TA/TL/2025/2041

JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Sistem Pengolahan Air Limbah Tenun dengan Kombinasi Proses Biologis dan Filtrasi dalam Mendegradasi Kandungan Warna dan Logam Berat (Pb dan Cd)

Athaya Helsa Savana
21513031

Dosen Pembimbing:
Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng.
Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia
2025

DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Wastewater Treatment System for Textile Industry Using a Combination of Biological Processes and Filtration to Degrade Color and Heavy Metal Content (Pb and Cd)

Athaya Helsa Savana
21513031

Supervisor:
Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng.
Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D

Environmental Engineering Bachelor Program
Faculty of Civil Engineering and Planning
Universitas Islam Indonesia
2025

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Sistem Pengolahan Air Limbah Tenun dengan Kombinasi Proses Biologis dan Filtrasi dalam Mendegradasi Kandungan Warna dan Logam Berat (Pb dan Cd)

Tugas akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Athaya Helsa Savana

21513031

Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 9 September 2025 dan disetujui oleh:

Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng. (Pembimbing 1)

Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D (Pembimbing 2)

Diah Ayu Prawitasari, S.T., M.T. (Penguji)

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana

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

PERNYATAAN

Saya, penyusun tugas akhir ini, 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 merupakan gagasan, rumusan, dan studi 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. Perangkat lunak atau program komputer yang digunakan dalam tugas akhir ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya. Bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Tidak ada penggunaan kecerdasan buatan *(artificial intelligence*, AI) dalam penyusunan karya tugas akhir ini kecuali:
   a. untuk membantu dalam kadar yang wajar (seperti membantu mengoreksi, mencari ide, dan mencari referensi), dan
   b. tercantum dan dijelaskan perihal penggunaannya secara eksplisit di dalam karya tugas akhir ini.

   Implikasi dari penggunaan AI tersebut menjadi tanggung jawab saya sepenuhnya.
6. Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya. Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 8 September 2025
Yang membuat pernyataan,



Athaya Helsa Savana
21513031

PRAKATA

Dengan memanjatkan puja dan puji syukur kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala yang telah melimpahkan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "Sistem Pengolahan Air Limbah Tenun dengan Kombinasi Proses Biologis dan Filtrasi dalam Mendegradasi Kandungan Warna dan Logam Berat (Pb dan Cd)" sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Sarjana (S1) Jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia. Selama penyusunan Tugas Akhir ini penulis menyadari bahwa Tugas Akhir tidak mungkin terselesaikan tanpa adanya dukungan, bantuan, bimbingan, dan nasihat dari berbagai pihak. Maka dari itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Sosok yang selalu ingin penulis peluk disetiap waktu, ayahanda Lilik Fajar Risdiyanto, S.T. Terima kasih atas segala peluh yang dikeluarkan untuk mencari nafkah guna memenuhi kebutuhan finansial penulis selama ini. Terima kasih juga untuk setiap do'a yang selalu dilangitkan untuk keberhasilan penulis dalam menyelesaikan studi ini. Terima kasih untuk segala kesabaran, cinta, dan kasih yang diberikan kepada penulis, sehingga penulis tidak pernah merasa kekurangan dalam bentuk kasih sayang.
2. Sosok perempuan yang kuat, tegas, penuh kasih, dan hati yang luas, yaitu Ibunda Eko Ike Kurniawati, S.E. Terima kasih untuk segala do'a disetiap sujudnya. Terima kasih untuk selalu sayang dan selalu memenuhi keinginan penulis. Terima kasih untuk segala semangat dan nasihat demi keberhasilan penulis untuk mewujudkan segala impian penulis.
3. Bapak Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan banyak bantuan, bimbimgan, dan dukungan penuh kepada penulis selama penyusunan dan menyelesaikan Tugas Akhir kepada penulis.

4. Ibu Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D. selaku dosen pembimbing 2 atas segala arahan serta saran yang diberikan kepada penulis, sehingga Tugas Akhir dapat diselesaikan dengan baik.
5. Ibu Diah Ayu Prawitasari, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik, saran, dan masukkan yang membangun.
6. Adik tersayang, Syahla Janika Fidela yang selalu mendoakan, memberikan semangat, dan hiburan kepada penulis.
7. Azhra Salsabillah Putri selaku sahabat baik penulis sejak 15 tahun lalu. Terima kasih atas segala nasihat, masukan, dan waktu yang telah diluangkan hanya untuk sekedar mendengarkan keluh kesah penulis.
8. Sosok yang tidak bisa disebutkan namanya selaku sahabat yang selalu menemani penulis selama menyusun tugas akhir. Terima kasih untuk segala dukungan, motivasi, nasihat, dan kesabaran yang telah diberikan kepada penulis. Terima kasih telah meluangkan pundaknya untuk penulis dapat bersandar. Terima kasih untuk selalu menenangkan emosi dan mental penulis tidak stabil. Terima kasih untuk selalu semangat mendengarkan cerita absurd yang keluar dari mulut penulis.
9. Kepada rekan-rekan satu tim penulis, Tsabita Dary Pramudisa dan Putri Syabina. Terima kasih telah memberikan dukungan, bantuan, saran, dan kerja sama yang baik selama penelitian berlangsung.
10. Terakhir, penulis ingin memberi ucapan terima kasih yang sangat mendalam kepada satu sosok yang selalu tetap berjuang meskipun kakinya goyah, memiliki rasa ingin tahu yang tinggi. Seorang wanita sederhana dengan segala cita-citanya untuk membanggakan orang tua, adik, dan orang lain. Terima kasih kepada penulis sebagai anak pertama yang baru menginjak 22 tahun. Terima kasih telah merayakan segala hal kecil dengan caranya sendiri, hal yang tidak pernah dirayakan orang lain dalam hidupnya. Semoga setiap langkah kecil dalam hidup penulis selalu mendapatkan ridho Allah dan akan

terus kaki penulis akan terus melangkah untuk menggapai segala cita-cita.

Sleman, 16 September 2025

Athaya Helsa Savana

Sistem Pengolahan Air Limbah Tenun dengan Kombinasi Proses Biologis dan Filtrasi dalam Mendegradasi Kandungan Warna dan Logam Berat (Pb dan Cd)

Mahasiswa : Athaya Helsa Savana
NIM : 21513031
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing : Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng / Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D

Abstrak

Air limbah tenun merupakan hasil sisa dari proses pencucian kain tenun yang mengandung senyawa kimia berbahaya, seperti pewarna, detergen, logam berat, dan lainnya. Senyawa kimia tersebut tentunya berbahaya apabila dibuang langsung ke lingkungan. Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja reaktor biologis (aerobik dan anaerobik) dan filtrasi dalam menurunkan kadar warna dan logam berat (Pb dan Cd). Reaktor biologis menggunakan sistem lumpur aktif dan reaktor filtrasi menggunakan media zeolit, pasir silika, dan *Polyethylen Glicol* (PEG). Air limbah yang digunakan merupakan konsentrasi 20% sebagai penyesuaian rangkaian reaktor dan dilanjutkan dengan konsentrasi 50% selama 1 bulan. Hasil pengolahan menunjukkan bahwa reaktor biologis dan filtrasi awalnya mampu menurunkan konsentrasi warna. Namun, efisiensi ini tidak stabil dan tidak menunjukkan penurunan yang signifikan secara keseluruhan. Konsentrasi warna tertinggi pada hari ke-21 di reaktor *clarifier* (1194,23 Pt-Co) dan reaktor silika (1476,92 Pt-Co), yang diduga disebabkan oleh endapan yang tidak terlarut pada bak pengumpul. Di sisi lain, pengolahan fisika menggunakan PEG menunjukkan efisiensi yang lebih baik, mencapai 100% pada hari ke-21. Pada parameter logam berat, sistem biologis efektif untuk logam Pb (1,078 mg/L menjadi 0,351 mg/L), tetapi kurang efektif untuk logam Cd. Sebaliknya, reaktor filtrasi dengan pasir silika dan PEG menunjukkan efisiensi yang tinggi dalam menurunkan konsentrasi kedua logam berat pada hari ke-28. Oleh karena itu, kombinasi kedua sistem menjadi strategi yang optimal untuk pengolahan air limbah tenun.

Kata kunci: Limbah Tenun, Pengolahan Biologis, Filtrasi, Warna, Logam Berat

Wastewater Treatment System for Textile Industry Using a Combination of Biological Processes and Filtration to Degrade Color and Heavy Metal Content

Student : Athaya Helsa Savana
Student Number : 21513031
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor : Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng/ Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D

Abstract

Textile wastewater, a residual from the fabric washing process, contains hazardous chemical compounds such as dyes, detergents, heavy metals, and other pollutants. Discharging these compounds directly into the environment poses a significant risk. Therefore, this study aimed to evaluate the performance of a biological reactor (anaerobic-aerobic) and filtration in reducing colour and heavy metals (Pb and Cd) concentrations. The biological reactor utilized an activated sludge system, while the filtration reactor used zeolite, silica sand, and Polyethylene Glycol (PEG) as media. The wastewater was tested at a 20% concentration for reactor acclimation, followed by a 50% concentration for one month. The results showed that both the biological and filtration treatments were initially able to reduce the wastewater colour concentration. However, this efficiency was unstable and did not show a significant overall reduction. The highest colour concentrations on day 21 were recorded in the clarifier reactor (1194.23 Pt-Co) and the silica reactor (1476.92 Pt-Co), which was likely due to undissolved precipitates in the collection tank. Conversely, the physical treatment using PEG showed better efficiency, achieving a 100% reduction on day 21. Regarding heavy metals, the biological system was effective for Pb (1.078 mg/L to 0.351 mg/L) but was less effective for Cd. In contrast, the filtration reactors with silica sand and PEG showed high efficiency in reducing the concentration of both heavy metals by day 28. Therefore, a combination of both systems represents an optima strategy for textile wastewater treatment.

Key words: *Textile Wastewater, Biological Treatment, Filtration, Colour, Heavy metals.*

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
Abstrak	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Limbah Cair Tenun	5
2.2 Biosorpsi	6
2.3 Bakteri Endofit	7
2.4 Pengolahan Biologis	7
2.5 Pengolahan Fisika	9
2.6 Logam Berat	11
2.7 Warna	12
2.8 Penelitian Terdahulu	12
BAB III METODE PENELITIAN	14
3.1 Waktu dan Lokasi	14
3.2 Sampling Air Limbah	14
3.3 Kulturisasi Bakteri Endofit	15
3.4 Pengoperasian Reaktor	18
3.5 Aklimatisasi Lumpur Aktif (*Activated Sludge*)	21
3.6 Running Reaktor, Sampling Reaktor, dan Pengujian	22
3.7 Analisis Data	23

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 24
4.1 Karakteristik Limbah Tenun 24
4.2 Kinerja Sistem Pengolahan Biologis dalam Penyisihan Warna dan Logam Berat 25
4.3 Peran Adsorben Zeolit, Silika, dan *Polyethylen Glycol* (PEG) dalam Penurunan Warna dan Logam Berat 30
4.4 Penurunan Removal pada Parameter Warna dan Logam Berat (Pb dan Cd) 36
4.5 Derajat Keasaman (pH) Air 41
BAB V PENUTUP 43
5.1 Kesimpulan 43
5.2 Saran 43
DAFTAR PUSTAKA 45
LAMPIRAN 55
Lampiran 55
RIWAYAT HIDUP 61

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu 12
Tabel 4. 1 Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Tekstil 24
Tabel 4. 2 Baku Mutu Logam Berat Pb dan Cd pada Lampiran XLVII PERMEN LHK No. 5 Tahun 2014 25
Tabel 4. 3 Karakteristik Parameter Warna dan Logam Berat (Pb dan Cd) Air Limbah Tenun..... 25

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Lokasi Sampling Limbah Tenun 14
Gambar 3. 2 Proses Pewarnaan Tenun 15
Gambar 3. 3 Alur Tahapan Kegiatan 16
Gambar 3. 4 Diagram Alir Kulturisasi Bakteri Endofit 17
Gambar 3. 5 Susunan Reaktor Pengolahan Air Limbah Tenun 18
Gambar 3. 6 Susunan Reaktor Pengolahan Air Limbah Tenun 18
Gambar 3. 7 Reaktor Anaerobik 19
Gambar 3. 8 Reaktor Aerobik 19
Gambar 3. 9 Reaktor *Clarifier* 20
Gambar 3. 10 Reaktor Filtrasi 21
Gambar 4. 1 Grafik Hasil Pengujian Warna pada Pengolahan Biologis Limbah Tenun Konsentrasi 20% dan 50%. 26
Gambar 4. 2 Grafik Konsentrasi Pb Pada Pengolahan Biologis 28
Gambar 4. 3 Grafik Konsentrasi Cd Pada Pengolahan Biologis 29
Gambar 4. 4 Grafik Hasil Pengujian Warna Pada Pengolahan Fisika Limbah Tenun Konsentrasi 50%. 31
Gambar 4. 5 Grafik Konsentrasi Pb Pada Pengolahan Adsorpsi 33
Gambar 4. 6 Grafik Konsentrasi Cd Pada Pengolahan Adsorpsi 34
Gambar 4. 7 Grafik Efisiensi Removal Warna 37
Gambar 4. 8 Grafik Efisiensi Penyisihan Pb Pada Seluruh Reaktor 38
Gambar 4. 9 Grafik Efisiensi Penyisihan Cd Pada Seluruh Reaktor 40
Gambar 4. 10 Grafik Pengukuran pH Masing-Masing Reaktor 41

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumen Pembuatan Reaktor 55
Lampiran 2 Aklimatisasi Reaktor 57
Lampiran 3 Dokumentasi Pengujian Warna 58
Lampiran 4 Hasil Perhitungan Parameter Limbah Cair Tenun 59

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu daerah di Jawa Tengah, yaitu Kabupaten Jepara yang memiliki kearifan lokal berupa industri tenun sejak tahun 1935. Tenun ikat troso merupakan sentra kerajinan tenun yang terletak di Desa Troso, Kecamatan Pecangaan, Kabupaten Jepara. Berdasarkan data dari Dinas Perindustrian dan Perdagangan Kabupaten Jepara tahun 2023, terdapat sebanyak 2.500 pengrajin tenun troso yang aktif di Desa Troso yang terdiri dari 1.800 penenun dan 700 pengusaha tenun. Dari banyaknya pengrajin tenun, masih banyak pengrajin masih banyak yang belum mengolah limbahnya dan langsung mengalirkan limbahnya ke sungai. Limbah tekstil yang dihasilkan dari industri tekstil skala kecil dan menengah umumnya menimbulkan masalah lingkungan karena belum adanya pengolahan limbah dalam bentuk apa pun, hal tersebut dapat menimbulkan ancaman serius terhadap ekosistem selama adanya pembuangan limbah tersebut (Fajri et al., 2024).

Air limbah dari produksi kain merupakan salah satu limbah industri paling tercemar karena mengandung berbagai senyawa kimia berbahaya, seperti pewarna, detergen, logam berat, dan lainnya. Limbah ini bersifat karsinogenik dan mutagenik, sehingga dapat menjadi racun bagi flora dan fauna pada konsentrasi tinggi (Hussain et al., 2018). Sumber utama limbah tenun berasal dari proses pewarnaan kain yang sering dibuang tanpa pengolahan. Limbah ini mengandung *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biological Oxygen Demand* (BOD), *Total Suspended Solid* (TSS), logam berat, dan bahan pewarna organik rantai panjang yang sukar diolah dengan teknologi pengolahan air limbah biologis biasa. Zat pewarna tekstil yang non-biodegradable dapat terutai oleh sinar UV, tetapi prosesnya lama sehingga dapat menyebabkan akumulasi di tanah dan air (Sitanggang, 2017). Hal tersebut menimbulkan dampak, seperti penurunan oksigen terlarut, kematian makhluk hidup akuatik, penurunan produktivitas tanah, serta gangguan penetrasi akar tumbuhan (Mukti et al., 2023).

Untuk menghindari terjadinya pencemaran lingkungan tersebut, perlu dilakukan pengolahan air limbah tekstil. Pada umumnya, untuk mengurangi bahan pencemar organik yang terkandung dalam air limbah tekstil dapat menggunakan teknologi pengolahan secara biologis, seperti *activated sludge* (lumpur aktif), *aerated filter*, biofilter anaerobik-aerobik, *trickling filter* (Nugroho & Mahmud, 2018), *anaerobic baffle reactor*, bioremediasi, ozonasi (Sitanggang, 2017), dan teknologi pengolahan air limbah konvensional lainnya. Namun, teknologi pengolahan konvensional tersebut memerlukan biaya operasional yang tinggi dan energi yang tinggi. Hal tersebut menjadi salah satu kendala dalam mengolah air limbah tekstil yang dialami oleh industri tekstil skala menengah dan skala kecil. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengolahan air limbah tekstil sederhana yang dapat dilakukan secara mandiri dengan perawatan yang mudah, seperti pengolahan dengan metode biologis.

Metode biologis dianggap sebagai cara mengolah limbah yang paling ramah lingkungan. Metode biologis memiliki kemampuan dalam menyerap dan mengurangi zat berbahaya berupa biosorpsi dan biodegradasi. Salah satu teknologi yang efisien dan hemat biaya adalah teknologi lumpur aktif (activated sludge). Namun, berdasarkan penelitian yang ada, teknologi lumpur aktif memiliki kekurangan, seperti menghasilkan banyak lumpur yang mengandung sisa senyawa yang sulit terurai. Penelitian (Deraniyagala, 2017) menyebutkan bahwa pengolahan limbah tekstil dengan *Activated Sludge Process* (ASP) laju aliran harian 4.000 m3 dapat menghasilkan 2.000 ton lumpur yang berbahaya yang sudah didapatkan setiap tahun.

Metode lain yang dianggap sebagai metode dengan biaya rendah dan perawatan yang mudah dalam mengolah air limbah adalah metode adsorpsi. Pada penelitian (Septiariva et al., 2021) menunjukkan bahwa proses adsorpsi menggunakan karbon aktif dengan waktu kontak 5-60 menit dan variasi konsentrasi awal yang mengandung Reactive Black (RB-5) sebesar 5 mg/L; 10 mg/L; 15 mg/L; 15 mg/L; dan 20 mg/L dapat menurunkan konsentrasi warna masing-masing sebesar 86,21%, 85,21%, 84,29%, dan 71,07% selama 60 menit.

