

Efektivitas Penyisihan Mangan (Mn) dengan Kombinasi Pengolahan Secara Aktif dan Pasif pada Air Asam Tambang

Distika Pratiwi¹⁾, Rr. Dina Asrifah²⁾, Ayu Utami³⁾, and Andi Renata Ade Yudono⁴⁾
^{1,2,3,4)} Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta/Jurusan Teknik Lingkungan

^{a)}Corresponding author: dina_asrifah@upnyk.ac.id

^{b)}114190007@student.upnyk.ac.id

ABSTRAK

Salah satu permasalahan dari banyaknya pertambangan batubara di Indonesia adalah potensi terbentuknya air asam tambang yang harus diolah sebelum dibuang ke lingkungan. Dampak negatif Air asam tambang adalah mencemari lingkungan dengan kandungan logam beratnya. Salah satu logam berat yang ada di air asam tambang adalah Mangan (Mn) yang menjadi tantangan tersendiri karena hanya dapat disisihkan jika pH sudah ($\text{pH} = 5$). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas pengolahan terhadap penurunan mangan (Mn) pada air asam tambang dengan kombinasi antara metode pengolahan aktif dengan pembubuhan kapur tohor dan pasif dengan tanaman eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) sistem kontinyu. Metode penelitian yang dilakukan adalah metode survey, rancangan percobaan, dan metode analisis menggunakan perhitungan efektivitas penurunan Mn. Penelitian ini menggunakan 3 variasi media yaitu tanpa pengolahan, tanaman eceng gondok, dan kombinasi kapur tohor dan eceng gondok dengan waktu tinggal 7 hari dan 4 kali periode percobaan. Uji coba penelitian ini menghasilkan efektivitas penurunan logam Mangan (Mn) yang paling efektif pada R3 dengan nilai 71,20%. Sedangkan pada R2 penurunan kadar Mn tertinggi pada minggu ketiga untuk tanaman eceng gondok dengan nilai 50,59 %.

Kata Kunci: Air Asam Tambang; Mangan (Mn); Kapur tohor; eceng gondok; efektivitas

ABSTRACT

*One of the problems with the large number of coal mines in Indonesia is the potential for the formation of acid mine drainage which must be treated before being discharged into the environment. The negative impact of acid mine drainage is polluting the environment with its heavy metal content. One of the heavy metals present in acid mine drainage is Manganese (Mn) which is a challenge in itself because it can only be removed if the pH is correct ($\text{pH} = 5$). This study aims to determine the effectiveness of processing on the reduction of manganese (Mn) in acid mine drainage with a combination of active processing methods by adding quicklime and passively using continuous systems of *Eichhornia crassipes*. The research method used was survey method, experimental design, and analytical method using the calculation of the effectiveness of Mn reduction. This study used 3 media variations, namely without processing, water hyacinth plants, and a combination of quicklime and water hyacinth with a residence time of 7 days and 4 experimental periods. This research trial resulted in the most effective reduction of Manganese (Mn) metal at R3 with a value of 71.20%. Whereas in R2 the highest decrease in Mn levels was in the third week for water hyacinth plants with a value of 50.59%.*

Keywords: acid mine drainage, Manganese (Mn), Quicklime, *Eichhornia crassipes*, effectiveness

PENDAHULUAN

Kegiatan pertambangan batubara berpengaruh terhadap kondisi lingkungan khususnya hutan sehingga perlu dilakukan pengelolaan lingkungan dari awal sampai akhir kegiatan agar dapat meminimalkan dampak negatif dari kegiatan pertambangan tersebut. Air asam tambang merupakan permasalahan lingkungan terbesar dalam kegiatan pertambangan, air asam tambang atau *Acid Mine Drainage* (AMD) terbentuk akibat proses oksidasi mineral sulfida dalam batuan secara kimiawi dan terkena air. Oksidasi terjadi pada batuan yang berpotensi menghasilkan asam atau disebut batuan PAF (*Potential Acid Forming*). Air asam tambang ini dicirikan dengan pH yang rendah dan tingginya senyawa logam tertentu seperti besi (Fe), Mangan (Mn), cadmium (Cd), aluminium (Al), sulfat, dan Pyrite yang sangat berbahaya jika dilepaskan ke lingkungan tanpa pengolahan terlebih dahulu.

