



Kombinasi Eco-Enzim Kulit Buah dan Tanaman Bintang Air dalam Mengurangi Kandungan Surfaktan dalam Air Limbah

Putu Primantari Vikana Suari^{1*}, I Dewa Ayu Angelina Pradnyawati²,
I Gede Andy Andika Parahita³, Nelson Darma Effendi⁴,
Kurnia Wardani Miftha Huljanah⁵, Ni Putu Ayu Krismayanti⁶

¹⁻⁴ Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Indonesia

⁵⁻⁶ Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Sains, Universitas Udayana, Indonesia

*Penulis Korespondensi: primantarivikan4@unud.ac.id

Abstract. The discharge of surfactant-laden wastewater from the rapidly expanding laundry industry poses significant environmental risks, especially in densely populated urban areas. While constructed wetlands (CWs) and Eco-Enzyme technology have shown promise for surfactant remediation, their standalone application requires long hydraulic retention times (HRTs), limiting practical implementation. This study evaluated the efficacy of a novel integrated system combining a subsurface constructed wetland (SSFCW) with fruit peel-derived Eco-Enzyme to treat synthetic laundry wastewater. Over a 6-day treatment period, the combined system achieved a remarkable surfactant removal efficiency of 99.63%, reducing the concentration from 225 mg/L to 0.835 mg/L—well below the regulatory threshold of 3 mg/L. The synergistic degradation mechanism involves enzymatic hydrolysis via Eco-Enzyme lipase and protease activity, complemented by microbial mineralization in the wetland rhizosphere. This system maintains optimal environmental conditions, with a stable pH of 6.85-7.32 and a temperature of 30.9-35.2°C, supporting robust biological activity. These findings demonstrate that the integrated Eco-Enzyme/SSFCW system overcomes the limitations of conventional HRT approaches, offering a highly efficient, sustainable, and practical decentralized wastewater treatment solution for the laundry industry.

Keywords: Construction Wetland (CW); Eco-Enzyme; Environmental Risks; Surfactant Degradation; Wastewater Treatment.

Abstrak. Pembuangan air limbah yang sarat surfaktan dari industri binatu yang berkembang pesat menimbulkan risiko lingkungan yang signifikan, terutama di daerah perkotaan padat penduduk. Sementara lahan basah yang dibangun (CW) dan teknologi Eco-Enzyme telah menunjukkan janji untuk remediasi surfaktan, aplikasi mandiri mereka memerlukan waktu retensi hidrolik (HRT) yang lama, membatasi implementasi praktis. Studi ini mengevaluasi kemandirian sistem terintegrasi baru yang menggabungkan lahan basah bawah permukaan (SSFCW) dengan Eko-Enzim yang berasal dari kulit buah untuk mengolah air limbah cucian sintetis. Selama periode perawatan 6 hari, sistem gabungan mencapai efisiensi penghilangan surfaktan yang luar biasa sebesar 99,63%, mengurangi konsentrasi dari 225 mg/L menjadi 0,835 mg/L—jauh di bawah ambang batas peraturan 3 mg/L. Mekanisme degradasi sinergis melibatkan hidrolisis enzimatis melalui aktivitas lipase dan protease Eko-Enzyme, dilengkapi dengan mineralisasi mikroba di rizosfer lahan basah. Sistem ini mempertahankan kondisi lingkungan yang optimal, dengan pH stabil pada 6,85-7,32 dan suhu pada 30,9-35,2 °C, mendukung aktivitas biologis yang kuat. Temuan ini menunjukkan bahwa sistem Eco-Enzyme/SSFCW terintegrasi mengatasi keterbatasan HRT dari pendekatan konvensional, menawarkan solusi pengolahan air limbah terdesentralisasi yang sangat efisien, berkelanjutan, dan praktis untuk industri binatu.

Kata kunci: Degradasi Surfaktan; Eco-Enzyme; Lahan Basah Konstruksi (CW); Pengolahan Air Limbah; Risiko Lingkungan.

1. LATAR BELAKANG

Meningkatnya popularitas layanan binatu, termasuk binatu koin berbasis kilo konvensional dan swalayan, mencerminkan meningkatnya pentingnya mereka dalam masyarakat modern untuk memudahkan pekerjaan rumah tangga sehari-hari. Namun, proliferasi yang cepat ini telah menyebabkan tantangan lingkungan yang signifikan: sebagian

besar limbah cair yang dihasilkan dibuang langsung ke sistem drainase umum atau badan air alami tanpa pengolahan yang memadai.

Masalah ini sangat menonjol di daerah perkotaan padat penduduk. Misalnya, di wilayah Sesehan di Denpasar Selatan, pemantauan dan evaluasi yang dilakukan oleh Dinas Lingkungan Hidup Kota (DLHK) Denpasar mengidentifikasi 17 usaha, termasuk operasi laundry, yang diduga membuang limbah yang tidak diolah secara ilegal ke sungai setempat, yang mengindikasikan kegagalan pengelolaan air limbah yang optimal (Paramita et al., 2018). Konstituen kimia utama yang digunakan dalam operasi laundry adalah deterjen, yang disukai karena sifat pembersihan yang efektif dan stabilitas dalam air sadah dan larutan asam (Apriyani, 2017). Air limbah cucian diketahui mengandung berbagai polutan kimia, terutama surfaktan, dengan Linear Alkylbenzene Sulfonates (LAS) menjadi jenis yang paling umum digunakan (Ahmad & El-Dessouky, 2008). Surfaktan adalah senyawa yang menurunkan tegangan permukaan air, memungkinkan suspensi dan penghilangan kotoran. Namun, konsentrasi surfaktan yang berlebihan di perairan penerima menyebabkan berbusa yang terlihat, yang menyelimuti permukaan air dan secara signifikan menghambat difusi oksigen atmosfer. Proses ini pada akhirnya mengurangi konsentrasi oksigen terlarut (DO), yang sangat berdampak pada biota perairan (Larasati, 2021). Akibatnya, mengolah limbah cucian untuk mengurangi kadar surfaktan di bawah batas peraturan adalah kebutuhan lingkungan.