Dari penjelasan yang telah disampaikan, penelitian ini dilakukan dengan pertimbahngan variasi limbah tenun yang digunakan dan Hydraulic Retention

Time (HRT). Metode yang digunakan pada pengujian ini adalah sistem biologis berupa pengolahan anaerobik-aerobik dan *clarifier*, serta sistem adsorpsi dengan menggunakan media zeolit, silika, dan PEG. Reaktor pengolahan diterapkan menggunakan secara kontinu.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana konsentrasi warna dan logam berat dalam air limbah tenun setelah dilakukan pengolahan menggunakan metode sederhana berupa sistem biologis dan fisika?
2. Seberapa efektif sistem biologis dan fisika dalam mengolah limbah air tenun?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan, antara lain:

1. Mengevaluasi kinerja reaktor biologis (aerobik dan anaerobik) dan filtrasi dalam mengolah warna dan logam berat pada air limbah tenun.
2. Menganalisis kualitas air limbah tenun dengan menggunakan sistem pengolahan biologis dan filtrasi dalam mengolah warna dan logam berat.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat, antara lain:

1. Sebagai studi literatur terkait efisiensi pengolahan limbah cair tenun menggunakan metode sederhana berupa pengolahan biologis dan fisika.
2. Sebagai referensi dalam menentukan alternatif pengolahan limbah cair tenun yang mudah dan biaya yang relatif lebih murah pada industri tenun ikat troso untuk mengendalikan pencemaran lingkungan.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini, yaitu:

1. Pembuatan reaktor biologis dengan variasi reaktor anaerobik, aerobik, dan *clarifier*, serta reaktor fisika dengan variasi adsorben berupa zeolit, silika, dan *polyethylen glicol* (PEG).
2. Kulturisasi bakteri konsorsium bakteri endofit.
3. Pengolahan limbah yang digunakan adalah sistem biologis anaerobik, aerobik, dan *clarifier* serta sistem fisika dengan bantuan adsorben berupa zeolit, silika, dan PEG.
4. Parameter yang diuji setiap sampling adalah warna dan logam berat.
5. Analisa kandungan warna menggunakan spektrofotometri dan logam berat menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)-nyala.

.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah Cair Tenun

Limbah cair yang dihasilkan dari industri tenun berasal dari proses pewarnaan dan pencucian kain. Limbah yang dihasilkan dari industri tenun umumnya mengandung senyawa kimia sintetis yang apabila tidak diolah dengan tepat dapat mencemari lingkungan. Limbah tekstil umumnya menggunakan pewarna azo, pewarna trifenilmetana, pewarna antrakuinon, pewarna nitrosed, pewarna xanthenes, pewarna ptalosianin, pewarna polimetin, dan pewarna indi-goids (Deng et al., 2020).

2.1.1 Karekateristik Limbah Industri Tenun

Pada umumnya, limbah cair yang dihasilkan dari industri tenun mengandung bahan organik yang tinggi, hal itu dapat ditunjukkan dengan konsentrasi BOD yang berasal dari beberapa proses pembuatan tekstil, yaitu proses pengilangan kanji (*desizing*), penggelantangan (*bleaching*), pelepasan *wax* (*scouring*), dan pencelupan (*dyeing*). Limbah cair yang dihasilkan dari industri tekstil memiliki karakteristik alkalinitas, padatan tersuspensi (*suspended solid*), kebutuhan oksigen biologi (*biological oxygen demand*/BOD) yang tinggi (Komarawidjaja, 2017).

Karakteristik limbah cair tekstil dapat digolongkan menjadi tiga golongan, yaitu:

1. Karakteristik Fisik

   Karakteristik fisik yang dimiliki oleh limbah cair tekstil meliputi warna, bau, suhu, dan padatan. Timbulnya warna pada limbah yang dihasilkan disebabkan karena adanya *Total Disolved Solid* (TDS), *Suspended Solid* (SS), dan zat-zat koloidal. Suhu yang terdapat dalam limbah cair tekstil akan mempengaruhi konsentrasi *Dissolved Oxygen* (DO) dalam air (Apriyani, 2018).
2. Karakteristik Biologi

Karakteristik biologis yang dimiliki oleh limbah cair tekstil meliputi mikroorganisme, jenis bakteri, dan zat toksin. Adanya mikroorganisme maupun bakteri yang terkandung dalam air limbah memiliki peran penting dalam mengevaluasi kualitas air (Apriyani, 2018).

3. Karakteristik Kimia

Karakterisitk kimia yang dimiliki oleh limbah cair tekstil meliputi pH, *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan *Dissolved Oxygen* (DO). Pada parameter COD, tingginya nilai COD dalam air limbah menandakan bahwa semakin buruk kualitas air tersebut. Sedangkan pada parameter DO menunjukkan oksigen terlarut yang paling penting untuk keberlangsungan hidup pada ekosistem air. Menurunnya kandungan oksigen dalam air yang menyebabkan kematian pada biota air dapat menjadi salah satu indikator tercemarnya air (Apriyani, 2018).

2.2 Biosorpsi

Biosorpsi merupakan salah satu pengolahan air limbah secara biologis yang memanfaatkan kinerja mikroorganisme dalam menyerap logam berat yang terkandung dalam air limbah. Mikroorganisme yang terbentuk dalam pengolahan limbah secara biologis memiliki kemampuan yang cukup efisien dalam menyerap logam dan menjadi perantara yang efisien dalam proses pemurnian. Maka dari itu, mekanisme biosorpsi sering menjadi teknologi alternatif atau pelengkap pengolahan limbah secara konvensional yang berpotensi menghilangkan kandungan logam berat dari limbah (Jadhav et al., 2010). Proses biosorpsi dalam menyerap logam berat dipengaruhi oleh adanya beberapa faktor, seperti pembersihan lumpur, pH, konsentrasi ion logam awal, berat adsorben, indeks pencampuran, waktu, dan suhu (Ajaykumar et al., 2009).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Yuanita et al., (2014), pada biosorpsi *remazol blue* dengan massa lumpur aktif sebesar 5 gram memberikan efisiensi terbesar, yaitu 6,83%. Sedangkan pada sampel remazol red dengan massa lumpur aktif sebesar 150 gram memberikan efisiensi 67,19%. Proses biosorpsi menggunakan lumpur aktif pada penelitian tersebut juga mampu menurunkan kadar COD pada sampel pewarna remazol red sebesar 22,22%.

2.3 Bakteri Endofit

Istilah kata endofit berasal dari bahasa Yunani kata ”endon” yang memiliki arti di dalam dan ”*phyton*” yang memiliki arti tanaman. Bakteri endofit dapat diartikan sebagai mikroorganisme hidup yang memiliki ukuran mikroskopis seperti jamur dan bakteri dan hidup di dalam jaringan tanaman dan bagian-bagian tanaman, seperti akar, daun, buah, dan batang. Bakteri endofit yang hidup diinangnya bersimbiosis mutualisme, dimana bakteri endofit tidak akan membuat kerusakan pada tanaman inang. Bakteri endofit yang berinteraksi dengan tanaman dan mikroorganisme lain dapat meningkatkan efisiensi remediasi tanah dan air yang tercemar (Sa’adah, 2020).

Simbiosis mutualisme tersebut terjadi ketika tanaman memberikan nutrisi kepada bakteri endofit, sedangkan bakteri endofit akan menurunkan tingkat toksisitas dan polutan seperti COD, BOD, ammonia, dan logam berat karena adanya pendegradasian oleh bakteri endofit. Bakteri endofit juga memiliki peranan penting dalam pertumbuhan tanaman di lingkungan yang tercemar, seperti pelarutan fosfor, produksi siderofor, dan fiksasi nitrogen (Shehzadi et al., 2016).

2.4 Pengolahan Biologis

2.4.1 Anaerobik

Pengolahan air limbah secara anaerobik dikenal sebagai metode yang efisien, terutama untuk limbah dengan konsentrasi polutan yang cukup tinggi, dengan keunggulan berupa produksi lumpur yang rendah (Metcalf & Eddy, 2014). Proses anaerobik berlangsung tanpa oksigen, dimana mikrorganisme mendegradasi bahan organik menjadi biogas (metana dan karbon dioksida) melalui serangkaian tahap biokimia (Speece, 1983). Tantangan utama dalam proses anaerobik adalah mempertahankan biomassa aktif terutama ketika berhadapan dengan laju alir yang tinggi atau perubahan beban organik yang konstan (Zieli´nski et al., 2023).

Sistem anaerobik dengan lumpur aktif mengacu pada reaktor anaerobik yang dilengkapi dengan unit pemisahan padatan (*clarifier*) diikuti dengan resirkulasi lumpur kembali ke reaktor utama. Tujuannya adalah untuk menjaga

konsentrasi biomassa yang tinggi, yang akan meningkatkan waktu retensi biomassa (SRT) dan efisiensi degradasi polutan, bahkan pada waktu retensi hidrolik (HRT) yang relatif singkat (Isma et al., 2014). Penerapan prinsip resirkulasi lumpur memunculkan berbgari konfigurasi reaktor anaerobik modern seperti *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) dan *Anaerobic Fluidized Bed Reactors* (AFBR), yang mampu mengoperasikan sistem pada beban organik volumetrik (OLR) tinggi dan waktu retensi hidrolik (HRT) singkat, sambil memastikan waktu retensi padatan (SRT) yang cukup lama untuk pertumbuhan bakteri metanogen yang lambat (Tomei & Garrido, 2024).

2.4.2 Aerobik

Pada dasarnya, prinsip proses pengolahan limbah secara aerobik adalah proses degradasi bahan organik oleh adanya aktivitas mikroba. Dimana, mikroba tersebut memerlukan oksigen yang berperan sebagai akseptor elektron utama. Dalam keadaan ini, mikroba akan mengoksidasi senyawa organik terlarut dan koloid untuk memperoleh energi bagi sintesis sel baru dan pemeliharaan sel. Proses degradasi pewarna secara aerobik dengan bantuan mikroba terbukti sebagai metode yang aman. Sistem pengolahan aerobik yang umumnya digunakan untuk mengolah zat warna pada suatu limbah cair adalah sistem lumpur aktif (Mukhtar et al., 2017).

Lumpur aktif (*activated sludge*) merupakan ekosistem mikroba buatan yang memiliki keragaman lebih dari 700 genus dan memiliki konsentrasi biomassa yang tinggi. Kumpulan bakteri yang sangat beragam pada ekosistem buatan tersebut dapat menyatukan diri dalam struktur heterogen flok lumpur aktif untuk menjamin kinerja stabil dan baik dalam pengolahan limbah biologis (T. Zhang et al., 2011). Pada sistem ini, mikroba tersuspensi dalam limbah diaerasi dan diberikan nutrisi yang mencukupi untuk mendegradasi polutan organik (Daniswara & Budiono, 2024).

2.5 Pengolahan Fisika

2.5.1 Polyethylen Glicol (PEG)

Polyethylene Glicol (PEG) menjadi salah satu sorotan dalam inovasi teknologi pengolahan air limbah tekstil. PEG merupakan molekul berukuran besar yang menyukai air (*hydrophilic macromolecule*). Adsorben jenis ini memiliki keunikan, yaitu PEG hanya sedikit berinteraksi dengan protein ketika ada banyak garam dan hampir tidak memengaruhi kerja protein jika kondisinya pas untuk memurnikan protein. PEG yang diubah bentuknya menjadi polimer monolit (seperti spons padat dengan pori-pori) dapat menjadi alat pemisah yang baik untuk molekul besar maupun kecil. Bahkan PEG dapat digunakan sebagai metode pemisahan, yaitu kromatografi cair fase terbalik (Rahayu et al., 2015).

Beberapa penelitian telah dilakukan, seperti penelitian yang dilakukan oleh Aryanti et al., (2014). Dalam penelitian tersebut menunjukkan bahwa penambahan PEG pada selulosa dari serbuk tongkol jagung berpengaruh terhadap adsorpsi ion logam timbal (Pb^{2+}). Adsorben tongkol jagung-PEG mampu menyerap Pb sebesar 0,19 mg/g dalam waktu 60 menit. Adanya kontak antara PEG dengan selulosa terbukti meningkatkan ukuran pori adsorben. Hal tersebut berpengaruh pada kapasitas penyerapan terhadap ion logam berat menjadi lebih baik (Aryanti et al., 2014).

Pada penelitian Tatinting et al., (2021), penambahan nanopartikel Fe_3O_4 dengan PEG dapat menyerap logam berat Cd dengan persentase penurunan terhadap konsentrasi awal larutan sebesar 99,54%. Sedangkan, pada nanopartikel Fe_3O_4 tanpa PEG menurunkan logam berat Cd sebesar 97,60%. Hal tersebut menunjukkan bahwa adanya penambahan PEG dapat meningkatkan efisiensi penghilangan logam berat dalam larutan air.

2.5.2 Silika

Silika adalah senyawa kimia yang tersusun atas atom silikon (Si) dan dua atom oksigen (O), sehingga menjadi oksida silikon dengan rumus kimia SiO_2 (silikon dioksida). Senyawa ini merupakan kompoen mineral terbanyak kedua di kerak bumi setelah oksigen. Secara alami, silika dapat ditemukan dalam dua bentuk utama, yaitu kristalin (contohnya kuarsa, tridimit, dan kristobalit) serta

amorfus (seperti opal, kaca silika, *vitreous silica* dan *diatomaceous earth*) (Purnawan et al., 2018). Silika bersifat hidrofilik dan memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi karena adanya gugus hidroksil permukaan, yaitu gugus silanol (-Si-OH). Hal tersebut membuat silika memiliki potensial untuk diaplikasikan sebagai adsorben (Elma et al., 2019).

Selain itu, silika juga memiliki karakteristik unggul berupa sifat non-konduktor serta stabilitas termal dan ketahanan oksidasi yang tinggi. Silika dapat diekstraksi dari berbagai sumber alam melalui metode ekstraksi cair-cair yang bertujuan untuk memisahkan komponen terlarut (Trianasari et al., 2017). berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Fadillah et al., (2025), terdapat efisiensi penurunan warna pada reaktor 3 berupa 50 cm pasir silika dengan konsentrasi 16,72 TCU, 34,28 TCU, dan 46,08 TCU sebesar 45,85%, 29,04%, dan 22,53%. Luas permukaan pasir silika yang kecil menjadi salah satu keterbatasan dalam menyisihkan kandungan warna, sehingga tidak dapat menyerap zat warna secara optimal.

2.5.3 Zeolit

Zeolit merupakan material berupa aluminosilikat terhidrasi yang terbentuk dari kerangka tiga dimensi bermuatan negatif, mengandung kation alkali atau alkali tanah yang dapat dipertukarkan, serta memiliki sifat asam dan pori berukuran molekuler. Secara struktural, terdapat tiga susunan komponen utama zeolit, yaitu kation yang dapat dipertukarkan, kerangka aluminosilikat yang kokoh, dan kandungan air yang bervariasi (Atikah, 2017). Zeolit perlu diaktivasi karena mengandung pengotor yang dapat menurunkan peforma dalam menyerap polutan organik. Aktivasi zeolit dapat dilakukan secara fisika atau kimia (Setyaningsih et al., 2017). Aktivasi zeolit secara fisik dapat dilakukan melalui proses pemanasan atau kalsinasi pada suhu antara 20°C-400°C selama beberapa jam. Proses pemanansan pada zeolit bertujuan untuk mengeluarkan air yang terdapat di dalam pori-pori zeloit berupa proses penguapan. Sedangkan, proses kimia pada aktivasi kimia dapat dilakukan dengan menambahkan larutan asam klorida (HCl), asam sulfat (H2SO4), asam fosfat (H3PO4), dan kalium

permanganat (KmnO4). Penambahan bahan kimia tersebut bertujuan untuk membersihkan permukaan pori-pori zeolit (Afifah et al., 2021).

Pada penelitian (Afifah et al., 2021), zeolit yang menjadi adsorben dalam mereduksi zat warna Methylen Blue (MB) diaktivasi secara kimia dengan penambahan KMnO4. Konsentrasi zat warna yang digunakan dalam penelitian tersebut, antara lain 1 ppm, 5 ppm, 10 ppm, 20 ppm, dan 30 ppm. Penelitian tersebut menunjukkan efisiensi penyisihan warna MB tertinggi berada pada konsentrasi 5 ppm sebesar 85,49%.

2.6 Logam Berat

Kegiatan industri tekstil dapat menghasilkan logam berat, seperti Arsen (As), Kadmium (Cd), Krom (Cr), Timbal (Pb), Tembaga (Cu), dan Seng (Zn). Kandungan logam berat tersebut dapat dihasilkan dari proses pewarnaan kain dalam pembuatan kain tenun. Penyebab adanya logam berat dalam zat warna yang digunakan dalam proses pewarnaan kain tenun, yaitu logam berat digunakan sebagai katalis dalam proses pembuatan zat warna dan beberapa jenis zat warna mengandung logam sebagai bagian dari struktur molekulnya (Komarawidjaja, 2017).

Secara alami, logam berat terbagi menjadi dua jenis, yaitu logam berat esensial dan logam berat non-esensial. Logam berat esensial, seperti Zn, Cu, Fe, Co, Mn, dan Ni memiliki peran penting dalam metabolisme tubuh dalam jumlah kecil. Sementara, logam berat non-esensial meliputi Hg, Cd, Pb, dan Cr dapat bersifat toksik dalam metabolisme tubuh. Ketika logam berat masuk ke dalam badan air yang dimanfaatkan untuk pertanian dan irigasi, dampak negatif terhadap kesehatan masyarakat dan lingkungan dapat terjadi dalam jangka panjang. Hal ini disebabkan oleh sifat logam berat yang tidak dapat terurai secara alami, sehingga cenderung terakumulasi dalam tubuh organisme atau mengalami biomagnifikasi melalui rantai makanan. Jika konsentrasinya melebihi ambang batas yang dapat ditoleransi, logam berat dapat menyebabkan keracunan pada makhluk hidup (Priantoro et al., 2025).

2.7 Warna

Pada proses pewarnaan pada industri tenun, umumnya pengrajin tenun troso menggunakan pewarna sintetis seperti naptol, direct, sulfur, dan lain-lain. Proses pewarnaan kain tenun dilakukan dengan mencelupkan benang ke dalam pewarna. Proses pencelupan tersebut akan dilakukan berulang kali, sehingga proses ini dapat menimbulkan potensi pencemara seperti penurunan kualitas air. Penurunan kualitas air ditandai dengan peningkatan kekeruhan yang dapat disebabkan oleh pencemaran zat warna yang menghambat penetrasi cahaya ke dalam perairan serta berpotensi menimbulkan efek mutagenik dan karsinogenik. Limbah cair dari proses pencelupan zat warna reaktif umumnya memiliki pH tinggi (>9), berwarna gelap, dan mengandung COD yang cukup tinggi. Hal ini terjadi karena dalam proses pencelupan digunakan alkali untuk fiksasi warna, sehingga meningkatkan pH larutan. Warna pekat pada limbah cair disebabkan oleh ketidaksempurnaan fiksasi zat warna pada serat, sementara tingginya COD berasal dari kandungan zat organik dalam limbah, seperti sisa zat warna, zat pembasah, dan bahan tambahan lainnya (Sa'adah, 2020).

