

ANALISIS SISTEM DAN BIAYA PENGOLAHAN LIMBAH CAIR INDUSTRI TAHU DENGAN MENGGUNAKAN FITOREMEDIASI TANAMAN ECENG GONDOK (*Eichornia crassipes*) (STUDI KASUS PABRIK TAHU CIKUDA)

Marshal Amperrmeo Sihaloho^{1*}, Chay Asdak², Boy Macklin Pareira P.³

^{1,2,3} Teknik Pertanian, Universitas Padjadjaran
*Email: marshalfarmerathlete@gmail.com

ABSTRAK

Limbah cair hasil industri tahu mengandung *Biological Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan *Total Suspended Solid* (TSS) yang cukup tinggi. Jika limbah cair dibuang begitu saja akan menimbulkan masalah lingkungan yang kompleks. Salah satu alternatif solusi yang dinilai efektif untuk mengatasi permasalahan ini adalah fitoremediasi tanaman eceng gondok. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas sistem pengolahan limbah cair industri tahu menggunakan fitoremediasi tanaman eceng gondok serta mengetahui perbandingan biaya pengolahan limbah cair industri tahu menggunakan fitoremediasi dengan tanaman eceng gondok jika dibandingkan dengan metode konvensional (biofilter aerob-anaerob). Jenis penelitian ini adalah eksperimen-komparatif yang terdiri dari dua proses, yakni fitoremediasi dan komparasi data. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Sumber Daya Air, Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjadjaran untuk fitoremediasi sedangkan untuk pengujian hasil penelitian, masing-masing sampel diuji di Laboratorium Ekologi Pulik Universitas Padjadjaran Bandung. Penelitian ini dilaksanakan pada Februari hingga Maret 2021. Hasil penelitian menunjukkan bahwa eceng gondok dapat menurunkan kadar TSS, BOD, dan COD secara umum di atas 80%. Selain dari segi efektivitas, dari segi biaya, pengolahan limbah cair industri tahu dengan metode fitoremediasi lebih efektif daripada metode konvensional (biofilter aerob-anaerob). Hal ini dibuktikan dengan nilai *Eco-Efficiency Ratio* (EER) metode konvensional sebesar 78,48% dan metode fitoremediasi sebesar 87,03%.

Kata Kunci: Sistem; Biaya; Limbah Cair; Industri Tahu; Fitoremediasi; Eceng Gondok.

PENDAHULUAN

Tahu adalah sejenis makanan yang dibuat dari kedelai. Kedelai direbus, tetapi tidak difermentasikan. Setelah itu, kedelai diambil sari-sarinya. Tahu mulai dikenalkan di Asia Timur dan Asia Tenggara oleh para perantau China hingga akhirnya, tahu menyebar ke seluruh penjuru dunia sampai ke Indonesia [1].

Industri tahu semakin lama berkembang semakin pesat di Indonesia karena tahu merupakan makanan yang sangat diminati di Indonesia. Aneka makanan dari tahu antara lain tahu bacem, tahu bakso, tahu isi (tahu bunting), tahu campur, perkedel tahu, kerupuk tahu, dan lain-lain [2]. Sayangnya, masih banyak industri tahu di Indonesia yang belum memahami dan menerapkan metode pengolahan limbah tahu yang efektif. Limbah hasil produksi tahu acapkali dibuang langsung ke sungai. Masalah utama yang lain dari pengelolaan limbah adalah menemukan solusi pengolahannya sehingga limbah tidak

menimbulkan masalah lingkungan yang serius [3]. Permasalahan lingkungan merupakan faktor penting yang harus segera dipikirkan mengingat dampak dari buruknya pengelolaan lingkungan semakin nyata saat ini. Pemilihan masalah lingkungan dalam penelitian ini dikarenakan berhubungan makhluk hidup terutama manusia [4].

Limbah adalah buangan yang dihasilkan dari suatu proses produksi yang kehadirannya tidak dikehendaki lingkungan karena tidak memiliki nilai ekonomis. Kehadiran limbah dapat berdampak negatif terhadap lingkungan [5]. Air limbah mengalami proses pembusukan zat organik sehingga menimbulkan bau tak sedap. Selain bau, warna air limbah yang kotor juga sangat mengganggu pemandangan [6].

Limbah cair tahu sendiri mengandung *Biological Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan *Total Suspended Solid* (TSS) yang tinggi. TSS yang tinggi menghalangi masuknya sinar matahari ke

dalam air, sehingga akan mengganggu proses fotosintesis, menyebabkan turunnya oksigen terlarut yang dilepas ke dalam air oleh tanaman. Turunnya oksigen terlarut dalam air yang mengganggu ekosistem akuatik. Selain itu, apabila jumlah materi tersuspensi ini mengendap, maka pembentukan lumpur dapat mengganggu aliran serta menyebabkan pendangkalan [7]. Sebagian besar limbah cair yang dihasilkan bersumber dari cairan kental yang terpisah dari gumpalan tahu pada tahap proses penggumpalan dan penyaringan yang disebut air dadih atau *whey* [8].