Dua metode pengolahan biologis Lahan Basah yang Dikonstruksi (CW) dan teknologi Eco-Enzyme telah dieksplorasi potensinya dalam remediasi surfaktan. Penelitian sebelumnya yang menggunakan sistem CW yang ditanam dengan Tanaman Bintang Air (*Cyperus papyrus*) menunjukkan efisiensi penghilangan surfaktan yang substansial sebesar 95,25%, mengurangi konsentrasi dari 225 mg/L menjadi 10,97 mg/L selama periode 6 hari (Sitoresmi, 2015). Namun demikian, konsentrasi limbah akhir sebesar 10,97 mg/L gagal memenuhi standar mutu 3 mg/L yang ditetapkan oleh Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI No. 5 Tahun 2014 (PERMENLHK No. 5 Tahun 2014). Secara terpisah, Eco-Enzyme yang berasal dari kulit buah campuran (mangga, jeruk, apel, pir, dan belimbing) yang dipilih sebagian karena tingginya volume sampah organik yang dihasilkan dari upacara keagamaan di Bali ditemukan dapat menurunkan konsentrasi surfaktan dari 176,2 mg/L menjadi 2,94 mg/L dalam waktu 5 hari (Wulandari & Winarsih, 2024).

Kendala kritis yang dimiliki oleh kedua metode yang berdiri sendiri adalah waktu retensi hidrolik yang berkepanjangan selama 5-6 hari, yang memerlukan tangki penampung air limbah dalam volume besar. Persyaratan ini menghadirkan hambatan spasial dan logistik

yang signifikan bagi bisnis binatu skala kecil yang ingin mengadopsi sistem perawatan ini secara mandiri.

Untuk mengatasi keterbatasan ini, penelitian ini mengusulkan pendekatan pengobatan gabungan baru yang mengintegrasikan *Cyperus papyrus* Constructed Wetland dengan kulit buah Eco-Enzyme. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk: (1) secara signifikan mempercepat waktu yang dibutuhkan untuk degradasi surfaktan dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, dan (2) secara konsisten memastikan kualitas limbah akhir memenuhi standar peraturan 3 mg/L (PERMENLHK No. 5 tahun 2014). Keberhasilan pengembangan sistem gabungan yang sinergis, efisien, dan berbiaya rendah ini dimaksudkan untuk memberikan solusi pengelolaan air limbah yang layak dan terdesentralisasi bagi operator bisnis binatu.

2. KAJIAN TEORITIS

Bagian ini menguraikan teori-teori relevan yang mendasari topik penelitian dan memberikan ulasan tentang beberapa penelitian sebelumnya yang relevan dan memberikan acuan serta landasan bagi penelitian ini dilakukan. Jika ada hipotesis, bisa dinyatakan tidak tersurat dan tidak harus dalam kalimat tanya.

3. METODE PENELITIAN

Lokasi Pengambilan Sampel

Bahan kulit buah untuk persiapan Eco-Enzyme dikumpulkan di Foodcourt Bangli City Square (Gambar 1). Penelitian eksperimental dilakukan di Rumah Kaca Teknik Lingkungan Universitas Udayana, Jalan Raya Kampus Unud, Jimbaran (Gambar 2).



Gambar 1. Lokasi bahan kulit buah untuk persiapan Eco-Enzyme dikumpulkan.
(Sumber: Google Earth, 2024)



Gambar 2. Penelitian eksperimental yang dilakukan.
(Sumber: Google Earth, 2024)

Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian menjelaskan langkah-langkah sistematis penelitian, disajikan dalam diagram alir yang menggambarkan urutan dan proses pengambilan keputusan (Gambar 3).



Gambar 3. Proses Pengambilan Keputusan.

Jenis Data

Penelitian ini memanfaatkan data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif termasuk pengukuran numerik seperti efisiensi penghilangan surfaktan, serta perubahan pH dan suhu yang diperoleh melalui pengujian laboratorium. Data kualitatif terdiri dari pengamatan visual yang menggambarkan proses degradasi surfaktan oleh sistem Lahan Basah Konstruksi dan Eco-Enzyme.

Identifikasi Masalah

Air limbah cucian yang dibuang tanpa pengolahan dapat mencemari badan air dan tanah. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa Lahan Basah Konstruksi berbasis *papyrus Cyperus* dapat menurunkan kadar surfaktan sebesar 95,25% dalam waktu 6 hari (Sitoresmi, 2015), sedangkan Eco-Enzyme pada konsentrasi 5% menurunkan surfaktan dari 176,2 mg/L menjadi 2,94 mg/L dalam 5 hari (Wulandari & Winarsih, 2024). Namun, kedua metode tersebut membutuhkan tangki penyimpanan yang besar, menimbulkan keterbatasan praktis. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menggabungkan *Cyperus papyrus* dengan kulit buah Eco-Enzyme untuk mencapai pengurangan surfaktan yang efektif dalam waktu retensi yang lebih singkat.

