis	Bakteri	Fitoremediasi	Performa
---------	---------	---------------	----------

A. Ijaz, G. Shabir, Q. M. Khan, M. Afzal (2015)	<i>Acinetobacter .sp, Bacillus cereus, Bacillus licheniformis</i>	<i>Brachiaria mutica</i>	<ul style="list-style-type: none"> • COD : 80% • BOD : 92% • Sulphates : 38% • Chlorides : 31% • Oil & Grease : 51%
Z. Hussain, M. Arslan, M. H. Malik, M. Mohsin, S. Iqbal, M. Afzal (2018)	<i>Microbacterium arborescens, Bacillus endophyticus, Bacillus pumilus, Bacillus sp.</i>	<i>Brachiaria mutica</i>	<ul style="list-style-type: none"> • COD : 81% • BOD : 72% • TDS : 32% • Warna : 74% • Nitrogen : 84% • Fosfor : 79% • Cr : 97% • Fe : 89% • Ni : 88% • Cd : 72%
H. Lin, S. You, L. Liu (2019)	<i>Bacillus cereus</i>	<i>Leersia hexandra Swartz</i>	Cr(VI) : $\pm 100\%$
J. A. Fajri, A. Nurmiyanto, N. N. Sa'adah, I. Nuryana, S. L. N. Anfaresi, A. N. Lathifah (2024)	Bakteri yang belum teridentifikasi dan terisolasi dari tanaman <i>Oryza Sativa</i> , <i>Colocasia esculenta</i> , <i>Alternanthera philoxeroides</i>	<i>Vetiveria sp.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • COD : 74% • Warna : 91% • Pb : 52% • Cd : 33%

Berdasarkan analisis dari beberapa penelitian terdahulu, ada potensi dari bakteri *Bacillus Cereus*, *Bacillus Spizizeni*, dan *Streptophomonas Maltophilia*

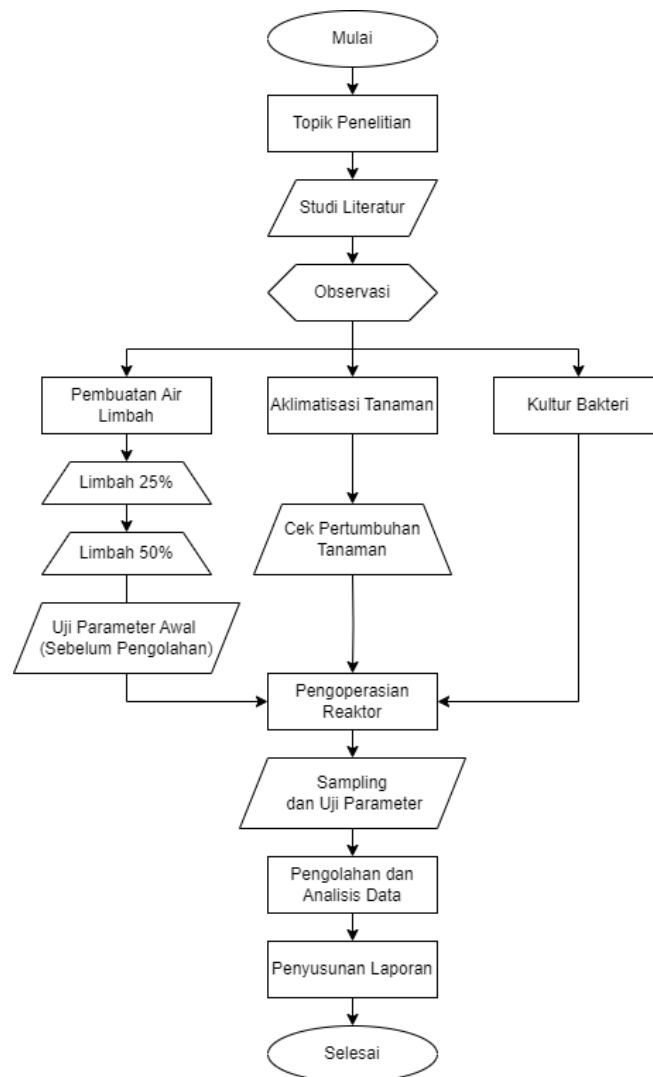
untuk menghilangkan beban pencemar di air limbah khususnya dalam parameter warna dan TSS dengan menggunakan *constructed tretment wetland* dan *floating treatment wetland* dengan tanaman *vetiveria ziznioides*. Karena keterkaitan antara ketiga bakteri tersebut dan kemampuan *vetiveria* untuk mendegradasi parameter warna dan TSS, maka perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui perbandingan tentang efektivitas konsorsium bakteri *Bacillus sp* dan *Stenotrophomonas Malthophilia* mendegradasi parameter warna dan TSS pada air limbah tenun menggunakan *floating treatment wetland* dan *constructed treatment wetland*.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi

Kegiatan aklimatisasi tanaman dan sampling air limbah dilakukan di ruang *green house* Teknik Lingkungan. Pengujian sampel dilakukan di Laboratorium Kualitas Lingkungan, Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia. Penelitian dimulai pada bulan Januari 2024 hingga Juni 2024. Secara umum alur tahapan kegiatan yang akan dilakukan dapat dilihat pada Gambar berikut ini :



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Preparasi Air Limbah

Air limbah yang digunakan berasal dari sisa-sisa produksi kain tenun. Air limbah 25% dan 50% adalah air limbah yang dibuat secara buatan di laboratorium dengan mencocokkan bahan dan proses pembuatan dengan yang digunakan dalam pewarnaan kain tenun.

Limbah cair tenun *artificial* dibuat dari 2 jenis warna, yaitu merah dan hitam. Pembuatan limbah cair mengacu pada proses pewarnaan pembuatan tenun Troso di lokasi aslinya. Langkah pembuatan pewarna pada proses pewarnaan tenun Troso sebagai berikut:

- Pewarna hitam

1. Naptol BO (30 g) + Naptol ASG (20 g) + kostik (NaOH) (25 g) dilarutkan dengan air panas sebanyak 12,5 L.
2. Naptol Garam biru (100 g) dilarutkan dengan air sebanyak 12,5 L.
3. Larutan pada langkah 1 dan 2 dicampur kemudian diaduk hingga tercampur rata.

- Pewarna biru

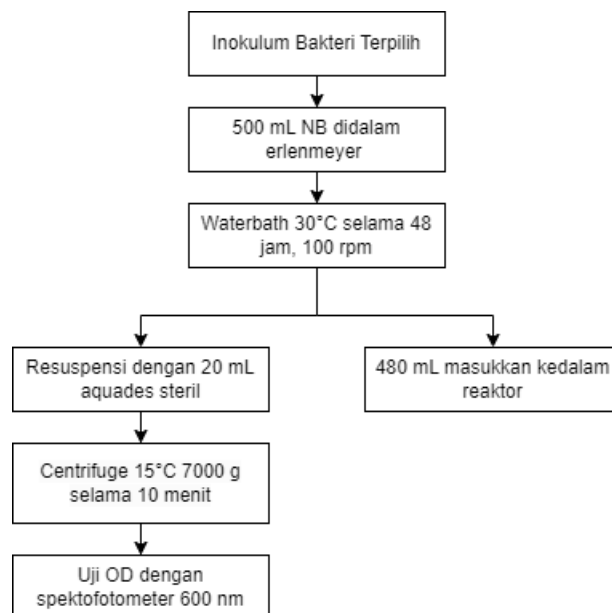
1. BO (50 g) + kostik (NaOH) (25 g) dilarutkan dengan air panas sebanyak 12,5 L
2. Naptol Garam R (100 g) dilarutkan dengan air sebanyak 12,5 L
3. Larutan pada langkah 1 dan 2 dicampur kemudian diaduk hingga tercampur rata

Limbah cair yang sudah dibuat kemudian diencerkan menjadi konsentrasi 25% dengan perbandingan komposisi limbah cair dan air sebesar 1:3. Pada tahap pengujian limbah cair tenun konsentrasi 50%, limbah dibuat dengan cara yang sama namun pengencer yang digunakan merupakan hasil dari pengolahan limbah cair tenun konsentrasi 25% dari masing-masing reaktor pada hari ke-14 dengan perbandingan limbah cair tenun *artificial* dan pengencer sebesar 2:2.

3.3 Kulturasasi Bakteri

Menurut Fajri *et.al.* (2024) Reaktor FTW dengan *Vetiveria zizanioides* yang diinokulasi dengan strain bakteri *Bacillus cereus* dan *Stenotrophomonas*

malthophil menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam hal tingkat penghilangan COD (86,7%) dan warna (65,3%) yang jauh lebih tinggi. Sementara itu, pada removal logam berat ditemukan bahwa *Vetiver zizanioides* dengan strain *Stenotrophomonas malthophil* mempunyai removal Pb tertinggi (99,4%) dan Cu (90,6%). Jika dibandingkan dengan strain bakteri lainnya, sebagian besar logam berat terakumulasi di jaringan akar dibandingkan jaringan pucuk pada tanaman *Vetiver zizanioides* yang diinokulasi dengan *Bacillus spizizenii*. Oleh karena itu bakteri yang dipilih pada penelitian kali ini adalah *Bacillus Sereus*, *Bacillus Spizizeni*, dan *Stenotrophomonas Melthopilia*. Isolasi menggunakan teknik pour plate pada media Nutrient Agar (NA) untuk kemudian ditambahkan di 3 reaktor *floating treatment wetland* dan 3 reaktor *constructed treatment wetland*.



Gambar 3. 2 Tahapan Kultivasi Bakteri

Bakteri yang telah diidentifikasi sebelumnya dipindahkan ke dalam cawan petri steril yang berisi media agar nutrisi baru. Langkah ini dilakukan untuk membersihkan bakteri berdasarkan bentuknya dan mendapatkan satu koloni bakteri tunggal yang akan digunakan untuk langkah selanjutnya. Pemindahan bakteri dilakukan secara hati-hati dan steril menggunakan metode gores atau streak menggunakan jarum ose. Setelah dipindahkan, bakteri dibiarkan tumbuh dalam

inkubator pada suhu 36°C selama 48 jam. Proses inkubasi ini membantu bakteri tumbuh lebih cepat dan mencegah masuknya kontaminan.