Penanganan air limbah seringkali membutuhkan biaya yang tidak sedikit sehingga memerlukan analisis eko-efisiensi dan produksi bersih. Adapun biaya secara sempit dapat diartikan sebagai pengorbanan sumber ekonomi untuk memperoleh aktiva [9]. Eko-efisiensi bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan per unit yang diproduksi dan dikonsumsi. Beberapa tools yang digunakan dalam pengukuran eko-efisiensi diantaranya adalah *Eco-costs*, *Net value Product*, perhitungan akhir dari metode ini adalah *Eco-cost Value Ratio* (EVR) di mana dari EVR ini akan diperoleh hasil *Eco-Efficiency Ratio* (EER) [10]. Produksi bersih adalah strategi pengelolaan lingkungan yang sifatnya mengarah pada pencegahan dan terpadu untuk diterapkan pada seluruh siklus produksi. Produksi bersih berfokus pada usaha pencegahan terbentuknya limbah yang merupakan salah satu indikator inefisiensi. Keberhasilan upaya ini akan menghasilkan penghematan yang besar karena penurunan biaya produksi yang signifikan sehingga pendekatan ini dapat menjadi sumber pendapatan [11].

Salah satu alternatif solusi yang dinilai efektif untuk mengatasi permasalahan ini dengan metode fitoremediasi. Fitoremediasi adalah pencucian polutan yang diremediasi oleh tumbuhan. Tanaman air berperan sebagai aerator perairan melalui proses fotosintesis, mengatur aliran air, membersihkan aliran tercemar melalui proses sedimentasi serta penyerapan partikel dan mineral [12]. Keunggulan fitoremediasi dibandingkan dengan teknologi pengolahan limbah yang lain adalah prosesnya yang alami serta tidak diperlukan teknologi tinggi. Kelebihan tersebut menyebabkan biaya operasi proses fitoremediasi relatif lebih rendah dibandingkan dengan metode lain [13].

Di antara sekian banyak tanaman remediator, salah satu tanaman yang prospektif untuk digunakan sebagai agen fitoremediasi limbah organik adalah eceng gondok (*Eichornia crassipes*). Selama ini, eceng gondok dikenal sebagai gulma yang merugikan karena mengganggu kelancaran pekerjaan petani. Di sisi lain, eceng gondok dapat hidup dengan baik dalam air limbah yang memiliki kandungan bahan organik yang tinggi sehingga dapat menyerap segala unsur pencemar di dalam air [14]. Beberapa tanaman yang dapat menyerap polutan dalam air di antaranya kiambang, kangkung air, dan eceng gondok. Adapun di antara ketiga tanaman tersebut, eceng gondok memiliki efektivitas penurunan kadar kekeruhan, TSS, BOD, COD, serta unsur Nitrogen yang tertinggi [15].

Studi kasus pada penelitian ini di Pabrik Tahu Cikuda yang terletak di Neglasari, Cikuda, Kecamatan Jatinangor, Kabupaten Sumedang. Pabrik ini memiliki kolam eceng gondok untuk mengurangi kadar limbah sebelum dibuang ke sungai. Hal ini tentunya layak menjadi inspirasi untuk para pelaku industri tahu. Pada proses produksi tahu di Pabrik Tahu Cikuda, debit limbah cair yang dihasilkan ± 4000 L dalam sehari [16]. Hal ini tentunya harus menjadi perhatian dari pihak pengelola industri terkait mengingat dampaknya yang besar terhadap lingkungan.

Berdasarkan beberapa uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas sistem pengolahan limbah cair industri tahu jika menggunakan fitoremediasi tanaman eceng gondok serta mengetahui perbandingan biaya pengolahan limbah cair industri tahu menggunakan fitoremediasi dengan tanaman eceng gondok jika dibandingkan dengan metode konvensional (biofilter aerob-anaerob).

METODE PENELITIAN

Jenis penelitian ini adalah eksperimen-komparatif yang terdiri dari dua proses, yakni fitoremediasi dan komparasi data. Pada proses fitoremediasi, digunakan 6 wadah berupa baskom yang terdiri dari 3 wadah biru untuk fitoremediasi dan 3 wadah merah untuk kontrol. Pada proses komparasi data, digunakan data dari hasil wawancara dengan Manajer Pabrik Tahu Cikuda serta berbagai data sekunder sebagai acuan untuk perbandingan antara biaya pengolahan metode fitoremediasi dengan metode konvensional (biofilter aerob-anaerob).

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Sumber Daya Air, Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjadjaran untuk fitoremediasi sedangkan untuk pengujian hasil penelitian, masing-masing sampel diuji di Laboratorium Ekologi Pulik Universitas Padjadjaran Bandung. Penelitian ini dilakukan sejak Februari hingga Maret 2021.

Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah 12 buah botol air mineral 1.5 L, 6 buah wadah, corong, ember, gelas ukur, jerigen 5 L, kertas label, kertas tisu, laptop, rak kayu, *software* Ms. Excel, *software* Ms. Word, telepon seluler, dan timbangan digital.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain air bersih, data mengenai limbah hasil UKM/IKM yang diperoleh dari Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Jawa Barat, data yang diperoleh dari beberapa karya ilmiah terkait, data yang diperoleh dari Pabrik Tahu Cikuda, es batu, limbah cair hasil industri tahu, serta tanaman eceng gondok.

Prosedur Kerja

1. Aklimatisasi (Penelitian Pendahuluan)
3 buah wadah merah dan biru disiapkan yang masing-masing memiliki diameter 38 cm dan kedalaman 14,4 cm. Selanjutnya, tanaman eceng gondok diambil dari Pabrik Tahu Cikuda dan langsung dibersihkan dari kotoran yang menempel. Tanaman eceng gondok yang digunakan seberat ± 500 g untuk setiap wadah biru. Aklimatisasi pun dimulai dengan menuangkan air bersih sebagai media tanam eceng gondok sebanyak 6 L ke dalam setiap wadah biru dan didiamkan selama 1 minggu. Tidak lupa setiap wadah merah diberi label A1, A2, dan A3 dan wadah biru diberi label B1, B2, dan B3. Seluruh wadah diletakkan pada rak kayu yang terdapat di belakang Laboratorium Sumber Daya Air Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjadjaran. Setiap hari dilakukan dokumentasi untuk mengamati kondisi tanaman eceng gondok.
2. Pengujian I (Sebelum Fitoremediasi)
Air limbah tahu yang akan diuji diambil dari saluran pembuangan Pabrik Tahu Cikuda menggunakan jerigen 5 L. Selanjutnya, seluruh wadah dikosongkan dan dibersihkan dengan air bersih mengalir. Air limbah sebanyak 1,9 L

dituangkan ke dalam setiap wadah dengan menggunakan teknik pengenceran 25% ($25\% \times 7,5 \text{ L} = 1,9 \text{ L}$) dan juga air bersih sebagai pelarut dituangkan sebanyak 5,6 L ke dalam setiap wadah dan diaduk rata. Larutan tersebut selanjutnya dituangkan ke dalam setiap botol 1,5 L sehingga volume larutan dalam setiap wadah tersisa ± 6 L. Tanaman eceng gondok kembali ditanam pada masing-masing wadah biru. Pengamatan dilakukan selama 1 minggu dalam proses fitoremediasi ini. Untuk pengujian I, setiap botol diberi label sesuai dengan wadah pengambilan sampel dengan kode sampel masing-masing adalah: BF A1, BF A2, BF A3, BF B1, BF B2, dan BF B3. Sampel harus dalam keadaan dingin sehingga sampel-sampel tersebut dibawa dalam ember yang berisi air dan es batu. Selanjutnya, sampel-sampel dibawa untuk pengujian kandungan BOD, COD, dan TSS di Laboratorium Ekologi Pulik Universitas Padjadjaran. Pengujian kandungan BOD mengacu pada SNI 6989.72-2009, COD pada SNI 6989.2:2009, dan TSS pada SNI 06-6989.3-2019. Setiap hari dilakukan dokumentasi untuk mengamati kondisi larutan air limbah dan tanaman eceng gondok.

3. Pengujian II (Setelah Fitoremediasi)

Larutan air limbah yang tersisa dituangkan ke dalam setiap botol 1,5 L sehingga volume larutan dalam setiap wadah tersisa $\pm 4,5$ L. Untuk pengujian II, setiap botol diberi label sesuai dengan wadah pengambilan sampel dengan kode sampel masing-masing adalah: AF A1, AF A2, AF A3, AF B1, AF B2, dan AF B3. Sama halnya dengan pengujian sebelumnya, seluruh sampel harus dalam keadaan dingin, jadi dibawa dalam ember yang berisi air dan es batu. Selanjutnya, sampel-sampel dibawa untuk pengujian kandungan BOD, COD, dan TSS di Laboratorium Ekologi Pulik Universitas Padjadjaran. Pengujian kandungan BOD mengacu pada SNI 6989.72-2009, COD pada SNI 6989.2:2009, dan TSS pada SNI 06-6989.3-2019. Sisa-sisa tanaman eceng gondok selanjutnya dikembalikan ke Pabrik Tahu Cikuda.

4. Perhitungan Efektivitas Penurunan Limbah Cair Industri Tahu dari Hasil Fitoremediasi

Perhitungan data efektivitas secara matematis [15]:

$$Efektivitas = \frac{(BF- AF)}{BF} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

di mana:

BF = Nilai parameter sebelum fitoremediasi

AF = Nilai parameter setelah fitoremediasi

5. Analisis Biaya Pengolahan Limbah Industri Tahu ditinjau dari Eko-Efisiensi

Analisis data ini sebagai perbandingan antara biaya pengolahan limbah metode konvensional dengan fitoremediasi. Data-data yang diperlukan antara lain biaya produksi, harga jual, dan biaya lingkungan (*eco-cost*). Selanjutnya, dilakukan perhitungan *Net Value*, *Eco-Efficiency Index* (EEI), *Eco-costs per Value Ratio* (EVR), serta *Eco-Efficiency Ratio* (EER) yang secara matematis seperti berikut [10].