Tinjauan Literatur

Tinjauan literatur mendukung analisis dan interpretasi data, meliputi karakteristik air limbah cucian, *papyrus Cyperus* dalam fitotreatment, sistem Lahan Basah yang Dibangun, dan komponen bioaktif dalam Eko-Enzim kulit buah.

Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan data primer dan sekunder.

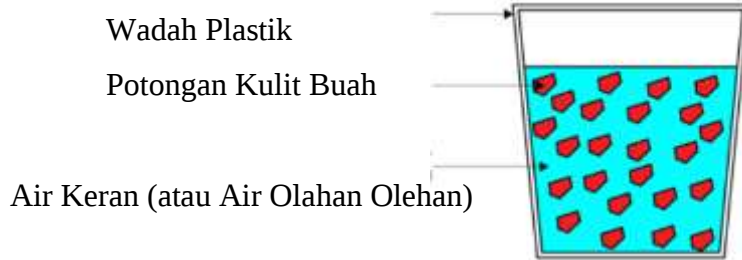
Data Utama: 1) Persiapan air limbah cucian buatan (225 mg/L, 1,33 L/reaktor). 2) Aklimatisasi pabrik selama 7 hari di media reaktor. 3) Percobaan utama: degradasi surfaktan menggunakan Subsurface Flow (SSF) Constructed Wetland dengan *papyrus Cyperus* dan 5% Eco-Enzyme dari kulit buah (mangga, jeruk, apel, pir, belimbing) selama 6 hari.

Variabel dan Parameter: 1) Variabel utama: Sistem batch Lahan Basah yang Dibangun SSF dengan Eco-Enzyme. 2) Parameter utama: konsentrasi surfaktan. 3) Parameter pendukung: pH, suhu, dan morfologi tanaman.

Alat & Bahan

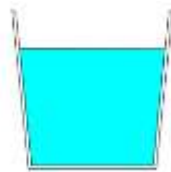
Penelitian ini juga membutuhkan berbagai alat dan bahan untuk mendukung investigasi. Alat yang digunakan adalah sebagai berikut: 1) Wadah plastik untuk persiapan Eco Enzyme dan pencampuran air limbah dengan Eco Enzyme. 2) Reaktor uji untuk fitotreatment menggunakan Sub Surface Flow Constructed Wetland dan biodegradasi oleh Eco Enzyme. 3) Sarung tangan dan botol sampel untuk mengumpulkan sampel air limbah.

Gambar wadah yang digunakan untuk persiapan Eco Enzyme dapat dilihat pada Gambar 4.

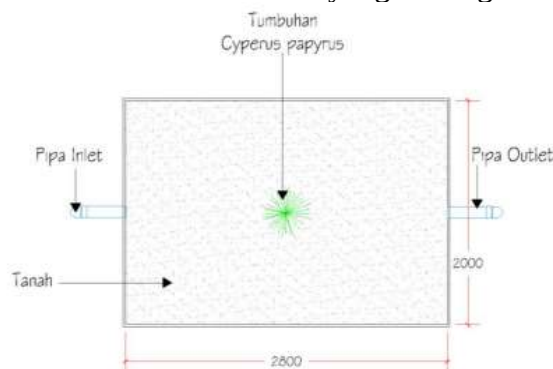


Gambar 4. Wadah Persiapan Eco Enzyme.

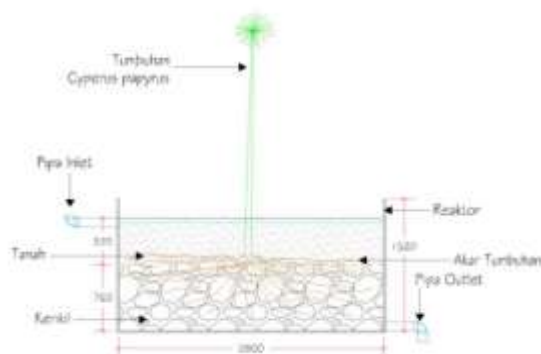
Persiapan Eco Enzyme dilakukan dalam wadah plastik berkapasitas 1,5 liter dengan mencampurkan air, kulit buah cincang, dan molase dengan perbandingan 10:3:1, yaitu 500 mL air, 150 g limbah kulit buah (30 g setiap jenis kulit buah), dan 50 g tetes tebu. Setelah tercampur, wadah ditutup dan dibiarkan selama kurang lebih 3 bulan.



Gambar 5. Tampilan Atas Reaktor Lahan Basah yang Dibangun Aliran Bawah Permukaan.



Gambar 6. Tampilan Depan Reaktor Lahan Basah yang Dibangun Aliran Bawah Permukaan.



Gambar 7. Tampilan Samping Reaktor.

Mekanisme penelitian ini menggunakan sistem Sub Surface Flow dengan metode aliran batch, dimana air limbah dicampur dengan 5% Eco Enzyme dalam wadah, dan kemudian campuran tersebut dimasukkan melalui pipa inlet. Air limbah kemudian melewati zona yang berisi kerikil, tanah, dan tanaman, di mana ia menjalani pengolahan. Air limbah akan tetap berada di reaktor selama 6 hari, setelah itu akan keluar melalui zona outlet.

Selain peralatan, bahan yang dibutuhkan untuk penelitian ini antara lain: 1) Kulit mangga, jeruk, apel, pir, dan belimbing. 2) Gula Bali sebagai tetes tebu. 3) Tanaman papirus Cyperus. 4) Air limbah cucian buatan. 5) Air PDAM (air minum umum). 6) Media lahan basah terdiri dari tanah dan kerikil.