Zat pewarna dalam limbah tenun merupakan salah satu faktor yang meningkatkan tingkat bahaya limbah tersebut. Pewarna azo yang termasuk dalam kategori pewarna sintetik dengan gugus azo (R-N=N-R) digunakan hingga 80% dalam proses pewarnaan tekstil. Selain itu, pewarna ini mengandung gugus kromofor dan aukrosom yang berperan penting dalam meningkatkan daya ikat warna pada bahan tekstil. Keberadaan kedua gugus tersebut juga menyebabkan sulitnya menghilangkan parameter warna dalam air limbah tenun (Sudha et al., 2014).

2.8 Penelitian Terdahulu

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Penulis	Teknologi	Peforma
1.	(Manavi et al., 2017)	Anaerobik-aerobik	Warna: 73% COD: 68%
2.	(Kozak et al., 2021)	Kombinasi *anaerobic moving bed biofilm reactor* (AnMBBR) dan *powdered activated*	Warna: 95% DOC: 96%

		carbon-aerobic membrane reactor (PAC-AeMBR)	
3.	(Aragaw et al., 2024)	Anaerobik-aerobik dengan menggunakan konsorsium mikroba alkali yang berasal dari danau soda	Warna: 97% COD: 93% TKN: 96%
4.	(Saleem et al., 2021)	Anaerobik-aerobik hibrida dengan menggunakan reaktor *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) skala laboratorium dengan reaktor *Sequencing Batch Reactor* (SBR)	Warna: 94% TKN: 93% COD: 98% Orthophosphate phosporus (PO_4^{3-}): 89%
5.	(Bogale et al., 2024)	Anaerobik-aerobik	Warna:100% COD: 90% TKN: 80%
6.	(Chamidah et al., 2023)	Adsorpsi zeolit	Kromium (Cr): 74,63%
7.	(Larasati et al., 2024)	Adsorpsi zeolit	Fe: 62,72% Cr: 42,02%
8.	(Tatinting et al., 2021)	Adsorpsi PEG	Cd: 99,54%

Berbagai penelitian terkait pengolahan limbah cair, khususnya limbah tenun telah banyak dilakukan dengan berbagai teknologi termasuk sistem konvensional lumpur aktif (*activated sludge*). Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada efisiensi removal pada beberapa parameter pencemar yang umum, seperti *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biochemical Oxygen demand* (BOD), *Total Suspended Solid* (TSS), dan warna menggunakan satu jenis sistem pengolahan, baik secara biologis maupun kombinasi fisik-kimia. Namun, studi yang secara langsung membandingkan kinerja pengolahan biologis dan fisika dengan kombinasi HRT 4 hari dan variasi konsentrasi limbah cair tenun sebesar 20% dan 50% dalam konteks pengolahan warna dan logam berat limbah masih relatif terbatas. Dalam penelitian ini juga akan dilakukan pengolahan dengan kombinasi sistem biologis berupa anaerobik-aerobik dan *clarifier*, serta pengolahan fisika berupa adsorpsi menggunakan media zeolit, silika, dan PEG.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi

Penelitian ini dilaksanakan di *Workshop* Universitas Islam Indonesia dan pengujian dilakukan di Laboratorium Bioteknologi dan Laboratorium Kualitas Air, Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia. Penelitian ini dimulai pada bulan Januari 2025 hingga Agustus 2025. Secara umum alur tahapan kegiatan yang akan dilakukan dapat dilihat pada gambar 3.3.

3.2 Sampling Air Limbah

Air limbah yang digunakan berasal dari limbah tenun yang kemudian akan diuji dengan konsentrasi 20% dan 50%. Air limbah akan diambil secara langsung dari air buangan hasil dari proses pembuatan kain tenun Troso di salah satu industry tenun skala kecil di Desa Troso, Kabupaten Jepara. Metode pengambilan sampel limbah cair tenun mengacu pada SNI 6989.59:2008 dengan menggunakan metode *grab sampling*.



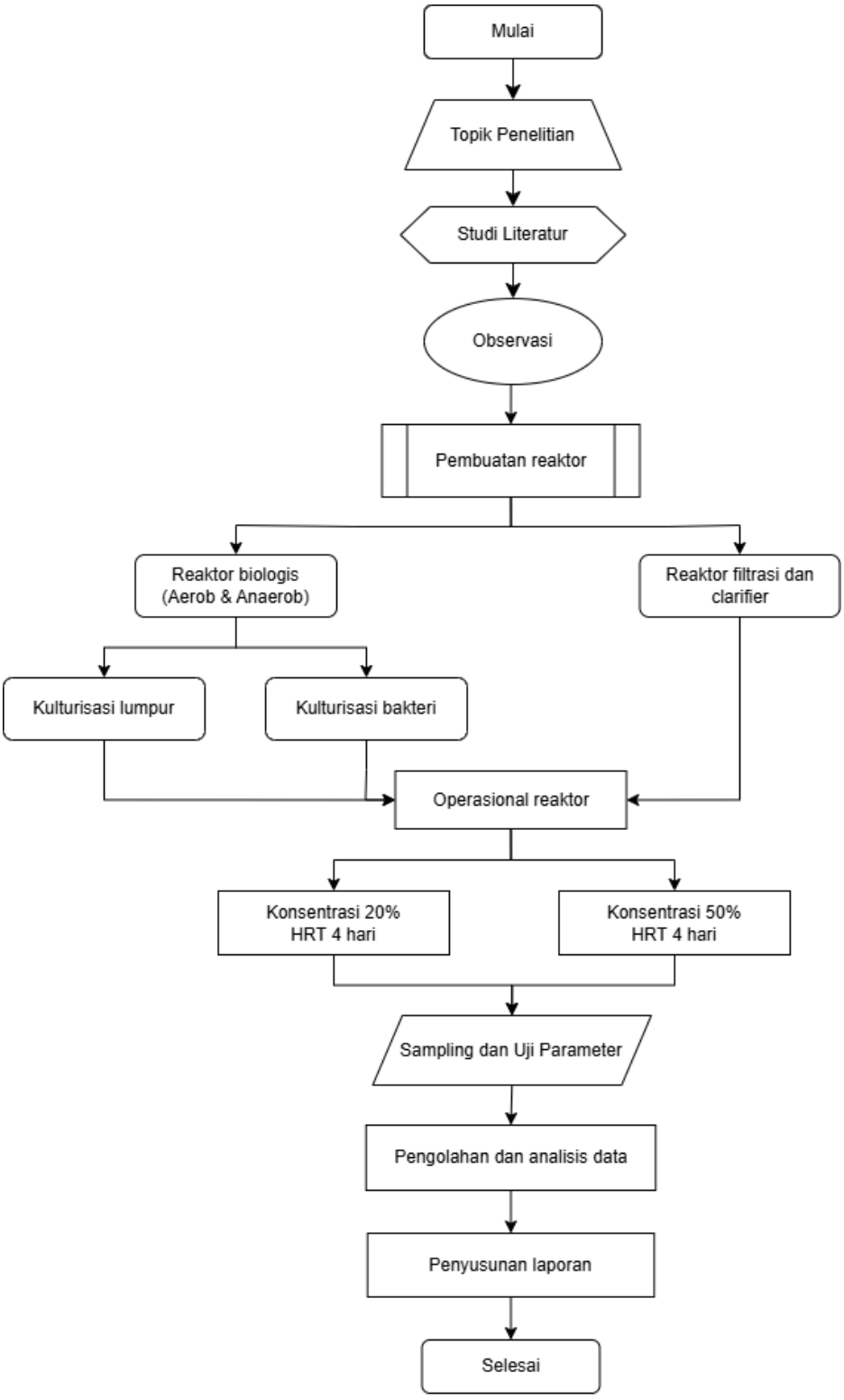
Gambar 3. 1 Lokasi Sampling Limbah Tenun



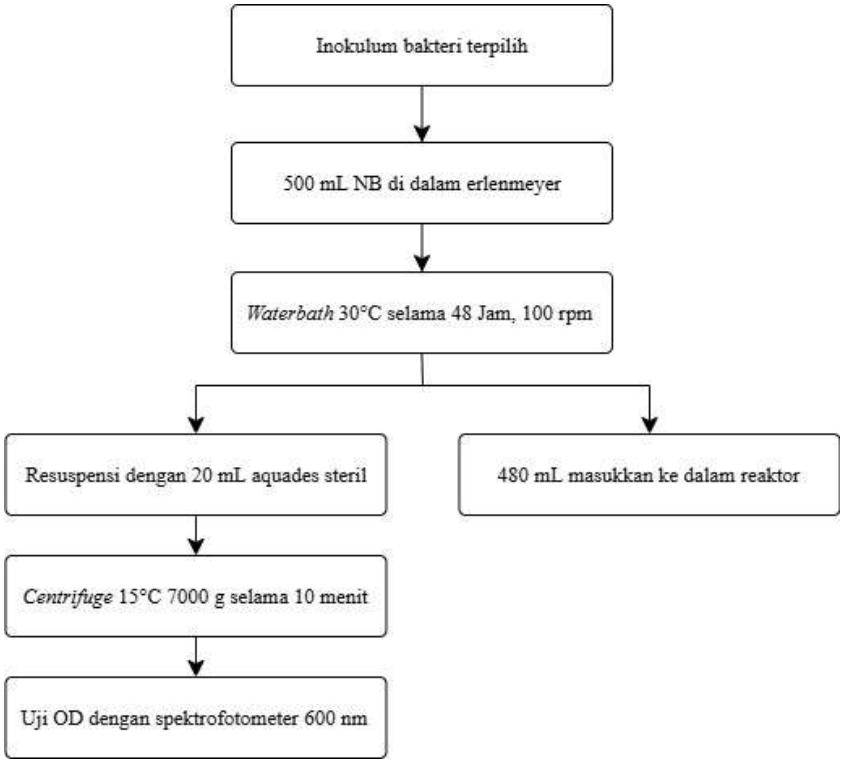
Gambar 3. 2 Proses Pewarnaan Tenun

3.3 Kulturisasi Bakteri Endofit

Bakteri yang telah teridentifikasi pada penelitian sebelumnya (Fajri et al., 2025), digunakan pada penelitian ini. Bakteri *Bacillus cereus* tersebut dimasukkan ke dalam 600 mL *Nutrient Broth* (NB) yang steril di dalam erlenmeyer. Tabung erlenmeyer yang telah berisi media kultur dan bakteri dimasukkan ke dalam waterbath dengan suhu 30°C dan didiamkan selama 48 jam dengan kecepatan pengadukan 100 rpm. Setelah didiamkan selama 48 jam, kultur bakteri dimasukkan ke dalam reaktor pada masa aklimatisai lumpur. Untuk lumpur yang digunakan berasal dari unit *Conventional Activated Sludge* (CAS) di unit IPAL Kawasan Industri Terpadu Batang (KITB). Diagram alir kulturisasi bakteri dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3. 3 Alur Tahapan Kegiatan

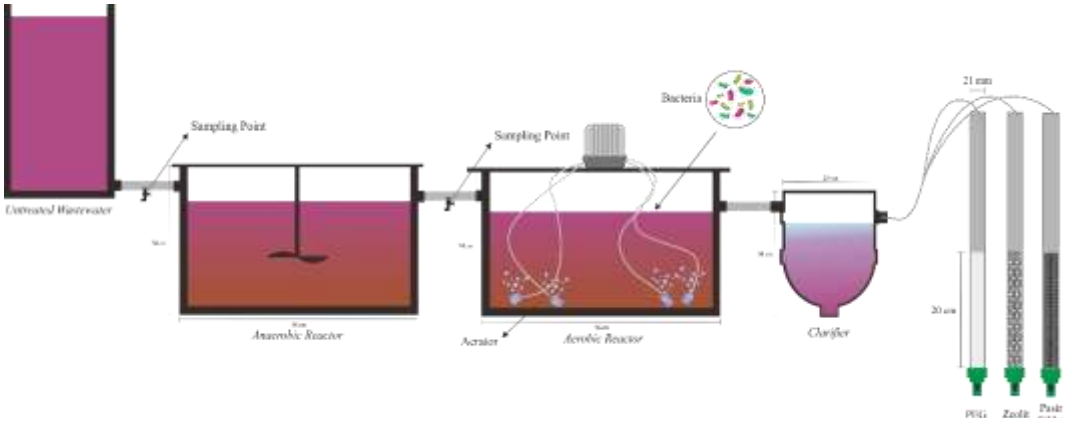


Gambar 3. 4 Diagram Alir Kulturisasi Bakteri Endofit

3.4 Pengoperasian Reaktor

3.4.1 Susunan Reaktor

Reaktor tersusun dari bak pengumpul, bak anaerobik, bak aerobik, bak *clarifier*, dan reaktor filtrasi. Bak pengumpul, bak anaerobik, dan bak aerobik terbuat dari box kontainer berukuran 20 L dan bak *clarifier* terbuat dari galon bekas air mineral berukuran 5 L. Posisi bak *clarifier* dibuat terbalik supaya lumpur (sludge) yang terdapat dalam air limbah dapat terpisah dengan air limbah dan mengendap dibagian bawah. Reaktor adsorpsi dibuat menggunakan pipa akrilik dengan panjang 100 cm dan diameter 25 mm. Gambar susunan reaktor dapat dilihat pada gambar 3.3 dan 3.4.



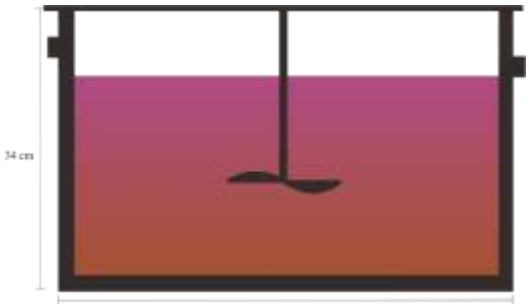
Gambar 3. 6 Susunan Reaktor Pengolahan Air Limbah Tenun



Gambar 3. 5 Susunan Reaktor Pengolahan Air Limbah Tenun

3.4.2 Persiapan Pembuatan Reaktor Anaerobik

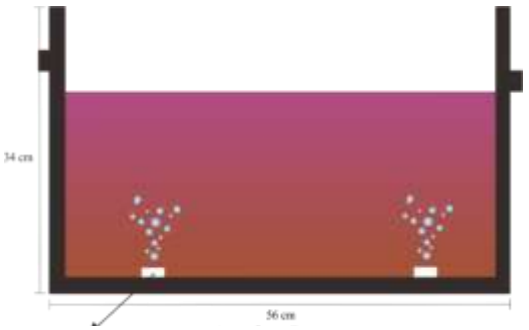
Bak anaerobik dibuat menggunakan box kontainer dengan 37 cm × 23 cm × 23,5 cm. Bak ini nantinya akan diisi dengan air limbah tenun dengan tambahan *sludge* atau lumpur. Bak ini terdapat pengaduk yang berfungsi untuk mengaduk *sludge* supaya tidak mengendap di satu titik. Volume air yang terdapat pada reaktor sebesar 9,7 L. Pada reaktor anaerob diaduk menggunakan *electric overhead stirrer* dengan kecepatan 450 rpm. Pada bak ini terdapat titik sampling dan akan disambungkan ke bak selanjutnya. Berikut ini merupakan desain dan variasi reaktor anaerobik dapat dilihat pada gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Reaktor Anaerobik

3.4.3 Persiapan Pembuatan Reaktor Aerobik

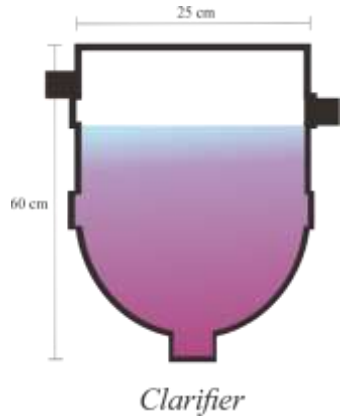
Bak aerobik dibuat menggunakan box kontainer dengan dimensi 37 cm × 23 cm × 23,5 liter. Pada bak ini ditambahkan aerator dengan *flowrate* sebesar 5,2 L/menit. Pembubuhan aerasi pada reaktor aerobik bertujuan untuk meningkatkan kadar oksigen pada air limbah dan adanya proses oksidasi pada air limbah yang lebih tinggi dari proses sebelumnya. Volume air yang terdapat pada reaktor sebesar 9,7 L. Bak aerobik berisi air limbah dan *sludge* dari bak anaerobik. Berikut merupakan desain dan variasi reaktor aerobik yang dapat dilihat pada gambar 3.8.



Gambar 3. 8 Reaktor Aerobik

3.4.4 Persiapan Pembuatan Reaktor *Clarifier*

Bak *clarifier* dibuat menggunakan galon plastik dengan kapasitas 5 L yang berisi air limbah dan *sludge* dari bak aerobik. Bagian bawah galon plastik tersebut dipotong, kemudian posisi galon akan dibalik agar *sludge* yang terdapat pada bak *clarifier* mengendap di bagian bawah reaktor dan memisahkan antara *sludge* dengan air limbah tenun. *Clarifier* berfungsi untuk memisahkan padatan (*sludge*) melalui proses sedimentasi. *Sludge* yang telah mengendap di dasar reaktor clarifier dikembalikan ke reaktor anaerobik untuk diolah kembali. Air limbah tenun yang telah masuk ke dalam reaktor *clarifier* akan diolah ke tahap berikutnya, yaitu pengolahan adsorpsi Berikut merupakan desain dan variasi reaktor *clarifier* yang dapat dilihat pada gambar 3.9.



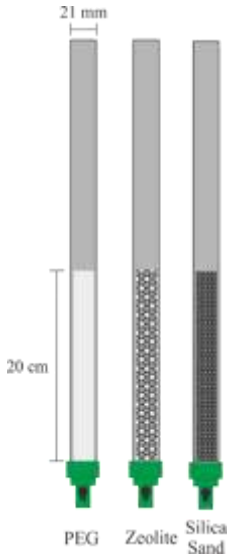
Gambar 3. 9 Reaktor *Clarifier*

3.4.5 Persiapan Pembuatan Reaktor Adsorpsi

Reaktor adsorpsi dibuat menggunakan pipa yang terbuat dari bahan akrilik dengan diameter 21 × 25 mm dan panjang pipa 100 cm. Terdapat 3 buah pipa yang digunakan dengan bahan adsorben yang berbeda-beda setiap pipanya. Bahan adsorben tersebut berupa zeolit, pasir silika, dan *Polyethylen Glicol* (PEG). Media zeolit dan pasir silika diaktivasi terlebih dahulu sebelum digunakan. Kedua media tersebut diaktivasi secara fisika dengan dipanaskan menggunakan *furnace* selama 30 menit dengan suhu 550°C. Media PEG yang telah dibuat dari penelitian sebelumnya (Hakim et al., 2025), digunakan pada penelitian ini.