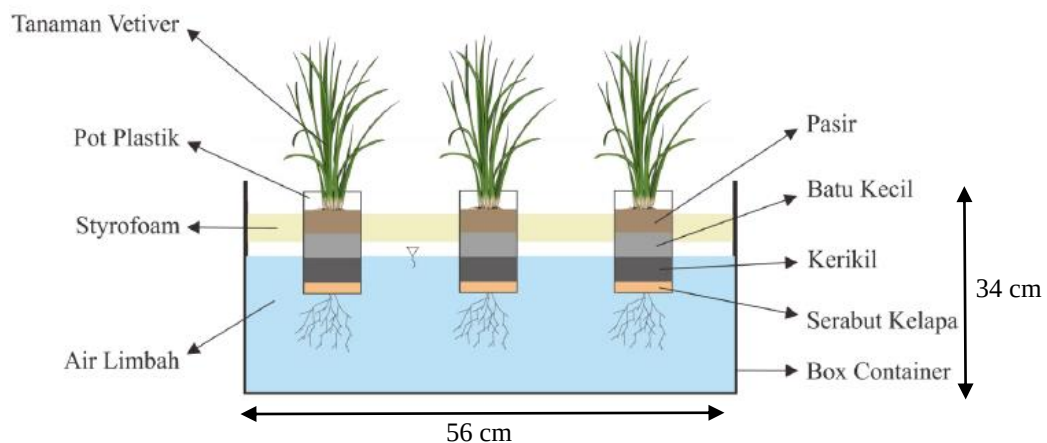
3.4 Wetland

3.4.1 Persiapan Pembuatan Reaktor FTW

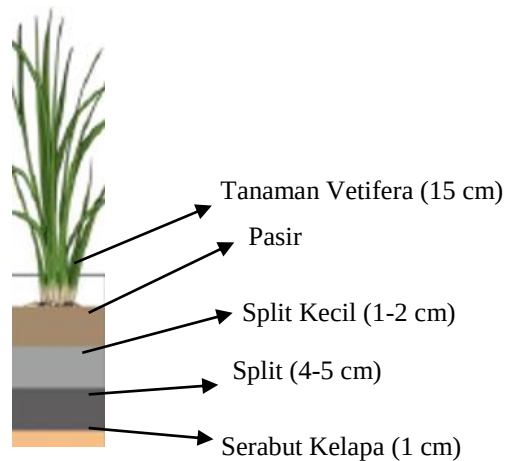
Pada *floating treatment wetland* (FTW), sistem pengolahannya menggunakan tanaman *vetiver* dan dibuat dengan menggunakan kotak kontainer berukuran 55 liter yang dilengkapi dengan styrofoam sebagai pengapung. Setiap reaktor FTW terdiri dari enam pot dengan ukuran 15 cm yang masing-masing berisi 3-4 batang tanaman *vetiver*. Media yang digunakan di dalam pot disusun secara berurutan dari bawah ke atas, yaitu sabut kelapa setinggi 1 cm, kerikil setinggi 2 cm, batu kecil setinggi 2 cm, pasir berukuran setinggi 2 cm, tanah setinggi 3 cm dan tinggi air terisi adalah 25 cm dari dasar reaktor. Di bawah ini adalah gambaran desain dari reaktor FTW.

Tabel 3. 1 Variasi Perlakuan Reaktor FTW

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



Gambar 3. 3 Desain Reaktor *Floating Treatment Wetland* (FTW)



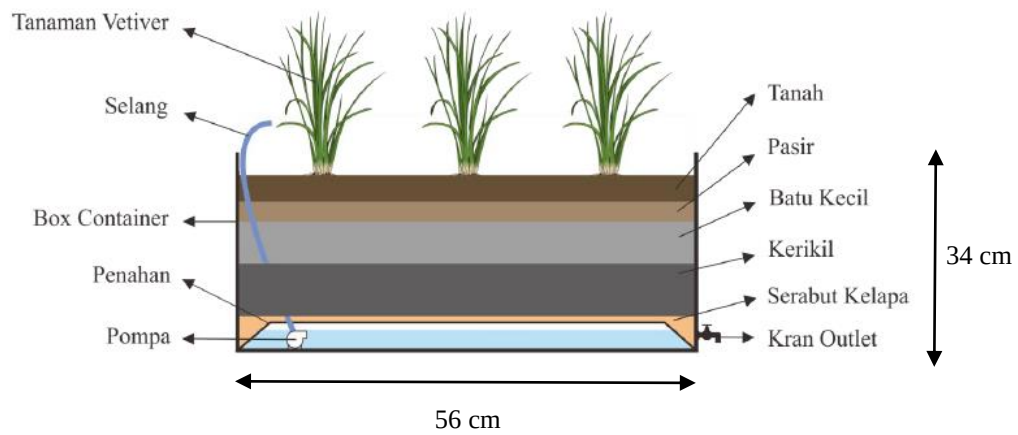
Gambar 3. 4 Susunan Tanaman di Floating Treatment *Wetland*

3.4.2 Persiapan Pembuatan Reaktor CTW

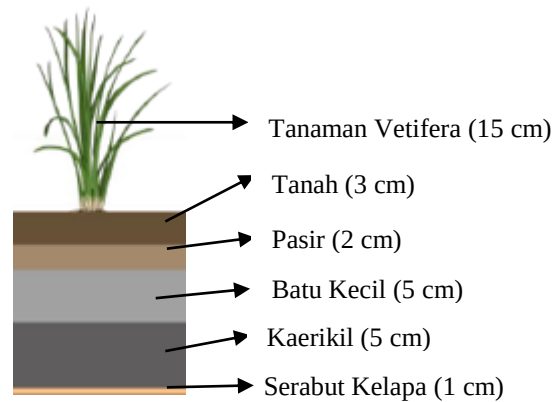
Pada sistem *Constructed Treatment Wetland* (CTW), mirip dengan sistem FTW yang juga menggunakan tanaman dan jenis box kontainer yang sama. Setiap reaktor CTW terdiri dari 9 kelompok tanaman, di mana setiap kelompok tersebut memiliki 3-4 batang tanaman *vetiver*. Di dasar box kontainer, terdapat pompa yang berperan dalam mengalirkan air ke dasar reaktor. Reaktor tersebut didukung oleh modifikasi plastik berbentuk persegi didalamnya sebagai penahan sebelum media ditempatkan di atasnya. Media yang digunakan dalam reaktor ini serupa dengan FTW, hanya saja dalam jumlah yang lebih banyak dan tambahan media tanah yang telah disterilkan. Bagian dasar reaktor dilapisi dengan serabut kelapa, kemudian di atasnya disusun lapisan serabut kelapa (1 cm), kerikil (cm), batu kecil (5 cm), pasir (2 cm), dan tanah (3 cm). Ini adalah gambaran desain dari reaktor CTW.

Tabel 3. 2 Variasi Perlakuan Reaktor CTW

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



Gambar 3. 5 Desain Reaktor *Constructed Treatmen Wetland* (CTW)



Gambar 3. 6 Susunan Tanaman di *Constructed Treatment Wetland*

3.4.3 Aklimatisasi Tanaman *Vetiveria Zizanioides*

Setelah pembuatan reaktor selesai, tanaman *vetiver* diaklimatisasikan selama 60 hari sebelum diberi perlakuan air limbah. Persiapan ini bertujuan agar tanaman dapat menyesuaikan diri dengan lingkungan dan tempat baru serta tumbuh dengan baik. Proses persiapan ini dilakukan untuk semua tanaman *vetiver* tanpa memandang usianya, dan daunnya dipotong hingga tinggal sepanjang 15 cm. Tanaman diberi pupuk hidroponik secara rutin 1 kali dalam seminggu selama 2 bulan pertama. Aklimatisasi tanaman dimulai pada tanggal 11 Januari 2024 dan berakhir pada tanggal 1 Mei 2024 dengan rata-rata tinggi batang tanaman pada *Constructed Treatment Wetland* setinggi 68 cm dan *Floating Treatment Wetland* setinggi 61 cm dengan panjang akar 24 cm.



(a)



(b)

Gambar 3. 7 Proses Aklimatisasi Tanaman Vetivera

Keterangan :

(a) Hari ke-0 proses aklimatisasi

(b) Hari ke-90 proses aklimatisasi

3.4.4 *Running dan Sampling Reaktor*

Volume air di masing-masing reaktor adalah 20 dan 15 liter. Running reaktor dilakukan selama 6 minggu mulai dari bulan April hingga Juni 2024. Setelah itu dilakukan sampling dengan konsentrasi air limbah 25 % dari minggu pertama ke minggu ketiga (hari ke-0, hari ke-7, hari ke-14), kemudian sampling air limbah 50 % dari minggu keempat hingga minggu keenam (hari ke-14, hari ke-21, dan hari ke-28). Pengambilan sampel yang dilakukan adalah parameter warna dan TSS pada masing-masing reaktor dan parameter fisik berupa TDS.

3.5 *Pengujian Parameter*

Pada penelitian ini dilakukan analisis mengenai konsentrasi pada limbah cair tenun yaitu 25% dan 50%. Kegiatan sampling dilakukan setiap minggu dengan mengambil sampel sebanyak 50 ml air limbah dari masing-masing reaktor

untuk pengujian warna dan TSS di laboratorium Teknik Lingkungan UII. Selain itu dilakukan pula pengambilan data parameter fisik berupa TDS guna mengetahui perbedaan fluktuasinya di setiap harinya, yang dilakukan sebanyak enam kali seminggu dari hari senin hingga sabtu.

Untuk pengambilan data parameter warna dengan metode spektrofotometri dilakukan berdasarkan SNI 6989.80-2011. Untuk parameter TSS dilakukan berdasarkan SNI 6989.3-2019 dengan metode gravimetri. Serta untuk parameter TDS dilakukan pengambilan data sampling menggunakan probe multimeter.

3.6 Analisis Data

Analisis keefektifan dan konsentrasi removal dilakukan dengan cara menghitung konsentrasi awal Warna dan TSS pada limbah dan dibandingkan dengan konsentrasi akhir warna dan TSS yang telah diuji pada reaktor pada konsentrasi 25% dan 50%. Berikut merupakan rumus efisiensi removal yang akan digunakan :

$$Y = \left(\frac{(A - B)}{A} \right) \times 100 \%$$

Dimana :

Y : Efisiensi removal

A : Konsentrasi warna dan TSS sebelum diolah

B : Konsentrasi warna dan TSS setelah diolah

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Air Limbah

Karakteristik limbah cair tenun yang diuji terdiri dari parameter warna, TSS, dan parameter fisik yakni TDS. Berikut ini adalah karakteristik awal limbah cair sebelum dimasukkan kedalam reaktor tenun menurut (Sa'adah 2020). Dan digunakan pula Baku Mutu dari PermenLHK No.5/2015 untuk bahan perbandingan.