Upaya pengelolaan air asam tambang dapat dilakukan dengan pencegahan air asam tambang dan pengolahan air asam tambang. Pencegahan air asam tambang dapat dilakukan dengan mengurangi interaksi antara mineral sulfida dan batuan PAF (*Potencial Acid Forming*) dengan menghambat aliran air dan pengurangan intensitas air yang masuk ke dalam tambang. Sedangkan pengolahan air asam tambang secara umum terdiri dari pengolahan aktif (*Active treatment*) dan pengolahan pasif (*passive treatment*). Pengolahan secara aktif dilakukan dengan pemberian bahan alkalin untuk peningkatan pH dan penurunan logam berat (Said, 2014). Sedangkan pengolahan secara pasif dilakukan dengan pemanfaatan sistem alami seperti saluran batu kapur dan sistem lahan basah buatan. Lahan basah buatan (*Constructed Wetland*) yang memiliki komponen berupa substrat organik dan tumbuhan air sebagai penyerap logam-logam larut dan mikroba untuk pengendapan logam sulfida.

Salah satu logam berat yang terkandung pada air asam tambang adalah mangan (Mn). Mangan berada dalam bentuk manganous (Mn^{2+}) dan manganik (Mn^{3+}) pada air asam tambang. Penyisihan mangan memiliki tantangan tersendiri karena hanya dapat disisihkan jika pH sudah memenuhi bakumutu (pH = 5). Logam berat dalam air limbah dapat dikurangi dengan menggunakan perlakuan kimiawi seperti proses koagulasi, absorpsi, dan pertukaran ion, secara fisik dapat dilakukan dengan proses elektrokoagulasi dan solidifikasi sedangkan biologis dapat dilakukan melalui proses fitoremediasi dan bioremediasi (Asrifah dkk., 2020). Salah satu alternatif penyisihan logam Mn adalah dengan proses fitoremediasi menggunakan tanaman untuk memperbaiki sebagian atau keseluruhan substansi dari kontaminan tertentu dalam air asam tambang (Azwari & Triyono, 2019). Fitoremediasi adalah proses pengurangan kadar polutan dalam suatu media dengan pemanfaatan tanaman (Muryani & Widiarti, 2018). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Madaniyah (2016) menyebutkan bahwa adanya tanaman pada permukaan air asam tambang tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap pH sehingga pada penelitian ini akan dilakukan kombinasi penggunaan kapur tohor dan sistem lahan basah buatan dengan menggunakan tanaman Eceng Gondok dalam penurunan kadar Mn agar diketahui efektivitas paling tinggi dari rancangan percobaan yang dilakukan. Pemilihan eceng gondok dikarenakan tanaman ini mampu menyerap logam berat seperti mangan (Mn) melalui sel akar karena proses adsorpsi (Suryanti dkk., 2013) Tipe lahan basah buatan yang dirancang merupakan tipe lahan basah aerobik dengan tujuan pengendapan oksida dan hidroksida logam serta pengikatan fisik hidroksida logam Fe, Al, dan Mn (Skousen, 1998).

METODE

Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah reaktor dengan diameter 50 cm, kedalaman 15 cm dan memiliki volume 29437,5 cm³, ember 15 L, keran, klep, botol sampel, gelas ukur, pH strip, pH meter, timbangan, spektrofotometer Hach Dr900, *cool box*, kertas lakmus, dan kamera sedangkan bahan yang digunakan untuk penelitian kombinasi aktif-pasif dari pengolahan air asam tambang ini merupakan lumpur PAF yang diambil pada dasar Kolam pengendapan lumpur (KPL), pupuk kompos, eceng gondok, kapur tohor (CaCO₃) dan air asam tambang KPL *Stock ROM* PT Dizamatra Powerindo Kecamatan Merapi Barat Kabupaten Lahat Provinsi Sumatera Selatan, larutan buffer pH 4 dan pH 7, reagen Mn, lem pipa dan selotip pipa.