Data sekunder

Data sekunder mengacu pada data yang tidak diperoleh secara langsung oleh peneliti tetapi bersumber dari literatur atau kumpulan data yang ada yang mendukung penelitian. Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kualitas Eko-enzim Fisik

Produksi Eco-Enzyme yang digunakan dalam penelitian ini berlangsung selama tiga bulan, mengikuti proses yang dirinci pada Tabel 1, dengan kepatuhan pada masa fermentasi minimum yang diperlukan untuk kematangan produk (Rukmini & Astuti Herawati, 2023). Selama ini, Eco-Enzyme mengalami pengamatan fisik secara teratur, memantau parameter seperti pH, suhu, bau, dan warna, untuk melacak perubahan yang menunjukkan keberhasilan fermentasi.

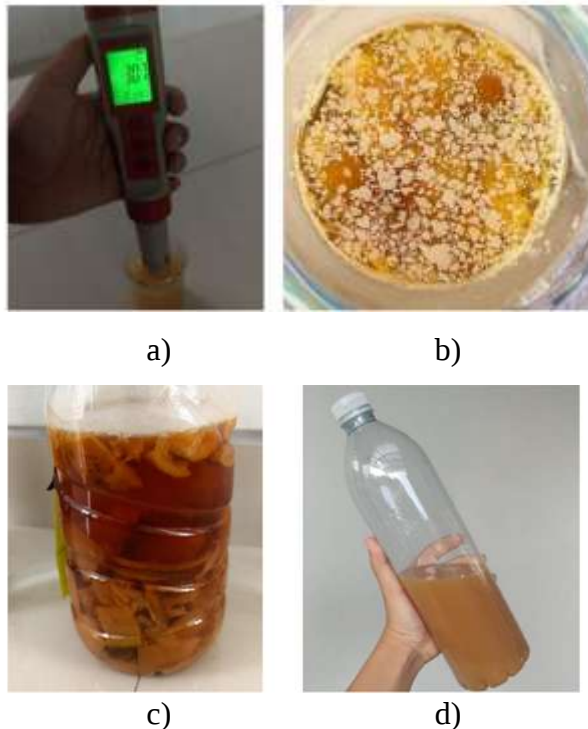
Kualitas akhir Eco-Enzyme sangat penting untuk kemanjurannya sebagai agen biodegradasi. Keberhasilan fermentasi dievaluasi secara ketat terhadap kriteria fisik dan kimia utama. *Secara fisik*, solusi akhir harus beralih dari warna coklat bening awal (gula aren) ke coklat gelap dan pekat, dan memiliki aroma fermentasi atau alkohol yang khas. Kehadiran jamur putih ('pitera') di permukaan tidak dianggap sebagai kegagalan dan masih menunjukkan keberhasilan batch (Win, 2011; Harlin & Handayani, 2024). *Secara kimia*, kriteria kritis adalah pH larutan, yang harus di bawah 4. pH rendah ini berfungsi sebagai perlindungan keselamatan, secara aktif mencegah proliferasi bakteri patogen (seperti *Staphylococcus aureus* dan *Salmonella typhosa*) yang biasanya tumbuh subur pada tingkat pH di atas 4 (Sartika et al., 2013). Berdasarkan pengukuran kualitas akhir (sebagaimana dirinci pada Tabel 4), Eco-Enzyme yang digunakan dalam penelitian ini memenuhi semua kriteria yang ditentukan dan akibatnya divalidasi sebagai cocok untuk aplikasi dalam percobaan pengolahan air limbah.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Kualitas Fisik Eco-Enzyme Setelah Fermentasi.

Tidak	Parameter	Hasil Pengukuran
1	pH	3.07
2	Suhu	31,4 °C
3	Bau	Berbau (alkohol) /
4	Warna	Coklat tua

Sumber: Hasil Analisis (2024)

Proses fermentasi Eco-Enzyme menunjukkan tahap biologis yang berbeda. Ini dimulai dengan aktivitas mikroba yang kuat selama dua minggu pertama, ditandai dengan produksi gelembung gas CO₂ dan munculnya bau alkohol, konsisten dengan fermentasi mikroba bahan organik penghasil enzim (Rukmini & Astuti Herawati, 2023). Berkembang ke bulan kedua, larutan mengalami pematangan, dibuktikan dengan pergeseran aroma ke asam asetat, menandakan pembentukan senyawa asam organik. Secara bersamaan, pemecahan senyawa mineral dan vitamin memfasilitasi pembentukan enzim aktif yang terus menerus.



Gambar 8. (a) Hasil Uji pH dan Suhu, (b) Kualitas Fisik Eco Enzyme setelah Fermentasi, (c) Eco Enzyme sebelum Fermentasi, (d) Hasil Eco Enzym setelah Fermentasi.

Eco-Enzyme yang dihasilkan berfungsi sebagai agen biodegradasi yang efektif karena kandungan enzimatiknya berperan sebagai biokatalis. Secara khusus, Arun dan Siva Shanmugam (2015) mengidentifikasi enzim kunci, terutama lipase dan alkil sulfatase, yang bertanggung jawab untuk mempercepat laju degradasi surfaktan dengan membelah rantai karbon molekuler. Selain itu, kandungan asam sitrat yang berasal dari kulit buah juga dihipotesiskan berkontribusi pada penguraian komponen deterjen yang ada dalam air limbah cucian.