Tabel 4. 1 Karakteristik Limbah Awal

Parameter	Nilai	Baku Mutu
COD (mg/L)	3750	150
TSS (mg/L)	180	50
Warna (Pt-Co)	3514,29	200
DHL (μ S/cm)	3550	-
TDS (mg/L)	2180	-
Suhu ($^{\circ}$ C)	26,4	-
pH	10,4	6 - 9

Sebelum menjalankan reaktor, dilakukan pengujian kadar warna dan TSS untuk mengetahui kandungan awalnya. Berikut hasil tabel data yang didapat dari pengujian karakteristik limbah cair tenun untuk masing-masing konsentrasi:

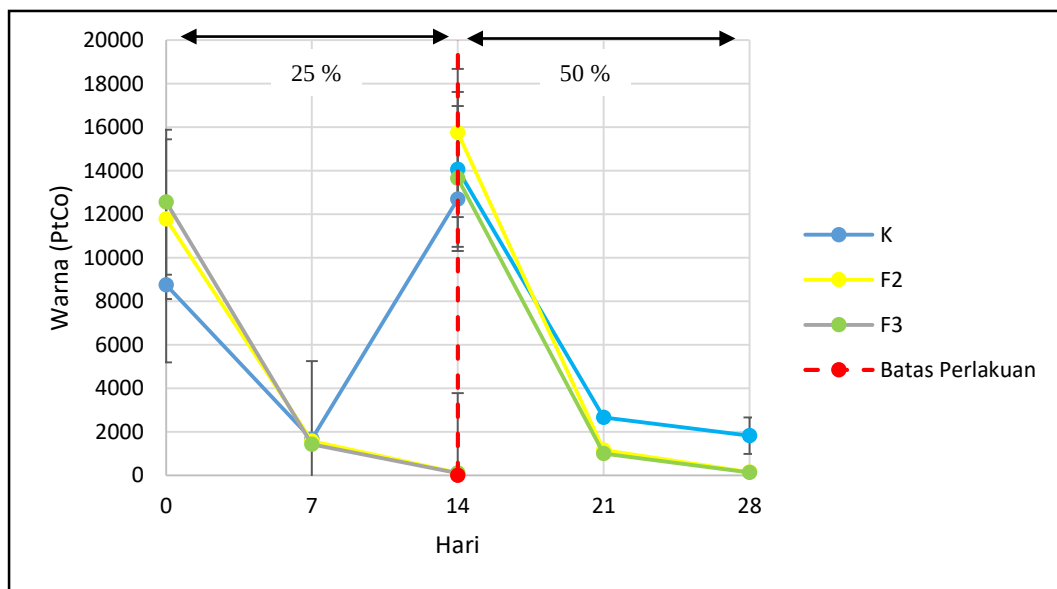
Tabel 4. 2 Karakteristik Air Limbah Tenun dalam Penelitian Ini

Konsentrasi Limbah Cair tenun	Warna (PtCo)	TSS (mg/L)	TDS (ppm)
25 %	8744,44	406,67	133
50 %	14055,56	1016,67	184,67

Pada ketiga konsentrasi limbah cair tenun terdapat perbedaan untuk setiap konsentrasi. Nilai konsentrasi tersebut diambil dari reactor control hari ke-0 sebelum dilakukan pengujian di hari-hari berikutnya.

4.2 Kemampuan Reaktor *Wetland* dalam Mengolah Air Limbah

4.2.1 Kemampuan Penurunan Warna



Gambar 4. 1 Hasil Pengujian Warna pada FTW

Gambar tersebut menunjukkan konsentrasi warna di Floating Treatment Wetland (FTW) yang diukur selama 28 hari dengan dua konsentrasi yang berbeda, yaitu 25% dan 50%. Grafik pada bagian atas gambar menunjukkan penurunan konsentrasi warna dari hari ke-0 hingga hari ke-28. Warna yang diukur ditampilkan dalam satuan PtCo, dengan tiga perlakuan yang berbeda: K, F2, dan F3. Pada konsentrasi 25%, awalnya terdapat nilai warna yang tinggi untuk semua perlakuan, tetapi terjadi penurunan drastis setelah 7 hari, dan mengalami kenaikan lagi pada hari ke-28. Pada konsentrasi 50%, penurunan konsentrasi warna juga diamati, namun dengan nilai awal yang lebih rendah dibandingkan konsentrasi 25%, dan mencapai nilai minimal pada hari ke-28.

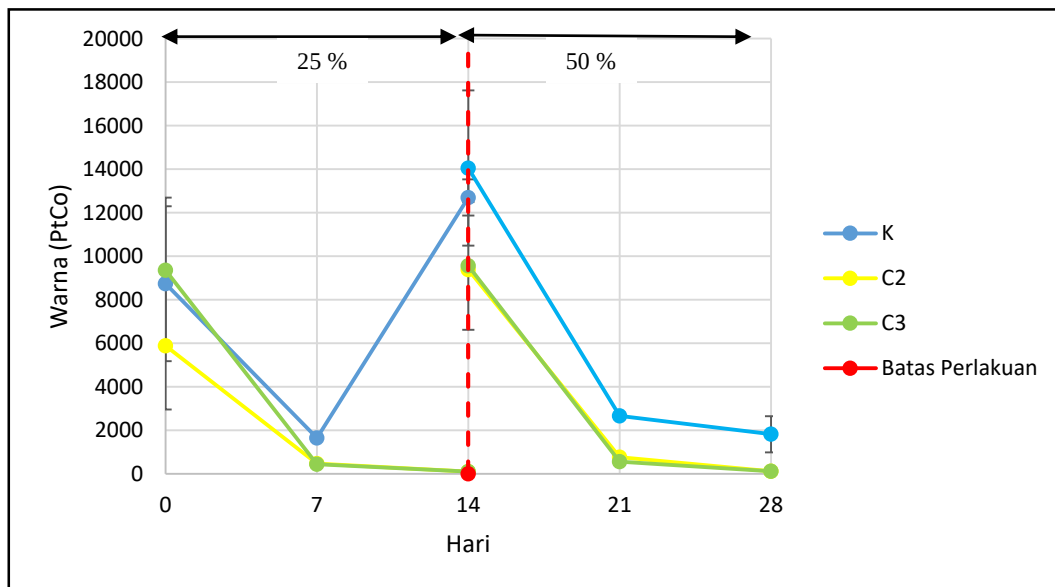
Dapat diketahui bahwa konsentrasi warna untuk setiap perlakuan pada hari-hari yang ditentukan (0, 7, 14, 21, dan 28). Pada konsentrasi 25%, K dimulai dari 8744,44 PtCo lalu turun di hari ke-7 dan naik lagi menjadi 8466 PtCo pada hari ke-14. Perlakuan F2 dan F3 menunjukkan tren penurunan yang signifikan tanpa kenaikan lagi di hari ke-14. Pada konsentrasi 50%, perlakuan K dimulai dari 14055 PtCo pada hari ke-14 dan menurun menjadi 1820 PtCo pada hari ke-28, sementara F2 dan F3 juga menunjukkan penurunan signifikan dari nilai awal hingga akhir pengamatan. Grafik ini memperlihatkan efektivitas FTW dalam menurunkan konsentrasi warna pada air limbah dengan dua konsentrasi berbeda dalam periode waktu tertentu.

Berdasarkan gambar tersebut, dapat disimpulkan bahwa Floating Treatment Wetland (FTW) efektif dalam mengurangi konsentrasi warna dalam air limbah pada kedua konsentrasi yang diuji, yaitu 25% dan 50%. Penurunan signifikan konsentrasi warna terlihat dalam waktu 7 hari pertama dan terus menurun hingga hari ke-28, menunjukkan bahwa sistem FTW memiliki kemampuan yang konsisten dalam menghilangkan warna dari air limbah seiring waktu.

Pada konsentrasi 25%, semua perlakuan (K, F2, dan F3) menunjukkan penurunan drastis dari nilai awal yang sangat tinggi hingga mendekati nol pada akhir periode pengamatan. Perlakuan dengan konsentrasi 50% juga menunjukkan tren penurunan yang serupa meskipun nilai awalnya lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa FTW dapat bekerja secara efektif pada berbagai tingkat konsentrasi awal, menjadikannya solusi potensial yang fleksibel untuk pengolahan air limbah dengan berbagai tingkat polusi warna.

Hal tersebut bisa terjadi karena tanaman dan media yang digunakan dalam Floating Treatment Wetlands (FTWs) memiliki kemampuan untuk menyerap dan mengadsorpsi berbagai zat pencemar termasuk senyawa warna. Menurut penelitian oleh Vymazal *et al.* (2011), tanaman akuatik dalam FTWs memainkan peran penting dalam proses fitoremediasi, di mana mereka menyerap polutan melalui akar mereka dan memetabolisme atau mengendapkannya dalam biomassa. Selain itu,

mikroorganisme yang hidup pada akar dan media dalam FTWs juga berkontribusi terhadap dekomposisi zat organik dan senyawa warna, melalui proses biodegradasi. Kombinasi dari proses fisik, kimia, dan biologis ini membuat FTWs efektif dalam mengurangi konsentrasi warna dalam air limbah. Sumber: Vymazal *et al.* (2011).



Gambar 4. 2 Hasil Pengujian Warna pada CTW

Gambar tersebut menunjukkan konsentrasi warna di Constructed Treatment Wetland (CTW) yang diukur selama 28 hari dengan dua konsentrasi berbeda, yaitu 25% dan 50%. Grafik pada bagian atas gambar menunjukkan penurunan konsentrasi warna dari hari ke-0 hingga hari ke-28. Warna yang diukur ditampilkan dalam satuan PtCo, dengan tiga perlakuan yang berbeda: K, C2, dan C3. Pada konsentrasi 25%, semua perlakuan menunjukkan penurunan signifikan dalam konsentrasi warna dalam waktu 7 hari pertama dan terus menurun hingga hari ke-28. Perlakuan K dimulai dengan nilai yang lebih tinggi dibandingkan C2 dan C3, namun pada akhirnya semua perlakuan mencapai nilai yang rendah pada hari ke-28.