Prosedur Penelitian

Penelitian ini menggunakan data primer yang diperoleh secara langsung dari hasil rancangan percobaan dan pengamatan penulis di lapangan. Data primer ini meliputi data kualitas air asam tambang yang didapatkan berdasarkan hasil laboratorium yang digunakan untuk menentukan kualitas air limbah pengolahan batubara di daerah penelitian. Parameter yang digunakan meliputi Peraturan Gubernur Sumatera Selatan No. 08 Tahun 2012 tentang Bakumutu untuk Kegiatan Pertambangan yang dapat dilihat pada **Tabel 1.** berikut

Tabel 1. Parameter Baku Mutu Limbah Industri Pertambangan

No	Parameter	Satuan	Maksimum
1	pH	-	6-9
2	Residu Tersuspensi	mg/L	400
3	Besi (Fe) Total	mg/L	7
4	Mangan (Mn) Total	mg/L	4

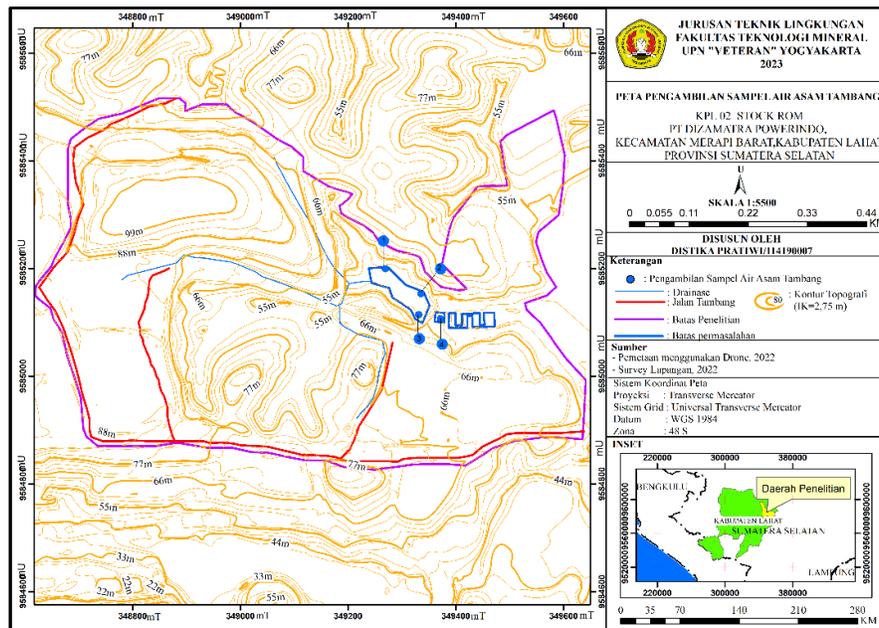
Sumber: Pergub Sumsel No.8 (2012)

Pengambilan Sampel

Teknik sampling merupakan teknik yang digunakan untuk menentukan sampel dalam pengambilan sampel yang nantinya akan digunakan dalam penelitian. Teknik sampling yang digunakan menggunakan *purposive sampling* yang termasuk ke dalam *non-probability sampling*. *Purposive sampling* merupakan teknik pengambilan sampel yang mempertimbangkan tujuan ataupun parameter tertentu yang diinginkan peneliti. Pengambilan sampel dilakukan dengan metode *composite sampling* yang dilakukan dengan pengambilan sampel gabungan secara terpisah dari beberapa tempat dengan volume yang sama pada waktu yang berbeda. Pada penelitian ini, sampel yang diambil berupa air asam tambang yang berasal dari wetland dengan kondisi belum dilakukan pengolahan. Penelitian ini terdiri dari 4 titik sampel yang merupakan air asam tambang yang belum diolah, koordinat lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada **Tabel 2** dan **Gambar 1**.

Tabel 2 Koordinat Lokasi Pengambilan Sampel

Lp	x	y
Lp1	349406	9585076
Lp2	349246	9584999
Lp3	348816	9584990
Lp4	348771	9585193



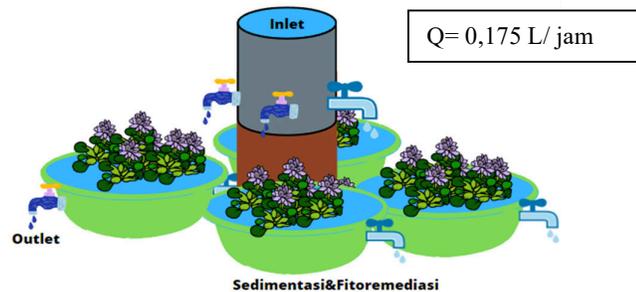
Gambar 1. Peta Pengambilan Sampel Air Asam Tambang
Sumber: Penulis (2023)

