



Penggunaan Fitoremediasi dengan Sistem Up-Flow untuk Mereduksi Polutan pada Outlet Kolam Anaerob II Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit

The Use of Phytoremediation with an Up-flow System to Reduce Pollutants at Anaerobic Pond Outlets II Oil Palm Mill Liquid Waste

Andina Pratiwi*, Rijadi Subiantoro, Febrina Delvitasari
Estate Crop Department, Politeknik Negeri Lampung, Bandar Lampung, Indonesia

*Corresponding author: andinapratwi3@gmail.com

Received: May 5, 2021; Accepted: August 31, 2021; Published: October 31, 2021

ABSTRACT

Oil palm plantations are one of the commodity crops that have an important role in the economy in Indonesia, namely as an export commodity that generates foreign exchange in addition to oil and gas. The increase in world demand for oil palm commodity encourages the growth of oil palm industry so that estimates of liquid waste also increase. If the liquid waste is disposed of directly into the aquatic environment without proper management, it will have a negative impact. This study aims to find the best phytoremediation in reducing the pollutants of WWTP II anaerobic ponds in the oil palm mill industry and to get the reduction. Research activities took place from July 2020 to September 2020 in the field and Analysis Laboratory of the Lampung State Polytechnic. This study uses an up-flow system with a stagnant condition and is carried out on a laboratory scale by testing using descriptive methods. The phytoremediation used in this study were water nails (*Azolla pinnata*) (A1), water spinach (*Ipomoea aquatica*) (A2), cattail (*Typha angustifolia*) (A3) and water bamboo (*Equisetum hyemale*) (A4). The results showed that the best phytoremediation in reducing the observation variable of oil palm mill effluent outlet anaerobic pond II was water spinach (*Ipomoea aquatica*). Phytoremediation *Ipomoea aquatica* at the end of the treatment was able to reduce the COD value with a decrease percentage of 41.29%, increase the pH to 8.57, reduce the TSS value to 124 mg/L, the turbidity value to 21 mg/L, the total N value to 0.021 mg/L, the K value becomes 2.59 mg/L.

Keywords: *Azolla pinnata*; *Equisetum hyemale*; *Ipomoea aquatica*; *Typha angustifolia*

Cite this as: Pratiwi, A., Subiantoro, R., & Delvitasari, F. (2021). Penggunaan fitoremediasi dengan sistem up-flow untuk mereduksi polutan pada outlet kolam anaerob II limbah cair pabrik kelapa sawit. *Agrosains : Jurnal Penelitian Agronomi*, 23(2), 89-98. DOI: <http://dx.doi.org/10.20961/agsjpa.v23i2.50101>

PENDAHULUAN

Tanaman kelapa sawit merupakan tanaman induk yang sudah menyebar luas di sejumlah wilayah Indonesia, yaitu Sumatera, Kalimantan, Sulawesi dan Irian Jaya. Luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia tercatat pada 2017 seluas 12.307.677 hektar yang terbagi atas tanaman perkebunan rakyat, perkebunan besar negara, perkebunan besar swasta nasional dan perkebunan besar swasta. Jumlah produksi sebanyak 35.359.384 ton buah kelapa sawit serta tingkat produktivitas sebesar 3.817 Kg/hektar (Direktorat Jendral Perkebunan, 2016). Tanaman kelapa sawit juga merupakan salah satu komoditi hasil perkebunan yang memiliki peran penting dalam perekonomian di Indonesia yaitu sebagai komoditas ekspor penghasil devisa negara selain minyak dan gas. Peningkatan permintaan dunia terhadap komoditi kelapa sawit sehingga mendorong naiknya industri kelapa sawit sehingga perkiraan limbah cair yang diperoleh juga meningkat.

Limbah cair pabrik kelapa sawit termasuk kategori limbah dengan kuantitas yang tinggi dan mengandung polutan mencapai 8.200-35.000 mg/L untuk BOD; 15.103-65.100 mg/L untuk COD; 1.330-50.700 mg/L untuk TSS (Kep. Men LH no. 51 Th 1995). Apabila

limbah cair tersebut langsung dibuang ke lingkungan perairan tanpa pengelolaan yang tepat, akan menimbulkan dampak yang negatif. Oleh karena itu, perlu dilakukan penanganan limbah cair pabrik kelapa sawit, salah satunya menggunakan metode fitoremediasi dengan sistem up-flow.

Fitoremediasi adalah suatu sistem yang mengandalkan tanaman air tertentu bekerjasama dengan mikroorganisme dalam media (tanah, koral dan air) yang dapat menurunkan zat kontaminan (pencemar) menjadi tidak berbahaya atau bahkan menjadi bahan yang berguna secara ekonomi (Lestari et al., 2020). Beberapa jenis tanaman air mampu bekerja sebagai agens fitoremediasi, seperti tanaman paku air (*Azolla pinnata*), kangkung air (*Ipomoea aquatica*), cattail (*Typha angustifolia*) dan bambu air (*Equisetum hyemale*). Menurut Nasrullah, dkk., (2017) tanaman *Typha angustifolia* mampu mereduksi pencemar limbah cair industri karet kadar COD dari 5009,5 mg/L menjadi 493,3 mg/L dengan persentase 90,15%. Menurut (Ren et al., 2019), tanaman bambu air mampu mereduksi pencemar pada limbah terolah industri penyamakan kulit dengan penurunan COD mencapai 60,60% dengan WTH 3,125 hari, BOD optimal sebesar 60,17% dengan WTH 2,083 hari, sedangkan untuk TSS penurunan

optimal dapat dicapai dengan WTH 3,125 hari sebesar 94,64%.

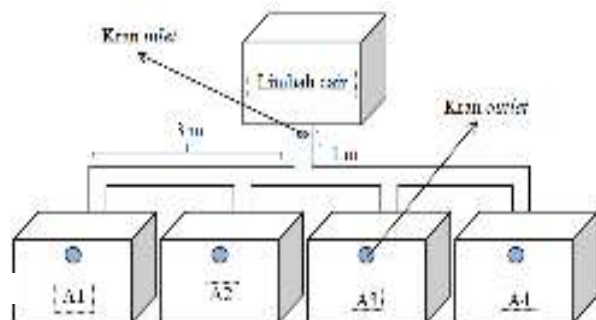
Air limbah dari pabrik kelapa sawit dialirkan ke kolam anaerob. Pada bagian dalam kolam anaerob berada dikondisi anaerob, sehingga terjadi fermentasi metan, kemudian zat organik diuraikan menjadi gas karbon dan metan, sehingga turun sampai level tertentu konsentrasi zat organik di dalam air limbah (KLH Jepang/KLH Indonesia, 2013). Hal tersebut menunjukkan bahwa kolam anaerob II memiliki pH 6-7. Tanaman air dapat tumbuh pada pH 6-7, sehingga dapat dikatakan bahwa tanaman air dapat tumbuh pada kolam anaerob II.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan fitoremediasi air terbaik dalam mereduksi polutan pada IPAL outlet kolam anaerob II limbah cair pabrik kelapa sawit dan menghitung persentase penurunan COD, peningkatan pH, serta penurunan TSS, kekeruhan, N-total, dan K pada IPAL outlet kolam anaerob II limbah cair pabrik kelapa sawit.