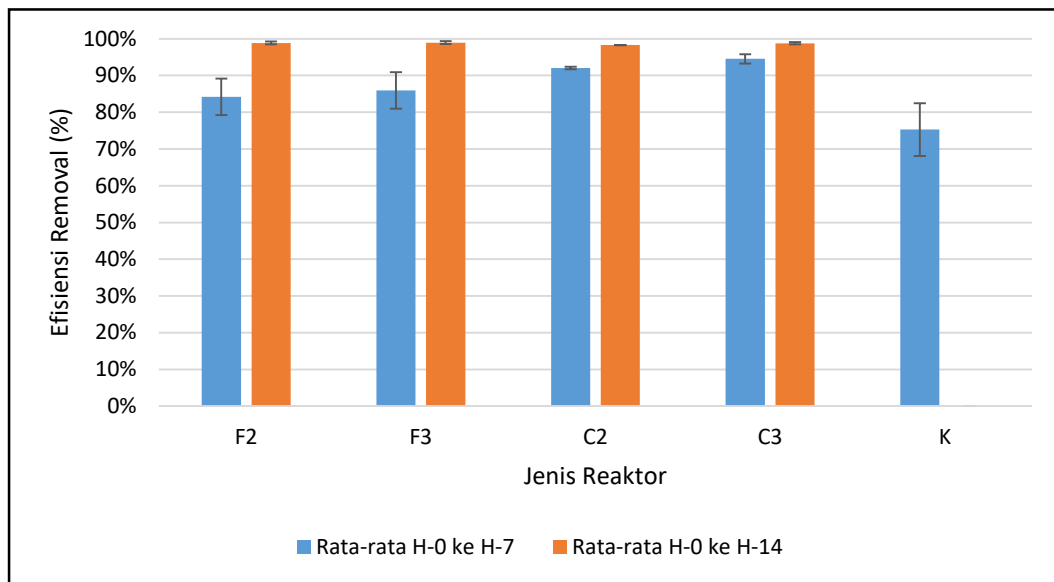
Konsentrasi warna untuk setiap perlakuan pada hari-hari yang ditentukan (0, 7, 14, 21, dan 28). Pada konsentrasi 25%, K dimulai dari 8744,44 PtCo kemudian turun menjadi 1653,33 PtCo di hari ke-7 dan naik lagi menjadi 8466 PtCo pada hari ke-14. C2 dan C3 menunjukkan tren penurunan yang sama tanpa danya

kenaikan lagi di hari ke-14. Pada konsentrasi 50%, perlakuan K dimulai dari 14055,56 PtCo pada hari ke-14 dan menurun menjadi 1820 PtCo pada hari ke-28, sementara C2 dan C3 juga menunjukkan penurunan signifikan dari nilai awal hingga akhir pengamatan. Grafik ini memperlihatkan efektivitas CTW dalam menurunkan konsentrasi warna pada air limbah dengan dua konsentrasi berbeda dalam periode waktu tertentu.

Berdasarkan gambar tersebut, dapat disimpulkan bahwa Constructed Treatment Wetland (CTW) efektif dalam mengurangi konsentrasi warna dalam air limbah pada kedua konsentrasi yang diuji, yaitu 25% dan 50%. Penurunan yang signifikan dalam konsentrasi warna terlihat dalam waktu 7 hari pertama dan terus menurun hingga hari ke-28, menunjukkan bahwa sistem CTW memiliki kemampuan yang konsisten dalam menghilangkan warna dari air limbah seiring waktu.

Pada konsentrasi 25%, perlakuan C2 dan C3 menunjukkan penurunan drastis dari nilai awal yang cukup tinggi hingga mendekati nol pada akhir periode pengamatan. Perlakuan dengan konsentrasi 50% juga menunjukkan tren penurunan yang serupa meskipun nilai awalnya lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa CTW dapat bekerja secara efektif pada berbagai tingkat konsentrasi awal, menjadikannya solusi yang fleksibel dan efisien untuk pengolahan air limbah dengan berbagai tingkat polusi warna.

Penurunan konsentrasi warna yang signifikan dalam Constructed Treatment Wetlands (CTWs) terjadi karena kombinasi proses fisik, kimia, dan biologis yang berlangsung dalam sistem tersebut. Menurut penelitian oleh Kadlec dan Wallace (2008), tanaman dalam CTWs berfungsi sebagai agen biofilter, menyerap dan memetabolisme polutan melalui akar mereka, sementara mikroorganisme yang berkoloni di akar dan media turut berperan dalam dekomposisi zat organik dan senyawa warna melalui proses biodegradasi. Selain itu, media filtrasi seperti pasir atau kerikil dalam CTWs juga membantu dalam mengadsorpsi partikel warna dan polutan lainnya, meningkatkan efektivitas keseluruhan dalam mengurangi konsentrasi warna dalam air limbah.

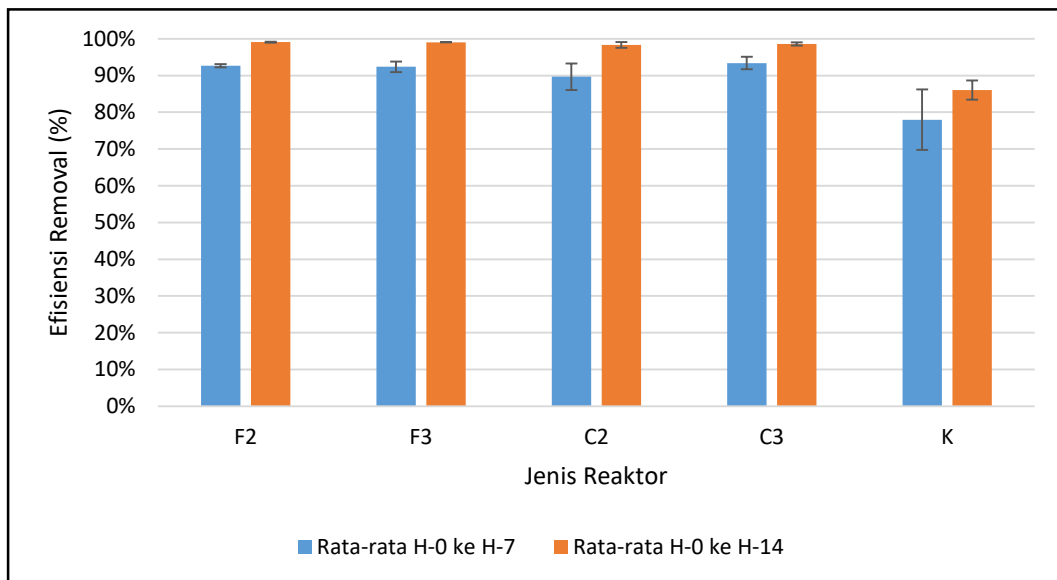


Gambar 4. 3 Efisiensi Removal Warna Air Limbah 25 % di Semua Reaktor

Gambar tersebut menunjukkan efisiensi removal warna dalam air limbah dengan konsentrasi 25% pada berbagai tipe reaktor (K, F2, F3, C2, C3) yang diukur pada hari ke-7 dan hari ke-14. Pada hari ke-7, nilai penghilangan warna tertinggi dicapai oleh reaktor C3, diikuti oleh C2. Reaktor K menunjukkan penghilangan warna yang paling rendah. Pada hari ke-14, semua reaktor menunjukkan peningkatan dalam penghilangan warna kecuali reaktor kontrol, dengan C3 tetap sebagai reaktor yang paling efektif, diikuti oleh C2, F3, dan F2. F2, meskipun peningkatannya paling sedikit, masih menunjukkan adanya peningkatan penghilangan warna.

Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa efektivitas penghilangan warna meningkat seiring waktu untuk semua tipe reaktor. Reaktor C3 menunjukkan kinerja terbaik dalam penghilangan warna baik pada hari ke-7 maupun hari ke-14, diikuti oleh C2. Reaktor F2 menunjukkan penghilangan warna yang lebih rendah dibandingkan reaktor lainnya, namun masih menunjukkan peningkatan dari hari ke-7 ke hari ke-14. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pengolahan dengan reaktor tipe C (C2 dan C3) lebih efektif dalam mengurangi konsentrasi warna dalam air limbah dibandingkan dengan reaktor tipe C dan K, terutama dalam jangka waktu 14 hari. Reaktor kontrol memiliki penghilangan warna yang lebih kecil karena mengalami

kenaikan lagi di hari ke-14 sehingga nilai penurunan removalnya menjadi lebih kecil.



Gambar 4. 4 Efisiensi Removal Warna Air Limbah 50 % di Semua Reaktor

Gambar tersebut menunjukkan diagram batang yang menggambarkan efisiensi removal warna pada air limbah sebesar 50% di lima tipe reaktor yang berbeda: K, F2, F3, C2, dan C3. Sumbu vertikal menunjukkan nilai efisiensi removal warna dalam persen, sedangkan sumbu horizontal menunjukkan jenis reaktor. Warna biru pada batang mewakili data pada Hari ke-7, sedangkan warna oranye mewakili data pada Hari ke-14. Dari data tersebut, kita dapat melihat bahwa semua tipe reaktor mengalami peningkatan dalam penghilangan warna antara Hari ke-7 dan Hari ke-14. Reaktor F2 menunjukkan nilai penghilangan warna tertinggi pada kedua waktu pengamatan, sedangkan reaktor K menunjukkan nilai penghilangan warna terendah.

Berdasarkan gambar tersebut, dapat disimpulkan bahwa efektivitas penghilangan warna pada air limbah bervariasi di antara lima jenis reaktor yang diuji, yaitu K, F2, F3, C2, dan C3. Reaktor F2 menunjukkan performa terbaik dengan nilai penghilangan warna tertinggi pada kedua periode waktu yang diukur, yaitu Hari ke-7 dan Hari ke-14. Sebaliknya, reaktor C2 memiliki performa terendah

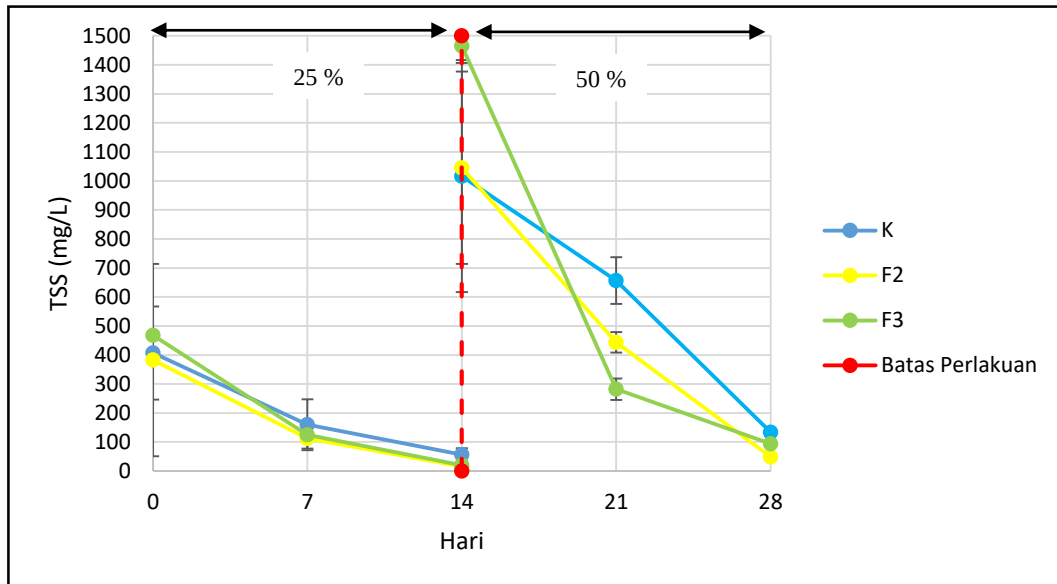
dalam penghilangan warna. Semua reaktor menunjukkan peningkatan penghilangan warna dari Hari ke-7 ke Hari ke-14, menunjukkan bahwa durasi pemrosesan yang lebih lama meningkatkan efektivitas penghilangan warna. Peningkatan penghilangan warna dari Hari ke-7 ke Hari ke-14 di semua tipe reaktor menunjukkan bahwa faktor waktu merupakan elemen penting dalam proses pengolahan air limbah untuk mencapai hasil yang lebih optimal. Hal ini menekankan pentingnya tidak hanya memilih jenis reaktor yang tepat, tetapi juga mempertimbangkan durasi proses untuk mencapai efisiensi penghilangan warna yang maksimal.