$$Net Value = H. Jual - B. Produksi \dots\dots\dots (2)$$

$$EEI = \frac{Net Value}{Biaya Produksi + Eco-cost} \dots\dots\dots (3)$$

$$EVR = \frac{Eco-cost}{Net Value} \dots\dots\dots (4)$$

$$EER Rate = (1 - EVR) \times 100\% \dots\dots\dots (5)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Fitoremediasi dalam Sistem Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu

Sebelum dilakukan fitoremediasi, terlebih dahulu harus dilakukan aklimatisasi agar tanaman eceng gondok dapat beradaptasi dengan kondisi larutan air limbah tahu yang akan diolah. Proses aklimatisasi dan fitoremediasi dilakukan di tempat yang sama, yakni di atas rak kayu yang terletak di belakang Laboratorium Sumber Daya Air, Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjadjaran. Hal ini bertujuan agar tanaman eceng gondok tetap dapat melakukan proses fotosintesis dengan baik.

Sebelum melakukan aklimatisasi, dilakukan pengambilan beberapa data awal. Data-data tersebut meliputi massa eceng gondok, volume air sebagai media untuk aklimatisasi, serta tinggi tanaman rata-rata dalam setiap wadah. Ketiga hal tersebut disesuaikan dengan ukuran wadah yang tersedia.

Tabel 1. Data Hasil Aklimatisasi

Wadah	Massa Eceng Gondok (g)	V air (L)	Tinggi Tanaman Rata-Rata (cm)
A1			
A2	Tidak dilakukan aklimatisasi		
A3			
B1	501	7,5	50
B2	508	7,5	52
B3	509	7,5	55

Pada proses aklimatisasi, pengamatan terus dilakukan selama satu minggu. Berdasarkan hasil pengamatan, selama proses aklimatisasi, kondisi tanaman eceng gondok dan air tidak mengalami perubahan yang signifikan dari hari ke hari. Dengan demikian, tanaman eceng gondok telah beradaptasi dengan kondisi lingkungan dan larutan air limbah yang baru dan siap untuk melalui tahap fitoremediasi.

Tabel 2. Kondisi selama Proses Aklimatisasi

Hari ke-	Kondisi Tanaman Eceng Gondok	Keterangan
	Fitoremediasi (B1-B3)	
1		Eceng Gondok keseluruhan dalam kondisi baik
2		Eceng Gondok keseluruhan dalam kondisi baik
3		Eceng Gondok keseluruhan dalam kondisi baik
4		Eceng Gondok keseluruhan dalam kondisi baik
5		Eceng Gondok keseluruhan dalam kondisi baik

6		Eceng Gondok keseluruhan dalam kondisi baik
7		Tidak terlihat perubahan yang signifikan dari hari ke hari

tanaman eceng gondok untuk menyerap kandungan limbah dari larutan. Pengujian I dilakukan untuk mengetahui kadar parameter larutan air limbah sebagaimana yang tercantum dalam tabel 3. Hasilnya, parameter BOD dan COD dari keseluruhan sampel belum memenuhi standar baku mutu limbah. Hal ini membuktikan bahwa limbah hasil industri tahu mengandung BOD dan COD yang tinggi, yang mana jika langsung dibuang ke lingkungan tentunya akan sangat mencemari dan mengganggu kehidupan yang ada di sekitar lingkungan industri.

Proses fitoremediasi diawali dengan pengenceran larutan air limbah sebesar 25%. Hal ini dilakukan agar dapat mengurangi konsentrasi air limbah sehingga memudahkan

Tabel 3. Data Pengujian I (Sebelum Fitoremediasi)

Sampel	Kandungan			Standar Baku Mutu Limbah			Keterangan		
	BOD	COD	TSS	BOD	COD	TSS	BOD	COD	TSS
	(mg/L)			(mg/L)			Memenuhi Standar?		
BF A1	192	220	58	100	50	200	Tidak	Tidak	Ya
BF A2	204	294	93				Tidak	Tidak	Ya
BF A3	288	441	144				Tidak	Tidak	Ya
BF B1	201	286	120				Tidak	Tidak	Ya
BF B2	195	264	105				Tidak	Tidak	Ya
BF B3	198	279	129				Tidak	Tidak	Ya

Proses fitoremediasi diakhiri dengan pengujian II seperti yang tercantum pada tabel 4. Pengujian setelah fitoremediasi bertujuan untuk membandingkan hasil parameter antara sebelum dan setelah dilakukannya fitoremediasi sekaligus mengetahui efektivitas penurunan ketiga parameter yang diujikan. Hasil pengujian terhadap sampel AF A1, AF A2, serta AF A3 ketiganya sama-sama belum memenuhi standar baku mutu limbah untuk keseluruhan parameter bahkan cenderung mengalami kenaikan, yang juga dipertegas dengan efektifitas bernilai negatif pada gambar 1, gambar 2, dan gambar

3. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama dibiarkan, maka semakin banyak mikroorganisme anaerob yang masuk ke dalam wadah sehingga meningkatkan nilai BOD dan secara tidak langsung juga meningkatkan nilai COD karena terjadi reaksi fermentasi. Nilai TSS juga ikut mengalami peningkatan karena semakin lama dibiarkan maka semakin banyak partikel mikroskopik yang juga masuk ke dalam wadah yang ditandai dengan semakin keruhnya larutan limbah pada wadah A1, A2, dan A3 dari hari ke hari yang mana hal ini dapat terlihat pada tabel 5.