Efektivitas Reduksi dan Waktu Maksimum untuk Parameter Surfaktan

Efektivitas penghapusan parameter surfaktan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi Eco Enzyme dan sistem Sub Surface Flow Constructed Wetland (SSFCW) menghasilkan efisiensi penghilangan surfaktan yang sangat tinggi. Tabel 2 menyajikan perbandingan pengukuran parameter surfaktan antara reaktor dalam penelitian ini dan penelitian sebelumnya.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa reaktor yang memanfaatkan kombinasi Eco Enzyme dan SSFCW mencapai efisiensi penghilangan sebesar 99,63% dengan konsentrasi akhir 0,835 mg/L pada Hari ke-6. Nilai ini secara signifikan lebih tinggi dibandingkan dengan studi Sitoresmi (2015), yang hanya menggunakan SSFCW, melaporkan efisiensi pengangkatan 95,25% dan konsentrasi akhir 10,97 mg/L. Hasil ini memenuhi standar kualitas limbah untuk industri sabun dan deterjen, sebagaimana ditetapkan oleh Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014, yang mengamanatkan batas surfaktan maksimum 3 mg/L.

Tingginya efektivitas sistem kombinasi ini didukung oleh McLaughlin et al. (2021), yang melaporkan bahwa lahan basah yang dibangun dapat mencapai tingkat penghilangan surfaktan hingga >94% untuk nonilfenol etoksilat dalam sistem multi-tahap. Studi serupa oleh Mascoli Junior et al. (2023) menunjukkan bahwa lahan basah yang dibangun multi-tahap dapat mencapai penghapusan Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS) sebesar 43% dalam kondisi operasi jangka panjang.

Tabel 2. Perbandingan Hasil Pengukuran Parameter Surfaktan.

Parameter	Hari 1	Hari 2	Hari 3	Hari 4	Hari 5	Hari 6
Removal Efficiency (%)	99,16	99,49	98,72	99,61	100,00	99,63
Surfactant Concentration (mg/L)	1,896	1,157	2,889	0,887	<0,010	0,835

Deskripsi:

R1 : Reaktor pabrik, media, Eco-Enzyme, dan air limbah

Sitoresmi (2015) Reaktor: Reaktor pabrik, media, dan air limbah

Mekanisme degradasi surfaktan oleh eko-enzim

Eco Enzyme adalah produk fermentasi dari sampah organik yang mengandung enzim aktif dan konsorsium mikroba yang mampu mendegradasi senyawa organik melalui hidrolisis enzimatik (Homberg, 2023). Analisis aktivitas enzim pada Eco Enzyme yang berasal dari kulit jeruk menunjukkan adanya aktivitas protease, lipase, dan amilase, yang berperan dalam degradasi berbagai komponen organik dalam air limbah (Sholeha, 2021).

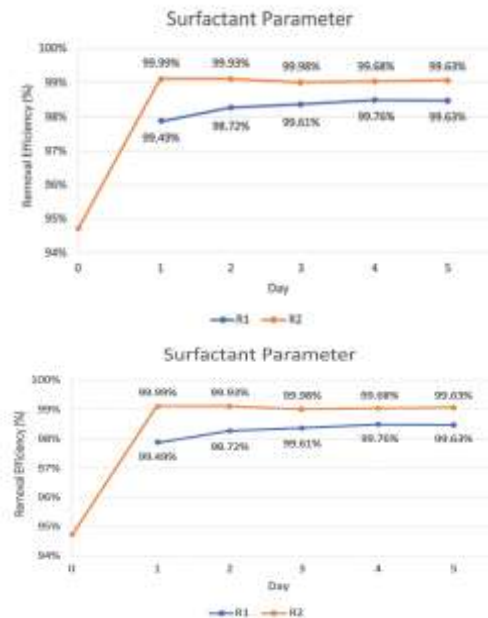
Enzim lipase dalam Eco Enzyme mempunyai peranan khusus dalam degradasi surfaktan. Arun dan Sivashanmugam (2015) melaporkan bahwa enzim lipase bertindak sebagai biokatalis yang membantu degradasi surfaktan dalam deterjen dengan mempercepat laju reaksi. Enzim lipase dan alkilsulfatase juga mampu memutus rantai karbon yang ada dalam molekul surfaktan, menghasilkan senyawa yang lebih sederhana dan lebih mudah terurai (Belkhir et al., 2020).

Penelitian Bratha dan Putri (2022) menunjukkan bahwa Eco Enzyme dari batang pisang dapat meningkatkan biodegradabilitas deterjen, dengan mekanismenya beroperasi melalui aktivitas multi-enzim yang mengkatalisis reaksi hidrolisis ikatan labil dalam struktur surfaktan.

Biodegradasi surfaktan di lahan basah bawah permukaan yang dibangun rendah

Proses degradasi surfaktan dalam SSFCW terjadi melalui kombinasi mekanisme fisikokimia dan biologis. Proses utama termasuk adsorpsi ke media dan sedimen, diikuti oleh biodegradasi mikroba di dalam biofilm dan rizosfer (Al-Saad et al., 2021).

Biodegradasi Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS) dalam sistem lahan basah yang dibangun melibatkan mikroorganisme seperti *Pseudomonas* sp., yang mampu mendegradasi struktur aromatik surfaktan melalui serangkaian reaksi oksidasi (Suriani et al., 2015). Proses degradasi dimulai dengan: 1) Pemecahan cincin aromatik LAS oleh mikroorganisme rhizobacteria. 2) Oksidasi alfa: degradasi asam lemak rantai panjang dengan melepaskan satu atom karbon. 3) Oksidasi beta: pembelahan asam lemak setiap dua atom karbon dalam bentuk asetil KoA.