Tabel 4. 3 Nilai Reduksi Warna (PtCo)

Reaktor	Konsentrasi 25 %		Konsentrasi 50 %	
	Hari ke-7	Hari ke-14	Hari ke-7	Hari ke-14
Kontrol	1653,33	12700	2662,22	1820
FTW	1575,56	110,89	1153,33	140,89
FTW + Bakteri	1431,11	105,33	997,78	128,67
CTW	465,56	100,89	765,56	112
CTW + Bakteri	437,78	98,67	560	117,56

Berdasarkan data diatas diperoleh kesimpulan bahwa reaktor kontrol yang tidak ditambahkan tanaman dan konsorsium bakteri sendiri sebenarnya sudah bisa menurunkan kadar warna pada air limbah walaupun mengalami kenaikan di hari ke-14 konsentrasi 25 %. Pada reactor C3 25 % *wetland* dengan tanaman vetifer + konsorsium bakteri terbukti lebih efektif menghilangkan konsentrasi polutan warna pada air limbah tenun, sementara untuk konsentrasi 50 % juga C3 *wetland* dengan tanaman vetifer + bakteri memiliki nilai yang lebih tinggi untuk nilai removal warnanya. Sedangkan untuk FTW, reaktor dengan tanaman vetifer + konsorsium bakteri (F3) di semua konsentrasi terbukti lebih efektif menghilangkan konsentrasi polutan warna pada air limbah tenun daripada reactor dengan tanaman vetifer tanpa adanya penambahan bakteri.

4.2.2 Kemampuan Penurunan *Total Suspended Solid* (TSS)



Gambar 4. 5 Hasil Pengujian TSS pada FTW

Gambar di atas menunjukkan konsentrasi Total Suspended Solids (TSS) pada *Wetland* Terapung (*Floating Treatment Wetland*) selama periode 28 hari. Grafik tersebut membandingkan tiga perlakuan yang berbeda: K (kontrol), F2, dan F3, dengan dua tingkat konsentrasi awal, yaitu 25% dan 50%. Garis merah vertikal pada hari ke-14 menunjukkan batas perlakuan dimana konsentrasi awal dinaikkan dari 25% menjadi 50%. Pada awalnya, untuk konsentrasi 25%, semua perlakuan menunjukkan penurunan TSS yang signifikan dari hari ke-0 hingga hari ke-14, dengan perlakuan K turun dari 406,67 mg/L menjadi 55,95 mg/L, perlakuan F2 turun dari 382,56 mg/L menjadi 15,83 mg/L, dan perlakuan F3 turun dari 468,00 mg/L menjadi 20,00 mg/L.

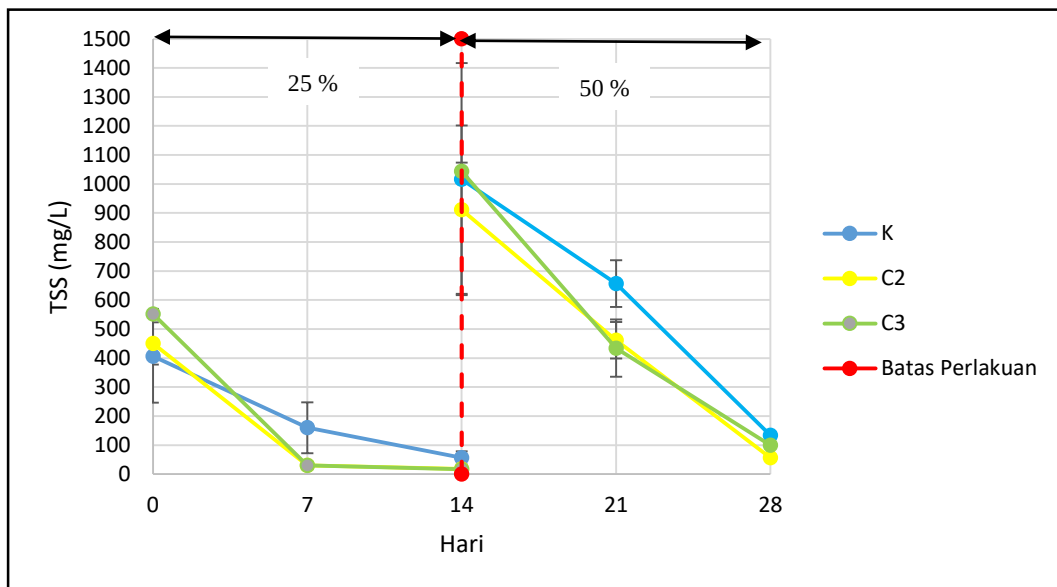
Setelah konsentrasi dinaikkan menjadi 50% pada hari ke-14, terjadi peningkatan TSS pada hari ke-21, dengan perlakuan K naik menjadi 656,22 mg/L, F2 menjadi 443,42 mg/L, dan F3 menjadi 281,97 mg/L. Namun, pada hari ke-28, TSS kembali turun signifikan, dengan perlakuan K menjadi 133,89 mg/L, F2 menjadi 48,89 mg/L, dan F3 menjadi 94,00 mg/L. Dari data ini, dapat disimpulkan bahwa *wetland* terapung efektif dalam menurunkan konsentrasi TSS baik pada

konsentrasi awal 25% maupun 50%, meskipun terdapat lonjakan sementara setelah peningkatan konsentrasi.

Berdasarkan gambar dan data yang ditampilkan, dapat disimpulkan bahwa *wetland* terapung (*Floating Treatment Wetland*) efektif dalam menurunkan konsentrasi Total Suspended Solids (TSS) baik pada konsentrasi awal 25% maupun 50%. Pada periode awal dengan konsentrasi 25%, terjadi penurunan signifikan pada TSS di semua perlakuan (K, F2, dan F3) hingga hari ke-14, menunjukkan efektivitas perlakuan dalam menyaring atau memproses zat padat terlarut.

Ketika konsentrasi TSS dinaikkan menjadi 50% pada hari ke-14, terjadi peningkatan konsentrasi pada hari ke-21, yang menunjukkan respons sistem terhadap perubahan mendadak dalam beban polutan. Namun, pada akhir periode (hari ke-28), TSS kembali menurun secara signifikan, mengindikasikan bahwa sistem *wetland* terapung mampu beradaptasi dan tetap efektif dalam jangka panjang meskipun terdapat lonjakan beban polutan. Hal ini menunjukkan potensi *wetland* terapung sebagai solusi pengolahan air yang adaptif dan berkelanjutan.

Penurunan konsentrasi Total Suspended Solids (TSS) yang efektif oleh *wetland* terapung dapat terjadi karena mekanisme fisik, biologis, dan kimia yang terjadi di dalam sistem tersebut. Mekanisme fisik seperti sedimentasi dan filtrasi oleh akar tanaman membantu mengurangi TSS. Selain itu, aktivitas biologis dari mikroorganisme yang menempel pada akar dan substrat tanaman juga berperan dalam dekomposisi bahan organik dan partikel tersuspensi, yang mengurangi konsentrasi TSS. Proses kimia, termasuk adsorpsi dan koagulasi oleh zat-zat yang dilepaskan oleh tanaman, juga berkontribusi pada penurunan TSS. Dalam sebuah penelitian oleh Vymazal *et al.* (2010), sistem *wetland* menunjukkan efektivitas tinggi dalam menghilangkan berbagai polutan melalui kombinasi dari proses-proses ini.



Gambar 4. 6 Hasil Pengujian TSS pada CTW

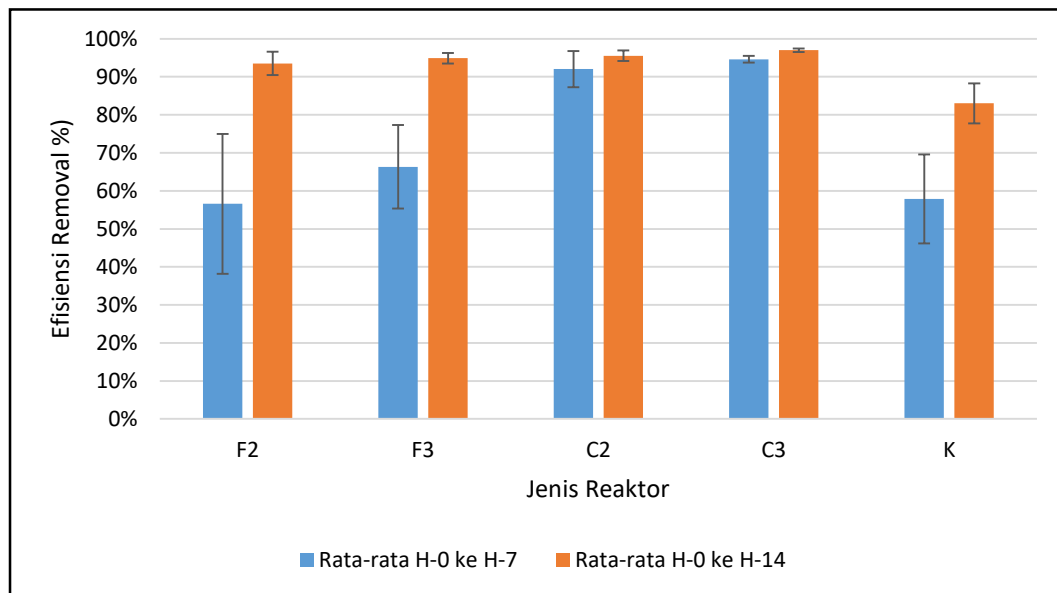
Gambar di atas menggambarkan perubahan konsentrasi Total Suspended Solids (TSS) dalam Constructed Treatment *Wetland* selama 28 hari. Grafik menunjukkan perbandingan antara kontrol (K) dan dua perlakuan (C2 dan C3) pada dua tahap konsentrasi awal, yaitu 25% dan 50%. Pada awal percobaan dengan konsentrasi 25%, semua perlakuan mengalami penurunan konsentrasi TSS yang signifikan. Perlakuan K menurun dari 406,67 mg/L menjadi 55,95 mg/L, C2 dari 450,17 mg/L menjadi 18,33 mg/L, dan C3 dari 551,29 mg/L menjadi 16,67 mg/L setelah 14 hari.