Tabel 4. Data Pengujian II (Setelah Fitoremediasi)

Sampel	Kandungan			Standar Baku Mutu Limbah			Keterangan		
	BOD	COD	TSS	BOD	COD	TSS	BOD	COD	TSS
	(mg/L)			(mg/L)			Memenuhi Standar?		
AF A1	281	397	282	100	50	200	Tidak	Tidak	Tidak
AF A2	307	529	296				Tidak	Tidak	Tidak
AF A3	311	1058	315				Tidak	Tidak	Tidak
AF B1	12	37	15				Ya	Ya	Ya
AF B2	16	44	18				Ya	Ya	Ya
AF B3	10	29	12				Ya	Ya	Ya

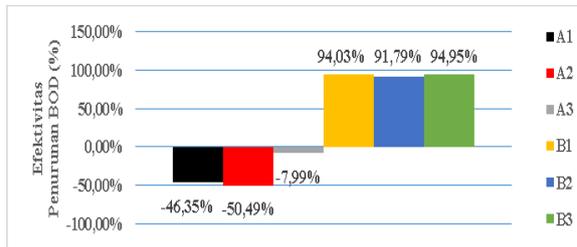
Tabel 5. Kondisi selama Proses Fitoremediasi

Hari ke-	Kondisi Larutan Limbah dan Tanaman Eceng Gondok		Keterangan	
	Kontrol (A1-A3)	Fitoremediasi (B1-B3)	Kontrol (A1-A3)	Fitoremediasi (B1-B3)
1			Larutan air limbah masih terlihat jernih	Eceng Gondok dalam kondisi baik dan larutan air limbah terlihat jernih
2			Larutan air limbah mulai sedikit keruh	Eceng Gondok dalam kondisi baik dan larutan air limbah terlihat jernih
3			Larutan air limbah mengalami peningkatan dalam kekeruhannya	Salah satu tanaman Eceng Gondok layu tetapi larutan air limbah terlihat jernih
4			Tidak terlihat perubahan yang signifikan	Tidak terlihat perubahan yang signifikan
5			Larutan air limbah terlihat semakin keruh	Tanaman Eceng Gondok yang layu bertambah tetapi larutan limbah terlihat semakin jernih
6			Tidak terlihat perubahan yang signifikan	Tidak terlihat perubahan yang signifikan
7			Larutan limbah mencapai kekeruhan klimaksnya	Eceng Gondok semakin banyak yang layu tetapi larutan limbah mencapai kejernihannya klimaksnya

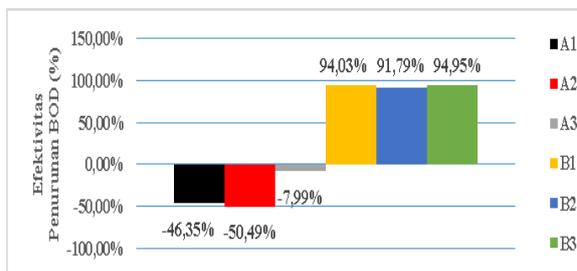
Lain halnya yang terjadi pada sampel AF B1, AF B2, dan AF B3 pada tabel 4, yang mana nilai pada ketiga parameternya telah memenuhi standar baku mutu limbah bahkan mengalami penurunan yang signifikan. Hal ini terjadi karena akar tanaman eceng gondok dapat menyerap apapun nutrisi atau kandungan yang

terdapat pada air. Pernyataan ini diperjelas dengan data pengamatan pada tabel 5, yang mana larutan limbah pada wadah B1, B2, dan B3 semakin lama semakin jernih meskipun tanaman eceng gondok satu per satu mulai layu. Eceng gondok semakin lama semakin layu karena terlalu banyak menyerap BOD, COD,

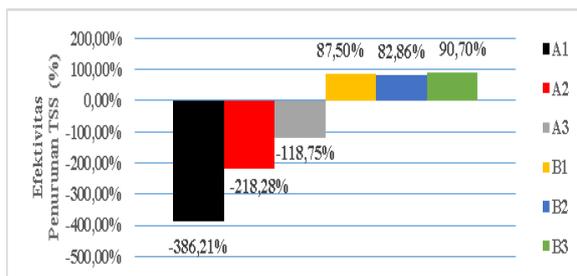
dan TSS. Adapun penurunan parameter terpampang jelas pada tabel-tabel di bawah ini, yang mana secara umum efektivitas penurunan air limbah hasil fitoremediasi berada di atas 80%. Dengan demikian, tanaman eceng gondok efektif untuk mengurangi kadar BOD, COD, dan TSS pada limbah cair industri tahu.