Air yang masuk ke dalam reaktor adsorpsi berasal dari reaktor clarifier, dimana pada ke-3 reaktor adsorpsi akan menyerap sludge yang masih terbawa dari

reaktor *clarifier* dan mengurangi beban warna dan logam berat. Berikut merupakan desian dan variasi reaktor filtrasi yang dapat dilihat pada gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Reaktor Filtrasi

3.5 Aklimatisasi Lumpur Aktif (*Activated Sludge*)

Setelah pembuatan reaktor dilakukan, lumpur aktif dikulturisasi selama 27 hari pada reaktor anaerobik dan aerobik. Aklimatisasi lumpur aktif menggunakan lumpur yang berasal dari IPAL Kawasan Industri Terpadu Batang, Jawa Tengah. Lumpur dari IPAL Batang dimasukkan ke dalam reaktor anaerobik dan aerobik sebanyak 2,5 L. Kemudian, aklimatisasi dilanjutkan dengan memasukkan air limbah dari IPAL komunal Tirto Mili yang terletak di Jongkang, Sariharjo, Ngaglik, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Aklimatisasi air limbah IPAL komunal Tirto Mili dimulai pada tanggal 4 Juni 2025 hingga 30 Juni 2025. Air limbah tersebut diambil dari *effluent* yang telah mengalami proses pengolahan dengan sistem *Rotating Biological Contactor* (RBC). Aklimatisasi air limbah menggunakan limbah yang berasal dari IPAL komunal Tirto Mili bertujuan sebagai adaptasi bagi lumpur aktif sebelum dimasukkan air limbah tenun dengan polutan organik yang tinggi. Proses aklimatisasi juga bertujuan untuk pertumbuhan sludge dan pembentukan flok-flok. Selama proses aklimatisasi, lumpur aktif diberikan gula dan urea dengan perbandingan 10:1 untuk setiap 30 L air limbah. Penambahan gula dan urea berfungsi untuk memberikan kandungan organik yang berfungsi sebagai nutrisi untuk bakteri. Tolak ukur keberhasilan

aklimatisasi pada penelitian ini diukur dari operasional sistem pengolahan biologis, dimana kenaikan *Sludge Volume* 30 (SV30) dipantau secara berkala. Apabila SV30 telah mencapai 80 mL dalam kondisi stabil, maka aklimatisasi dapat dikatakan berhasil. Hal tersebut dapat menjadi salah satu tanda bagi komunitas mikroorganisme yang sudah dapat beradaptasi dan dapat berkembang secara optimal (Golalipour et al., 2010).

3.6 Running Reaktor, Sampling Reaktor, dan Pengujian

Running reaktor dengan air limbah tenun konsentrasi 20% dimulai pada 1 Juli 2025. Kemudian, dilanjutkan dengan running reaktor air limbah tenun konsentrasi 50% yang dimulai pada 11 Juli 2025 hingga 25 Juli 2025. Untuk HRT 4 hari membutuhkan debit sebesar 2,42 L/hari air limbah setiap harinya. Maka, dalam penelitian ini membutuhkan air limbah tenun sebanyak 12,1 L untuk konsentrasi 20% dan 45,98 L untuk konsentrasi 50%. Pada bak pengumpul terdapat pompa air ukuran 1×3 (mm) dengan *flowrate* 2-17 mL/menit. Pompa tersebut berfungsi untuk mengalirkan air limbah dari bak pengumpul ke bak anerobik dengan debit 3,2 L/hari. Pada reaktor adsorpsi menggunakan pompa peristaltik 24v dengan debit 20,6 L/hari untuk mengalirkan air limbah tenun dari reaktor *clarifier*. Pengoperasian reaktor filtrasi dilakukan selama 2 jam, kemudian pompa dimatikan. Konsentrasi 20% dan 50% digunakan sebagai rentang skenario penelitian dari konsentrasi rendah dan tinggi untuk mengukur dan membandingkan kinerja rangkaian pengolahan sehingga hasil dari penelitian lebih menggambarkan kondisi nyata di lapangan. Selain itu, variasi konsentrasi 20% dan 50% berfungsi untuk menganalisis pengaruh beban pengolahan biologis dan filtrasi.

Sampling reaktor dilakukan pada 6 titik sampling, yaitu bak pengumpul, sampling reaktor anaerobik dilakukan pada kran *output* antara reaktor anaerobik-aerobik, kran *output clarifier* untuk sampling reaktor aerobik, dan pada masing-massing pipa adsorpsi (zeolit, silika, dan PEG). Sampel yang diambil pada reaktor *clarifier* bertujuan untuk memisahkan air dengan lumpur yang sudah selesai diproses pada reaktor aerobik.

Pada saat pengujian dilakukan sampling sebanyak 5 kali dan dilakukan pada hari ke 0, 7, 14, 21, dan 28. Air limbah dilakukan pengujian terlebih dahulu sebelum dimasukkan ke dalam reaktor. Sampling dilakukan setiap 1 minggu sekali selama 4 minggu. Sampling dilakukan dengan HRT 4 hari dengan masing-masing konsentrasi limbah sebesar 20% dan 50%. Total sampel yang akan diuji sebanyak 48 sampel warna dan 8 sampel logam berat. Pengujian kandungan warna pada sampel air limbah mengacu pada SNI 6989.80.2011. Pengujian air limbah dilakukan dengan menggunakan spektrofotometri dengan panjang gelombang 465 nm. Pengujian kandungan logam berat Pb dan Cd mengacu pada SNI 6989.84:2019 menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA).

3.7 Analisis Data

Pada penelitian ini dilakukan analisis mengenai konsentrasi pada air limbah tenun dengan kadar 20% dan 50%. Analisis dalam penelitian ini dilakukan dengan cara menghitung konsentrasi awal warna pada limbah dan dilakukan perbandingan dengan konsentrasi akhir warna yang telah diuji pada reaktor. Berikut merupakan rumus efisiensi removal yang akan digunakan:

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

Dimana:

Y : Efisiensi removal

A : Konsentrasi warna sebelum diolah

B : Konsentrasi warna setelah diolah

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Limbah Tenun

Pada penelitian ini, pengolahan air limbah tenun dilakukan secara *continous* dengan variasi HRT 4 hari. Pengolahan limbah tenun dilakukan selama 28 hari karena dengan rentang waktu tersebut dapat diamati fase adaptasi, pertumbuhan, dan stabilisasi dari rangkaian pengolahan terutama pada mikroorganisme yang terlibat pada proses penghilangan pencemar. Karakteristik air limbah tenun yang diuji terdiri dari parameter warna, logam berat berupa timbal (Pb) dan kadmium (Cd), dan derajat keasaman (pH). Penelitian ini mengacu pada baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah. Baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan industri tekstil yang tercantum dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Tekstil

Parameter	Kadar Paling Tinggi (mg/L)	Beban Pencemaran Paling Tinggi (kg/ton)
BOD_5	60	6
COD	150	15
TSS	50	5
Fenol Total	0,5	0,05
Krom Total	1,0	0,1
Amonia Total (NH_3-N)	8,0	0,8
Sulfida (sebagai S)	0,3	0,03
Minyak dan Lemak	3,0	0,3
pH	6,0 – 9,0	
Debit Limbah Paling Tinggi	100 m^3/ton produk tekstil	

Sumber: PermenLHK Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019

Baku mutu air limbah tekstil logam berat Pb dan Cd tercantum dalam Lampiran XLVII Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah yang tergolong dalam usaha dan/atau kegiatan yang belum memiliki baku mutu air limbah yang ditetapkan. Adapun baku mutu air limbah tekstil untuk parameter Pb dan Cd dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Baku Mutu Logam Berat Pb dan Cd pada Lampiran XLVII PERMEN LHK No. 5 Tahun 2014

Parameter	Satuan	Baku Mutu
Timbal (Pb)	mg/L	1
Cadmium (Cd)	mg/L	0,1

Hasil pengujian dilakukan pada variasi konsentrasi limbah 20% dan 50% dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Karakteristik Parameter Warna dan Logam Berat (Pb dan Cd) Air Limbah Tenun

Konsentrasi Air Limbah Tenun	Warna (Pt-Co)	Logam (mg/L)		pH
		Pb	Cd	
20%	135,58	0,005 ± 0,254	0,142 ± 0,017	5,97
50%	157,59	1,078 ± 0,555	0,142 ± 0,028	8,45

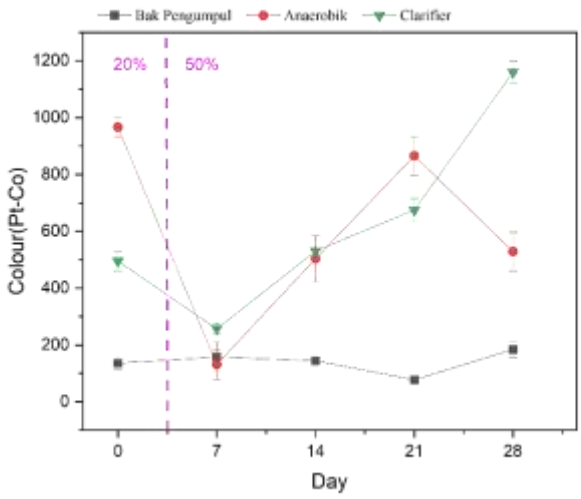
Karakteristik air limbah tenun dengan variasi konsentrasi 20% dan 50% masih berada di atas ambang baku mutu yang telah ditentukan. Hal tersebut dapat menyebabkan pencemaran lingkungan apabila air limbah tersebut dibuang secara langsung ke lingkungan tanpa adanya pengolahan untuk mereduksi konsentrasi pada tiap parameter.

4.2 Kinerja Sistem Pengolahan Biologis dalam Penyisihan Warna dan Logam Berat

4.2.1 Penurunan Konsentrasi Warna

Berdasarkan konsep pengolahan anaerobik-aerobik terpadu, pewarna azo harus dihilangkan dari fase air melalui reduksi anaerobik kemudian diikuti dengan reduksi aerobik dari amina aromatik yang merupakan komponen pewarna tersebut. Adanya waktu retensi yang panjang pada proses anaerobik menunjukkan bahwa pengurangan banyak pewarna azo merupakan proses yang relatif lambat. Pada umumnya, peningkatan efisiensi penghilangan warna pada proses anaerobik diamati pada HRT yang lebih tinggi, konsentrasi biomassa yang lebih tinggi, konsentrasi substrat primer yang lebih tinggi, dan konsentrasi pewarna yang lebih rendah (Zee & Villaverde, 2005).

Data hasil pengujian kadar warna pada limbah cair tenun dengan konsentrasi 20% dan 50% selama pengolahan masing-masing reaktor biologis 21 hari dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Grafik Hasil Pengujian Warna pada Pengolahan Biologis Limbah Tenun Konsentrasi 20% dan 50%.

Pengujian parameter warna dilakukan pada *effluent* setiap reaktor untuk melihat adanya perubahan warna pada tiap minggunya. Penelitian ini menggunakan konsentrasi air limbah tenun 20% dan 50%. Konsentrasi 20% digunakan pada minggu pertama sebagai penyesuaian reaktor biologis terhadap limbah tenun karena apabila dilakukan pengujian dengan konsentrasi tinggi secara langsung, dapat mempengaruhi metabolisme mikroorganisme yang tidak tahan terhadap perubahan komponen air limbah (Alinsafi et al, 2016). Pada minggu pertama konsentrasi limbah 20%, nilai warna pada bak pengumpul sebagai sumber awal limbah berada pada 135,58 Pt-Co. Lebih rendah dibandingkan dengan reaktor lainnya dengan nilai tertinggi, yaitu pada reaktor anaerobik sebesar 966,35 Pt.Co.

Pada hari ke-7 dengan konsentrasi limbah tenun 50%, kadar warna tertinggi pada proses pengolahan biologis terdapat pada reaktor *clarifier* dengan kadar warna sebesar 256,73 Pt-Co dan kadar warna terendah berada pada reaktor anaerobik sebesar 130,77 Pt-Co. Kenaikan kadar warna pada reaktor *clarifier* dapat disebabkan karena penambahan gula dan urea sebagai sumber makanan. Gula dan urea tersebut berfungsi sebagai asupan nutrisi bagi bakteri endofit yang

terdapat pada proses pengolahan biologis, serta juga dapat mengendapkan lumpur yang tersuspensi dalam air limbah (Sunarti et al., 2014; Daniswara & Budiono, 2024). Pada penelitian (Mukhtar et al., 2017) menyatakan bahwa jika pembubuhan nutrisi dikurangi, akan berdampak pada penurunan kinerja bakteri dalam mendegradasi polutan dalam air limbah.

Pada hari ke-14 dengan konsentrasi limbah tenun 50% kadar warna tertinggi berada pada reaktor *clarifier* sebesar 530,77 Pt-Co dan kadar warna terendah berada pada reaktor bak pengumpul sebesar 144,23 Pt-Co. Kadar warna pada reaktor anaerobik sebesar 503,85 Pt-Co. Hasil tersebut menunjukkan adanya peningkatan kadar warna dari hari ke-0 pada pengolahan biologis. Peningkatan kadar warna pada air limbah tenun juga terjadi pada pengujian hari ke-21. Konsentrasi warna limbah tenun tertinggi berada pada reaktor anaerobik sebesar 865,38 Pt-Co dan konsentrasi warna terendah berada pada reaktor bak pengumpul sebesar 76,92 Pt-Co. Pada reaktor *clarifier*, konsentrasi warna sebesar 675,00 Pt-Co.

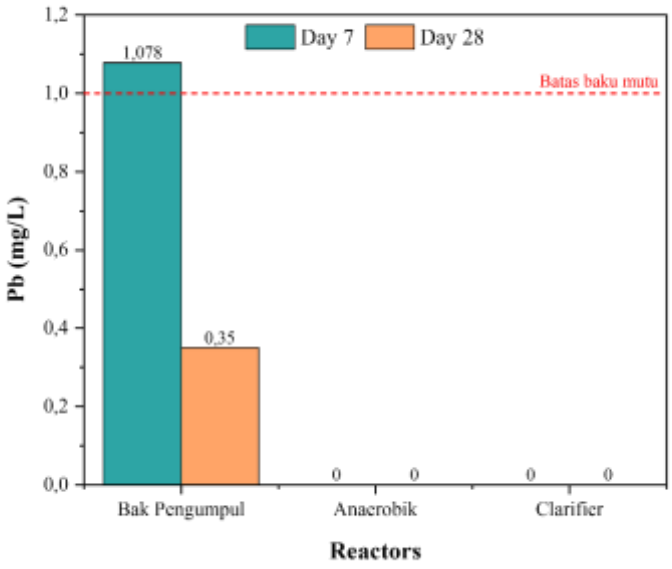
Pada hari ke-28 dengan konsentrasi limbah tenun 50%, konsentrasi warna terus meningkat. Konsentrasi warna tertinggi dan terendah berturut-turut berada pada reaktor *clarifier* dan bak pengumpul sebesar 1159,62 Pt-Co dan184,62 Pt-Co. Peningkatan konsentrasi warna juga ditunjukkan pada reaktor anaerobik dengan konsentrasi warna sebesar 528,85 Pt-Co.

Peningkatan warna pada proses biologis setiap minggunya dapat disebabkan mekanisme adsorpsi pada *sludge* dan diperparah dengan komposisi warna yang kompleks, seperti adanya campuran bahan pewarna serta bahan kimia organik dan anorganik lainnya seperti surfaktan, logam berat, dam garam. Sehingga menghambat aktivitas mikroba dan memperlambat proses secara keseluruhan. Selain itu, struktur pewarna pada limbah tekstil sangat mungkin tahan terhadap biodegradasi, sehingga memerlukan waktu yang lebih lama (Alinsafi et al., 2006). Peningkatan kadar warna pada bak penampung disebabkan karena adanya endapan pewarna yang tidak terlarut dengan air limbah tenun. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Susilo & Amalia (2022), dimana nilai kekeruhan berbanding lurus dengan penyisihan warna sehingga semakin tinggi nilai kekeruhan maka akan semakin tinggi nilai penyisihan warna

pada limbah. Oleh karena itu, pada hari ke-28 diakhir pengujian padatan yang mengendap semakin banyak sehingga konsentrasi warna terakumulasi.

4.2.2 Penurunan Konsentrasi Logam Berat (Pb dan Cd)

Kualitas air yang semakin menurun dapat terjadi karena adanya kandungan logam berat bersifat *toxic* dan karsinogenik yang larut dalam air. Pada penelitian ini, grafik data hasil pengujian kadar Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) pada air limbah tenun konsentrasi 20% dan 50% dapat dilihat pada gambar 4.2 dan 4.3.

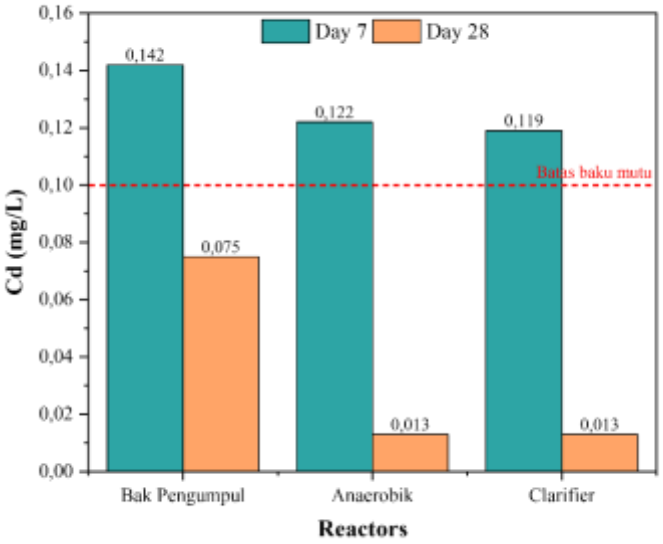


Gambar 4. 2 Grafik Konsentrasi Pb Pada Pengolahan Biologis
Sumber baku mutu: PermenLHK Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 Lampiran XLVII

Pada konsentrasi air limbah 20%, kadar Pb pada reaktor bak penampung dan *clarifier* sebesar 0,005 mg/L dan 0,004 mg/L. Hasil pengujian tersebut menunjukkan adanya penurunan karena terdapat bantuan kinerja dari mikroba yang tumbuh secara alami pada proses pengolahan biologis. Protein dan polisakarida yang terdapat pada dinding sel mikroba tersebut akan menyerap logam berat selama proses pengolahan berlangsung (Ramadhini et al., 2023).