BAHAN DAN METODE

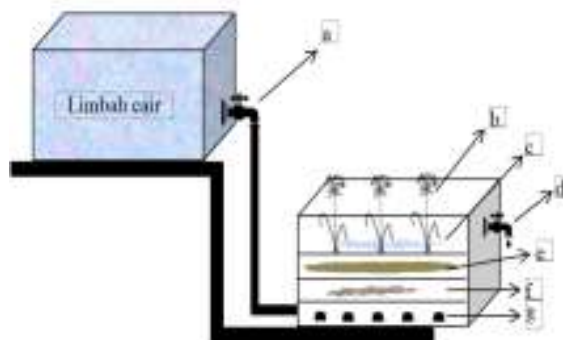
Penelitian ini dilaksanakan di lahan Politeknik Negeri Lampung dan analisis variabel pengamatan dilaksanakan di Laboratorium Analisis Politeknik Negeri Lampung pada Juli 2020 hingga September 2020. Alat yang digunakan yaitu *container box* (55 cm x 38 cm x 32 cm), pipa, kran, jerigen, *turbidity meter*, *spektrofotometer*, *stopwatch*, pH meter, labu ukur, neraca analitik, *beakerglass*, pipet ukur, pipet tetes *nanometrick*, botol sampel, bola hisap, cawan, oven, *hot plate*, erlenmeyer, gelas ukur, *magnetic stirer*, labu Kjeldahl, *shaker*, destilator, inkubator, dan set titrasi. Bahan yang digunakan yaitu sampel limbah cair pabrik kelapa sawit kolam anaerob II yang didapatkan dari Pabrik Pengolahan Kelapa Sawit PTPN VII unit Bekri, tanaman paku air dan kangkung air yang didapatkan dari kolam perikanan dekat perumahan Dosen Politeknik Negeri Lampung, tanaman *cattail* dan tanaman bambu air yang didapat dari toko tanaman hias, batu split, pasir, *topsoil*, *aquadest*, H₂SO₄ pekat, HgSO₄, HClO₄, K₂Cr₂O₇ 1 N, H₂BO₃, H₂SO₂, C₈H₅KO₄, NaOH, dan kertas saring.

Penelitian ini menggunakan sistem *up-flow* dikondisikan *stagnant* yang dilakukan dalam skala laboratorium dengan pengujian menggunakan metode deskriptif. Perlakuan menggunakan 4 tanaman, yaitu paku air (*Azolla pinnata*) (A1), kangkung air (*Ipomoea aquatica*) (A2), *cattail* (*Typha angustifolia*) (A3) dan bambu air (*Equisetum hyemale*) (A4).



Gambar 1. Rancangan alat pengolahan limbah sistem fitoremediasi

Keterangan: *Container box* dengan ukuran panjang 55 cm, lebar 38 cm, dan tinggi 32 cm.



Gambar 2. Rancangan alat pengolahan limbah sistem fitoremediasi

Keterangan:

- a. Kran inlet
- b. Fitoremediasi (tanaman paku air, kangkung air, *cattail*, dan bambu air)
- c. Air limbah
- d. Outlet pengambilan sampel
- e. Top soil
- f. Pasir
- g. Batu split

Data yang diperoleh kemudian dihitung persentase nilai reduksi COD, peningkatan pH, dan penurunan TSS, Kekeruhan, N-total, dan K, lalu dilakukan perbandingan diantara ke-4 tanaman tersebut yang paling efektif dalam menurunkan COD (mg/L), TSS (mg/L), Kekeruhan (NT_μ), N-Total (mg/L), dan K (mg/L), serta meningkatkan pH. Data tersebut disajikan dalam bentuk grafik.

Uji pendahuluan sampel limbah: Limbah cair kelapa sawit berasal dari *outlet* kolam anaerob II IPAL PTPN VII Unit Bekri. Dilakukan uji pendahuluan dengan cara menganalisis sampel limbah cair kelapa sawit berupa pengukuran COD (mg/L), pH, TSS (mg/L), Kekeruhan (NT_μ), N-Total (mg/L), dan K (mg/L). Persiapan penelitian: Bak dirangkai dengan sistem *up-flow* yang terdiri atas dua tingkatan, bak bagian atas dan bak bagian bawah. Bak bagian atas diperuntukkan menampung limbah cair dari pabrik yang akan diperlakukan dan bak bagian bawah yang akan digunakan untuk diberi perlakuan dengan menanami fitoremediasi.

Tanaman fitoremediasi mulai ditanam di bak perlakuan beserta dengan air dari habitat asli tanaman tersebut untuk adaptasi tanaman dengan lingkungan tanam yang baru. Setelah 20 hari masa adaptasi, bak perlakuan atas mulai diisi dengan limbah cair kelapa sawit dari *outlet* kolam anaerob II, kemudian memulai perlakuan untuk mengamati besarnya pengurangan polutan pada limbah cair kelapa sawit dengan perlakuan tersebut.

Penelitian dilakukan menggunakan bak dengan panjang 55 cm, lebar 38 cm, dan tinggi 32 cm. Sebelum diisi limbah cair kelapa sawit, bagian dasar bak diisi dengan batu split, pasir, dan *top soil* masing-masing dengan ketebalan ± 3 cm.

Diketahui:

Volume air dalam bak = 56 L

Waktu tinggal = 5 hari (120 jam)

Dengan volume air 56 L dan waktu tinggal selama 5 hari (120 jam), kemudian dihitung debit air limbah yang masuk ke dalam bak.

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{56 \text{ L}}{120 \text{ jam}} = 0,4 \frac{\text{L}}{\text{jam}} = 6,6 \text{ mL/menit}$$

Pengamatan: Limbah yang digunakan dalam penelitian adalah limbah cair kelapa sawit dengan variabel pengamatan, yaitu COD (mg/L), pH, TSS (mg/L), Kekeruhan (NT_u), N-Total (mg/L), dan K (mg/L). Pengamatan pertama dilakukan pada 25 HST, kemudian pengamatan selanjutnya dilakukan setiap 5 hari hingga 5 kali diulang 2 kali pengujian (analisis). Prosedur pengukuran variabel pengamatan yang diamati adalah:

COD (Chemical Oxygen Demand) (SNI6989.2:2009): Analisis pengukuran COD tahap pertama yang dilakukan yaitu menyiapkan larutan pencerna pada labu ukur volume 250 mL kemudian masukkan 2.554 gram K₂Cr₂O₇, 41,75 mL H₂SO₄, 8,35 gram HgSO₄. Tahap berikutnya menyiapkan larutan kalium hidrogen yakni 0,425 gram C₈H₅KO₄ selanjutnya membuat larutan standart dengan menyiapkan aquadest pada masing masing tabung (2,5 mL, 2 mL, 1,5 mL, 1 mL, 0,5 mL, 0 mL) dengan penambahan masing masing larutan kalium hidrogen sebanyak (0 mL, 0,5 mL, 1 mL, 1,5 mL, 2 mL, 2,5 mL) larutan pencerna masing masing 1,5 ml dan asam sulfat masing masing 3,5 mL.

Menghitung COD dengan rumus:

$$\text{COD} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(A - B) \times N \text{ FAS} \times 1000 \times 8 \times 100}{V \text{ sampel}}$$

Keterangan:

A = jumlah mL blanko

B = jumlah mL sampel

Derajat Kemasaman (pH) (SNI06-6989.11-2004): Analisis pengukuran pH pada limbah cair industri karet menggunakan pH meter dengan cara: tombol suhu pada saat pengukur pH disesuaikan dengan suhu larutan yang diperiksa. Mengalibrasi pH meter menggunakan larutan penyangga pH 7,00 dan pH 4,01. Membilas *elektrode* dengan air bebas ion dan keringkan dengan tisu sebelum pengukuran setiap sampel / larutan penyangga. Memasukkan *elektrode* ke dalam sampel (kurang lebih 25 mL baca setelah mantap). Membilas *electrode* dengan air bebas ion dan mengeringkan menggunakan tisu sebelum pengukuran setiap sampel/larutan penyangga.