Gambar 9. Grafik Efisiensi Penghapusan Parameter Surfaktan .

Sumber: Hasil Pengukuran Pribadi (2025)

R1: Reaktor 1 (Pabrik, media, Eco Enzyme, dan air limbah)

R2: Reaktor 2 (Media, Eco Enzyme, dan air limbah)

Hasilnya menunjukkan bahwa R2 menunjukkan efisiensi pengangkatan yang lebih konsisten dibandingkan dengan R1 pada sebagian besar hari pengamatan. Namun, kedua reaktor mengalami penurunan efisiensi pada Hari ke-6, dengan R1 turun 0,37% (dari 100% menjadi 99,63%) dan R2 turun 0,22% (dari 99,76% menjadi 99,44%).

Faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja reaktor

Perbedaan kinerja antara R1 dan R2 dapat dijelaskan oleh beberapa faktor:

a) Kompetisi Nutrisi

Pada R1, Eco Enzyme, yang mengandung mikroorganisme dan nutrisi, cenderung diserap lebih awal oleh tanaman sebelum dapat berfungsi secara optimal dalam degradasi surfaktan. Sudarmadji et al. (2017) melaporkan bahwa Eco Enzyme mengandung mikroorganisme yang mengubah nutrisi selama fermentasi menjadi bentuk yang mudah diserap oleh tanaman. Islami et al. (2023) menambahkan bahwa Eco Enzyme menghasilkan senyawa bermanfaat seperti fitohormon dan enzim yang berperan dalam metabolisme dan pertumbuhan tanaman.

b) Dinamika Populasi Mikroba

Penurunan efisiensi di kedua reaktor pada Hari ke-6 menunjukkan dinamika populasi mikroba. Syahid et al. (2020) menjelaskan bahwa dalam proses biosorpsi aktif, mikroorganisme hidup menyerap polutan melalui aktivitas metabolisme, namun setelah mikroorganisme mati, akumulasi polutan dapat tetap berada di dalam struktur sel.

c) Aktivitas Enzim dalam Eco Enzyme

Penelitian menunjukkan bahwa Eco Enzyme dari kulit jeruk mengandung enzim lipase, yang efektif dalam mendegradasi surfaktan (Sholeha, 2021). Arun dan Sivashanmugam (2017) melaporkan bahwa Eco Enzyme memiliki enzim hidrolitik multi-aktivitas yang mampu mendegradasi sampah organik.

Mekanisme molekuler degradasi surfaktan

Berdasarkan analisis literatur saat ini, degradasi surfaktan dalam gabungan Eco Enzyme dan sistem SSFCW melibatkan beberapa jalur molekuler:

a) Hidrolisis Enzimatik

Eco Enzyme mengandung enzim hidrolitik seperti lipase, protease, dan amilase yang mengkatalisis pembelahan ikatan ester dan amida dalam molekul surfaktan (Mehrvar dan Venhuis, 2023). Pérez et al. (2022) melaporkan bahwa hidrolisis amida merupakan langkah penting dalam biodegradasi surfaktan kationik berbasis arginin.

b) Oksidasi Mikroba

Mikroorganisme dalam sistem lahan basah yang dibangun, khususnya genera *Pseudomonas* dan *Rhodopseudomonas*, berperan dalam oksidasi rantai alkil surfaktan melalui jalur oksidasi alfa dan beta (Sitoresmi, 2015). Proses ini menghasilkan asam karboksil-sulfonil, yang kemudian dimineralisasi menjadi CO_2 , H_2O , dan SO_4^{2-} .

c) Sintrofi Mikroba

Mascoli Junior et al. (2023) mengidentifikasi komunitas mikroba yang bekerja secara sintofis dalam degradasi LAS, yang melibatkan proses hidrolisis, fermentasi, asetogenesis, dan metanogenesis di zona redoks yang berbeda.

Hasil penelitian ini memberikan beberapa implikasi praktis bagi penerapan teknologi pengolahan air limbah surfaktan:

d) Efektivitas Sistem Gabungan

Kombinasi Eco Enzyme dan SSFCW terbukti efektif dalam memenuhi standar kualitas dengan efisiensi penghilangan 99,63%. Sistem ini dapat direkomendasikan untuk pengolahan air limbah dari industri sabun dan deterjen.

e) Optimasi Dosis Eco Enzyme

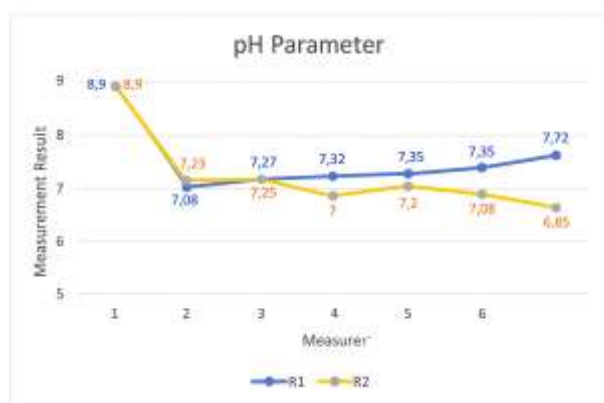
Berdasarkan persaingan nutrisi yang diamati pada R1, perlu dioptimalkan dosis dan waktu aplikasi Eco Enzyme untuk memaksimalkan fungsi degradasi surfaktan dengan tetap mendukung pertumbuhan tanaman.

f) Manajemen Populasi Mikroba

Penurunan efisiensi pada Hari ke-6 menunjukkan perlunya strategi pengelolaan populasi mikroba, seperti penambahan nutrisi atau aerasi terkontrol, untuk mempertahankan aktivitas mikroba.