Gambar 1. Grafik Efektivitas Penurunan Kadar BOD dari Setiap Wadah



Gambar 2. Grafik Efektivitas Penurunan Kadar COD dari Setiap Wadah



Gambar 3. Grafik Efektivitas Penurunan Kadar TSS dari Setiap Wadah

2. Perbandingan Biaya Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu antara Metode Konvensional dengan Metode Fitoremediasi Ditinjau dari Eko-Efisiensi

Unsur pertama yang terlebih dahulu harus diketahui untuk perhitungan eko-efisiensi adalah harga jual tahu. Berikut ini adalah hasil perhitungan secara detail harga jual tahu dari Pabrik Tahu Cikuda [16].

Tabel 6. Perhitungan Harga Jual Tahu per Hari

Variabel	Jumlah
Frekuensi Produksi	17 kali
Jumlah Baki	8 kotak
Persentase Kerusakan	5%
Jumlah per Baki	169 keping
Harga Jual/Satuan	Rp10.000,00/13 keping
Subtotal	Rp130.000,00
Total Harga Jual	Rp16.796.000,00

Secara matematis [16]:

$$\text{Subtotal} = \text{Jumlah} \times \text{Harga} \frac{\text{Jual}}{\text{Satuan}} \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{Total Harga Jual} = \text{Subtotal} \times \text{Jumlah Baki} \times \text{Frekuensi Produksi} \times (100 - \text{Persentase Kerusakan})\% \dots\dots\dots (7)$$

Harga jual tahu langsung didapatkan dari hasil wawancara dengan Pihak Manajer Tahu Cikuda. Harga jual tahu sejak wawancara dilakukan dipatok sebesar Rp10.000,00 untuk setiap 13 keping tahu. Setiap proses produksi tentunya selalu ada produk yang mengalami kerusakan, yang mana dalam hal ini terdapat kerusakan produk sebesar 5% dari total produk yang dihasilkan dalam sehari. Adapun total harga jual yang didapatkan dari tahu sekitar Rp16.796.000,00 setiap harinya.

Unsur berikutnya yang juga harus dicari untuk perhitungan eko-efisiensi adalah biaya produksi tahu. Berikut ini adalah hasil perhitungan biaya produksi tahu secara rinci.

Tabel 7. Estimasi Perhitungan Biaya Produksi Tahu per Hari

Bahan Baku	Ukuran		Harga per Satuan	Nilai
	Jumlah	Satuan		
Kedelai	500	kg	Rp6.600,00	Rp3.300.000,00
Cuka	2	Liter	Rp60.000,00	Rp120.000,00
Solar	10	Liter	Rp8.000,00	Rp80.000,00
Listrik	15	Jam	Rp853,30	Rp12.799,53
Bubuk Kayu	5	Ton	Rp100.000,00	Rp500.000,00
Air	50.000	Liter	Rp0,00	Rp0,00
Tenaga Kerja	Tenaga Kerja	Harian	Rp570.000,00	Rp570.000,00
Total Biaya Produksi Per Hari				Rp4.582.799,53

Biaya produksi tahu didapatkan dari analisis data sekunder yang telah diolah dari hasil penelitian sebelumnya [17]. Pada biaya produksi tahu, biaya-biaya yang menjadi bahan pertimbangan adalah biaya bahan baku, seperti kedelai, cuka, solar, listrik, kayu bakar, serta upah tenaga kerja. Air termasuk bahan baku namun gratis karena air dapat diperoleh dari air

tanah dalam dan air hujan. Hasil perhitungan keseluruhan menunjukkan bahwa total biaya produksi per hari sebesar Rp4.582.799,53.

Unsur terakhir yang tidak boleh terlewat adalah biaya lingkungan atau *eco-cost*. Berikut ini adalah hasil perhitungan *eco-cost* produksi tahu secara rinci.

Tabel 8. Perhitungan *Eco-cost* dari Produksi Tahu per Hari

No.	Variabel	Konvensional	Fitoremediasi
A. Biaya Pencegahan			
	Pemeliharaan	Rp82.410,96	-
	Perlengkapan	Rp783.561,64	Rp783.561,64
	Peralatan	Rp476.712,33	-
B. Biaya Deteksi			
	Pengelolaan Limbah	Rp197.260,27	-
	Pengawasan Proses	Rp54.794,52	-
	Kebersihan Lingkungan	Rp8.219,18	Rp8.219,18
C. Biaya Kegagalan Internal			
	Penanganan Limbah Beracun	Rp44.054,79	-
	Perlengkapan	Rp783.561,64	Rp783.561,64
	Pengelolaan Limbah	Rp197.260,27	-
D. Biaya Kegagalan Eksternal			
	Penanganan Limbah Tambahan	-	Rp8.219,18
	Total	Rp2.627.835,62	Rp1.583.561,64