Kadar Pb tertinggi ditunjukkan pada reaktor bak pengumpul dengan konsentrasi air limbah tenun 50% pada awal pengujian, sebesar 1,078 mg/L. Namun, pada pengolahan selanjutnya, yaitu reaktor anaerobik dan *clarifier* menunjukkan hasil pembacaan Pb menggunakan AAS menjadi minus. Nilai yang

minus tersebut menunjukkan bahwa kadar Pb berada di bawah batas deteksi (*Limit of Detection*/LOD) dari alat AAS, dimana nilai LOD pada alat AAS yang digunakan untuk menguji logam berat berada pada nilai 0,05 mg/L. Hal tersebut menunjukkan bahwa alat AAS yang digunakan tidak mampu mendeteksi keberadaan Pb air limbah tenun. Pada akhir pengujian dengan konsentrasi limbah 50%, menunjukkan hasil yang semakin menurun pada bak pengumpul, yaitu sebesar 0,312 mg/L. Hal yang sama juga terjadi pada akhir pengujian, dimana kadar Pb pada reaktor anaerobik dan *clarifier* tidak terbaca oleh AAS.



Gambar 4. 3 Grafik Konsentrasi Cd Pada Pengolahan Biologis
Sumber baku mutu: PermenLHK Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 Lampiran XLVII

Pada konsentrasi air limbah tenun 20%, kadar Cd pada bak pengumpul dan *clarifier* sebesar 0,142 mg/L dan 0,003 mg/L. Penurunan kadar Cd tersebut juga dapat disebabkan karena adanya kinerja mikroba dalam mendegradasi logam berat. Pada konsentrasi air limbah 50% dengan pengujian awal, kadar Cd pada reaktor bak pengumpul, anaerobik, dan *clarifier* secara berturut-turut sebesar 0,142 mg/L, 0,123 mg/L, 0,120 mg/L. Hasil tersebut menunjukkan adanya penurunan kadar logam Cd yang konsisten.

Hasil menunjukkan adanya perbedaan efektivitas yang jelas antara penyisihan logam berat timbal (Pb) dan kadmium (Cd) dalam sistem pengolahan biologis. Pada logam Pb, reaktor anaerob dan *clarifier* bekerja efektif, dilihat dari

konsentrasinya yang tidak terdeteksi atau berada pada *limit of detection* setelah pengolahan. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme biologis seperti biosorpsi dan bioakumulasi oleh mikrooganisme sangat efisien untuk menghilangkan Pb (Wierzba, 2015). Efektivitas yang tinggi ini dapat dijelaskan oleh keterkaitan mikroorganisme yang lebih kuat terhadap Pb. Sifat fisikokimia Pb, seperti elektronegativitas yang lebih tinggi dan ukuran ion yang lebih besar dibandingkan Cd, menyebabkan lebih mudah terikat pada gugus-gugus aktif di permukaan sel mikroba (Wang & Chen, 2009). Prinsip tersebut menegaskan bahwa logam dengan sifat elektrokimia tertentu lebih mudah untuk terikat pada biomassa, yang merupakan dasar dari teknologi biosorpsi (Volesky, 2001).

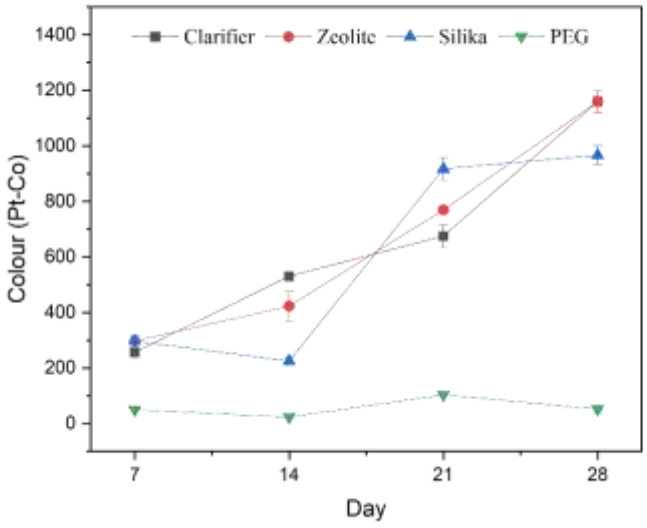
Penghilangan pada logam Cd pada pengolahan biologis kurang efektif. Meskipun konsentrasinya berhasil diturunkan secara signifikan (0,123 mg/L ke 0,014 mg/L), Cd masih terdeteksi di akhir proses pengolahan. Hasil ini mendukung dugaan bahwa mikroorganisme dalam reaktor memiliki keterkaitan yang lebih rendah dengan logam Cd. Berbagai penelitian pada biomassa yang berbeda secara konsisten menunjukkan urutan afinitas dimana Pb lebih mudah terikat daripada Cd (Pardo et al., 2003). Ketika kedua logam ini berada bersamaan dalam air limbah, terjadi interaksi berlawanan untuk dapat saling terikat pada permukaan sel mikroba. Dalam interaksi ini, Pb lebih unggul dan dapat menghambat penyerapan logam lainnya (Shao et al., 2019). Hal ini sesuai dengan penelitian oleh Chen et al., (2019) yang menemukan bahwa keberadaan Pb dapat menghambat proses penyerapan Cd secara kompetitif. Dengan demikian, mikroorganisme secara alami lebih mudah mengikat Pb, yang mengakibatkan efisiensi penghilangan kedua logam tersebut menjadi berbeda.

4.3 Peran Adsorben Zeolit, Silika, dan *Polyethylen Glycol* (PEG) dalam Penurunan Warna dan Logam Berat

4.3.1 Penurunan Warna

Setelah *clarifier*, air yang telah diolah dengan pengolahan biologis, air limbah diolah lebih lanjut dengan metode adsorpsi menggunakan adsorben. Terdapat tiga jenis adsorben yang berbeda, yaitu zeolit, silika, dan polyethylen glicol (PEG). Pengujian dengan pengolahan fisika dimulai pada konsentrasi 50% tanpa adanya penyesuaian seperti reaktor biologis, karena mikroba sulit

beradaptasi terhadap perubahan variasi konsentrasi air limbah yang spontan sehingga memerlukan waktu yang cukup panjang untuk beradaptasi (Alinsafi et al., 2006). Data pengujian kadar warna dengan metode pengolahan filtrasi dapat dilihat pada gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Grafik Hasil Pengujian Warna Pada Pengolahan Fisika Limbah Tenun Konsentrasi 50%.

Pada konsentrasi limbah cair tenun 50% pengujian hari ke-7, penurunan kadar warna terjadi pada reaktor PEG dari yang semula 256,73 Pt-Co menjadi 50,00 Pt-Co. Pada pipa zeolit dan silika tidak ada penurunan kadar warna, dimana pada konsentrasi warna pada reaktor zeolit dan silika sebesar 297,12 Pt-Co. Hal tersebut dapat terjadi karena pori permukaan zeolit dan silika yang cukup besar dan kurangnya waktu kontak antara zeolit dan silika dengan air limbah tenun (Pungut et al., 2021). Kondisi tersebut juga dapat dipengaruhi karena tingginya bahan organik lain, seperti COD, BOD, dan TSS pada air limbah (Mizwar, 2013). Kemampuan adsorpsi terhadap warna dapat berkurang seiring dengan adanya polutan lain dalam air limbah yang diolah (Allen & Koumanova, 2005).

Pada hari ke-14 penurunan konsentrasi warna terjadi pada seluruh reaktor fisika. Kadar warna pada hari ke-14 pada reaktor zeolit, silika, dan PEG secara berturut-turut sebesar 423,08 Pt-Co; 225,00 Pt-Co; dan 23,08 Pt-Co. Penurunan kadar warna pada pengolahan fisika terjadi karena adsorben yang digunakan dapat menyerap warna yang lolos dari proses pengolahan biologis. Pada hari ke-21

terjadi kenaikan kadar warna yang cukup signifikan. Pada reaktor zeolit, kadar warna sebesar 769,15 Pt-Co. Pada reaktor silika, kadar warna sebesar 917,31 Pt-Co. Pada reaktor PEG, kadar warna mengalami kenaikan menjadi sebesar 103,85 Pt-Co dengan. Hal yang sama juga terjadi pada pengujian hari ke-28, dimana reaktor pada pipa zeolit dan silika mengalami peningkatan konsentrasi sebesar 1159,62 Pt-Co dan 966,35 Pt-Co.

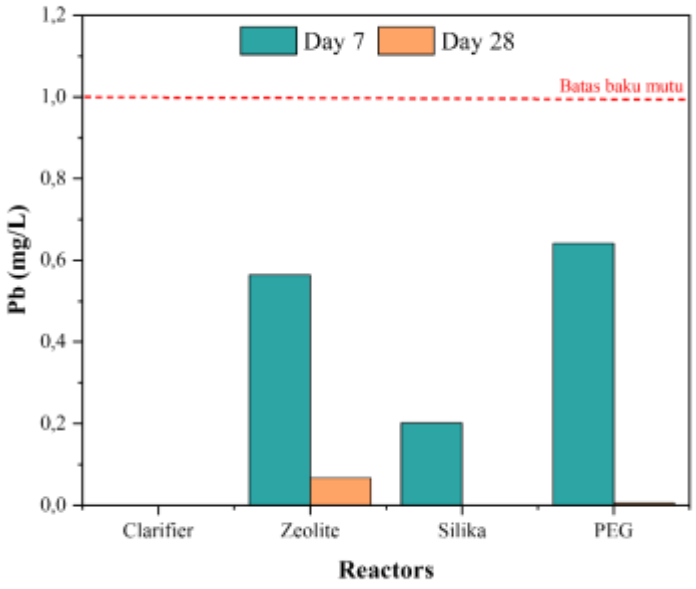
Kenaikan kadar warna pada hari ke-21 dan hari ke-28 terjadi seiring dengan kenaikan kadar warna pada pengolahan biologis. Hal tersebut dapat disebabkan karena pengolahan biologis yang tidak optimal pada penelitian ini. Dimana, pada pengolahan biologis dapat mengalami reaksi polimerisasi oksidatif yang kemudian membentuk molekul baru yang lebih kompleks dan berwarna. Selain itu, flok-flok yang terdapat pada proses aerobik melemah sehingga menghasilkan biomassa halus yang tersuspensi. Biomassa halus tersebut mengandung zat warna hasil biosorbsi yang sulit mengendap pada reaktor *clarifier*. Hal tesebut menyebabkan biomassa halus terus mengalir ke pengolahan filtrasi dan menghasilkan sumbatan pada pori-pori permukaan media adsorben yang digunakan (Field et al., 1995).

Pada pengujian hari ke-28, pipa PEG cenderung menunjukkan penurunan konsentrasi menjadi 51,92 Pt-Co. Berdasarkan penelitian yang dilakukan pada pengolahan air limbah tenun dengan ketiga media adsorpsi (pasir, silika, zeolit, dan PEG) menunjukkan perbedaan hasil terutama pada media PEG. Stabilitas terlihat pada media PEG berasal dari kombinasi mekanisme adsorpsi dan biodegradasi biologis yang lebih efisien dibandingkan kedua media lainnya. PEG merupakan polimer hidrofilik dan non-ionik yang memiliki sifat biokompatibel (Choopani et al., 2024). Hal tersebut menjadikan PEG media yang baik untuk pertumbuhan biofilm sehingga dapat mendegradasi zat warna secara konsisten bahkan saat terjadi fluktuasi molekuler ikatan hidrogen dengan molekul zat warna (Serna-Galvis et al., 2024). Selain itu, PEG juga berfungsi sebagai agen dalam sistem pemisahan fase akuatik (*Aqueiys Biphasic System*), yang secara efektif memisahkan warna dalam limbah ke dalam lapisan yang berbeda yang tidak dimiliki oleh pasir silika dan zeolit (Dilip et al., 2005).

Efektivitas penyisihan warna pada media pasir silika sangat dipengaruhi oleh kejenuhan media. Akumulasi partikel dapat menyebabkan penyumbatan dan pelepasan kembali zat yang terperangkap ketika beban limbah atau menyebabkan kondisi hidraulik berubah (Jaeel & Abdulkathum, 2018). Keterbatasan zeolit juga disebabkan oleh media yang jenuh sehingga kehilangan efektivitasnya. Penelitian lain menunjukkan (Imessaoudene et al., 2023) bahwa pH limbah sangat mempengaruhi kinerja zeolit sehingga dapat memicu pelepasan zat warna yang telah teradsorpsi yang sejalan dengan kenaikan warna pada hari ke-28.

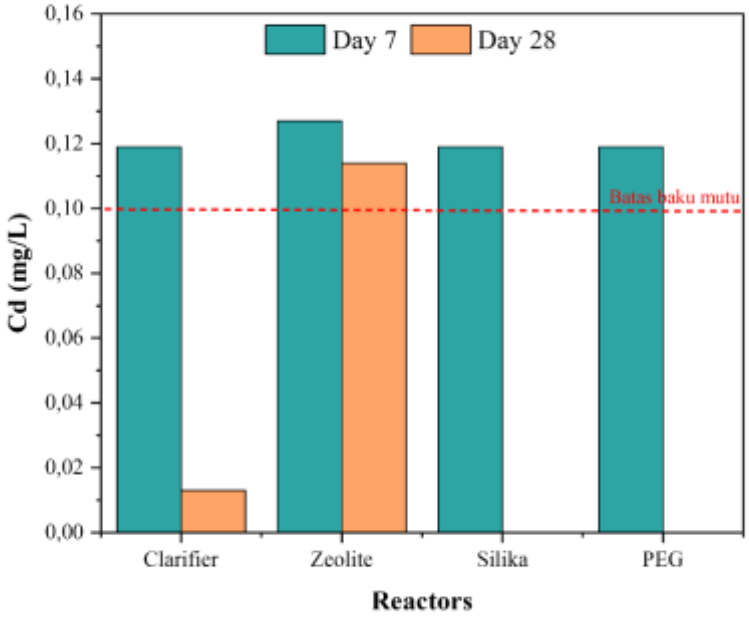
4.3.2 Penurunan Logam Berat

Pada pengolahan air limbah tenun dengan sistem adsorpsi yang menggunakan tiga media adsorben berbeda (zeolit, silika, dan PEG). Pengujian kadar Pb dan Cd dengan sistem adsorpsi dilakukan setelah sistem pengolahan biologis, dimana influent dari ketiga media tersebut berasal dari reaktor *clarifier*. Grafik kadar Pb dan Cd pada proses adsorpsi dapat dilihat pada gambar 4.5 dan 4.6.



Gambar 4. 5 Grafik Konsentrasi Pb Pada Pengolahan Adsorpsi
Sumber baku mutu: PermenLHK Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 Lampiran XLVII

Kadar Pb tertinggi pada proses adsorpsi berada pipa yang berisi media PEG pada awal pengujian dengan konsentrasi 50%, yaitu sebesar 0,641 mg/L. Sedangkan pada media zeolit dan silika memiliki kadar Pb sebesar 0,564 mg/L dan 0,203 mg/L. Kadar Pb tersebut menunjukkan adanya peningkatan dari reaktor *clarifier*. Hal tersebut dapat terjadi karena adanya akumulasi kadar logam berat yang terkumpul pada reaktor *clarifier*. Kadar Pb pada akhir pengujian menunjukkan hasil yang terus menurun dari awal pengujian. Pada akhir pengujian, kadar Pb pada media zeolit, silika, dan PEG secara berturut-turut adalah 0,067 mg/L, 0,000 mg/L, dan 0,005 mg/L. Proses adsorpsi air limbah tenun pada masing-masing media adsorben dapat dipengaruhi karena pH. pH yang terdapat pada masing-masing pipa dapat memengaruhi muatan permukaan media adsorben, derajat ionisasi, dan spesies adsorbat. Nilai pH yang lebih dari 5 dapat menyebabkan penurunan drastis dalam proses penyerapan logam karena adanya hidrolisis ion logam (Abas et al., 2013).



Gambar 4. 6 Grafik Konsentrasi Cd Pada Pengolahan Adsorpsi
Sumber baku mutu: PermenLHK Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 Lampiran XLVII

Kadar Cd tertinggi pada awal pengujian dengan konsentrasi air limbah tenun 50% berada pada media zeolit, yaitu sebesar 0,127 mg/L. Pada media zeolit

dan silika memiliki kadar Cd yang sama, yaitu 0,120 mg/L. Penurunan kadar Cd juga terjadi pada akhir pengujian. Namun, kadar Cd tertinggi pada akhir pengujian berada pada media zeolit sebesar 0,115 mg/L. Pada media silika dan PEG memiliki kadar Cd yang sama, yaitu 0,000 mg/L.

Pada hari ke-28 pengujian, media pasir silika menunjukkan kinerja yang paling unggul diantara media adsorpsi lainnya dengan kemampuan menyisihkan logam Pb dan Cd hingga tidak terdeteksi (0 mg/L). Pasir silika memiliki mekanisme kerja utama penyisihan logam berat berupa adsorpsi permukaan. Gugus fungsi silanol (Si-OH) yang terdapat di permukaan partikel silika mengikat ion-ion logam berat (Uddin, 2017). Gugus silanol tersebut dapat melepas ikatan H^+ menjadi Si-O^- yang bermuatan negatif dalam media air. Hal tersebut dapat membuat interaksi elektrostatik yang secara efektif menarik dan mengikat kation logam berat seperti Pb^{2+} dan Cd^{2+} (Lee et al., 2010).

Pada hari ke-28 pengujian, reaktor dengan media PEG juga menunjukkan kemampuan dalam menurunkan konsentrasi Pb dan Cd dengan sangat baik. Pada logam Cd, media PEG mampu menurunkan konsentrasi Cd hingga tidak terdeteksi dan menurunkan konsentrasi Pb secara drastis (0,641 mg/L menjadi 0,005 mg/L). Media PEG memiliki perbedaan dalam mekanisme kerjanya dengan media adsorben lainnya. Pada media PEG memiliki mekanisme kerja melalui proses pembentukan yang kompleks. Media PEG memiliki struktur polimer dengan atom okseigen pada gugus eter yang memiliki banyak pasangan elektron bebas, sehingga dapat bereaksi sebagai pendonor elektron untuk ion logam berat yang bermuatan positif (Gao et al., 2017). Mekanisme kerja yang terjadi pada media PEG dapat membentuk logam-polimer yang stabil secara kompleks, sehingga dapat mengeluarkan ion logam dari fase larutan secara efektif. Penggunaan polimer yang larut dalam air telah terbukti efektif untuk remediasi logam berat karena memiliki kemampuan membentuk banyak ikatan dengan satu ion logam tunggal (Díaz Bukvic et al., 2023; Saeedi-Jurkuyeh et al., 2020).