Ketika konsentrasi TSS ditingkatkan menjadi 50% pada hari ke-14, terdapat peningkatan sementara pada hari ke-21, di mana konsentrasi TSS perlakuan K mencapai 656,22 mg/L, C2 mencapai 461,43 mg/L, dan C3 mencapai 434,12 mg/L. Namun, pada akhir periode (hari ke-28), konsentrasi TSS kembali menurun signifikan, dengan nilai untuk K adalah 133,89 mg/L, untuk C2 adalah 56,36 mg/L, dan untuk C3 adalah 99,30 mg/L. Ini menunjukkan bahwa meskipun terjadi lonjakan sementara setelah peningkatan konsentrasi, Constructed Treatment *Wetland* mampu menurunkan konsentrasi TSS secara efektif dalam jangka panjang.

Berdasarkan gambar dan data yang disajikan, dapat disimpulkan bahwa *Constructed Treatment Wetland* efektif dalam mengurangi konsentrasi *Total Suspended Solids* (TSS) pada kedua tahap konsentrasi awal, yaitu 25% dan 50%. Pada tahap konsentrasi 25%, semua perlakuan (K, C2, dan C3) menunjukkan penurunan TSS yang signifikan hingga hari ke-14, dengan C2 dan C3 menunjukkan performa penurunan yang lebih baik dibandingkan kontrol.

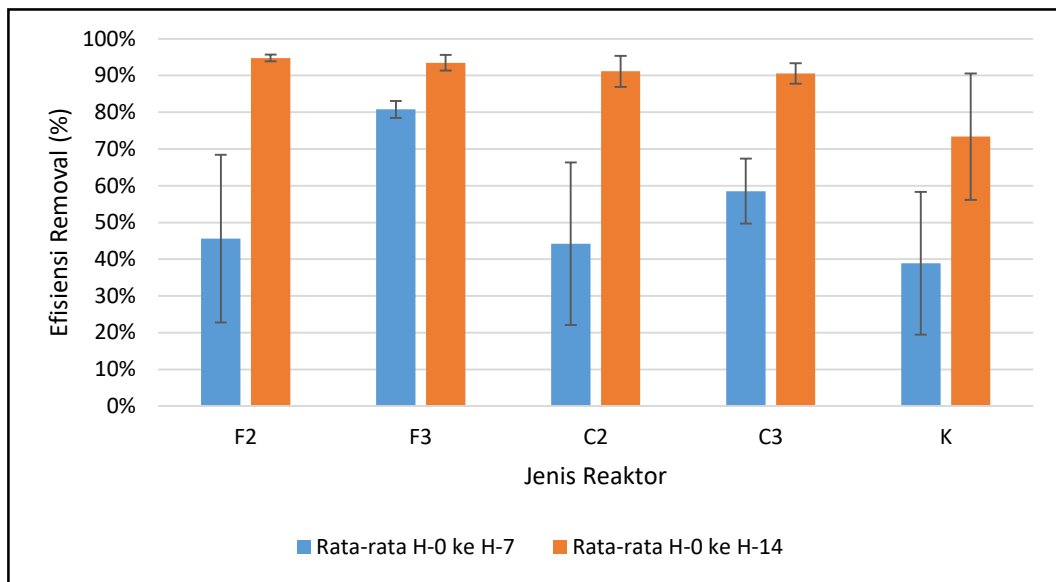
Setelah konsentrasi TSS dinaikkan menjadi 50% pada hari ke-14, meskipun terjadi peningkatan konsentrasi TSS pada hari ke-21, sistem ini mampu menurunkan konsentrasi secara signifikan pada hari ke-28. Hal ini mengindikasikan bahwa *Constructed Treatment Wetland* dapat beradaptasi dengan baik terhadap perubahan beban polutan dan mempertahankan efektivitasnya dalam jangka panjang. Ini menunjukkan potensi sistem ini sebagai solusi berkelanjutan untuk pengolahan air dengan tingkat adaptasi yang baik terhadap variasi konsentrasi polutan.

Efektivitas *Constructed Treatment Wetland* dalam menurunkan konsentrasi *Total Suspended Solids* (TSS) disebabkan oleh kombinasi proses fisik, kimia, dan biologis yang terjadi di dalam sistem ini. Proses fisik seperti sedimentasi dan filtrasi membantu mengendapkan partikel tersuspensi, sementara aktivitas mikroorganisme yang berkembang di media tanam dan permukaan akar tanaman berkontribusi pada dekomposisi bahan organik dan partikel tersuspensi. Tanaman juga berperan dalam proses fitoremediasi, di mana mereka menyerap dan memetabolisme polutan. Selain itu, proses kimia seperti adsorpsi oleh bahan organik dalam *wetland* dan pembentukan kompleks dengan zat-zat terlarut juga berkontribusi pada penurunan TSS. Penelitian oleh Kadlec dan Wallace (2009) menunjukkan bahwa mekanisme ini dapat bekerja sinergis dalam *Constructed Wetland*, memungkinkan penghilangan polutan yang efektif bahkan ketika terjadi perubahan konsentrasi beban polutan.



Gambar 4. 7 Efisiensi Removal TSS Air Limbah 25 % di Semua Reaktor

Gambar tersebut menunjukkan efisiensi removal *Total Suspended Solids* (TSS) dalam air limbah dengan dua konsentrasi berbeda, yaitu 25% dan 50%, menggunakan lima jenis reaktor dan perlakuan selama dua periode waktu yakni hari ke-7 dan hari ke-14. Pada diagram batang pertama, yang menggambarkan penghilangan TSS di air limbah dengan konsentrasi 25%, terlihat bahwa reaktor dengan kombinasi tanaman dan bakteri (C3) memiliki nilai efisiensi removal TSS tertinggi, mencapai 95% pada hari ke-14. Reaktor dengan kombinasi tanaman terapung dan bakteri juga (F3) menunjukkan hasil yang signifikan pada hari ke-14 dengan efisiensi removalnya sebesar 95%. Reaktor kontrol dan reaktor dengan hanya tanaman terapung memiliki hasil penghilangan TSS yang lebih rendah, meskipun ada peningkatan dari Hari ke-7 ke Hari ke-14.



Gambar 4. 8 Efisiensi Removal TSS Air Limbah 50 % di Semua Reaktor

Diagram batang kedua menunjukkan hasil penghilangan TSS di air limbah dengan konsentrasi 50%. Pada konsentrasi ini, reaktor dengan kombinasi tanaman terapung dan bakteri (F3) menunjukkan nilai efisiensi removal TSS tertinggi pada hari ke-7, yaitu 81% pada hari ke-7, dan meningkat menjadi 93% pada hari ke-14. Reaktor kontrol (K) dan reaktor dengan hanya tanaman terapung (F2) memiliki hasil yang lebih rendah dibandingkan reaktor lainnya, tetapi masih menunjukkan peningkatan yang signifikan dari Hari ke-7 ke Hari ke-14. Reaktor C3 juga memiliki nilai efisiensi yaremoval lebih tinggi dari C2 yakni sebesar 59% pada hari ke-7 dan 91% pada hari ke-14. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi tanaman dan bakteri lebih efektif dalam mengurangi TSS dalam air limbah, terutama pada konsentrasi yang lebih tinggi.

Tabel 4. 4 Nilai Reduksi TSS (mg/L)

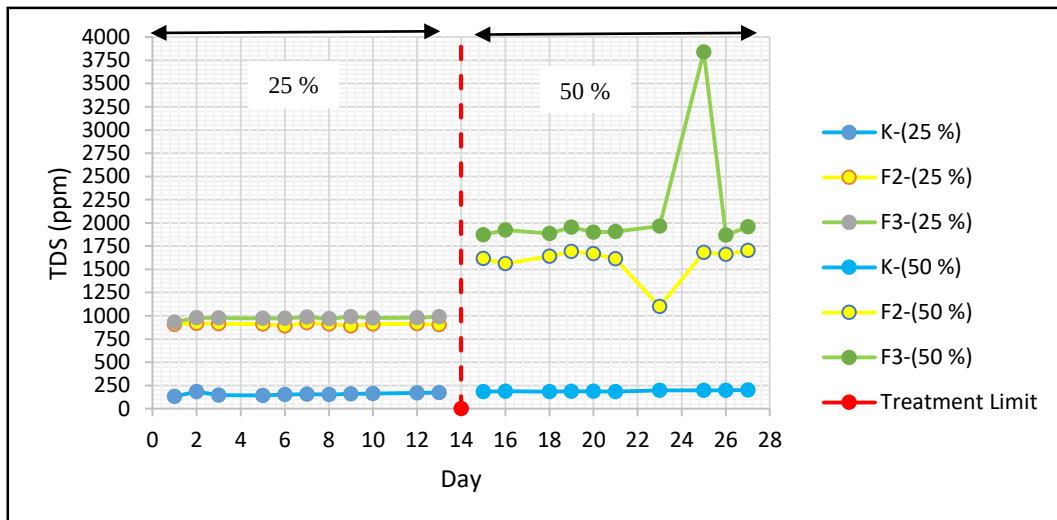
Reaktor	Konsentrasi 25 %		Konsentrasi 50 %	
	Hari ke-7	Hari ke-14	Hari ke-7	Hari ke-14
Kontrol	159,63	55,95	656,22	133,89
FTW	112,86	15,83	443,42	48,89
FTW + Bakteri	124,25	20	281,97	94
CTW	29,52	18,33	461,43	56,36
CTW + Bakteri	29,87	16,67	434,12	99,30

Berdasarkan data diatas bisa disimpulkan bahwa reaktor kontrol tanpa penambahan tanaman dan bakteri sendiri sudah bisa menurunkan kadar TSS pada air limbah, terbukti dengan nilai TSS removal di hari ke-7 dan hari ke-14 selalu naik nilainya di semua konsentrasi pada masing-masing reaktor. Pada FTW, reaktor dengan penambahan konsorsium bakteri terbukti lebih efektif dalam mendegradasi parameter TSS terbukti bahwa nilai removal TSS di F3 lebih besar daripada F2. Sedangkan untuk CTW, reaktor dengan penambahan konsorsium bakteri juga terbukti lebih efektif dalam mendegradasi parameter TSS yang dibuktikan bahwa nilai removal TSS di C3 lebih besar daripada C2.

4.3 Karakteristik Parameter Fisik pada Air Limbah di Masing-Masing Reaktor

4.3.1 Total Dissolved Solid (TDS)

Total *dissolved solid* (TDS) adalah keseluruhan partikel ion yang ukurannya kurang dari 2 mikron (0,0002 cm), termasuk elektrolit yang terlarut dan membentuk salinitas, serta senyawa lainnya seperti bahan organik yang larut (Thompson, 2006). Dalam penelitian terdahulu, karakteristik limbah cair menunjukkan konsentrasi TDS berada di kisaran 2000 – 3000 mg/L (Sa'adah 2024).