Rancangan Percobaan

Rancangan percobaan terdiri dari proses netralisasi pH menggunakan kapur tohor (CaCO_3) dengan dosis optimal berdasarkan *jarrest* yang dilakukan adalah 0,75 gram kemudian dilanjutkan dengan proses fitoremediasi oleh tanaman eceng gondok. Variasi penelitian ini terdiri dari variasi perlakuan tanpa penggunaan kapur tohor dan dengan penggunaan kapur tohor. Pengaliran air asam tambang dilakukan dengan sistem continue dengan debit inlet dan outlet adalah 0,175 L/Jam, debit ini sudah disesuaikan dengan waktu tinggal dan volume yang ditentukan. Pengaliran ini dilakukan dengan waktu tinggal air 7 hari, hal ini dilakukan merujuk penelitian yang dilakukan oleh Nopi Stiyati Prihatini (2020) yang menyebutkan pada waktu tinggal D0 hari ke-7 menunjukkan efektivitas penurunan logam berat dan kenaikan pH paling tinggi. Reaktor dibagi menjadi 3 zona kompartemen yang terdiri dari zona inlet sekaligus pembubuhan kapur tohor, zona sedimentasi dan pengolahan dengan fitoremediasi tanaman, dan zona outlet. Dengan adanya media tersebut diharapkan dapat meningkatkan pH dan penurunan kandungan Fe, Mn, serta TSS pada air asam tambang batubara. Pada dasar reaktor juga ditambahkan matriks lahan basah yang terdiri dari kompos dan lumpur PAF, kemudian dimasukkan tanaman uji yang masing-masing reaktor 15 rumpun, tanaman yang digunakan mempunyai ukuran yang sama dan berat 30 gram.

Tabel 3. Rancangan Percobaan

No.	Jenis Pengolahan	Periode (hari)				Parameter yang diukur
		7	14	21	28	
1	AAT tanpa pengolahan (kontrol 1) (R1)	7	14	21	28	Mangan (Mn)
2	AAT + Eceng Gondok (R2)					
3	AAT + Kapur Tohor (0,75 gram) + Eceng Gondok (R3)					



Gambar 2. Rancangan Percobaan Skala Laboratorium (R3)

Sumber: Penulis (2023)



Gambar 3. Rangkaian Reaktor Penelitian

Sumber: Penulis (2023)

Pengolahan Data

Rancangan percobaan dilakukan selama 28 hari dengan waktu tinggal selama 7 hari. Setiap 7 hari tersebut akan dilakukan pengambilan sampel untuk diujikan kandungan Mn. Setelah itu akan dilakukan perhitungan besarnya efektivitas penurunan Fe dan Mn dinyatakan dalam bentuk persentase (%) dengan rumus sebagai berikut

$$E_f = \frac{C_o - C_i}{C_o} \times 100 \% \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- Ef : Efektivitas proses penurunan parameter (%)
- Co : Konsentrasi paramter saat masuk ke proses
- Ci : Konsentrasi parameter saat keluar dari proses (Tjokrokusumo,1998)

Selain itu juga dilakukan metode statistik yaitu analisis regresi linier ini untuk mengetahui hubungan linier dari perlakuan dengan variabel y merupakan periode percobaan dengan variabel x merupakan parameter pH, Fe, dan Mn.

$$y = a + bx \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan

- Y = Variabel dependen (variabel terikat)
- X = Variabel independen (variabel bebas)
- a = Konstanta
- b = Koefisien regresi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kualitas Air Asam Tambang Awal

Air asam tambang kegiatan pertambangan batubara diperoleh dengan melakukan pengambilan 4 sampe air asam tambang yang berada pada lokasi penelitian. Kualitas air asam tambang dilakukan dengan mengacu pada Peraturan Gubernur Sumsel No.8 Tahun 2012. Parameter air limbah pada kegiatan pertambangan batubara terdiri dari Besi (Fe), mangan (Mn), pH, dan TSS. Sampel air limbah diambil pada inlet sebelum air mengalami pengolahan.