TSS (Total Suspended Solid) (SNI06-6989.3-2004): Menyiapkan sampel air dan kertas saring. Mengoven kertas saring kemudian menimbanginya. Melakukan penyaringan dengan peralatan vakum. Membasahi saringan dengan sedikit air suling. Mengaduk contoh uji dengan *magnetic stirer* untuk memperoleh contoh uji yang lebih homogen. Pipet contoh diuji dengan volume tertentu, pada waktu contoh diasuk dengan *magnetic stirer*. Lanjutkan penyaringan dengan vakum selama 3 menit agar diperoleh penyaringan sempurna. Contoh uji dengan padatan terlarut yang tinggi memerlukan pencucian tambahan. Memindahkan kertas saring secara hati-hati dari peralatan penyaring dan memindahkan ke wadah timbang aluminium sebagai penyangga. Jika digunakan cawan Gooch memindahkan cawan dari rangkaian alatnya. Mengeringkan dengan oven selama ± 1jam pada suhu 103°C sampai dengan 105°C, mendinginkan dalam desikator untuk menyeimbangkan suhu dan timbangan. Menghitung nilai TSS:

$$\text{TSS} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(A - B) \times 1000}{V}$$

Keterangan:

A = berat kertas saring + residu kering (mg)

B = berat kertas saring (mg)

V = volume contoh (ml)

Kekeruhan (turbidity) (SNI 06-6989[1].25-2005): Alat yang digunakan untuk menganalisa turbiditas adalah turbidimeter portable 2100P. Memasukkan sampel ke dalam botol turbidimeter dan diusahakan tidak ada gelembung udara, kemudian tabung tersebut ditempatkan pada tempat pengukuran dan membaca nilai kekeruhan yang muncul pada layar alat. Menghitung penyisihan atau penurunan kekeruhan berdasarkan persamaan sebagai berikut :

$$\text{Penyisihan turbiditas} = \frac{(A-B)}{A} \times 100\%$$

N-Total: Mengambil 1 mL sampel, memasukkan kedalam labu kjedahl kemudian menambahkan selenium 1 gram, menambahkan 10 mL H₂SO₄ pekat secara perlahan kedalam tabung. Kemudian memasukkan ke dalam alat pemanas (destruksi) selama ± 4 jam atau sampai cairan berwarna hijau bening, kemudian didinginkan dan menambahkan 100 mL aquades. Sampel dari labu kjedahl dipindahkan ke labu takar 250 mL, kemudian menambahkan NaOH 20 mL dan dilakukan pengenceran dengan aquades sampai 250 mL. Mengambil 2 mL sampel dan memasukkannya ke dalam tabung reaksi kemudian menambahkan 8 mL aquades untuk pengenceran. Lalu menambahkan nesler A dan B sebanyak 1 mL dan mengukur di *spectrofotometer*. Perhitungan kadar nitrogen dapat dihitung dengan rumus:

$$N \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{\text{ppm} \times \text{pelarut} \times \text{pengencer} \times \text{FK}}{\text{berat sampel} \times 10.000}$$

Keterangan:

ppm = nilai yang tertera pada spektrofotometer

Kalium (K): Larutan standar K dari larutan standar kalium 200 ppm dibuat larutan standar dengan variasi 2;4;6;8;10 ppm, dengan cara mengambil sebanyak 1; 2; 3; 4 dan 5 mL larutan standar kemudian memasukkan kedalam labu ukur 10 mL hingga tanda batas. Menimbang 0,5 gram larutan standar ke dalam labu kjedahl, ditambah 5 mL HNO₃ dan 0,5 mL HClO₄, dikocok-kocok dan biarkan semalam kemudian panaskan mulai suhu 100°C, setelah uap kuning habis suhu dinaikkan menjadi 200°C. Destruksi diakhiri bila sudah keluar uap putih dan cairan dalam labu tersisa 0,5 mL, kemudian mendinginkan dan mengencerkan dengan H₂O dan volume ditepatkan menjadi 50 mL, mengocok hingga homogen dan membiarkan semalam atau menyaring dengan kertas saring agar dapat diekstrak jernih (ekstrak A). Memipet 1 mL ekstrak A, memasukkan ke dalam labu ukur 25 mL,menambah aquades hingga tanda batas, kemudian mengocok hingga homogen (ekstrak B). Mengukur K dengan menggunakan AAS dengan deret standar sebagai pembandingan. Perhitungan kadar K dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{Kadar K (mg/L)} = \text{ppm kurva} \times P$$

Keterangan:

ppm kurva : kadar contoh yang didapat dari kurva regresi hubungan antar kadar deret standar dengan pembacaannya setelah dikurangi blanko

P : volume ukur dibagi dengan volume sampel

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Tanaman Politeknik Negeri Lampung pada bulan Desember 2019 sampai Januari 2020. Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah kurungan serangga, gelas plastik, kertas label, kuas, kain kasa, pisau, timbangan, blender, ember, cawan petri, gela sukur, panci, dan toples. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah daun sirih, daun sirsak, akuades, deterjen, larva Spodoptera litura instar II, serbuk gergaji, kertas serap, kapas, madu, dan daun bayam. Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap yang terdiri atas 7 perlakuan dengan 4 ulangan, sehingga terdapat 28 satuan percobaan. Setiap satuan percobaan terdiri dari 12 ekor larva ulat grayak tahap instar II. Pada pembuatan perlakuan 10%, jumlah larutan yang dibutuhkan adalah 10% dari 100 ml larutan jadi, yaitu 10 ml larutan jadi, lalu ditambahkan dengan 90% atau 90 ml akuades.

Data yang diperoleh dianalisis dengan analisis ragam, bila berbeda nyata maka dilanjutkan dengan uji BNT pada taraf 5%. Pengamatan dilakukan setiap hari dengan mengamati jumlah ulat yang mati (mortalitas), dan lama perkembangan larva hingga menjadi pupa setelah pemberian perlakuan insektisida nabati. Mortalitas dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Mortalitas} = \frac{\text{Jumlah larva yang mati}}{\text{jumlah seluruh larva yang diamati}} \times 100\%$$

Lama perkembangan larva hingga menjadi pupa diamati setiap hari dengan melihat lama waktu hidup larva hingga menjadi pupa. Data yang diperoleh diolah dengan sidik ragam. Jika hasil analisis sidik ragam menunjukkan perbedaan nyata, maka akan dilanjutkan dengan uji BNT pada taraf 5%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Pendahuluan Limbah Cair Kelapa Sawit

Uji pendahuluan limbah cair kelapa sawit bertujuan untuk mengetahui sifat awal dari limbah cair kelapa sawit yang nantinya akan menjadi data pembanding setelah limbah cair kelapa sawit telah mengalami proses fitoremediasi. Limbah cair kelapa sawit diambil dari PTPN VII Unit Usaha Bekri pada outlet kolam anaerob 2. Pengambilan sampel dilakukan secara sampling. Uji pendahuluan limbah cair kelapa sawit dilakukan di Laboratorium Analisis Politeknik Negeri Lampung. Hasil

dari uji pendahuluan limbah cair kelapa sawit outlet kolam anaerob 2 disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil uji pendahuluan limbah cair kelapa sawit outlet kolam anaerob 2

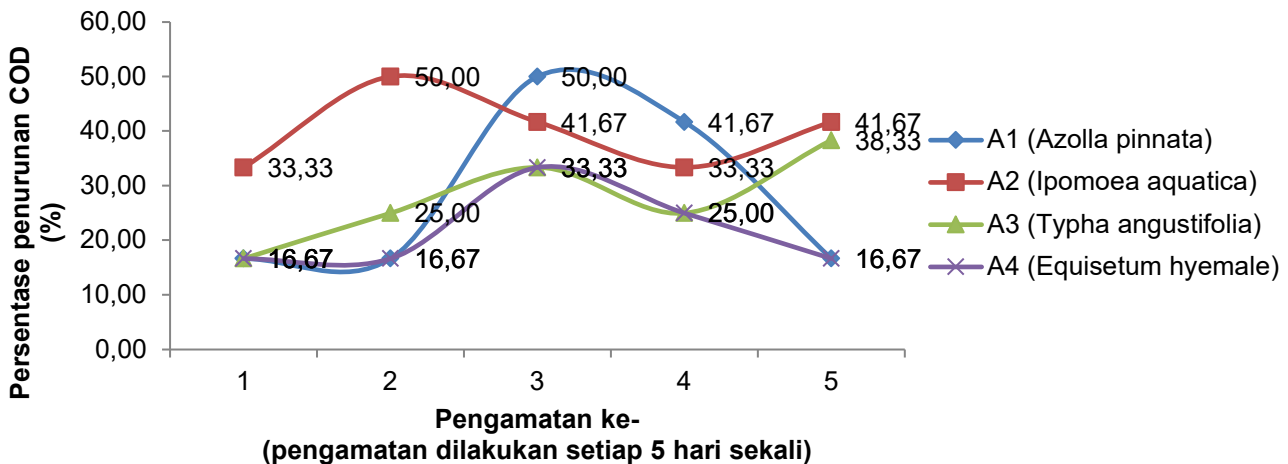
No	Variabel pengamatan	Nilai	Baku Mutu
1	COD (mg/L)	16.000	350
2	pH	7,01	6,0 – 9,0
3	TSS (mg/L)	1.560	250
4	Kekeruhan (NTU)	1.028,75	20*
5	N-total (mg/L)	1,107	50
6	K (mg/L)	11,85	0,38**