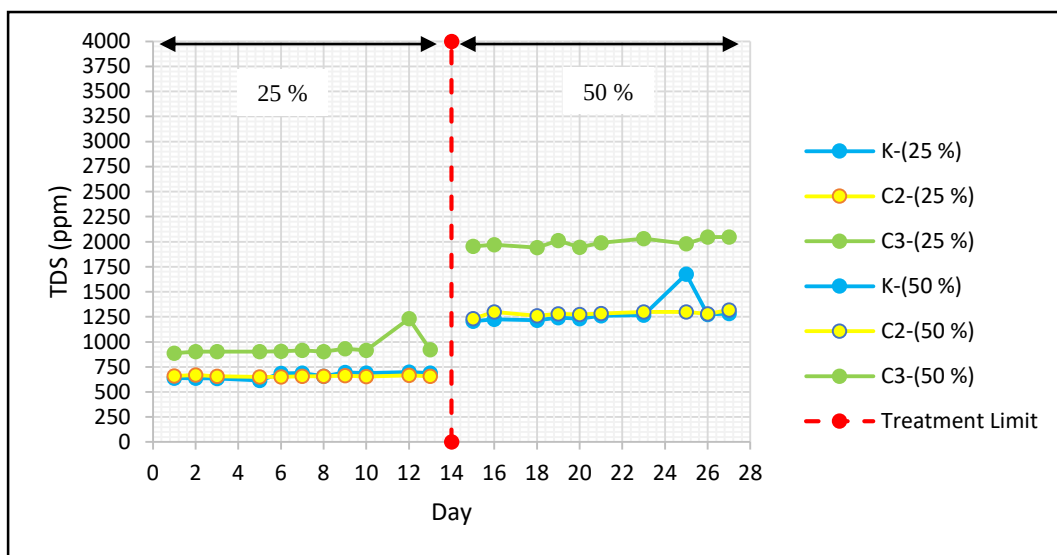


Gambar 4. 9 Hasil Pengukuran TDS pada FTW

Gambar tersebut menunjukkan konsentrasi Total Dissolved Solids (TDS) dalam perlakuan *wetland* terapung (Floating Treatment Wetland, FTW) dan *wetland* konstruksi (Construction Treatment Wetland, CTW) selama periode 28 hari, dengan dua konsentrasi awal yaitu 25% dan 50%, serta pengaruh penambahan bakteri. Pada gambar pertama, yang menggambarkan FTW, terlihat bahwa konsentrasi TDS pada perlakuan kontrol 25% dan 50% tetap stabil di bawah batasan perlakuan selama 28 hari. Sedangkan FTW 25% dan 50% dengan penambahan bakteri mengalami sedikit penurunan konsentrasi TDS selama 14 hari pertama,

namun FTW 50% + bakteri mengalami lonjakan signifikan setelah hari ke-14, mencapai sekitar 3750 ppm pada hari ke-28.

Berdasarkan perhitungan diperoleh kesimpulan bahwa reaktor kontrol sebenarnya sudah bisa untuk menurunkan kadar TDS pada air limbah tenun. Tetapi reaktor FTW dengan penambahan konsorsium bakteri memiliki nilai TDS removal yang lebih tinggi daripada reaktor FTW tanpa bakteri pada konsentrasi 25 %. Sedangkan pada konsentrasi 50 % reaktor FTW tanpa tambahan bakteri memiliki nilai TDS removal yang lebih tinggi daripada reaktor FTW yang ditambahkan dengan bakteri.



Gambar 4. 10 Hasil Pengolahan TDS pada CTW

Gambar kedua menunjukkan hasil yang serupa pada CTW. Perlakuan kontrol 25% dan 50% juga menunjukkan konsentrasi TDS yang stabil di bawah batasan perlakuan. CTW 25% dengan penambahan bakteri menunjukkan sedikit penurunan pada konsentrasi TDS, sedangkan CTW 50% + bakteri mengalami lonjakan signifikan setelah hari ke-14, meskipun tidak sebesar lonjakan pada FTW. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa penambahan bakteri memiliki pengaruh yang bervariasi terhadap konsentrasi TDS dalam kedua jenis *wetland*, dengan pengamatan lonjakan signifikan pada konsentrasi yang lebih tinggi setelah periode waktu tertentu.

Berdasarkan perhitungan diperoleh kesimpulan bahwa reaktor kontrol sebenarnya sudah bisa untuk menurunkan kadar TDS pada air limbah tenun tetapi tidak seefektif dibandingkan reaktor CTW. Pada konsentrasi 25 % reaktor C3 memiliki TDS removal lebih besar daripada C2, pada konsentrasi 50 % juga menunjukkan hasil yang sama yakni nilai TDS removal C3 lebih besar daripada C2. Hal ini menunjukkan bahwa *wetland* yang menggunakan tanaman vetifer + konsorsium bakteri lebih efektif untuk mendegradasi parameter TDS pada air limbah tenun.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, diperoleh nilai bahwa limbah cair tenun mengandung konsentrasi warna dan TSS yang berbeda-beda di setiap konsentrasinya. Selain itu setiap metode pengolahan juga memiliki performa yang berbeda-beda dalam menghilangkan konsentrasi warna dan TSS pada air limbah tersebut. Oleh karena itu penelitian ini menghasilkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan dari tingkat efisiensi removal warna, penggunaan konsorsium bakteri *Bacillus Cereus*, *Bacillus Spizizenii*, dan *Strenotrophomonas Malthophilia* dapat meningkatkan performa *wetland* dalam menurunkan konsentrasi warna pada konsentrasi air limbah 25 %. Untuk konsentrasi limbah 50 % reaktor F3 dan C3 juga lebih efektif untuk menurunkan removal warna pada air limbah tenun dari pada reaktor F2 dan C2 tanpa menggunakan tambahan konsorsium bakteri. Pada keseluruhan reaktor setelah hari ke-7 sudah mengalami penurunan konsentrasi warna. Efisiensi removal tertinggi pada konsentrasi limbah cair tenun 25 % terdapat pada reaktor CTW+Bakteri (C3) yakni sebesar 95 % di hari ke-7 dan 99% di hari ke-14, sedangkan pada konsentrasi limbah cair tenun 50% juga terdapat pada reaktor CTW+Bakteri (C3) yakni sebesar 93% pada hari ke-7 dan 99% pada hari ke-14. Hasil konsentrasi akhir ke-28 setelah konsentrasi hingga 50%, keseluruhan reaktor memenuhi baku mutu parameter warna dengan konsentrasi FTW (F2) 140,89 PtCo; FTW+Bakteri (F3) 128,67 PtCo; CTW (C2) 112 PtCo; dan CTW+Bakteri (C3) 117,56 PtCo.
2. Berdasarkan tingkat removal TSS, penggunaan konsorsium bakteri *Bacillus Cereus*, *Bacillus Spizizenii*, dan *Strenotrophomonas Malthophilia* dapat meningkatkan performa *wetland* dalam menurunkan konsentrasi TSS di

semua konsentrasi baik 25% maupun 50 % air limbah. Sejatinya pada reaktor kontrol pun setelah hari ke-7 sudah mengalami penurunan konsentrasi TSS. Nilai efisiensi removal tertinggi terdapat pada konsentrasi limbah cair tenun 25 % terdapat pada reaktor CTW+Bakteri (C3) yang mana dapat diturunkan hingga 95% pada hari ke7 dan 97% pada hari ke-14, sedangkan pada konsentrasi limbah cair tenun 50% terdapat pada reaktor FTW+bakteri (F3) yakni sebesar 81% pada hari ke-7 dan 93 % pada hari ke-14. Hasil konsentrasi akhir hari ke-28 setelah penambahan konsentrasi hingga 50%, hanya ada satu reaktor yang memenuhi baku mutu parameter TSS, yakni FTW sebesar 48,89 mg/L. Nilai akhir untuk reaktor lainnya adalah FTW+Bakteri (F3) 94 mg/L; CTW (C2)56,36 mg/L; dan CTW+Bakteri (C3) 99,30 mg/L.

3. Penggunaan wetland dengan tanaman *vetiveria zizanioides* dan konsorsium bakteri dalam penelitian ini mungkin dapat mereduksi parameter air limbah hingga diatas 90 %, tetapi wetland sendiri belum bisa digunakan secara sendirian untuk IPAL. Hal ini dikarenakan parameter-parameter pencemar yang ada di air limbah sangatlah bervariasi dan perlu dilakukan proses yang lain dibagian pre-treatment dan primary treatmentnya. Wetland juga sangat bergantung kepada kekuatan tanaman dan konsorsium bakteri sehingga semakin banyak beban pencemar yang masuk ke lingkungan wetland maka semakin berkurang kekuatan tanaman dan bakteri untuk mendegradasi bahan pencemar, dan sebaliknya semakin sedikit beban pencemar yang masuk kedalam wetland maka semakin besar pula kekuatan tanaman dan bakteri untuk mendegradasi bahan pencemar.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan yaitu :

1. Perlunya dilakukan aklimatisasi konsorsium bakteri terlebih dahulu di reaktor, sebelum diberikan air limbah. Hal ini supaya bakteri dapat

beradaptasi dengan lingkungan reaktor terlebih dahulu sehingga bakteri diharapkan bisa lebih efektif mendegradasi parameter pencemar air limbah.

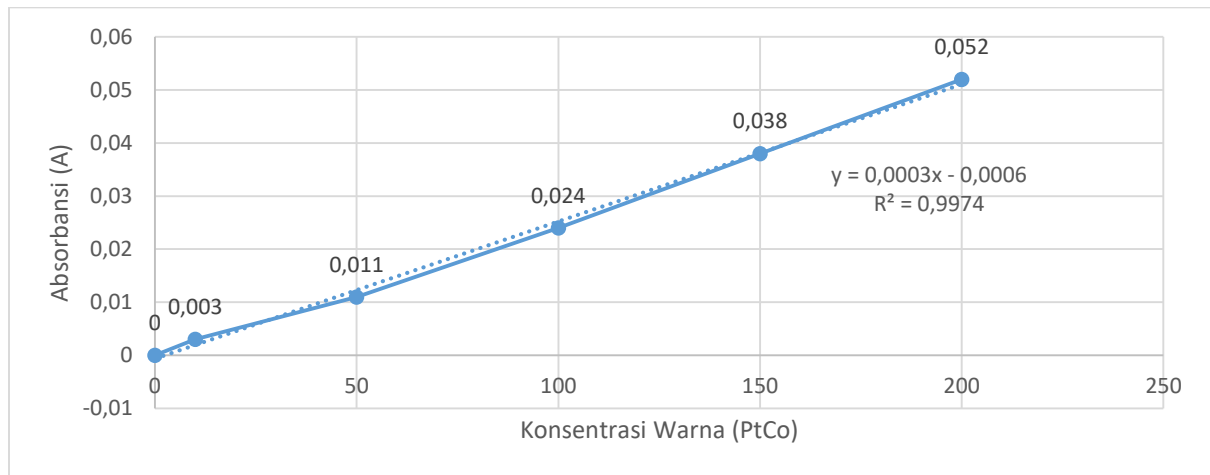
2. Pengukuran TSS diharapkan bisa mengikuti standar SNI, 6989.3-2019 dimana dilakukan perendaman dengan akuades terlebih dahulu dan pengovenan sebanyak 2 kali. Hal ini dimaksudkan agar hasil pengujian TSS tidak menjadi minus karena nilai penimbangan setelah disaring lebih kecil daripada sebelum disaring.
3. Pembuatan limbah artificial sebaiknya dibuat dalam satu wadah dibuat satu wadah terlebih dahulu untuk semua reaktor, hal ini dimaksudkan agar konsentrasinya bisa seragam dan tidak terjadi perbedaan nilai yang cukup besar di masing-masing reaktor.