Eco-cost juga didapatkan dari hasil analisis data sekunder [18]. *Eco-cost* penting untuk diperhitungkan oleh setiap pelaku industri atau perusahaan sebagai biaya untuk mencegah atau mengurangi potensi kerusakan lingkungan yang ditimbulkan. Aspek-aspek yang menjadi bahan pertimbangan adalah biaya pencegahan, biaya deteksi, biaya kegagalan internal, serta biaya kegagalan eksternal [19]. Perhitungan *eco-cost* dihitung dari kedua

metode, baik dari konvensional (biofilter aerob-anaerob) dan juga fitoremediasi. Berdasarkan hasil perhitungan keseluruhan, diketahui bahwa total *eco-cost* masing-masing sebesar Rp2.627.835,62 dan Rp1.583.561,64. Berdasarkan tabel perhitungan di atas, dapat diketahui bahwa *eco-cost* untuk sistem fitoremediasi lebih rendah daripada konvensional. Hal ini terjadi karena sistem biofilter aerob-anaerob memerlukan

penanganan dan perawatan yang lebih intensif serta peralatan yang lebih banyak. Sementara pada metode fitoremediasi hanya memerlukan sedikit biaya penanganan limbah tambahan yang berupa sisa tanaman fitoremediasi yang mati, yang dalam hal ini adalah eceng gondok. Dengan demikian semakin kecil *eco-cost*, maka semakin efektif sistem pengelolaan limbah dari instansi terkait.

Setelah nilai harga jual, biaya produksi, dan *eco-cost* diketahui, barulah dapat dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai *Net value*, *Eco-Efficiency Index* (EEI), *Eco-costs per Value Ratio* (EVR), serta *Eco-Efficiency Ratio* (EER) untuk masing-masing metode pengolahan, seperti pada tabel di bawah berikut.

Tabel 9. Hasil Perhitungan Biaya Eko-Efisiensi Produksi Tahu

Variabel	Konvensional	Fitoremediasi
Harga Jual/hari (Rp)	Rp16.796.000,00	Rp16.796.000,00
Biaya Produksi/hari (Rp)	Rp4.582.799,53	Rp4.582.799,53
<i>Net value</i> (Rp)	Rp12.213.200,47	Rp12.213.200,47
<i>Eco-costs</i> /hari (Rp)	Rp2.627.835,62	Rp1.583.561,64
EEI	1,694 <i>Sustainable dan Affordable</i>	1,981 <i>Sustainable dan Affordable</i>
EVR	0,22	0,13
EER	78,48%	87,03%

Net value merupakan selisih dari harga jual dan biaya produksi seperti yang telah tertera di atas. Semakin besar nominal *net value* maka semakin besar keuntungan yang didapatkan. Adapun pada tabel perhitungan di atas, hasil perhitungan *net value* dari kedua metode pengolahan limbah sama besar karena menggunakan selisih antara harga jual dan biaya produksi dari tahu yang sama.

Nilai EEI dihitung untuk menentukan apakah kegiatan pengolahan limbah yang dilakukan terjangkau secara finansial (*affordable*) dan ramah lingkungan (*sustainable*) atau tidak. Jika nilai EEI < 0, maka tidak *affordable* dan tidak *sustainable*, jika nilai EEI antara 0-1, maka *affordable* tetapi tidak *sustainable*, sedangkan jika nilai EEI > 1, maka *affordable* dan *sustainable* [10]. Pada hasil perhitungan, dapat kita lihat bahwa nilai EEI pada masing-masing sistem sebesar 1,694 dan 1,981, yang menunjukkan bahwa kedua metode ini *affordable* dan *sustainable*. Meskipun demikian, nilai EEI pada metode fitoremediasi lebih besar yang berarti metode fitoremediasi lebih unggul.

Berikutnya mengenai nilai *Eco-costs per Value Ratio* (EVR). Semakin kecil nilai EVR maka semakin minimal pengeluaran. Berdasarkan hasil perhitungan, nilai EVR berturut-turut senilai 0,22 dan 0,13. Sama halnya dengan nilai EEI, nilai EVR pada metode fitoremediasi lebih unggul karena biaya yang harus dikeluarkan lebih minimal.

Terakhir adalah perhitungan nilai *Eco-Efficiency Ratio* (EER). Berdasarkan hasil perhitungan pada tabel 16 di atas, nilai EER yang didapatkan berturut-turut sebesar 78,48% dan 87,03%. Persentase EER menunjukkan efektif atau tidaknya metode pengolahan limbah. Semakin besar nilai EER maka semakin efektif eko-efisiensi. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa secara keseluruhan, metode pengolahan limbah cair industri tahu dengan fitoremediasi lebih efektif dibandingkan dengan metode konvensional.