Tabel 4. Uji Karakteristik Awal Air Asam Tambang

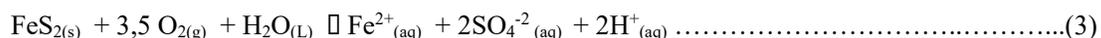
No	Parameter	Satuan	Bakumutu	Hasil Analisa
1	pH		6-9	3
2	TSS	mg/L	300	20
3	Fe	mg/L	7	2,5
4	Mn	mg/L	4	7,57

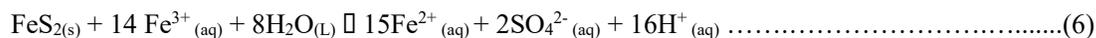
 : Tidak Memenuhi Bakumutu

Sumber : Data Hasil Uji Pemeriksaan Awal Labororium

Bakumutu, berdasarkan Pergub Sumsel No.8 Tahun 2012

Parameter yang belum memenuhi bakumutu terdapat pada tabel 2 yaitu pH dan mangan (Mn). Berdasarkan Peraturan Gubernur Sumatera Selatan No. 8 Tahun 2012 untuk parameter pH belum memenuhi bakumutu yang disyaratkan yaitu 6-9 sedangkan berdasarkan hasil laboratorium adalah 3. Untuk paramater Mangan (Mn) juga melebihi bakumutu yang disyaratkan yaitu 4 mg/L sedangkan berdasarkan hasil laboratorium adalah 7,57. Adanya pH yang rendah pada air asam tambang ini disebabkan oleh proses oksidasi mineral sulfida salah satunya *pyrite* yang terkandung pada batuan tersingkap dan mengalami kontak dengan oksigen di udara dan air. Berikut merupakan reaksi oksidasi dari mineral pirit (FeS₂) yang menghasilkan asam berupa H₂SO₄ diuraikan dalam reaksi berikut:





Pada reaksi (3) oksidasi mineral pirit (FeS_2) yang melapuk akan membentuk besi ferro (Fe^{2+}) sulfat (SO_4^{2-}) dan beberapa proton yang mengakibatkan kemasaman (H^+) bertambah. Selain itu kemasaman juga disebabkan oleh beberapa reaksi seperti reaksi (4) yang merupakan proses oksidasi besi (II) menjadi besi (III) yang berjalan lambat ketika $\text{pH} < 5$, dilanjutkan dengan reaksi (5) merupakan reaksi hidrolisis berupa pembentukan endapan besi hidroksida dan kemasaman (H^+), dan reaksi (6) merupakan reaksi oksidasi lanjutan mineral sulfida oleh besi (III) dan ion sulfat, hasil dari reaksi ini akan meningkatkan keasaman yang lebih tinggi daripada reaksi pertama (Hamdani & Senjaya, 2011). Sedangkan logam berat Mangan (Mn) terbentuk dari mineral rhodoksit (MnCO_3) yang terkandung dalam batubara dan batuan lain yang akan teroksidasi membentuk mangano (Mn^{2+}), dan mangani (Mn^{3+}) yang mudah terlarut dalam air.

Penggunaan Kapur Tohor

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Assyakiri (2021), untuk menetralkan pH dari 3 menjadi 7 diperlukan dosis 0,2152 – 0,9730 gr/liter. Berdasarkan hasil uji laboratorium, dosis kapur tohor (CaO) yang efisien dalam satu liter air adalah 0,75 gr, uji *jarrest* yang dilakukan dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Dosis Optimal Kapur Tohor

No	Kapur Tohor (gram)	Jumlah air (mL)	pH Awal air	pH						
				1 Jam	2 Jam	3 Jam	4 Jam	5 Jam	6 Jam	7 Jam
1	0,25	1000	3	4,14	4,29	4,19	5,90	6,10	6,42	6,49
2	0,75	1000	3	6,91	6,92	7,20	7,43	7,39	7,42	7,46
3	1,00	1000	3	7,10	7,10	6,98	7,02	7,12	7,10	7,46
4	1,25	1000	3	7,92	7,81	7,54	7,16	7,23	7,20	7,10

Keterangan:

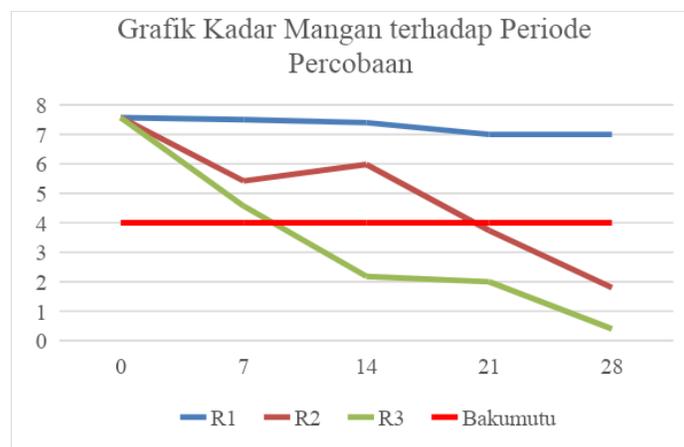
: Jumlah kapur yang efektif dan efisien dalam percobaan laboratorium