Analisis pH

Analisis pH adalah parameter lingkungan kritis yang dilakukan untuk mengevaluasi kondisi keasaman atau alkalinitas dalam lingkungan reaktor, karena pH memberikan pengaruh besar pada viabilitas tanaman dan laju metabolisme mikroorganisme. Umumnya, pH media filter cenderung tertarik ke arah netral saat terpapar air limbah, sebuah fenomena yang sering dikaitkan dengan zat yang dihasilkan dari reaksi reduksi di zona anoksik (Sitoresmi, 2015).



Gambar 10. Grafik Hasil Pengukuran PH.
Sumber: Pengukuran Pribadi (2025)

R1: Reaktor 1 (Pabrik, media, Eco Enzyme, dan air limbah)

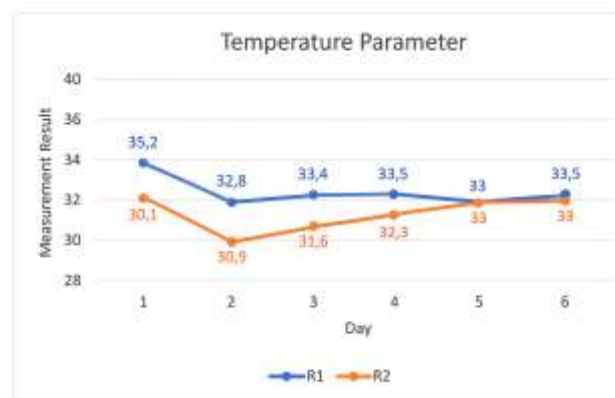
R2: Reaktor 2 (Media, Eco Enzyme, dan air limbah)

Pengukuran harian mengungkapkan bahwa pH di Reaktor R1 dan R2 berfluktuasi secara stabil dalam kisaran sempit 6,85 hingga 7,32 selama periode pengamatan. Kisaran pH netral ini sangat kondusif untuk kondisi kehidupan yang optimal, terutama untuk tanaman air, yang tumbuh subur paling baik antara pH 7.0 dan 8.5 dan tidak dapat bertahan hidup di lingkungan yang sangat asam $\text{pH} < 4$ (Ulumudin & Purnomo, 2022; Vymazal, 2011). Fluktuasi yang diamati dimulai dengan penurunan pH segera setelah penambahan air limbah, dikonfirmasi disebabkan oleh kontribusi pH awal Eco Enzyme yang sangat asam sekitar 3,07. Namun, pH dengan cepat bergeser kembali ke kisaran netral/basa lemah. Pemulihan ini

dijelaskan oleh dinamika kesetimbangan CO₂-alkalinitas yang terutama didorong oleh keberadaan makrofit. Selama fotosintesis, penyerapan CO₂ terlarut oleh tanaman mengurangi konsentrasi CO₂. Pergeseran kesetimbangan kimia ini secara otomatis menurunkan pembentukan ion H⁺, sehingga meningkatkan pH air (Kadlec & Wallace, 2009). pH yang stabil dan netral ini sangat penting untuk memastikan bahwa aktivitas enzim pendegradasi surfaktan, seperti lipase dan alkil sulfatase dari Eco Enzyme, dan mikroba rizosfer, beroperasi pada tingkat yang optimal, yang terpenting untuk keberhasilan keseluruhan proses pengolahan air limbah (Tchobanoglous et al., 2003).

Analisis Suhu

Analisis suhu dilakukan untuk memverifikasi bahwa kondisi termal air limbah di dalam reaktor berada dalam batas yang mendukung efisiensi degradasi surfaktan yang tinggi, terutama oleh mikroorganisme. Suhu adalah variabel kunci yang secara kritis mempengaruhi kinetika reaksi biologis. Suhu optimal yang dibutuhkan oleh mikroorganisme pengolah polutan biasanya berkisar antara 15oC dan 35oC (Parasmita et al., 2013).



Gambar 11. Grafik Hasil Pengukuran Suhu.

Sumber: Pengukuran Pribadi (2025)

R1: Reaktor 1 (Pabrik, media, Eco Enzyme, dan air limbah)

R2: Reaktor 2 (Media, Eco Enzyme, dan air limbah)

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa suhu di kedua reaktor berfluktuasi antara 30,9oC dan 35,2oC. Kisaran ini dipastikan berada dalam batas normal dan optimal untuk pertumbuhan tanaman dan aktivitas mikroba di lingkungan berair. Variasi suhu sebagian besar dipengaruhi oleh faktor eksternal, seperti suhu ruangan sekitar, lokasi penelitian, dan intensitas paparan matahari, yang merupakan variasi khas dalam sistem Lahan Basah Terkonstruksi terbuka (Vymazal, 2011).