Keterangan: Permen LH No 5, 2014; *Yusuf, 2008; **Ihsan, et al., 2013

Dari Tabel 1 di atas, menunjukkan hasil uji pendahuluan limbah cair kelapa sawit outlet kolam anaerob 2 pada parameter COD sebesar 16.000 mg/L, pH sebesar 7,01, TSS (Total Suspended Solid) sebesar 1.560 mg/L, dan kekeruhan sebesar 1.028,75 NTU, N sebesar 1,107 mg/L, dan K sebesar 11,85 mg/L. Hasil dari uji pendahuluan tersebut dapat dilihat bahwa beberapa kadar pencemar dalam limbah cair kelapa sawit cukup tinggi karena melebihi baku mutu yang telah ditetapkan oleh Peraturan Menteri Lingkungan Hidup nomor 5 tahun 2014, jika limbah cair kelapa sawit langsung dibuang ke lingkungan tanpa melalui pengolahan terlebih dahulu, maka akan mencemari lingkungan.

Hasil Pengamatan Fitoremediasi terhadap Persentase Penurunan Chemical Oxygen Demand (COD)

COD (Chemical Oxygen Demand) adalah jumlah oksigen yang diperlukan untuk mengurai seluruh bahan organik yang terkandung dalam air. Nilai COD akan meningkat sejalan dengan meningkatnya kandungan bahan organik diperairan. Pada penelitian ini, kondisi awal limbah cair kelapa sawit memiliki nilai COD sebesar 16.000 mg/L. Setelah limbah dilakukan pengolahan menggunakan metode fitoremediasi dengan 4 jenis tanaman, yaitu tanaman paku air (*Azolla pinnata*), kangkung air (*Ipomoea aquatica*), cattail (*Typha angustifolia*), dan bambu air (*Equisetum hyemale*), kadar COD mengalami penurunan. Persentase penurunan nilai COD dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Persentase penurunan nilai COD

Pada Gambar 3, dapat dilihat bahwa fitoremediasi mampu menurunkan nilai COD, namun persentase

penurunan berfluktuatif. Pada pengamatan pertama (25 HST) pada perlakuan A2 (*Ipomoea aquatica*) mampu menurunkan nilai COD sebesar 33,33%, sedangkan ketiga perlakuan lainnya, yaitu A1 (*Azolla pinnata*), A3 (*Typha angustifolia*), dan A4 (*Equisetum hyemale*) yang hanya mampu menurunkan nilai COD sebesar 16,67%. Pada pengamatan ke 2 (30 HST) fitoremediasi mampu menurunkan nilai COD lebih efisien dari pengamatan pertama, yaitu pada A2 (*Ipomoea aquatica*) meningkat menjadi 50% dan A3 (*Typha angustifolia*) menjadi 25%. Hal ini terjadi karena pada ke 2 perlakuan tersebut pertumbuhan tanaman fitoremediasi mengalami peningkatan sehingga terjadi penyerapan oleh tanaman dan distribusi oksigen meningkat pula menyebabkan terjadinya aktivitas perombakan bahan organik dan nilai COD mengalami penurunan. Peran tanaman dalam menghasilkan persediaan oksigen dari proses fotosintesis menyebabkan dekomposisi bahan organik lebih efektif (Zulfahmi et al., 2021). Sedangkan pada A1 (*Azolla pinnata*) dan A4 (*Equisetum hyemale*) nilai COD masih sama seperti pengamatan pertama, hal tersebut dikarenakan tajuk tanaman belum menutupi bagian permukaan limbah cair kelapa sawit sehingga perombakan bahan organik belum optima (Mustafa & Hayder, 2021).

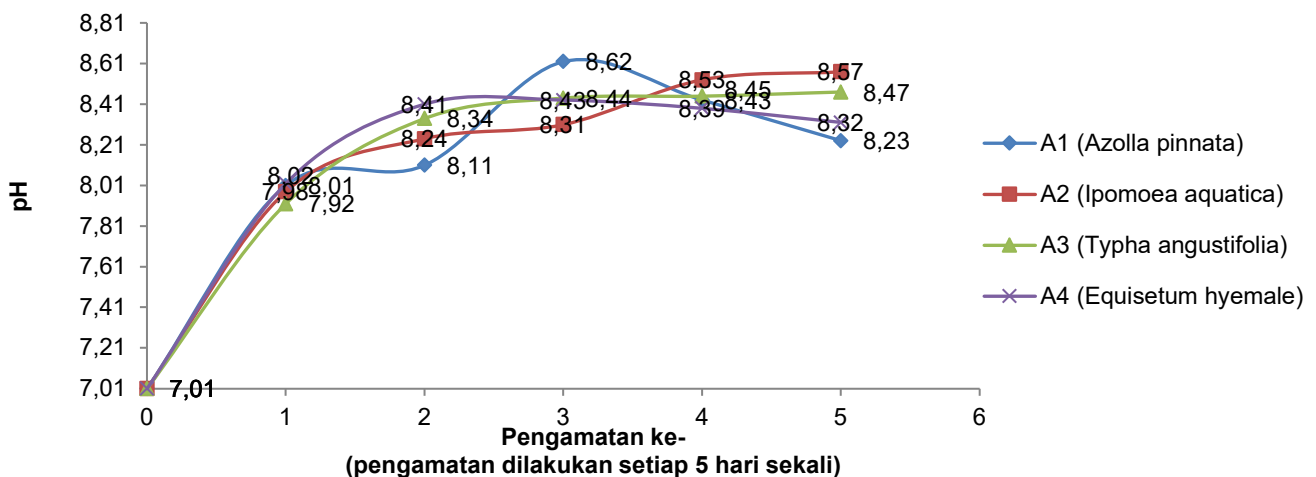
Pada pengamatan ke 3 (35 HST) penurunan nilai COD oleh fitoremediasi dapat dikatakan lebih efisien dibandingkan pada pengamatan ke 2 terutama pada perlakuan A1 (*Azolla pinnata*). Penurunan ini disebabkan adanya peningkatan pertumbuhan mikroorganisme, sehingga aktivitas perombakan bahan organik oleh mikroorganisme juga meningkat dan menyebabkan penurunan pada nilai COD. Pada tanaman bagian perakaran terdapat persediaan oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme yang hidup dalam air limbah (Ng et al., 2017). Kondisi bagian perakaran dengan persediaan oksigen yang tinggi, mengakibatkan berkembang pesat bakteri aerob. Hal tersebut akan mempercepat proses penguraian COD, sehingga kadar

COD dalam limbah menjadi berkurang (Mahmoudpour et al., 2021).