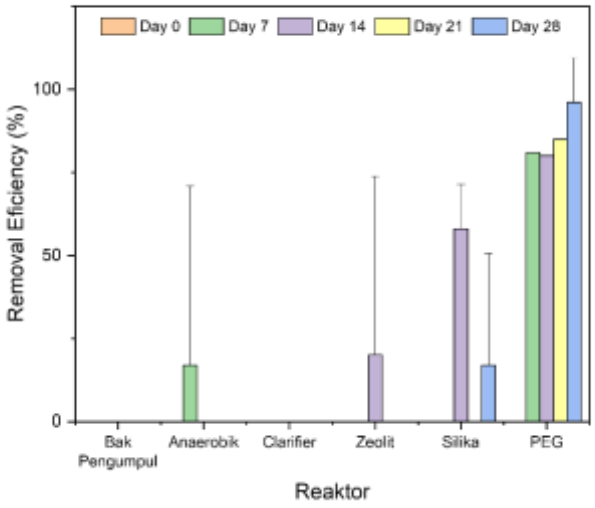
Media adsorpsi berupa zeolit menunjukkan efektivitas yang lebih spesifik. Media zeolit dapat menurunkan konsentrasi Pb (0,190 mg/L menjadi 0,067 mg/L) lebih baik dibandingkan dengan logam Cd (0,127 mg/L menjadi 0,115 mg/L). Hasil pengujian tersebut menunjukkan kemampuan media zeolit dalam memilih

ion logam tertentu. Media zeolit memiliki mekanisme kerja utama berupa pertukaran ion, dimana kation-kation yang dapat bergerak pada media zeolit (seperti Na^+, K^+, Ca^{2+}) di dalam rangka aluminosilikatnya ditukar dengan ion logam berat dari larutan (Sikosana et al., 2019). Zeolit memiliki kemampuan yang lebih kuat dalam mengikat Pb daripada Cd. Penyebab utama disebabkan oleh sifat ion Pb^{2+} yang memiliki ukuran lebih ringkas dan daya tarik elektron yang lebih kuat. Kedua faktor tersebut memungkinkan ion Pb berikatan secara lebih efektif dengan pertukaran ion dalam struktur zeolit dibandingkan logam Cd (Erdem et al., 2004; Sprynskyy et al., 2006). Oleh karena itu, dalam situasi ini, penyerapan Pb oleh zeolit akan lebih dominan.

4.4 Penurunan Removal pada Parameter Warna dan Logam Berat (Pb dan Cd)

4.4.1 Persentase Removal Warna

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian efisiensi removal parameter warna. Hasil pada pengujian penyisihan konsentrasi warna menunjukkan kegagalan yang cukup signifikan pada proses pengolahan biologis. Proses pengolahan yang menunjukkan adanya keunggulan dan cenderung konsisten berada pada proses pengolahan adsorpsi, khususnya media *Polyethylene Glycol* (PEG). Pada media zeolit dan silika menunjukkan hasil yang berfluktuatif. Grafik efisiensi removal dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Grafik Efisiensi Removal Warna

Hasil pengujian sangat jelas menunjukkan bahwa proses biologis tidak efektif dalam mendegradasi warna pada air limbah tenun. Hasil efisiensi penyisihan warna yang cenderung memiliki nilai yang berfluktuatif menunjukkan hipotesis bahwa lingkungan di dalam proses pengolahan biologis yang terdiri dari proses anaerobik, aerobik, dan *clarifier* tidak mendukung pertumbuhan mikroba yang spesifik untuk degradasi warna air limbah tenun. Ketidakstabilan efisiensi penyisihan warna pada penelitian ini dapat diakibatkan oleh influent dari bak pengumpul, seperti variasi pH dan beban organik yang telah menghambat kinerja koloni mikroba yang terbentuk sehingga proses degradasi warna tidak terjadi secara efisien (Kokina et al., 2022).

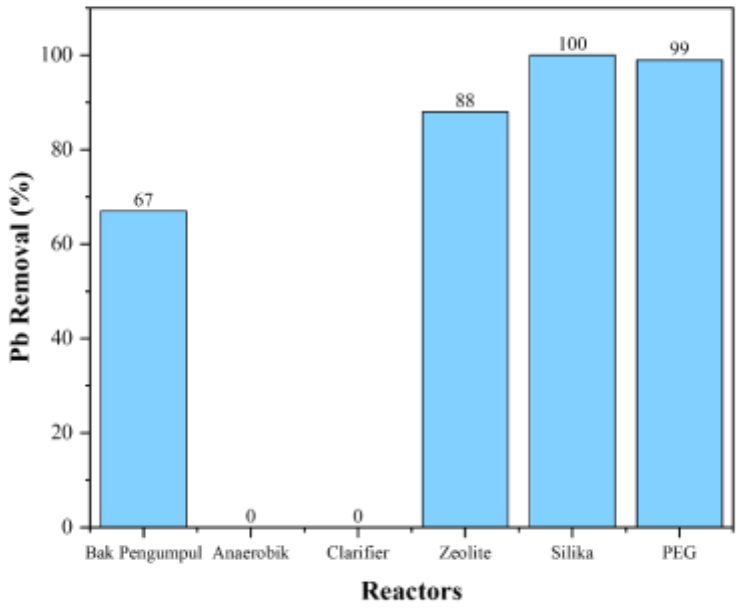
Dalam penelitian ini, proses pengolahan adsorpsi dengan media PEG menunjukkan kinerja yang cukup konsisten dalam mendegradasi warna air limbah tenun. Efisiensi penyisihan warna tertinggi berada pada hari ke-28 pengujian sebesar 96%. Hasil tersebut menunjukkan adanya perbedaan yang sangat signifikan dengan proses pengolahan biologis dan media adsorpsi lainnya. Kestabilan media PEG dapat dipengaruhi oleh kemampuannya dalam berinteraksi dengan zat warna melalui adsorpsi atau biosorpsi yang efektif (H.-J. Zhang et al., 2017).

Pada proses adsorpsi dengan media zeolit dan silika menunjukkan hasil yang sangat tidak konsisten. Pada pengujian hari ke-14 media zeolit dan silika

menunjukkan adanya efisiensi penyisihan warna sebesar 20% dan 58%. Namun, pada pengujian hari ke-21 efisiensi penyisihan warna turun drastis hingga tidak menunjukkan adanya efisiensi penyisihan warna. pada pengujian hari ke-28, media zeolit tetap tidak menunjukkan adanya efisiensi penyisihan warna, sedangkan pada media silika menunjukkan sedikit peningkatan efisiensi penyisihan warna sebesar 17%. Hasil yang berfluktuatif tersebut menunjukkan bahwa media zeolit dan silika memiliki kapasitas yang terbatas dan kemungkinan telah mencapai titik kejenuhan. Fluktuasi efisiensi penyisihan warna ini dapat mengganggu mekanisme adsorpsi pada permukaan zeolit dan silika (Gupta & Suhas, 2009; Hammood et al., 2021).

4.4.2 Persentase Removal Logam Berat (Pb dan Cd)

Pada penelitian ini juga dilakukan pengujian efisiensi penyisihan logam berat Pb dan Cd. Terdapat beberapa kegagalan dalam penyisihan logam berat Pb. Grafik efisiensi penyisihan logam berat Pb dan Cd dapat dilihat pada gambar 4.8 dan 4.9.



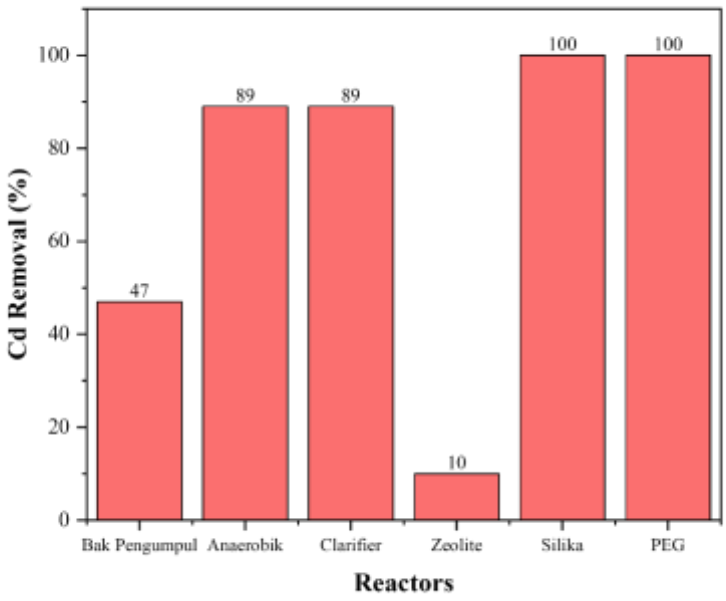
Gambar 4. 8 Grafik Efisiensi Penyisihan Pb Pada Seluruh Reaktor

Efisiensi penyisihan kadar Pb tertinggi berada pada reaktor silika dengan persentase 100%. Sedangkan efisiensi penyisihan kadar Pb terendah berada pada

reaktor bak pengumpul. Hal tersebut dapat terjadi karena tidak ada pengolahan apapun pada bak pengumpul.

Analisis efisiensi penyisihan logam Pb menunjukkan kinerja yang bervariasi di tiap reaktor. Pada bak pengumpul secara tak terduga menunjukkan efisiensi sebesar 67%. Pengurangan konsentrasi yang tinggi diakibatkan oleh proses presipitasi. Pb dapat dengan mudah membentuk endapan sebagai timbal karbonat ($PbCO_3$) atau timbal hidroksida ($Pb(OH)_2$) pada kondisi pH air limbah yang mendekati netral atau basa, yang umum ditemukan pada limbah tekstil (Dushenko et al., 1995). Endapan ini kemudian mengendap sebagai lumpur di dasar bak, sehingga menurunkan konsentrasi Pb terlarut secara drastis sebelum masuk ke tahap biologis (Dushenko et al., 1995). Sementara itu, pada reaktor biologis (anaerobik dan *clarifier*), efisiensi tidak dapat dihitung karena konsentrasi Pb sudah berada di bawah batas deteksi, yang menjelaskan tingginya keterkaitan biomassa mikroba terhadap Pb pada pembahasan sebelumnya.

Pada tahap filtrasi, semua media menujukkan kapasitas yang tinggi untuk menghilangkan Pb. Pasir silika dan PEG berhasil mencapai efisiensi removal 100% dan 99%. Kemampuan pasir silika didukung oleh mekanisme adsorpsi permukaan yang kuat pada gugus silanol, yang efektif dalam mengikat kation divalen seperti Pb^{2+} (Dushenko et al., 1995). Pada media zeolit, menunjukkan efisiensi removal sebesar 88% melaui mekanisme pertukaran ion yang selektif terhadap Pb. Beberapa penelitian terdahulu mengkonfirmasi bahwa zeolit secara konsisten menunjukkan preferensi yang lebih kuat untuk Pb dibandingkan logam berat lainnya karena kombinasi sifat radius ion dan elektronegativitasnya yang ideal untuk terikat dalam aluminosilikat zeolit (Ouki & Kavannagh, 1997; Vishnu et al., 2021). Kinerja dari ketiga media filtrasi membuktikan bahwa pemolesan (*polishing*) efektif dalam menurunkan kualitas logam berat yang dibuat ke lingkungan.



Gambar 4. 9 Grafik Efisiensi Penyisihan Cd Pada Seluruh Reaktor

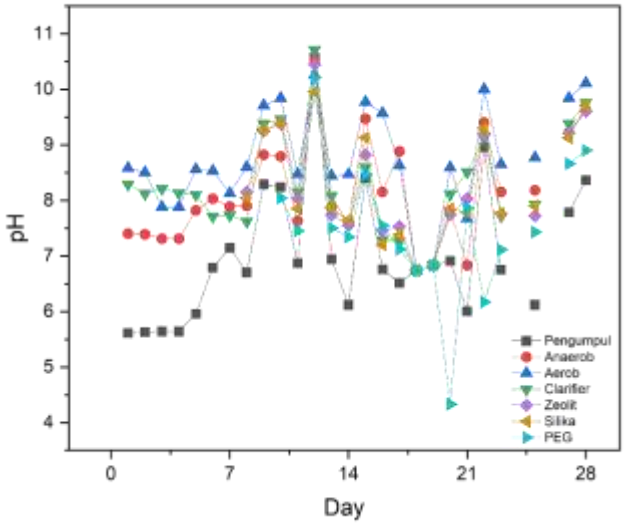
Efisiensi penyisihan kadar Cd tertinggi berada pada reaktor silika dan PEG dengan persentase 100%. Sedangkan, efisiensi penyisihan warna terendah berada pada reaktor zeolit dengan persentase 10%. Penyisihan kadar Cd yang memiliki nilai cukup rendah dapat terjadi karena kejenuhan pada media zeolit yang menyebabkan zeolit kehilangan efektivitasnya dalam menyerap logam berat (Imessaoudene et al., 2023).

Efisiensi penyisihan logam Cd menunjukkan pola yang berbeda antar reaktornya. Di bak pengumpul, efisiensi penyisihan Cd hanya 47%, jauh jika dibandingkan Pb. Hal ini diakibatkan karena Cd memiliki kelarutan yang lebih tinggi dalam air dan tidak mudah membentuk endapan hidroksida atau karbonat pada rentang yang sama dengan Pb, sehingga lebih banyak Cd yang terlarut dalam air limbah (Acheampong et al., 2010). Namun, pada tahap pengolahan biologis (anaerobik dan *clarifier*) terjadi perbedaan efisiensi yang cukup tinggi hingga 89%. Ini menunjukkan bahwa keterkaitan mikroba terhadap Cd tidak sekuat Pb, mekanisme biosorpsi oleh biopolimer ekstraseluler dan bioakumulasi oleh biomassa anaerobik menjadi jalur utama yang efektif untuk mereduksi konsentrasi Cd dari air limbah (Zulfiqar et al., 2023).

Pada tahap filtrasi, pasir silika dan PEG menunjukkan efisiensi removal tertinggi pada angka 100%. Kapasitas adsorpsi yang tinggi dari kedua media tersebut mampu mengikat berbagai jenis kation logam berat secara efektif. Sebaliknya, zeolit menunjukkan efisiensi yang sangat rendah untuk Cd yang hanya 10%. Kinerja yang tidak maksimal, menjelaskan fenomena adsorpsi kompetitif dan selektivitas zeolit terhadap pencemar (Al-Anber & Al-Anber, 2008). Zeolit yang memiliki keterkaitan yang jauh lebih tinggi untuk kation lain memungkinkan kation lain tersebut menempati ruang pada zeolit dan menyisakan hanya sedikit ruang untuk mengikat Cd. Hal ini menjelaskan bahwa zeolit bukan media yang ideal untuk menghilangkan Cd dalam air limbah jika terdapat konsentrasi ion lainnya yang tinggi.

4.5 Derajat Keasaman (pH) Air

Derajat keasaman (pH) air limbah tenun diukur menggunakan alat *multi parameter water quality meter* setiap hari selama 28 hari pengolahan. Hasil pengukuran pH pada proses pengolahan air limbah tenun menunjukkan nilai yang berfluktuasi, karena adanya pengaruh dari zat warna pada air limbah tenun. Perubahan pH pada pengolahan limbah secara biologis dapat menunjukkan terjadinya proses biodegrasi bahan organik (Retnosari & Shovitri, 2013). Grafik pengukuran pH pada masing-masing reaktor dapat dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Grafik Pengukuran pH Masing-Masing Reaktor

Ketidakstabilan pH yang terus menerus selama pengujian merupakan permasalahan dari reaktor pengolahan. Diperkirakan bahwa bak penampung tidak berfungsi secara efektif sebagai bak ekualisasi sehingga terjadi fluktuasi karakteristik limbah yang terus berlanjut ke sistem pengolahan selanjutnya. Dari hasil pengamatan yang dilakukan, ditemukan adanya pengendapan padatan pada bak penampung dikarenakan kurangnya pengadukan. Kurangnya pengadukan menyebabkan air limbah dan sludge yang terkandung tidak terlarut secara efektif sehingga menyebabkan stratifikasi pH, dan limbah yang masuk ke reaktor biologis memiliki sifat yang tidak konsisten dari hari ke hari (Foess et al., 1997; Raji et al., 2018).

Ketidakstabilan pH dari bak penampung kemudian menyebabkan efek yang bersambung pada kinerja reaktor biologis. Reaktor anaerob yang merupakan tahap awal pengolahan biologis sangat rentan terhadap fluktuasi pH. Mikroorganisme anaerobik sangat sensitif dan hanya aktif pada rentang pH 6,5 – 7,5. Fluktuasi pH dapat menghambat bahkan mengeliminasi komunitas mikroba, menyebabkan penumpukan produk sampingan asam lemak volatil (VFA) yang berakibat menurunnya pH lebih jauh (Wu et al., 2009). Meskipun reaktor *clarifier* memiliki ketahanan yang lebih baik, efisiensi mikroorganisme di dalamnya terganggu oleh lingkungan yang tidak stabil, sehigga proses pengolahan di dalamnya tidak berjalan secara optimal (Kokina et al., 2022).

Pada tahap pengolahan dengan filtrasi, ketidakstabilan pH dari reaktor-reaktor sebelumnya terus mempengaruhi kinerja reaktor adsorpsi. Efektivitas ketiga media dalam filtrasi bergantung pada pH air yang masuk. Kemampuan pertukaran ion zeolit sangat dipengaruhi oleh pH (Imessaoudene et al., 2023; Hammood et al., 2021), dan stabilitas serta efisiensi biofilm pada media PEG yang berperan penting dalam degradasi warna, juga bergantung pada konsisi pH yang optimal (Serna-Galvis et al., 2024).

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, dapat diketahui bahwa air limbah tenun memiliki konsentrasi warna yang berbeda pada setiap konsentrasi dan setiap pengolahan dengan proses pengolahan secara biologis dan fisika. Pada penelitian ini dapat disimpulkan:

1. Pada pengolahan biologis (anaerobik-aerobik dan *clarifier*) dan filtrasi (zeolit, silika, dan PEG) warna mampu menurunkan konsentrasi warna air limbah tenun. Namun, terdapat kondisi jenuh sehingga menyebabkan kenaikan konsentrasi warna sehingga konsentrasi warna menjadi berfluktuasi dan efisiensi penyisihan warna menjadi tidak stabil.
2. Pada parameter logam berat (Pb dan Cd), removal berada pada nilai yang tinggi terutama pada reaktor zeolit (Pb 88%; Cd 10%), silika (Pb 100%; Cd 100%), dan PEG (Pb 99%;Cd 100%).

5.2 Saran

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

1. Perbaikan yang dapat dilakukan dimulai dari perbaikan mendasar ditahap awal pengolahan. Masalah utama kemungkinan dari bak pengumpul yang tidak berfungsi sebagai bak ekualisasi yang sebenarnya. Tanpa pengaduk, limbah dari produksi tidak terlarut secara sempurna, sehingga fluktuasi pH dan konsentrasi polutan berpengaruh ke seluruh sistem dan mengganggu kinerja reaktor lainnya. Untuk itu disarankan untuk melengkapi bak pengumpul dengan pengaduk mekanik untuk memastikan air limbah yang masuk ke reaktor biologis memiliki karakteristik yang konstan sehingga bakteri dapat bekerja secara optimal tanpa berpengaruh oleh perubahan kondisi.