DAFTAR PUSTAKA

- Achilla, S. (2023). *Etnomatematika pada motif Tenun Ikat Troso serta aktivitas fundamental matematis menurut Bishop di industri Ibany Tenun Troso Jepara* (Doctoral dissertation, UIN KH Abdurrahman Wahid Pekalongan).
- Adams, G. O., Tawari Fufeyin, P., Eruke Okoro, S., & Ehinomen, I. 2020. Bioremediation, Biostimulation and Bioaugmentation: A Review. Int
- Fajri, J. A. (2020). Perubahan parameter fisika pada proses biodegradasi limbah tenun oleh bakteri endofit.
- Mayori, A. (2022). Unjuk Kerja Aerated Dan *Floating Wetland* Kombinasi Dengan Konsorsium Bakteri Untuk Removal Kandungan Bod, Cod Dan Amonia Pada Air Limbah Tenun.
- Halder, A., Das, A., Sen, S. K., & Jana, A. (2017). Biodegradation of complex organic compounds from agricultural wastes by bacterial consortium: kinetics and microbial community analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5), 4833-4847.
- Fajri, J. A., Nurmiyanto, A., Sa'adah, N. N., Nuryana, I., Anfaresi, S. L. N., & Lathifah, A. N. (2024). Effectiveness of Endophytes Bacteria in Enhancing *Floating Treatment Wetland* to Treat Textile Wastewater. *Journal of Ecological Engineering*, 25(3).
- Fajri, J. A., Nurmiyanto, A., Sa'adah, N. N., Sagita, N. D., Nuryana, I., Rahayu, A., & Lathifah, A. N. (2024). Selection of endophyte and indigenous bacteria degrading textile wastewater in floating treatment *wetland*. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-12.
- Kadlec, R. H. (2009). Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. *Ecological engineering*, 35(2), 159-174.
- Pardamean, M. A., Islamy, R. A., Hasan, V., Herawati, E. Y., & Mutmainnah, N. 2021. Identification and physiological characteristics of potential indigenous bacteria as bioremediation agent in the wastewater of sugar factory. *Sains Malaysiana*, 50(2), 279–286.
- Priadie, B., Muda Bidang Teknik Lingkungan SDA, P., Litbang Sumber Daya Air, P., & Ji Ir H Juanda, K. P. 2012. Teknik Bioremediasi Sebagai Alternatif Dalam Upaya Pengendalian Pencemaran Air. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 10(1), 38–48.
- Rahimnejad, M., Mesdaghinia, A., Vaezi, F., Naddafi, K., Nabizadeh, R., Alimohammadi, M., & Mahvi, A. H. (2016). Performance evaluation of a *Stenotrophomonas maltophilia*

- strain in bioaugmentation of activated sludge system for removal of phenol. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(14), 13778-13787.
- Sa'adah, N.N. 2020. Pengolahan Limbah Cair Tenun Dengan Sistem *Floating Treatment Wetland* Menggunakan Kombinasi Tanaman Vetiver dan Bakteri Endofit. Skripsi. Yogyakarta: Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia.
- Shahid, M. J., Arslan, M., Ali, S., Siddique, M., & Afzal, M. 2018. *Floating Wetlands: A Sustainable Tool for Wastewater Treatment*. In *Clean - Soil, Air, Water* (Vol. 46, Issue 10). Wiley-VCH Verlag.
- Srivastava, J., Kayastha, S., Jamil, S., & Srivastava, V. 2008. Environmental perspectives of *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash. In *Acta Physiologiae Plantarum* (Vol. 30, Issue 4, pp. 413–417).
- Sukarjo, W. P., Handayani, C. O., & Harsanti, E. S. 2019. Penilaian resiko kontaminasi logam berat di lahan sawah dan tanaman padi di DAS Brantas, Kabupaten Jombang. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan Vol*, 6(1), 1033-1042.
- Sukono, G. A. B., Hikmawan, F. R., Evitasari, E., & Satriawan, D. 2020. Mekanisme Fitoremediasi: Review. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 2(2), 40–47.
- Thompson, I. P., van der Gast, C. J., Ciric, L., & Singer, A. C. 2005. Bioaugmentation for bioremediation: The challenge of strain selection. In *Environmental Microbiology* (Vol. 7, Issue 7, pp. 909–915).
- Ulayya, F. T. 2023. Pemberdayaan Industri Kecil Tenun Troso oleh Dinas Perindustrian dan Perdagangan di Desa Troso Kecamatan Pecangaan Kabupaten Jepara Provinsi Jawa Tengah. Skripsi. Sumedang: Program Studi Pembangunan Ekonomi dan Pemberdayaan Masyarakat Institut Pemerintahan Dalam Negeri.
- Vymazal, J. 2005. Horizontal sub-surface flow and hybrid *constructed wetlands* systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 25(5), 478–490.
- Zhao, H., Xie, H., He, C., & Xu, X. (2019). Application of *Bacillus cereus* in *Constructed Wetlands* for Enhanced Treatment of Nitrogen and Phosphorus from Municipal Wastewater. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(3), 342. <https://doi.org/10.3390/ijerph1603034>

LAMPIRAN



Lampiran 1 Kurva Kalibrasi Standar Warna PtCo



Lampiran 2 Kegiatan Pengujian Konsentrasi Warna dengan Spektrofotometer



Lampiran 3 Kenampakan Reaktor Floating Kontrol



Lampiran 4 Kenampakan Reaktor Floating Tanaman



Lampiran 5 Kenampakan Reaktor Floating Tanaman + Bakteri



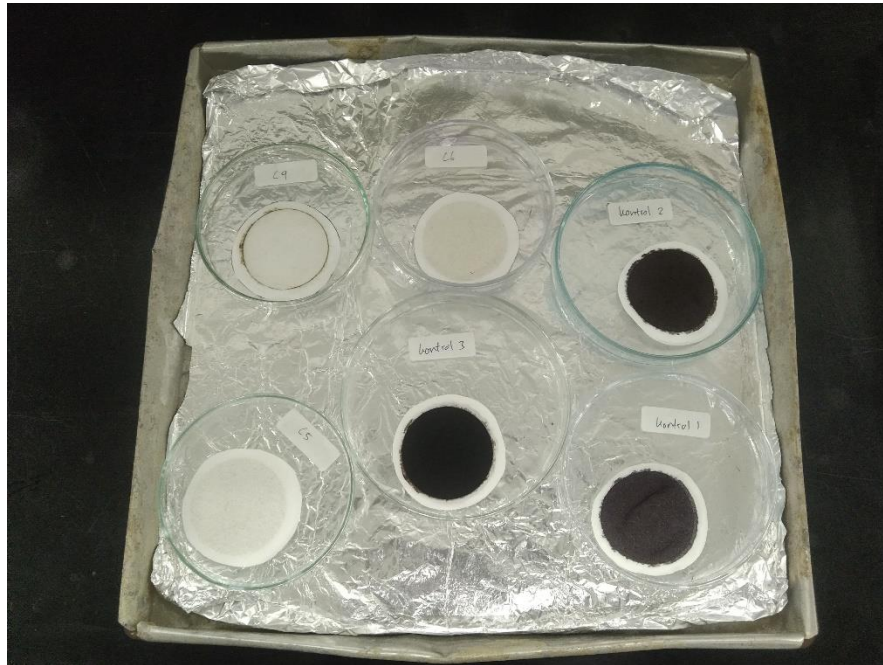
Lampiran 6 Kenampakan Reaktor Floating Tanaman + Bakteri



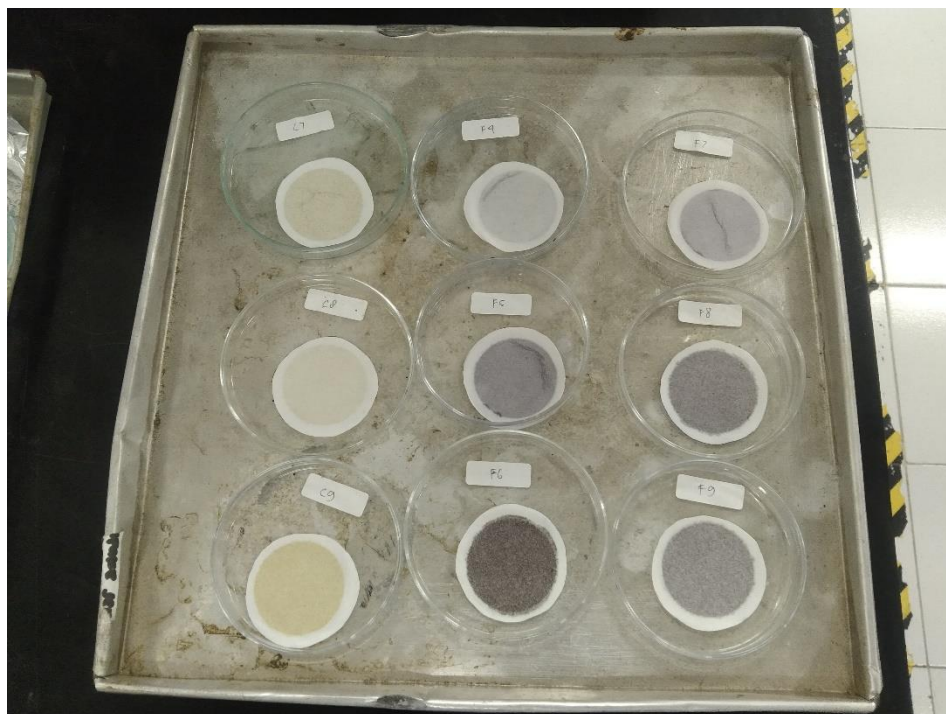
Lampiran 5 Kenampakan Reaktor Constructed Tanaman



Lampiran 6 Reaktor Constructed Tanaman + Bakteri



Lampiran 7 Kenampakan Kertas Saring Setelah Dilakukan Penyaringan TSS



Lampiran 8 Kenampakan Kertas Saring Setelah Dilakukan Penyaringan TSS