Pada akhir pengamatan (45 HST) perlakuan A2 (*Ipomoea aquatica*) mampu menurunkan nilai COD mencapai 41,67% dan A3 (*Typha angustifolia*) mampu menurunkan nilai COD mencapai 38,33% penurunan ini terjadi karena pertumbuhan tanaman fitoremediasi mencapai puncaknya dan penguraian bahan organik semakin besar. Selain itu, menurunnya nilai COD pada limbah cair kelapa sawit juga terjadi karena lama waktu tinggal air limbah dalam bak menyebabkan padatan mulai mengendap dan adanya penyerapan oleh tanaman. Penurunan nilai COD terjadi karena telah mulai mengendap bahan-bahan padatan pada air limbah sehingga bahan buangan pada air limbah tersebut menjadi berkurang (Davamani et al., 2021). Sedangkan pada perlakuan A1 (*Azolla pinnata*) dan A4 (*Equisetum hyemale*) nilai COD mengalami peningkatan. Hal ini disebabkan fitoremediasi mengalami seleksi atau kematian pada beberapa batang dan daun, sehingga terjadi penambahan bahan organik pada limbah cair kelapa sawit dan meningkatkan nilai COD. Meskipun fitoremediasi mampu menurunkan nilai COD namun hasil tersebut masih belum memenuhi baku mutu yang telah ditetapkan oleh Pemerintah yaitu sebesar 350 mg/L sehingga perlu dilakukan pengolahan lanjutan.

Hasil Pengamatan Fitoremediasi Terhadap Nilai pH

Derajat keasaman (pH) adalah tingkat keasaman atau kebasahan yang dimiliki oleh suatu larutan. Nilai pH berkisar dari 0 hingga 14. Suatu larutan dikatakan netral apabila memiliki nilai pH 7, jika nilai pH lebih dari 7 menunjukkan larutan memiliki sifat basa, sedangkan nilai pH kurang dari 7 menunjukkan sifat asam. Air limbah yang bersifat asam akan mengganggu aktivitas mikroorganisme. Gambar 4 menunjukkan hasil pengamatan nilai derajat keasaman (pH) setelah perlakuan fitoremediasi.



Gambar 4. Nilai pH setelah perlakuan fitoremediasi

Terlihat pada Gambar 4, fitoremediasi mampu meningkatkan nilai pH pada limbah cair kelapa sawit. Peningkatan nilai pH terjadi dimulai dari pengamatan pertama (25 HST) hingga pengamatan ke 5 (45 HST). Pada pengamatan pertama (25 HST) perlakuan A1 (*Azolla pinnata*), A2 (*Ipomoea aquatica*), A3 (*Typha angustifolia*), dan A4 (*Equisetum hyemale*) pH

meningkat sampai dengan 8,01, 7,98, 7,92, dan 8,02. Perubahan nilai pH disebabkan adanya proses fotosintesis, fitoplankton dan respirasi. Nilai pH erat kaitannya dengan nilai karbon dioksida (CO₂), proses fotosintesis pada tanaman akan banyak mengikat senyawa CO₂, yang menyebabkan terjadinya peningkatan nilai pH. Tanaman akan mengikat banyak

senyawa CO₂ pada saat berfotosintesis, kemudian diubah menjadi monosakarida dan oksigen sehingga keberadaan CO₂ pada limbah semakin berkurang dan berdampak pada peningkatan nilai pH (Suryadi, et al., 2017). Pada pengamatan ke 3 (35 HST), perlakuan A1 (*Azolla pinnata*) mengalami peningkatan mencapai 8,62. Hal ini disebabkan pertumbuhan tanaman meningkat sehingga kebutuhan CO₂ yang dibutuhkan juga meningkat sehingga gas CO₂ berkurang, mengakibatkan kondisi pH berubah ke arah alkaline (basa).

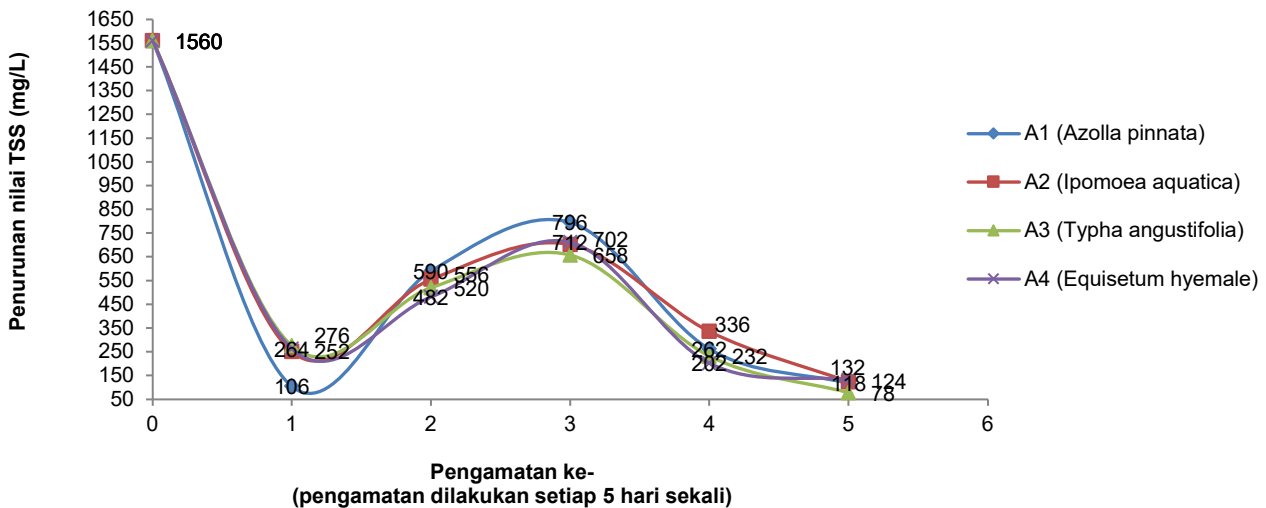
Pada Gambar 4 menunjukkan bahwa pada akhir pengamatan terdapat penurunan nilai pH pada fitoremediasi A1 (*Azolla pinnata*) dan A4 (*Equisetum hyemale*) penurunan ini disebabkan adanya seleksi/kematian pada beberapa batang dan daun yang mengakibatkan berkurangnya kebutuhan CO₂ yang digunakan untuk proses fotosintesis pada tanaman sehingga gas CO₂ meningkat, mengakibatkan kondisi pH berubah menjadi asam.

Pada uji pendahuluan didapat nilai pH sebesar 7,01, nilai ini telah memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan oleh pemerintah. Hal ini disebabkan karena sebelum limbah cair kelapa sawit diberi perlakuan

fitoremediasi, limbah tersebut telah mengalami tahap pengolahan fat pit, cooling pond serta kolam anaerob I. Nilai akhir pH dari perlakuan fitoremediasi telah memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan oleh Pemerintah yaitu sebesar 6,0-9,0.

Hasil Pengamatan Fitoremediasi Terhadap Penurunan Nilai Total Suspended Solid (TSS)

Total Suspended Solid (TSS) adalah padatan yang menyebabkan kekeruhan air, tidak terlarut dan tidak dapat langsung mengendap, terdiri dari partikel-partikel yang ukuran maupun beratnya lebih kecil dari sedimen, misalnya bahan-bahan organik tertentu, sel-sel mikroorganisme dan sebagainya (Aqilah et al., 2021). Terbawanya sedimen ke perairan dapat menyebabkan adanya TSS pada perairan tersebut. Nilai TSS yang tinggi menunjukkan tingkat pencemaran pada suatu perairan menjadi tinggi pula, hal tersebut mengakibatkan terganggunya proses fotosintesis dari biota air pada suatu perairan (Karnanta et al., 2021). Gambar 5 menunjukkan hasil pengamatan penurunan nilai TSS setelah perlakuan fitoremediasi.