Meskipun kisaran ini ideal, manajemen suhu tetap penting. Suhu yang terlalu tinggi dapat menginduksi denaturasi enzim pada mikroorganisme, secara signifikan menghambat laju metabolisme, dan berpotensi menyebabkan kematian sel, yang pada akhirnya mengurangi

efisiensi degradasi surfaktan (Metcalf & Eddy, 2014; Masi et al., 2020). Selain itu, suhu tinggi mempercepat laju evapotranspirasi dan penguapan air di dalam reaktor, yang memerlukan pengawasan operasional yang cermat. Dengan demikian, kondisi termal yang dicapai dalam penelitian ini membentuk fondasi lingkungan yang kondusif, sepenuhnya mendukung laju reaksi tinggi yang diamati untuk degradasi surfaktan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Integrasi *Cyperus papyrus* Subsurface Flow Constructed Wetland (SSFCW) dengan Eco-Enzyme merupakan teknologi sinergis yang sangat efektif untuk pengolahan air limbah cucian terdesentralisasi. Sistem gabungan mencapai efisiensi penghilangan surfaktan 99,63% (mengurangi konsentrasi menjadi 0,835 mg/L), secara meyakinkan menunjukkan kepatuhan terhadap standar peraturan 3 mg/L. Kinerja unggul ini dihasilkan dari mekanisme multi-aspek: hidrolisis enzimatis awal oleh lipase dan protease Eco-Enzym, diikuti oleh mineralisasi mikroba di rizosfer lahan basah. Dengan mempercepat kinetika degradasi, pendekatan ini secara efektif mengatasi keterbatasan waktu retensi hidraulik yang berkepanjangan, membangun solusi yang layak, berkelanjutan, dan sangat efisien untuk mengurangi polusi surfaktan.

DAFTAR REFERENSI

- Al-Saad, M. H., Elaibi, A. I., & Mageed, I. S. (2021). Improving nutrient removal in constructed wetland wastewater treatment. *Journal of Petroleum Research and Studies*, 2(2). <https://doi.org/10.52716/jprs.v2i2.38>
- Arun, C., & Sivashanmugam, P. (2015). Investigation of biocatalytic potential of garbage enzyme and its influence on stabilization of industrial wastewater activated sludge. *Process Safety and Environmental Protection*, 94, 471–478. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.10.009>
- Arun, C., & Sivashanmugam, P. (2017). Enhancement of biodegradation of organic pollutants using garbage enzymes: A comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(15), 13467–13478.
- Belkhir, M., Louhab, K., Bougherara, S., et al. (2020). Surfactant elimination through biological pathways. In *Proceedings of the International Conference on Environmental Science and Technology*.
- Bratha, R. W. K., & Putri, N. R. (2022). Innovation in environmentally friendly detergent production with the addition of eco-enzyme from banana stems (*Musa paradisiaca*). *Journal of Innovation Studies*, 2(4), 121–135. <https://doi.org/10.52000/jsi.v2i4.121>

- Homberg, M. (2023). Constructed wetlands for organic hydrocarbon remediation: A sustainable environmental cleanup approach. In *Sustainable approaches for bioremediation of environmental pollutants* (pp. 67–89). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2564-3_4
- Islami, R., Sari, D. P., & Wahyuni, S. (2023). Effectiveness of eco-enzymes in enhancing plant growth. *Journal of Environmental Biotechnology*, 15(3), 78–85.
- Mascoli Junior, R., Passoni, C. M., Santos, F. M., et al. (2023). Assessment of surfactant removal capacity and microbial community diversity in constructed wetlands treating greywater. *Resources*, 12(3), 38.
- McLaughlin, M. C., McDevitt, B., Miller, H., et al. (2021). Constructed wetlands for polishing oil and gas produced water discharges. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 23(10), 1552–1565. <https://doi.org/10.1039/d1em00311a>
- Mehrvar, M., & Venhuis, S. R. H. (2023). Health effects, environmental impacts, and photochemical degradation of selected surfactants in water. *Environmental Research Communications*, 5(7).
- Pérez, L., García, M. T., Pinazo, A., et al. (2022). Cationic surfactants based on arginine–phenylalanine and arginine–tryptophan: Synthesis, aggregation behavior, antimicrobial activity, and biodegradation. *Pharmaceutics*, 14(12), 2602. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14122602>
- Rahman, D. A., Priambodo, E., Caturputranto, T., et al. (2022). Pollutant removal kinetics in constructed wetlands influenced by retention time and plant density using *Cyperus alternifolius*. *Journal of Ecological Engineering*, 23(12), 123–132. <https://doi.org/10.12911/22998993/154848>
- Sholeha, N. (2021). Lipase activity in eco-enzymes derived from orange peels for surfactant degradation. *Journal of Applied Biochemistry*, 8(2), 67–74.
- Sitoresmi, A. (2015). Effectiveness of subsurface flow constructed wetlands in reducing surfactant parameters in detergent wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 21(2), 156–164.
- Stm, T., Sutanto, H. B., & Prihatmo, G. (2022). Removal efficiency of organic load, phosphate, and detergent in car wash wastewater using a constructed wetland system. *BioLink*, 8(2), 145–156. <https://doi.org/10.31289/biolink.v8i2.5796>
- Sudarmadji, S., Darmanto, W., & Supriyadi, S. (2017). Effect of eco-enzymes on water quality and plant growth. *Journal of Environmental Technology*, 18(2), 45–52.
- Suriani, N., Soeharjono, & Soemarno. (2015). Biodegradation of linear alkylbenzene sulfonate (LAS) by indigenous bacterial consortium. *Journal of Biology*, 8(1), 23–32.
- Syahid, M., Rahman, A., & Putri, L. (2020). Mechanisms of pollutant biosorption by microorganisms in wastewater treatment systems. *Journal of Environmental Engineering*, 12(4), 234–245.