2. Untuk mengatasi penurunan efisiensi pada reaktor filtrasi dapat dilakukan dengan melakukan pengamatan lebih lanjut untuk mengindikasikan adanya kemungkinan jenuhnya media adsoben.

DAFTAR PUSTAKA

Abas, S. N. A., Ismail, M. H. S., Kamal, M. L., & Izhar, S. (2013). Adsorption process of heavy metals by low-cost adsorbent: A review. *World Applied Sciences Journal*, *28*(11), 1518–1530. https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.28.11.1874

Acheampong, M. A., Meulepas, R. J. W., & Lens, P. N. L. (2010). Removal of heavymetals and cyanide from gold mine wastewater. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, *85*(5), 590–613. https://doi.org/10.1002/jctb.2358

Afifah, A. S., Adicita, Y., & Suryawan, I. W. K. (2021). Reduksi Warna Methylen Blue (MB) dengan Granular Zeolit Klinoptilolit Teraktivasi. *Media Ilmiah Teknik Lingkungan*, *6*(1), 24–33. https://doi.org/10.33084/mitl.v6i1.1271

Ajaykumar, addagalla V., Darwish, N. A., & Hilal, N. (2009). Study of Various Parameters in the Biosorption of Heavy Metals on Activated Sludge. *World Applied Sciences Journal 5 (Special Issue for Environment)*, *5*(January 2009), 32–40.

Al-Anber, M., & Al-Anber, Z. A. (2008). Utilization of natural zeolite as ion-exchange and sorbent material in the removal of iron. *Desalination*, *225*(1–3), 70–81. https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.07.006

Alinsafi, A., da Motta, M., Le Bonté, S., Pons, M. N., & Benhammou, A. (2006). Effect of variability on the treatment of textile dyeing wastewater by activated sludge. *Dyes and Pigments*, *69*(1–2), 31–39. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2005.02.014

Allen, S. J., & Koumanova, B. (2005). Decolourisation of Water / Wastewater Using Adsorption (Review). *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, *40*, 175–192.

Apriyani, N. (2018). Kandungan Limbah Cair Industri Batik. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *53*(9), 1689–1699.

Aragaw, T. A., Suarez, C., Paul, C. J., & Simachew, A. (2024). Evaluation of Integrated Anaerobic/Aerobic Conditions for Treating Dye-Rich Synthetic and Real Textile Wastewater Using a Soda Lake Derived Alkaliphilic

Microbial Consortia. *Water (Switzerland)*, *16*(20). https://doi.org/10.3390/w16202937

Aryanti, A. Y., Hastuti, R., & Khabibi. (2014). Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi Pengaruh Penambahan Polietilen Glikol (PEG) pada Selulosa. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, *17*(1), 1–5.

Atikah, W. S. (2017). Potensi Zeolit Alam Gunung Kidul Teraktivasi Sebagai Media Adsorben Pewarna Tekstil. *Arena Tekstil*, *32*(1), 17–24. https://doi.org/10.31266/at.v32i1.2650

Bogale, F. M., Teffera, B., & Aragaw, T. A. (2024). Recent developments in integrated anaerobic/aerobic (A/O) process for textile industry wastewater treatment: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, *15*(June), 100438. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100438

Chamidah, A. R., Kustono, D., Al-Irsyad, M., & Marji, M. (2023). Efektivitas Penggunaan Adsorben Zeolit dan Koagulan Poly Aluminium Chloride (PAC) untuk Menurunkan Kandungan Kromium pada Limbah Cair Batik. *Sport Science and Health*, *5*(12), 1270–1280. https://doi.org/10.17977/um062v5i122023p1270-1280

Chen, Z. liang, Zhang, J. qiang, Huang, L., Yuan, Z. hui, Li, Z. jun, & Liu, M. chao. (2019). Removal of Cd and Pb with biochar made from dairy manure at low temperature. *Journal of Integrative Agriculture*, *18*(1), 201–210. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61987-2

Choopani, L., Salehi, M. M., Mashhadimoslem, H., Khosrowshahi, M. S., Rezakazemi, M., AlHammadi, A. A., Elkamel, A., & Maleki, A. (2024). Removal of organic contamination from wastewater using granular activated carbon modified—Polyethylene glycol: Characterization, kinetics and isotherm study. *PLoS ONE*, *19*(7 July), 1–18. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0304684

Daniswara, D., & Budiono, A. (2024). Perhitungan F/M Ratio Pengolahan Limbah Lumpur Aktif Wwtp-2 Di Pabrik Farmasi. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, *10*(1), 41–47. https://doi.org/10.33795/distilat.v10i1.4952

Deng, D., Lamssali, M., Aryal, N., Ofori-Boadu, A., Jha, M. K., & Samuel, R. E.

(2020). Textiles wastewater treatment technology: A review. *Water Environment Research*, *92*(10), 1805–1810. https://doi.org/10.1002/wer.1437

Deraniyagala, H. (2017). Textile colour waste and sustainability. In *Colour Design: Theories and Applications: Second Edition* (Second Edi). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101270-3.00028-X

Díaz Bukvic, G., Rossi, E., & Errea, M. I. (2023). Polysaccharides as Economic and Sustainable Raw Materials for the Preparation of Adsorbents for Water Treatment. *Polysaccharides*, *4*(3), 219–255. https://doi.org/10.3390/polysaccharides4030016

Dilip, M., Muthuraman, G., & Palanivelu, K. (2005). Removal of textile dyes from aqueous solution using PEG based aqueous biphasic system. *Toxicological and Environmental Chemistry*, *87*(4), 499–507. https://doi.org/10.1080/02772240500381326

Dushenko, W. T., Bright, D. A., & Reimer, K. J. (1995). Arsenic bioaccumulation and toxicity in aquatic macrophytes exposed to gold-mine effluent: relationships with environmental partitioning, metal uptake and nutrients. *Aquatic Botany*, *50*(2), 141–158. https://doi.org/10.1016/0304-3770(95)00448-9

Elma, M., Riskawati, N., & Marhamah, M. (2019). DESALINASI AIR LIMBAH PABRIK TAHU MENGGUNAKAN MEMBRAN SILIKA DENGAN PREKURSOR TEOS (Tetraethyl orthosilicate). *Konversi*, *7*(2), 67–70. https://doi.org/10.20527/k.v7i2.6500

Erdem, E., Karapinar, N., & Donat, R. (2004). The removal of heavy metal cations by natural zeolites. *Journal of Colloid and Interface Science*, *280*(2), 309–314. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.08.028

Fadillah, R. F., Badriani, R. E., & Fildzah, C. A. (2025). Efektivitas Media Filter Pasir Silika dan Arang Ampas Tebu untuk Menurunkan Warna Menggunakan Filtrasi Upflow. *Rekayasa*, *18*(1), 9–19. https://doi.org/10.21107/rekayasa.v18i1.24483

Fajri, J. A., Nurmiyanto, A., Sa'adah, N. N., Nuryana, I., Anfaresi, S. L. N., & Lathifah, A. N. (2024). Effectiveness of Endophytes Bacteria in Enhancing Floating Treatment Wetland to Treat Textile Wastewater. *Journal of*

Ecological Engineering, *25*(3), 12–24. https://doi.org/10.12911/22998993/177593

Fajri, J. A., Nurmiyanto, A., Sa'adah, N. N., Sagita, N. D., Nuryana, I., Rahayu, A., & Lathifah, A. N. (2025). Selection of endophyte and indigenous bacteria degrading textile wastewater in floating treatment wetland. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *22*(1), 319–330. https://doi.org/10.1007/s13762-024-05654-0

Field, J. A., Stams, A. J. M., Kato, M., & Schraa, G. (1995). Enhanced biodegradation of aromatic pollutants in cocultures of anaerobic and aerobic bacterial consortia. *Antonie van Leeuwenhoek*, *67*(1), 47–77. https://doi.org/10.1007/BF00872195

Foess, G. W., Meenahan, J. G., & Blough, D. (1997). *Effects of Flow Equalization On The Operation and Performance of An Activated Sludge Plant*.

Gao, L., Zhou, W., Huang, J., He, S., Yan, Y., Zhu, W., Wu, S., & Zhang, X. (2017). Nitrogen removal by the enhanced floating treatment wetlands from the secondary effluent. *Bioresource Technology*, *234*, 243–252. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.036

Golalipour, M. J., Najafi, L., & Keshtkar, A. A. (2010). Neural tube defects in native fars ethnicity in northern Iran. *Iranian Journal of Public Health*, *39*(3), 116–123.

Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal - A review. *Journal of Environmental Management*, *90*(8), 2313–2342. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017

Hakim, L., Rahayu, A., Jamilatun, S., Sisca, V., & Fajri, J. A. (2025). Integrating ammonium-based polymer with phytoremediation for phosphate and chemical oxygen demand reduction in palm oil mill effluent. *Journal of Ecological Engineering*, *26*(1), 46–58. https://doi.org/10.12911/22998993/195213

Hammood, Z. A., Chyad, T. F., & Al-Saedi, R. (2021). Adsorption Performance of Dyes over Zeolite for Textile Wastewater Treatment. *Ecological Chemistry and Engineering S*, *28*(3), 329–337. https://doi.org/10.2478/eces-2021-0022

Hussain, Z., Arslan, M., Malik, M. H., Mohsin, M., Iqbal, S., & Afzal, M. (2018). Integrated perspectives on the use of bacterial endophytes in horizontal flow constructed wetlands for the treatment of liquid textile effluent: Phytoremediation advances in the field. *Journal of Environmental Management*, *224*, 387–395. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.057

Imessaoudene, A., Cheikh, S., Hadadi, A., Hamri, N., Bollinger, J. C., Amrane, A., Tahraoui, H., Manseri, A., & Mouni, L. (2023). Adsorption Performance of Zeolite for the Removal of Congo Red Dye: Factorial Design Experiments, Kinetic, and Equilibrium Studies. *Separations*, *10*(1). https://doi.org/10.3390/separations10010057

Isma, M. I. A., Idris, A., Omar, R., & Razreena, A. R. P. (2014). *Effects of SRT and HRT on Treatment Performance of MBR and Membrane Fouling*. *January*.

Jadhav, J. P., Kalyani, D. C., Telke, A. A., Phugare, S. S., & Govindwar, S. P. (2010). Evaluation of the efficacy of a bacterial consortium for the removal of color, reduction of heavy metals, and toxicity from textile dye effluent. *Bioresource Technology*, *101*(1), 165–173. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.027

Jaeel, A. J., & Abdulkathum, S. (2018). Sustainable pollutants removal from wastewater using sand filter: A review. *International Conference on Advances in Sustainable Engineering and Applications, ICASEA 2018 - Proceedings, July*, 179–183. https://doi.org/10.1109/ICASEA.2018.8370979

Kokina, K., Mezule, L., Gruskevica, K., Neilands, R., Golovko, K., & Juhna, T. (2022). Impact of Rapid pH Changes on Activated Sludge Process. *Applied Sciences (Switzerland)*, *12*(11). https://doi.org/10.3390/app12115754

Komarawidjaja, W. (2017). Paparan Limbah Cair Industri Mengandung Logam Berat pada Lahan Sawah di Desa Jelegong, Kecamatan Rancaekek, Kabupaten Bandung. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, *18*(2), 173. https://doi.org/10.29122/jtl.v18i2.2047

Kozak, M., Cirik, K., & Basak, S. (2021). Treatment of textile wastewater using combined anaerobic moving bed biofilm reactor and powdered activated carbon-aerobic membrane reactor. *Journal of Environmental Chemical*

Engineering, *9*(4). https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105596

Larasati, A. I., Susanawati, L. D., & Suharto, B. (2024). The Effectiveness of Heavy Metals Adsorptions on Leachate by Activated Carbon, Zeolite, and Silica Gel in TPA Tlekung, Batu. *Jurnal Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, *3*(1), 44–48.

Lee, S. M., Kim, W. G., Laldawngliana, C., & Tiwari, D. (2010). Removal behavior of surface modified sand for Cd(II) and Cr(VI) from aqueous solutions. *Journal of Chemical and Engineering Data*, *55*(9), 3089–3094. https://doi.org/10.1021/je901094h

Manavi, N., Kazemi, A. S., & Bonakdarpour, B. (2017). The development of aerobic granules from conventional activated sludge under anaerobic-aerobic cycles and their adaptation for treatment of dyeing wastewater. *Chemical Engineering Journal*, *312*, 375–384. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.155

Mizwar, A. (2013). Penyisihan Warna pada Limbah Cair Sasirangan dengan Adsorpsi Zeolit dalam Fixed-bed Column. *Enviro Science 9*, *9*, 1–9.

Mukhtar, G., Iwan, R., Mina, N., & Tintin, S. R. (2017). Pemanfaatan Nutrisi Terfermentasi untuk Penurunan Kadar COD/BOD Air Limbah Industri. *Journal Industrial Servicess*, *3*(1b), 231–234.

Mukti, M. W. P., Sumantra, I. M., & Karuni, N. K. (2023). Studi Pemanfaatan Warna Alam Pada Produk Tekstil. *Hastagina: Jurnal Kriya Dan Industri Kreatif*, *3*(02), 207–213. https://doi.org/10.59997/hastagina.v3i02.2906

Nugroho, R., & Mahmud, I. (2018). PENGOLAHAN AIR LIMBAH BERWARNA INDUSTRI TEKSTIL DENGAN PROSES AOPs. *Jurnal Air Indonesia*, *1*(2), 163–172. https://doi.org/10.29122/jai.v1i2.2344

Ouki, S. K., & Kavannagh, M. (1997). Performance of natural zeolites for the treatment of mixed metal- contaminated effluents. *Waste Management and Research*, *15*(4), 383–394. https://doi.org/10.1006/wmre.1996.0094

Pardo, R., Herguedas, M., Barrado, E., & Vega, M. (2003). Biosorption of cadmium, copper, lead and zinc by inactive biomass of Pseudomonas Putida. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *376*(1), 26–32. https://doi.org/10.1007/s00216-003-1843-z

Pungut, P., Al Kholif, M., & Pratiwi, W. D. I. (2021). Penurunan Kadar Chemical Oxygen Demand (Cod) Dan Fosfat Pada Limbah Laundry Dengan Metode Adsorpsi. *Jurnal Sains &Teknologi Lingkungan*, *13*(2), 155–165. https://doi.org/10.20885/jstl.vol13.iss2.art6

Purnawan, C., Martini, T., & Rini, I. P. (2018). Sintesis dan Karakterisasi Silika Abu Ampas Tebu Termodifikasi Arginin sebagai Adsorben Ion Logam Cu(II). *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, *14*(2), 333. https://doi.org/10.20961/alchemy.14.2.19512.334-349

Rahayu, A., Lim, L. W., & Takeuchi, T. (2015). Polymer monolithic methacrylate base modified with tosylated-polyethylene glycol monomethyl ether as a stationary phase for capillary liquid chromatography. *Talanta*, *134*, 232–238. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.10.060

Raji, N. A., Olaleye, J. O., Ogunleye, R. O., & Anibaba, A. T. (2018). Development of Equalization Tank for flow rate attenuation in small scale Wastewater Treatment System. *Engineering and Technology Research Journal*, *3*(1), 11–15. https://doi.org/10.47545/etrj.2018.3.1.034

Ramadhini, D. N., Taroepratjeka, D. A. H., & Marganingrum, D. (2023). Efisiensi Penyisihan Logam Krom (Cr) dalam Limbah Cair Industri Tekstil Menggunakan MPMO dan Nutrient Broth (NB). *FTSP Series: Seminar Nasional Dan Diseminasi Tugas Akhir*, 1–6.

Retnosari, A. A., & Shovitri, M. (2013). *Kemampuan Isolat*. *2*(1), 7–11.

Sa'adah, N. N. (2020). *Pengolahan Limbah Cair Tenun dengan Sistem Floating Treatment Wetland Menggunakan Kombinasi Tanaman Vetiver dan Bakteri Endofit*.

Saeedi-Jurkuyeh, A., Jafari, A. J., Kalantary, R. R., & Esrafili, A. (2020). A novel synthetic thin-film nanocomposite forward osmosis membrane modified by graphene oxide and polyethylene glycol for heavy metals removal from aqueous solutions. *Reactive and Functional Polymers*, *146*, 104397. https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2019.104397

Saleem, M. U., Khan, S. J., Shahzad, H. M. A., & Zeshan, H. M. A. (2021). Performance evaluation of integrated anaerobic and aerobic reactors for treatment of real textile wastewater Integrated anaerobic and aerobic reactors

for textile wastewater treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *January 2022*. https://doi.org/10.1007/s13762-021-03830-0

Septiariva, I. Y., Suryawan, I. W. K., & Sarwono, A. (2021). Reactive Black 5 (RB5): Pengolahan Air Limbah Tekstil dengan Adsorbsi Menggunakan Powdered Karbon Aktif. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, *22*(2), 199–205. https://doi.org/10.29122/jtl.v22i2.4523

Serna-Galvis, E. A., Arboleda-Echavarría, J., Echavarría-Isaza, A., & Torres-Palma, R. A. (2024). Removal and elimination of pharmaceuticals in water using zeolites in diverse adsorption processes and catalytic advanced oxidation technologies—a critical review. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 31, Issue 55). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/s11356-024-35204-7

Setyaningsih, L. W. N., Asmira, Z. I., & W, N. C. F. (2017). Aktivasi dan Aplikasi Zeolit Alam Sebagai Adsorben Logam Kromium Dalam Air Limbah Industri Penyamakan Kulit Activation and Application of Natural Zeolite for Adsorbent of Chromium in Wastewater of Leather Industry. *Eksergi*, *14*(1), 7–11.

Shao, W., Li, M., Teng, Z., Qiu, B., Huo, Y., & Zhang, K. (2019). Effects of Pb(II) and Cr(VI) stress on phosphate-solubilizing bacteria (bacillus Sp. strain MRP-3): Oxidative stress and bioaccumulation potential. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(12). https://doi.org/10.3390/ijerph16122172

Sikosana, M. L., Sikhwivhilu, K., Moutloali, R., & Madyira, D. M. (2019). Municipal wastewater treatment technologies: A review. *Procedia Manufacturing*, *35*, 1018–1024. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.051

Sitanggang, P. Y. (2017). *PENGOLAHAN LIMBAH TEKSTIL DAN BATIK DI INDONESIA*.

Speece, R. E. (1983). *Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment*. https://doi.org/10.1021/es00115a001

Sprynskyy, M., Buszewski, B., Terzyk, A. P., & Namieśnik, J. (2006). Study of

the selection mechanism of heavy metal (Pb2+, Cu2+, Ni2+, and Cd2+) adsorption on clinoptilolite. In *Journal of Colloid and Interface Science* (Vol. 304, Issue 1, pp. 21–28). https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.07.068

Sudha, M., Saranya, A., Selvakumar, G., & Sivakumar, N. (2014). Enzymatic Degradation of Azo Dyes – A Review Enzymatic Degradation of Azo Dyes – A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *1*(January 2011), 1250–1260.