Gambar 5. Hasil pengamatan penurunan nilai TSS setelah perlakuan fitoremediasi

Pada Gambar 5, fitoremediasi mampu menurunkan nilai TSS pada limbah cair kelapa sawit. Pada pengamatan pertama (25 HST) penurunan nilai TSS oleh fitoremediasi terlihat sangat signifikan. Pada penelitian ini uji pendahuluan limbah cair kelapa sawit outlet kolam anaerob 2 menunjukkan nilai TSS sebesar 1.560 mg/L, setelah perlakuan fitoremediasi pada A1 (*Azolla pinnata*) dapat menurunkan nilai TSS menjadi 106 mg/L, A2 (*Ipomoea aquatica*) menjadi 252 mg/L, A3 (*Typha angustifolia*) 276 mg/L, dan A4 (*Equisetum hyemale*) 264 mg/L. Penurunan nilai TSS disebabkan karena dekomposisi bahan organik, mengendapnya hasil dekomposisi bahan organik, dan adanya proses penyerapan oleh akar tanaman (Burd et al., 2000). Pada pengamatan ke 2 dan ke 3 nilai TSS mengalami peningkatan, namun pada pengamatan ke 4 nilai TSS mulai menurun dengan baik dan pada pengamatan ke 5 fitoremediasi mampu menurunkan nilai TSS dengan efektif.

Proses penyerapan unsur hara oleh akar tanaman, pembusukan akar, distribusi debu dari udara ke dalam limbah, dan distribusi serangga ke dalam limbah yang

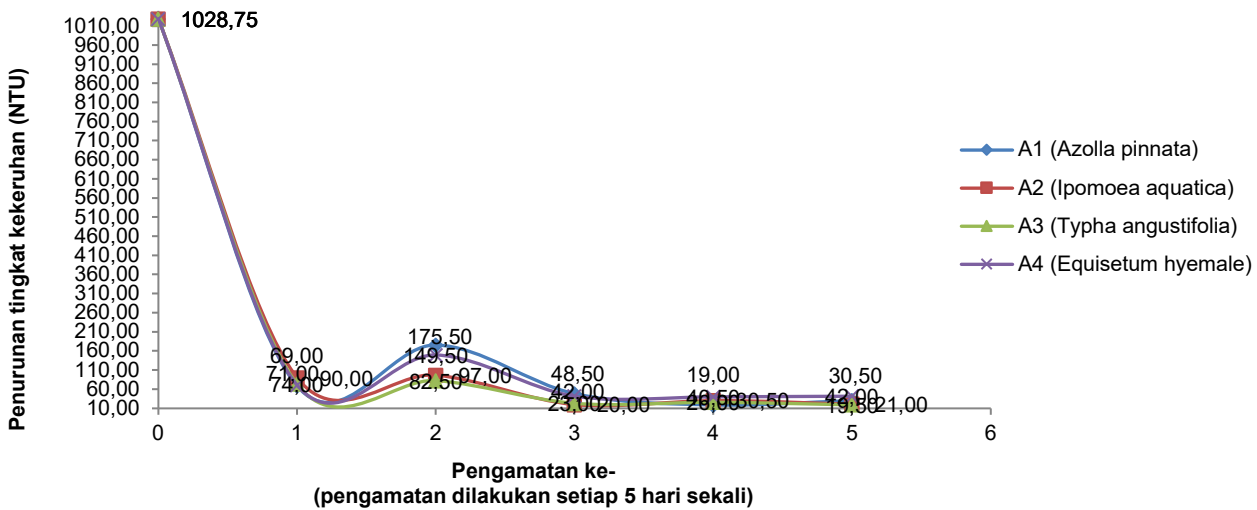
tidak teramati mempengaruhi banyaknya zat padat yang tersuspensi dalam limbah. Peningkatan nilai TSS yang terjadi pada pengamatan ke 2 (30 HST) dan ke 3 (35 HST) disebabkan oleh faktor lingkungan yaitu berkembangnya jentik-jentik nyamuk di dalam limbah cair kelapa sawit yang menyebabkan penambahan massa zat tersuspensi, sehingga nilai TSS menjadi naik. TSS erat kaitannya dengan kekeruhan air. Semakin tinggi nilai TSS, maka air akan semakin keruh. Hal tersebut mengakibatkan terhalangnya sinar matahari masuk ke perairan, sehingga mengganggu proses fotosintesis yang berdampak pada turunnya oksigen terlarut, dan mengakibatkan terganggunya aktivitas makhluk hidup di dalam perairan (Ayesa et al., 2018).

Hasil Pengamatan Fitoremediasi Terhadap Penurunan Tingkat Kekeruhan

Kekeruhan (turbidity) adalah keadaan dimana air mengandung banyak padatan tersuspensi seperti bahan organik, non organik, serta organisme hidup atau mati. Apabila kekeruhan memiliki tingkat yang tinggi akan menghalangi masuknya sinar matahari ke dalam air,

sehingga mengganggu proses fotosintesis dan berdampak pada penurunan oksigen, akibatnya aktivitas makhluk hidup di dalam perairan akan terganggu.

Gambar 6 menunjukkan hasil penurunan tingkat kekeruhan setelah perlakuan fitoremediasi



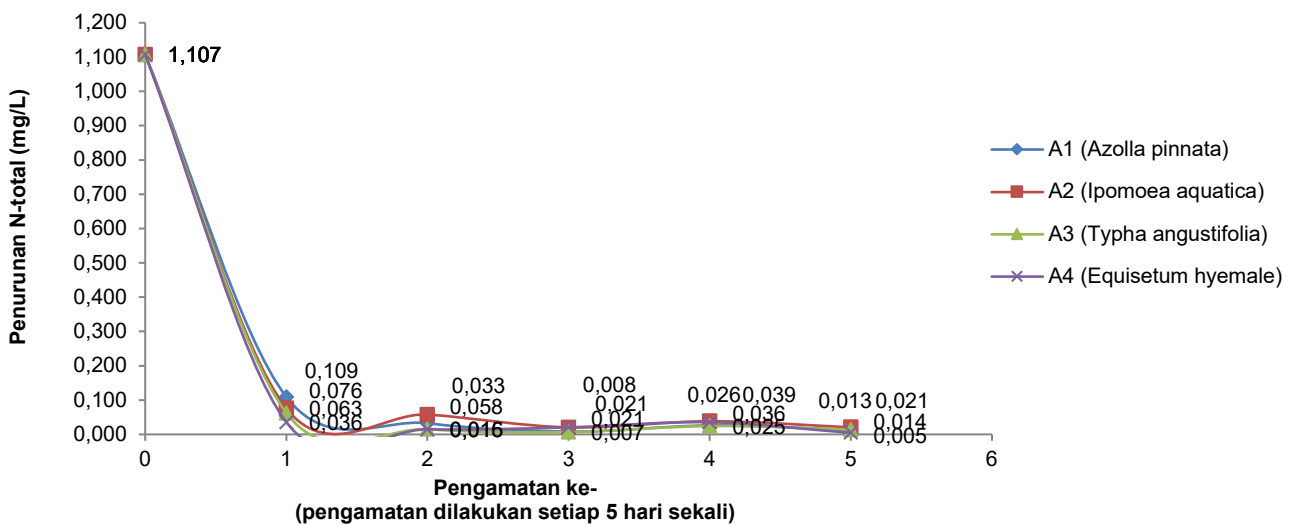
Gambar 6. Hasil penurunan tingkat kekeruhan setelah perlakuan fitoremediasi

Terlihat pada Gambar 6 menunjukkan bahwa fitoremediasi mampu menurunkan tingkat kekeruhan limbah cair kelapa sawit. Setelah diberi perlakuan fitoremediasi penurunan tingkat kekeruhan ini terlihat sangat signifikan. Dimulai dari pengamatan pertama (25 HST) yang awalnya mencapai 1.028,75 NTU, pada perlakuan A1 (*Azolla pinnata*) tingkat kekeruhan menjadi 69 NTU, A2 (*Ipomoea aquatica*) menjadi 90 NTU, A3 (*Typha angustifolia*) menjadi 74 NTU, dan A4 (*Equisetum hyemale*) menjadi 71 NTU. Pada pengamatan ke 2 (30 HST) tingkat kekeruhan kembali meningkat, namun pada pengamatan ke 3, 4, dan 5 tingkat kekeruhan mengalami penurunan dengan sangat efektif. Kekeruhan mengalami kenaikan dan penurunan diduga akibat adanya aliran air dari inlet menuju ke bak perlakuan yang menyebabkan perubahan tingkat kekeruhan. Meskipun demikian tingkat kekeruhan mengalami penurunan diakhir perlakuan. Penurunan tingkat kekeruhan ini mengindikasikan bahwa padatan yang tidak terlarut mengalami pengurangan. Berkurangnya padatan yang

tidak terlarut ini disebabkan adanya proses rizhofiltrasi pada tanaman.