Effektivitas Penurunan Mangan (Mn)

Tabel hasil pengujian parameter Mangan (Mn) setelah dilakukan pengolahan secara aktif dan pasif dengan menggunakan sistem kontinyu

Tabel 6. Tabel Hasil Pengujian Parameter Mangan (Mn)

Periode Percobaan	Satuan	Air Limbah tanpa pengolahan (R1)	Eceng Gondok (R2)	Eceng Gondok + Kapur Tohor (R3)
Sampel awal	mg/L	7,57	7,57	7,57
Hari ke-7	mg/L	7,5	5,42	4,57
Hari ke-14	mg/L	7,4	5,98	2,18
Hari Ke-21	mg/L	7	3,74	2
Hari Ke-28	mg/L	7	1,8	0,4



Gambar 4. Grafik Kadar Mangan (Mn) Terhadap Periode Percobaan

Gambar 4 menunjukkan grafik penurunan kadar mangan setiap periode percobaan yang memperlihatkan bahwa semua perlakuan dapat menurunkan kadar Mn pada wetland skala laboratorium yang ditunjukkan pada Gambar 5. Pada perlakuan R1 menunjukkan penurunan Mn yang tidak signifikan dan masih diatas bakumutu nilainya, hal ini dikarenakan kurangnya proses remediasi dan pengendapan logam Mn. Penurunan Mn yang tidak signifikan disebabkan oleh tidak tertutupnya permukaan kontrol pada R1 dengan tanaman sehingga menyebabkan teroksidasinya kembali logam sulfida yang telah terbentuk dan dapat meningkatkan konsentrasi logam Mn pada permukaan kontrol.

Pada perlakuan R2 logam Mn dalam air mengalami penurunan pada minggu pertama tetapi belum sampai memenuhi bakumutu, kemudian mengalami kenaikan pada minggu kedua hal ini terjadi karena pengambilan sampel dilakukan pada minggu ke-2 dan kondisi yang mengakibatkan Mangan (Mn) teroksidasi kembali, menurut penelitian yang dilakukan Stumm, W dan JJ Morgan (1981) yang menyebutkan logam Mn memiliki sifat mudah terlarut pada kondisi pH yang rendah. Penyerapan logam Mn lebih lambat dibandingkan Fe, hal ini dikarenakan selektivitas media adsorben (tanaman air) yang bergantung keelektronegatifan dari suatu ion, dan keelektronegatifan dari logam Mn memiliki nilai yang kecil dibanding dengan logam lain seperti Fe. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Madaniyah (2016) fenomena meningkatnya kembali konsentrasi Mn pada bagian permukaan lahan basah disebabkan oleh proses oksidasi biotik, abiotik, maupun foto-oksidasi logam sulfida yang telah terbentuk pada permukaan lahan basah tersebut. Peningkatan kadar Mn juga dapat disebabkan oleh logam berat Mn yang sudah mengendap, teroksidasi kembali akibat adanya permukaan air yang tidak tertutup tanaman.

Mangan mengalami reaksi oksidasi dan hidrolisis yang menghasilkan endapan mangan oksida hidroksida. Ketika pH mencukupi Mn dapat mengendap MnOOH yang ditunjukkan pada reaksi hidrolisis berikut (Hedin dkk., 1994).



Sedangkan menurut Skousen dkk. (2017) menyebutkan bahwa pengendapan dengan kombinasi oksidasi dan pre-tisipasi