Sunarti, T. C., Suprihatin, & Lauda, R. D. (2014). Stabilisasi Sludge Dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (Ipal) Menggunakan Starter Bakteri Indigenous Pada Aerobic Sludge Digester. *E-Jurnal Agroindustri Indonesia*, *3*(1), 201–213. http://tin.fateta.ipb.ac.id/journal/e-jaii

Susilo, N. A., & Amalia, G. (2022). *Removal Pada Pengolahan Air Limbah Industri Kertas Warna*.

Tatinting, G. D., Aritonang, H. F., & Wintu, A. D. (2021). *DARI PASIR BESI PANTAI HAIS SEBAGAI ADSORBEN LOGAM KADMIUM (Cd)*. *14*(2).

Tomei, M. C., & Garrido, J. M. (2024). *Anaerobic Treatment of Domestic (Present Status and Potentialities)*.

Trianasari, Manurung, P., & Karo-Karo, P. (2017). Analisis dan Karakterisasi Kandungan Silika (SiO 2) sebagai Hasil Ekstraksi Batu Apung (Pumice). *JURNAL Teori Dan Aplikasi Fisika*, *05*(02), 179–186.

Uddin, M. K. (2017). A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade. *Chemical Engineering Journal*, *308*, 438–462. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.029

Vishnu, D., Dhandapani, B., Senthil Kumar, K., Balaji, G., & Mahadevan, S. (2021). Removal of heavy metals from mine waters by natural zeolites. *New Trends in Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater*, *39*(12), 161–175. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822965-1.00008-8

Volesky, B. (2001). Detoxification of metal-bearing effluents: Biosorption for the next century. *Hydrometallurgy*, *59*(2–3), 203–216. https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00160-2

Wang, J., & Chen, C. (2009). Biosorbents for heavy metals removal and their future. *Biotechnology Advances*, *27*(2), 195–226.

https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.11.002

Wierzba, S. (2015). Biosorption of lead(II), zinc(II) and nickel(II) from industrial wastewater by Stenotrophomonas maltophilia and Bacillus subtilis. *Polish Journal of Chemical Technology*, *17*(1), 79–87. https://doi.org/10.1515/pjct-2015-0012

Wu, H., Yang, D., Zhou, Q., & Song, Z. (2009). The effect of pH on anaerobic fermentation of primary sludge at room temperature. *Journal of Hazardous Materials*, *172*(1), 196–201. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.146

Yuanita, D., Widjajanti, E., & Sulistyani. (2014). *Penggunaan Lumpur Aktif Sebagai Material Untuk Biosorpsi Pewarna Remazol*. *9*(2), 93–100.

Zee, F. P. Van Der, & Villaverde, S. (2005). Combined anaerobic-aerobic treatment of azo dyes - A short review of bioreactor studies. *Water Research*, *39*(8), 1425–1440. https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.03.007

Zhang, H.-J., Wang, J.-H., Zhang, Y.-H., & Hu, T.-L. (2017). Hollow porous organic polymer: High-performance adsorption for organic dye in aqueous solution. *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*, *55*(8), 1329–1337. https://doi.org/10.1002/pola.28500

Zhang, T., Shao, M., & Ye, L. (2011). 454 Pyrosequencing reveals bacterial diversity of activated sludge from 14 sewage treatment plants. *The ISME Journal*, *6*(6), 1137–1147. https://doi.org/10.1038/ismej.2011.188

Zieli´nski, M., Kazimierowicz, J., & Debowski, M. (2023). *Advantages and Limitations of Anaerobic Wastewater Treatment—Technological Basics, Development Directions, and Technological Innovations 1* ,.

Zulfiqar, U., Haider, F. U., Maqsood, M. F., Mohy-Ud-Din, W., Shabaan, M., Ahmad, M., Kaleem, M., Ishfaq, M., Aslam, Z., & Shahzad, B. (2023). Recent Advances in Microbial-Assisted Remediation of Cadmium-Contaminated Soil. *Plants*, *12*(17). https://doi.org/10.3390/plants12173147

LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumen Pembuatan Reaktor



Gambar Lampiran 1. 2 Pembuatan Reaktor Anaerobik-Aerobik



Gambar Lampiran 1. 1 Rancangan Reaktor Anaerobik-Aerobik dan *Clarifier*



Gambar Lampiran 1. 3 Pembuatan Reaktor Filtrasi



Gambar Lampiran 1. 4 Limbah Tenun dialirkan Ke dalam Reaktor Filtrasi

Lampiran 2 Aklimatisasi Reaktor



Gambar Lampiran 2. 1 Aklimatisasi Reaktor Dengan Limbah Tenun

Lampiran 3 Dokumentasi Pengujian Warna



Gambar Lampiran 3. 1 Pembuatan Larutan Pengujian Warna



Gambar Lampiran 3. 2 Sampel Limbah Tenun yang Telah disaring



Gambar Lampiran 3. 3 Proses Destruksi Logam Berat



Gambar Lampiran 3. 4 Proses Pengujian Logam Berat Menggunakan AAS

Lampiran 4 Hasil Perhitungan Parameter Limbah Cair Tenun

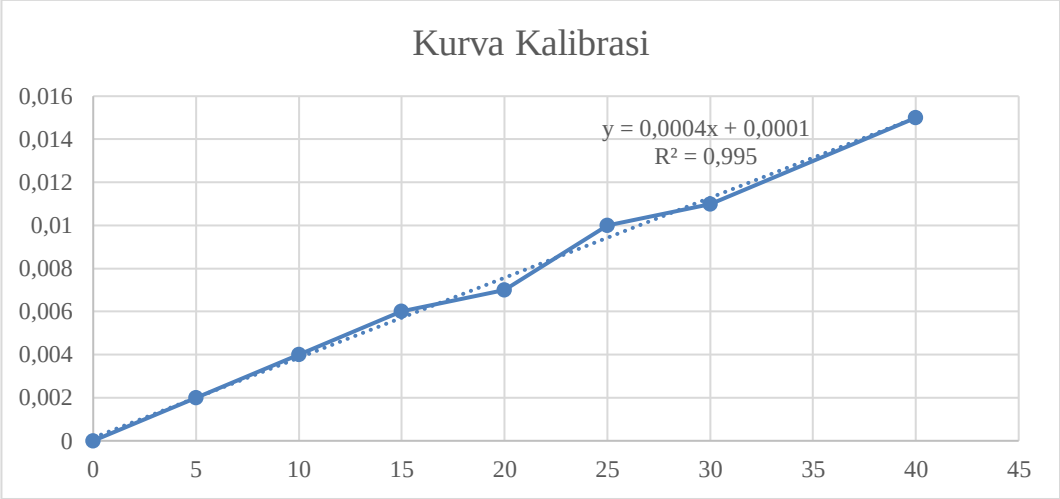
4.1 Pembacaan Kurva Kalibrasi Warna

Acuan dalam pembuatan standar kurva kalibrasi ini adalah SNI 6989.80.2011 Pengujian air limbah dilakukan dengan menggunakan spektrofotometri dengan

panjang gelombang 465 nm. Kurva kalibrasi parameter warna dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Larutan Standar Parameter Warna

Sampel	Konsentrasi (PtCo) (X)	Absorbansi (Y)	XY	X^2
Blanko	0	0	0	0
Sampel 1	5	0,002	0,01	25
Sampel 2	10	0,004	0,04	100
Sampel 3	15	0,006	0,09	225
Sampel 4	20	0,007	0,14	400
Sampel 5	25	0,01	0,25	625
Sampel 6	30	0,011	0,33	900
Sampel 7	40	0,015	0,6	1600
TOTAL	145	0,055	1,46	3875



Gambar Lampiran 4. 1 Kurva Kalibrasi Standar Warna

4.2 Hasil Perhitungan Konsentrasi dan Persentase Removal Parameter Warna Hari ke-0

Tabel 4.2 Konsentrasi dan Persentase Removal Warna Hari ke-0

Limbah 20% (Hari ke-0; 8 Juli 2025)								%Removal
Reaktor	Sampel	Absorbansi (A)	C (Pt-Co)	f	Kadar Warna (Pt-Co)	Kadar Warna rata2	SE	
Bak Pengumpul	P1	0,003	7,6923	15	115,385	135,58	20,19	
	P2	0,004	10,3846	15	155,769			
Anaerob	An1	0,015	40,0000	25	1000,000	966,35	33,65	-613%
	An2	0,014	37,3077	25	932,692			
Aerob	Ae1	0,007	18,4615	25	461,538	562,50	100,96	-315%

	Ae2	0,01	26,5385	25	663,462			
Clarifier	C1	0,007	18,4615	25	461,538	495,19	33,65	-265%
	C2	0,008	21,1538	25	528,846			

4.3 Hasil Perhitungan Konsentrasi dan Persentase Removal Parameter Warna Hari ke- 7

Tabel 4.3 Konsentrasi dan Persentase Removal Warna Hari ke-7

Limbah 50% (Hari ke-7; 11 Juli 2025)								%Removal
Reaktor	Sampel	Absorbansi (A)	C (Pt-Co)	f	Kadar Warna (Pt-Co)	Kadar Warna rata2	SE	
Bak Pengumpul	P1	0,004	10,3846	10	103,846	157,69	53,85	
	P2	0,008	21,1538	10	211,538			
Anaerob	An1	0,003	7,6923	10	76,923	130,77	53,85	17%
	An2	0,007	18,4615	10	184,615			
Aerob	Ae1	0,005	13,0769	15	196,154	196,15	0,00	-24%
	Ae2	0,005	13,0769	15	196,154			
Clarifier	Cl1	0,007	18,4615	15	276,923	256,73	20,19	-63%
	Cl2	0,006	15,7692	15	236,538			
Zeolit	Z1	0,008	21,1538	15	317,308	297,12	20,19	-16%
	Z2	0,007	18,4615	15	276,923			
Silica	S1	0,008	21,1538	15	317,308	297,12	20,19	-16%
	S2	0,007	18,4615	15	276,923			
PEG	S1	0,002	5,0000	10	50,000	50,00	0,00	81%
	S2	0,002	5,0000	10	50,000			

4.4 Hasil Perhitungan Konsentrasi dan Persentase Removal Parameter Warna Hari ke-14

Tabel 4.4 Konsentrasi dan Persentase Removal Warna Hari ke-14

Limbah 50% (Hari ke-21; 24 Juli 2025)								**%Removal**
Reaktor	**Sampel**	**Absorbansi (A)**	**C (Pt-Co)**	**f**	**Kadar Warna (Pt-Co)**	**Kadar Warna rata2**	**SE**	
Bak Pengumpul	P1	0,003	7,6923	10	76,923	76,92	0,00	
	P2	0,003	7,6923	10	76,923			
Anaerob	An1	0,012	31,9231	25	798,077	865,38	67,31	-1025%
	An2	0,014	37,3077	25	932,692			
Aerob	Ae1	0,01	26,5385	30	796,154	836,54	40,38	-988%
	Ae2	0,011	29,2308	30	876,923			
Clarifier	Cl1	0,008	21,1538	30	634,615	675,00	40,38	-778%
	Cl2	0,009	23,8462	30	715,385			
Zeolit	Z1	0,01	26,5385	30	796,154	796,15	0,00	-18%
	Z2	0,01	26,5385	30	796,154			
Silica	S1	0,011	29,2308	30	876,923	917,31	40,38	-36%

	S2	0,012	31,9231	30	957,692			
PEG	S1	0,004	10,3846	10	103,846	103,85	0,00	85%
	S2	0,004	10,3846	10	103,846			

4.5 Hasil Perhitungan Konsentrasi dan Persentase Removal Parameter Warna Hari ke-21

Tabel 4.5 Konsentrasi dan Persentase Removal Warna Hari ke-21

Limbah 50% (Hari ke-21; 24 Juli 2025)								%Removal
Reaktor	**Sampel**	**Absorbansi (A)**	**C (Pt-Co)**	**f**	**Kadar Warna (Pt-Co)**	**Kadar Warna rata2**	**SE**	
Bak Pengumpul	P1	0,003	7,6923	10	76,923	76,92	0,00	
	P2	0,003	7,6923	10	76,923			
Anaerob	An1	0,012	31,9231	25	798,077	865,38	67,31	-1025%
	An2	0,014	37,3077	25	932,692			
Aerob	Ae1	0,01	26,5385	30	796,154	836,54	40,38	-988%
	Ae2	0,011	29,2308	30	876,923			
Clarifier	Cl1	0,008	21,1538	30	634,615	675,00	40,38	-778%
	Cl2	0,009	23,8462	30	715,385			
Zeolit	Z1	0,01	26,5385	30	796,154	796,15	0,00	-18%
	Z2	0,01	26,5385	30	796,154			
Silica	S1	0,011	29,2308	30	876,923	917,31	40,38	-36%
	S2	0,012	31,9231	30	957,692			
PEG	S1	0,004	10,3846	10	103,846	103,85	0,00	85%
	S2	0,004	10,3846	10	103,846			

4.6 Hasil Perhitungan Konsentrasi dan Persentase Removal Parameter Warna Hari ke-28

Tabel 4.6 Konsentrasi dan Persentase Removal Warna Hari ke-28

Limbah 50% (Hari ke-21; 24 Juli 2025)								%Removal
Reaktor	**Sampel**	**Absorbansi (A)**	**C (Pt-Co)**	**f**	**Kadar Warna (Pt-Co)**	**Kadar Warna rata2**	**SE**	
Bak Pengumpul	P1	0,003	7,6923	10	76,923	76,92	0,00	
	P2	0,003	7,6923	10	76,923			
Anaerob	An1	0,012	31,9231	25	798,077	865,38	67,31	-1025%
	An2	0,014	37,3077	25	932,692			
Aerob	Ae1	0,01	26,5385	30	796,154	836,54	40,38	-988%
	Ae2	0,011	29,2308	30	876,923			
Clarifier	Cl1	0,008	21,1538	30	634,615	675,00	40,38	-778%
	Cl2	0,009	23,8462	30	715,385			
Zeolit	Z1	0,01	26,5385	30	796,154	796,15	0,00	-18%

	Z2	0,01	26,5385	30	796,154			
Silica	S1	0,011	29,2308	30	876,923	917,31	40,38	-36%
	S2	0,012	31,9231	30	957,692			
PEG	S1	0,004	10,3846	10	103,846	103,85	0,00	85%
	S2	0,004	10,3846	10	103,846			

4.7 Hasil Perhitungan Kadar Pb dan Cd

Reaktor	**Logam Pb**			**Logam Cd**		
	20%	**50%**		**20%**	**50%**	
	28	**0**	**28**	**28**	**0**	**28**
Bak Pengumpul	0,005	1,078	0,351	0,142	0,142	0,075
Anaerobik		0,000	0,000		0,123	0,014
Clarifier	0,004	0,000	0,000	0,003	0,120	0,014
Zeolit		0,564	0,067		0,127	0,115
Silika		0,203	0,000		0,120	0,000
PEG		0,641	0,005		0,120	0,000

4.8 Hasil Perhitungan pH

Hari	**Bak Pengumpul**	**Anaerobik**	**Aerobik**	**Clarifier**	**Zeolit**	**Silika**	**PEG**
1	5,61	7,4	8,58	8,29			
2	5,63	7,39	8,5	8,12			
3	5,64	7,31	7,88	8,21			
4	5,64	7,31	7,88	8,13			
5	5,96	7,82	8,56	8,1			
6	6,79	8,03	8,53	7,71			
7	7,15	7,89	8,13	7,73			
8	6,7	7,9	8,6	7,62	8,15	8,04	
9	8,29	8,82	9,71	9,38	9,25	9,28	
10	8,24	8,79	9,84	9,46	9,38	9,38	8,04
11	6,87	7,63	8,47	8,15	8,03	7,85	7,45
12	10,56	10,54	10,26	10,71	10,45	9,95	10,21
13	6,94	7,88	8,44	8,08	7,74	7,87	7,5
14	6,12	7,62	8,47	7,57	7,55	7,65	7,34
15	8,4	9,47	9,77	8,59	8,82	9,13	8,47
16	6,76	8,15	9,57	7,29	7,46	7,2	7,55
17	6,51	8,88	8,63	7,26	7,53	7,38	7,12
18	6,74	6,74	6,74	6,74	6,74	6,74	6,74
19	6,83	6,83	6,83	6,83	6,83	6,83	6,83
20	6,91	7,81	8,59	8,11	7,74	7,85	4,33
21	6	6,83	7,67	8,51	8,03	7,78	7,86
22	8,96	9,4	10	9,12	9,2	9,3	6,17
23	6,75	8,15	8,65	7,72	7,75	7,77	7,11
24							
25	6,12	8,18	8,77	7,93	7,72	7,9	7,43

26							
27	7,78	9,22	9,84	9,38	9,21	9,12	8,66
28	8,36	9,62	10,11	9,76	9,6	9,71	8,9

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Athaya Helsa Savana, lahir di Sleman pada tanggal 1 Juli 2003. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Lilik Fajar Risdiyanto dan Eko Ike Kurniawati. Pendidikan penulis dimulai TK Kharisma, Kramatwatu. Penulis melanjutkan pendidikan di SD Negeri 2 Cilegon (2009 – 2015), SMP negeri 2 Cilegon (2015 – 2018), SMA Negeri 1 Waringin Kurung (2018 – 2021), dan Universitas Islam Indonesia, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan.

Selama masa perkuliahan, penulis mengikuti beberapa kegiatan, baik kegiatan akademik maupun non-akademik, sebagai berikut:

1. Staff *Organizing Commitee* Divisi Dana Usaha Kepanitiaan *Enviro Champions* 2021.
2. Staff *Organizing Committee* Divisi Wali Jamaah Kepanitiaan Lintas Lingkungan 2022.
3. Staff Organizing Committee Divisi Kesehatan Kepanitiaan Pekan Taaruf FTSP 2023.
4. Kerja Praktik di PT. Tenaris SPIJ, Cilegon dengan judul ”Analisis Kualitas Limbah Cair Dalam Proses Pembuatan Pipa Baja Pada PT. Tenaris SPIJ”.
5. Asisten Praktikum Mata Kuliah Hidrolika.

TABEL PERBAIKAN

No.	Bab	Keterangan
1.	Bab 2: Tinjauan Pustaka	Mengubah penjelasan bioremediasi menjadi biosorpsi
2.	Bab 3: Metode Penelitian	1. Menambahkan flowrate aerator pada reaktor aerobik 2. Memperbaiki alur tahapan kegiatan
3.	Bab 4: Hasil dan Pembahasan	1. Memperbaiki karakteristik limbah tenun 2. Menambahkan keterangan pada grafik 3. Menambahkan penjelasan terkait penurunan logam berat