Hasil Pengamatan Fitoremediasi Terhadap Penurunan N-total

Nitrogen merupakan salah satu parameter yang menunjukkan pencemaran air. Unsur nitrogen di dalam perairan merupakan salah satu nutrisi bagi biota di dalamnya (Amalero et al., 2003). Keberadaan nitrogen di dalam perairan tidak bermasalah apabila konsentrasinya dalam batas yang layak untuk kebutuhan biota, namun jika konsentrasinya berlebih maka akan terjadi eutrofikasi yang mengakibatkan perubahan fungsi pada nitrogen tersebut. Salah satunya adalah kematian ikan secara massal di beberapa perairan antara Teluk Jakarta – Lampung. Gambar 7 menunjukkan hasil penurunan N-total setelah perlakuan fitoremediasi.



Gambar 7. Hasil penurunan N-total setelah perlakuan fitoremediasi

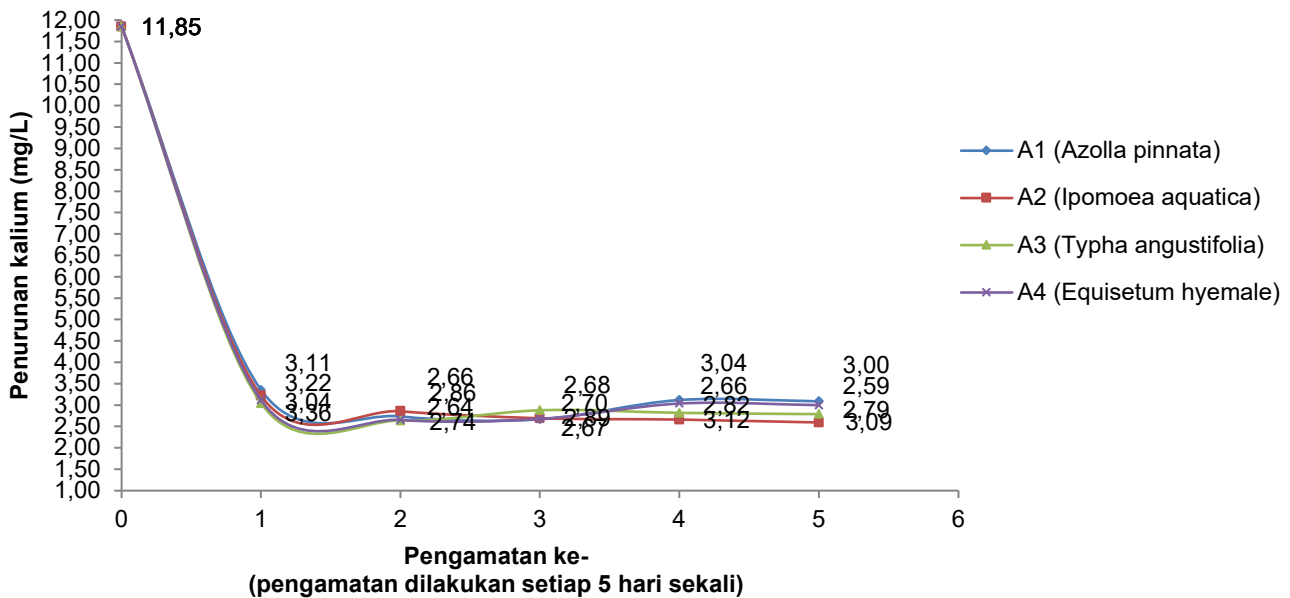
Pada Gambar 7, menunjukkan bahwa semakin lama waktu tinggal maka penyerapan nitrogen semakin besar, dapat dikatakan fitoremediasi mampu menurunkan nilai N-total limbah cair kelapa sawit. N-total pada uji pendahuluan tergolong rendah yaitu sebesar 1,107 mg/L, setelah diberi perlakuan fitoremediasi dari pengamatan pertama (25 HST) hingga pengamatan ke 5 (45 HST) N-total menjadi lebih rendah lagi. Penurunan Nitrogen pada limbah cair kelapa sawit terjadi karena adanya proses fitoremediasi oleh tanaman, yaitu fitoekstraksi, fitovolatilisasi, fitodegradasi, fitostabilisasi, rizofiltrasi dan interaksi dengan mikroorganisme pendegradasi polutan (Sánchez-Navarro et al., 2020). Nitrogen adalah satu dari beberapa hara makro yang lebih banyak dibutuhkan oleh tanaman selain fosfor dan kalium (Andrade et al., 2004). Oksigen yang dihasilkan dari proses fotosintesa ganggang atau alga di dalam bak dimanfaatkan oleh mikroorganisme untuk melakukan metabolisme. Pentingnya nitrogen bagi tanaman dan mikroorganisme menyebabkan nitrogen di dalam limbah cair kelapa sawit mengalami penurunan. Penurunan nitrogen dalam limbah tersebut dibuktikan dengan adanya jumlah N-total pada brangkasan fitoremediasi per gram

tanaman yaitu, pada A1 (*Azolla pinnata*) sebesar 5,96%, A2 (*Ipomoea aquatica*) sebesar 7,45%, A3 (*Typha angustifolia*) sebesar 7,73%, dan A4 (*Equisetum hyemale*) sebesar 7,86%.

Pada akhir perlakuan, A1 (*Azolla pinnata*) dapat menurunkan N-total menjadi 0,013 mg/L, A2 (*Ipomoea aquatica*) menjadi 0,021 mg/L, A3 (*Typha angustifolia*) menjadi 0,014 mg/L dan A4 (*Equisetum hyemale*) menjadi 0,005 mg/L, nilai ini sudah berada dalam baku mutu yang telah ditetapkan oleh Pemerintah sebesar 50 mg/L.

Hasil Pengamatan Fitoremediasi Terhadap Penurunan Kalium

Kalium merupakan makronutrien penting, utama ketiga setelah Nitrogen dan Fosfor yang berperan dalam pertumbuhan tanaman (Sg et al., 2021). Selain tanaman, mikroorganisme juga membutuhkan kalium untuk proses metabolismenya. Apabila jumlah kalium sangat tinggi akan memacu eutrofikasi yang dapat menyebabkan meledaknya populasi alga, sehingga berdampak negatif bagi lingkungan. Gambar 8 menunjukkan hasil penurunan nilai K setelah perlakuan fitoremediasi



Gambar 8. Hasil penurunan kalium setelah perlakuan fitoremediasi

Pada gambar 14, menunjukkan bahwa semakin lama waktu tinggal maka penyerapan kalium semakin besar, dapat dikatakan fitoremediasi mampu menurunkan kalium limbah cair kelapa sawit. Penurunan kalium pada limbah cair kelapa sawit dimulai dari pengamatan pertama (25 HST) hingga pengamatan ke 5 (45 HST), ini terjadi karena adanya proses fitoremediasi oleh tanaman, yaitu fitoekstraksi, fitovolatilisasi, fitodegradasi, fitostabilisasi, rizofiltrasi dan interaksi dengan mikroorganisme pendegradasi polutan (Jeevanantham et al., 2019). Penurunan kalium oleh mikroorganisme sejalan dengan penelitian (Zulfahmi et al., 2021) yang dinyatakan bahwa penambahan kalium pada bioremediasi air limbah waduk meningkatkan pertumbuhan bakteri, sehingga proses pengolahan dengan sistem bioremediasi berjalan dengan optimum. Kalium merupakan makronutrien yang diperlukan mikroorganisme, salah

satunya adalah sebagai kebutuhan energi untuk menghasilkan CO₂ yang kemudian digunakan oleh tanaman untuk berfotosintesis. Pentingnya kalium bagi tanaman dan mikroorganisme menyebabkan kalium di dalam limbah cair kelapa sawit mengalami penurunan. Penurunan kalium dalam limbah tersebut dibuktikan dengan adanya jumlah kalium pada brangkasan fitoremediasi per gram tanaman yaitu, pada A1 (*Azolla pinnata*) sebesar 0,20%, A2 (*Ipomoea aquatica*) sebesar 0,38%, A3 (*Typha angustifolia*) sebesar 0,31%, dan A4 (*Equisetum hyemale*) sebesar 0,19%.