KESIMPULAN

Fitoremediasi dengan tanaman eceng gondok merupakan metode yang efektif dalam pengolahan limbah cair industri tahu, khususnya untuk menurunkan kadar BOD, COD, dan TSS dengan efektivitas penurunan secara umum di atas 80%. Selain itu, biaya pengolahan limbah cair industri tahu dengan metode fitoremediasi lebih efektif daripada metode konvensional yang dibuktikan dengan nilai EER pada metode konvensional dan fitoremediasi secara berturut-turut sebesar 78,48% dan 87,03%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Haryono, Bambang dan Dina Kurniati. (2013). *Kedelai*. Jakarta: PT. Trisula Adisakti.

- [2] Joe, Wulan. (2011). *101++ Keajaiban Khasiat Kedelai*. Yogyakarta: CV. Andi Offset.
- [3] Yuwono, Arief Sabdo dan Yoga Armando. (2016). *Pengolahan dan Pemanfaatan Limbah Pertanian*. Bogor: Seameo Biotrop.
- [4] Andika, A., & Kurniawan, N. L. G. E. S. P. S. (2017). Analisis Perlakuan Akuntansi Atas Biaya Pengolahan Limbah Pabrik (Studi Penerapan Akuntansi Lingkungan pada PT Indo Citra Jaya Samudra Jembrana). *E-Journal S1 Akuntansi Universitas Pendidikan Ganesha*, 8(2), 10–19.
- [5] Hufron. (2013). *Limbah Pabrik Bisa Didaur Ulang*. Bandung: CV. Alfarisi Putra.
- [6] Asmadi dan Suharno. (2012). *Dasar-Dasar Teknologi Pengolahan Air Limbah*. Yogyakarta: Gosyen Publishing.
- [7] Ruhmawati, T., Sukandar, D., Karmini, M., & S, T. R. (2017). Penurunan Kadar Total Suspended Solid (TSS) Air Limbah Pabrik Tahu dengan Metode Fitoremediasi. *Jurnal Permukiman*, 12(1), 25–32.
- [8] Haerun, R., Mallongi, A., & Natsir, M. F. (2018). Efisiensi Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu Menggunakan Biofilter Sistem Upflow dengan Penambahan Efektif Mikroorganisme 4. *Jurnal Nasional Ilmu Kesehatan*, 1(2), 1–11.
- [9] Widilestariningtyas, Ony dkk. (2012). *Akuntansi Biaya*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [10] Sari, et. al. (2012). “Pengukuran Tingkat Eko-Efisiensi Menggunakan Life Cycle Assessment Untuk Menciptakan Sustainable Production di Industri Kecil Menengah Batik.” *Jurnal Teknik Industri* 14(2):137–44.
- [11] BPLHD (Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup Daerah) Jawa Barat. (2015). Laporan Akhir Pekerjaan: Pekerjaan Mapping dan Pendampingan Program Produksi Bersih pada Industri Binaan.
- [12] Ahmad, H., & Adiningsih, R. (2019). Efektivitas Metode Fitoremediasi Menggunakan Tanaman Eceng Gondok dan Kangkung Air Dalam Menurunkan Kadar BOD dan TSS pada Limbah Cair Industri Tahu. *Jurnal Farmasetis*, 8(2), 31–38.
- [13] Nirmala, K., Wardani, S., Hastuti, Y. P., & Nurussalam, W. (2016). Penentuan Bobot Kayu Apu *Pistia stratiotes* L . sebagai Fitoremediator dalam Pendederan Ikan Gurami *Oshpronemus goramy* Lac. Ukuran 3 cm. *Jurnal Akuakultur Indonesia*, 15(2), 180–188. <https://doi.org/10.19027/jai.15.2.180-188>.
- [14] Zumani, D., Suryaman, M., & Dewi, S. M. (2015). Pemanfaatan Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) untuk Fitoremediasi Kadmium (Cd) pada Air Tercemar. *Siliwangi*, 1(1), 22–31.
- [15] Novita, E., Hermawan, A. A. G., & Wahyuningsih, S. (2019). Komparasi Proses Fitoremediasi Limbah Cair Pembuatan Tempe Menggunakan Tiga Jenis Tanaman Air. *Jurnal Agroteknologi*, 13(01), 16–24.
- [16] Tukirman, diwawancarai oleh penulis, 2020, Pabrik Tahu Cikuda, Jatinangor, Jawa Barat, Indonesia.
- [17] Agtriani, N. N., & Prabawani, B. (2020). Analisis Proses Produksi pada Usaha Kecil dan Menengah (UKM) Tahu di Kelurahan Jomblang Berbasis Eko-Efisiensi (Studi Pada UKM Tahu Harapan Tenang Semarang). *Jurnal Ilmu Administrasi Bisnis*, 9(2).
- [18] Dwifebrisa, Rinanda. (2014). *Analisis Penerapan Akuntansi Lingkungan dan Penyajiannya dalam Laporan Keuangan (Studi pada Industri Tahu H.Makhrus)*. (Undergraduate Thesis, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim, 2014). Diakses dari: <http://etheses.uin-malang.ac.id/id/eprint/1958>
- [19] Hansen, R. dan M. Mowen. (2005). *Management Accounting (7th ed)*. (Dewi Fitriasisari dan Deny Arnos Kwary, Terjemahan). Jakarta: Salemba Empat.