Dapat dilihat pada Gambar 14 diakhir perlakuan (45 HST), A1 (*Azolla pinnata*) mampu menurunkan kadar Kalium dari 11,85 mg/L menjadi 3,09 mg/L, A2 (*Ipomoea aquatica*) menjadi 2,59 mg/L, A3 (*Typha angustifolia*) menjadi 2,79 mg/L dan A4 (*Equisetum hyemale*) menjadi 3,00 mg/L. Nilai tersebut masih tergolong tinggi apabila dibandingkan dengan pernyataan Ihsan, et al.

(2013), dikatakan bahwa konsentrasi kalium yang diperbolehkan pada air laut yang menampung limbah cair pertanian dan limbah cair industri sebesar 0,38 mg/L.

KESIMPULAN

Fitoremediasi terbaik dalam menurunkan polutan limbah cair pabrik kelapa sawit outlet kolam anaerob II adalah *Ipomoea aquatica*. Fitoremediasi *Ipomoea aquatica* pada akhir perlakuan mampu menurunkan nilai COD dengan persentase penurunan 41,29%, meningkatkan pH menjadi 8,57, menurunkan nilai TSS menjadi 124 mg/L, nilai kekeruhan menjadi 21 mg/L, nilai N-total menjadi 0,021 mg/L, nilai K menjadi 2,59 mg/L.

DAFTAR PUSTAKA

- Amalero, E. G., Ingua, G. L., Erta, G. B., & Emanceau, P. L. (2003). Review article Methods for studying root colonization by introduced. *Agronomie*, 23(2007), 407–418. <https://doi.org/10.1051/agro>
- Andrade, S. A. L., Abreu, C. A., De Abreu, M. F., & Silveira, A. P. D. (2004). Influence of lead additions on arbuscular mycorrhiza and Rhizobium symbioses under soybean plants. *Applied Soil Ecology*, 26(2), 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2003.11.002>
- Aqilah, M., Rozaimah, S., Abdullah, S., & Abu, H. (2021). A constructed wetland system for bio-polishing oil palm mill effluent and its future research opportunities. *Journal of Water Process Engineering*, 41(April), 102043. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102043>
- Ayesa, S. A., Chukwuka, K. S., & Odeyemi, O. O. (2018). Tolerance of *Tithonia diversifolia* and *Chromolaena odorata* in heavy metal simulated-polluted soils and three selected dumpsites. *Toxicology Reports*, 5(October), 1134–1139. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2018.11.007>
- Burd, G. I., Dixon, D. G., & Glick, B. R. (2000). Plant growth-promoting bacteria that decrease heavy metal toxicity in plants. *Canadian Journal of Microbiology*, 46(3), 237–245. <https://doi.org/10.1139/w99-143>
- Davamani, V., Indhu, C., Arulmani, S., Ezra, J., & Poornima, R. (2021). Hydroponic phytoremediation of paperboard mill wastewater by using vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105528. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105528>
- Fachrurozi, M., L.B. Utami, dan D. Suryani. 2010. Pengaruh variasi biomassa *Pistia stratiotes* L. terhadap penurunan kadar BOD, COD, dan TSS limbah cair tahu di Dusun Klero Sleman Yogyakarta. Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Ahmad Dahlan. Yogyakarta. KESMAS. Vol.4 (1): 1-75.
- Fathiyah, N., T.G. Pin, dan R. Saraswati. 2017. Pola spasial dan temporal Total Suspended Solid (TSS) di Estuari Cimandiri, Jawa Barat. Mahasiswa Departemen Geografi Fakultas MIPA Universitas Indonesia Kampus UI. Depok. Industrial Research Workshop and National Seminar Politeknik Negeri Bandung
- Jeevanantham, S., Saravanan, A., Hemavathy, R. V., Kumar, P. S., Yaashikaa, P. R., & Yuvaraj, D. (2019). Removal of toxic pollutants from water environment by phytoremediation: A survey on application and future prospects. In *Environmental Technology and Innovation* (Vol. 13, pp. 264–276). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.12.007>
- Karnanta, S., Solikin, M., & Purnama, H. (2021). Terraced Wetland Construction of Liquid Waste Pollution Countermeasures from Tofu Industry (Case Study of Tofu Industry in Mojosongo , Surakarta) Terraced Wetland Construction of Liquid Waste Pollution Countermeasures from Tofu Industry (Case Study of. *Journal of Physics: Conference Series*, 1858. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1858/1/012003>
- Keputusan Menteri Negara Kependudukan dan Lingkungan Hidup. 2004. Baku Mutu Limbah Cair Bagi Kegiatan Industri (KEP-51/MENLH/10/1995).
- KLH Jepang/KLH Indonesia. 2013. Penanganan air limbah di pabrik PKS. Hasil studi kebijakan bersama Indonesia- Jepang (2011-2013). Sumatera Utara
- Lestari, T., Apriyadi, R. Mustikarini, E. D. Saputra, W. & Merlin, Y. (2020). The application of palm-oil waste as organic materials on three pineapple accessions cultivated on post-tin mining land in Bangka Island, Indonesia. *Nusantara Bioscience*, 12(1), 40–45. <https://doi.org/10.13057/nusbiosci/n120107>
- Mahmoudpour, M., Gholami, S., Ehteshami, M., & Salari, M. (2021). Evaluation of Phytoremediation Potential of Vetiver Grass (*Chrysopogon zizanioides* (L .) Roberty) for Wastewater Treatment. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- Mustafa, H. M., & Hayder, G. (2021). Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater : A review article. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 355–365. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.009>
- Ng, Y. S., Juinn, D., & Chan, C. (2017). Wastewater phytoremediation by *Salvinia molesta*. *Journal of Water Process Engineering*, 15, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.08.006>
- Perkebunan Indonesia Komoditas Kelapa Sawit 2015-2017. Jakarta. Hal.11.
- Ren, C. G., Kong, C. C., Wang, S. X., & Xie, Z. H. (2019). Enhanced phytoremediation of uranium-contaminated soils by arbuscular mycorrhiza and rhizobium. *Chemosphere*, 217, 773–779. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.085>
- Sánchez-Navarro, V., Zornoza, R., Faz, Á., & Fernández, J. A. (2020). A comparative greenhouse gas emissions study of legume and non-legume crops grown using organic and conventional fertilizers. *Scientia Horticulturae*, 260(September 2019), 108902. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108902>
- Sg, L., Jjo, O., R, A., & St, M. (2021). The potential of biochar to enhance concentration and utilization of

selected macro and micro nutrients for chickpea
(*Cicer arietinum*) grown in three contrasting soils.
Rhizosphere, 17.
<https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100289>

Zulfahmi, I., Nila, R., Huslina, F., & Rahmawati, L.
(2021). Environmental Technology & Innovation
Phytoremediation of oil palm mill effluent (POME)
using water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk).
Environmental Technology & Innovation, 21,
101260. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101260>