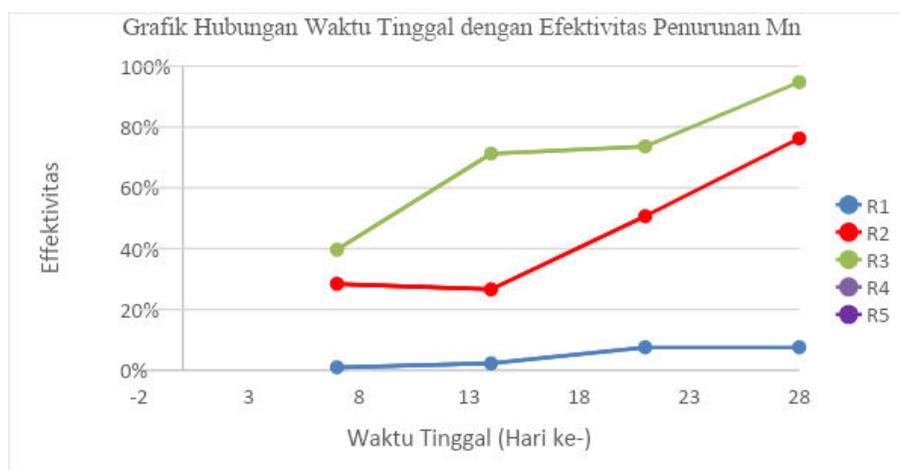
Perbedaan tren penurunan mangan (Mn) dalam rancangan percobaan dengan penggunaan kapur tohor sebelumnya dan tanpa penggunaan kapur tohor menunjukkan perbedaan yang signifikan. Pada R3 penggunaan kapur tohor dapat meningkatkan pH air asam tambang yang dapat mempengaruhi proses pengendapan logam Mn dan berpengaruh juga pada kemampuan tanaman dalam penyerapan logam berat. Tanaman eceng gondok mampu menyerap dan memanfaatkan kandungan Mn dalam air untuk

unsur hara mikro. Sehingga tren penurunan mangan pada rancangan percobaan dengan penggunaan kapur tohor terlebih dahulu lebih stabil dan lebih baik. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Rahmat & Prihatini (2018), yang menyatakan pengikatan logam oleh jaringan tanaman meningkat seiring peningkatan pH. Hal ini dikarenakan pada pH rendah kation logam akan terhambat oleh adanya gaya tolak dari ion H⁺ dari suatu adsorben. Kandungan mangan pada percobaan dengan kombinasi kapur tohor dan tanaman fitoremediasi sudah memenuhi bakumutu menurut Peraturan Gubernur Sumatera Selatan No.8 Tahun 2012 pada minggu pertama.

Tabel 7. Efektivitas Penurunan Mangan (Mn)

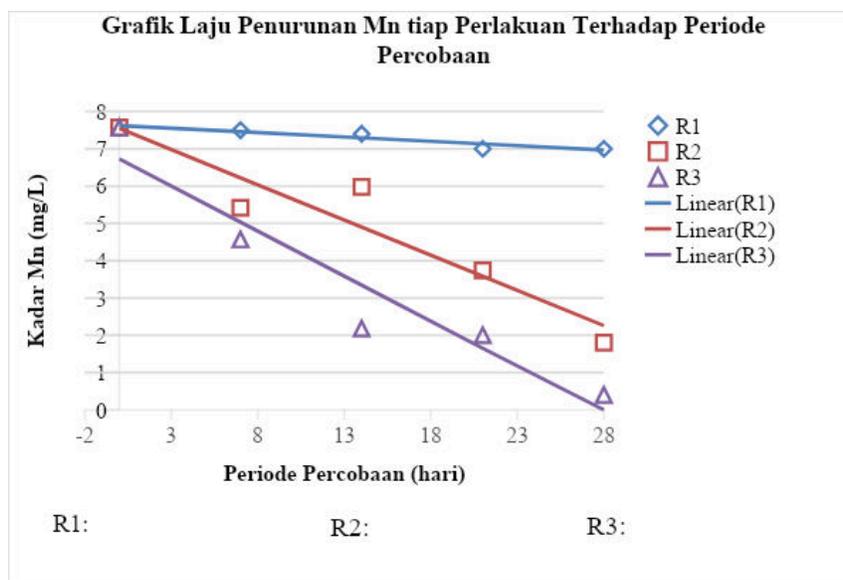
Periode Percobaan	Kontrol (%)	Eceng Gondok (%)	Eceng Gondok + Kapur Tohor (%)
7	0,924	28,4	39,63
14	2,245	26,589	71,20
21	7,529	50,59	73,58
28	7,529	76,22	94,71

Efektivitas penurunan mangan (Mn) tertinggi terjadi pada minggu kedua untuk perlakuan R3 dengan nilai 71,20%. Sedangkan pada R2 penurunan kadar Mn tertinggi pada minggu ketiga untuk tanaman eceng gondok dengan nilai 50,59 %. Penyerapan logam berat Mn dilakukan oleh sel-sel akar kemudian zat yang terlarut akan memasuki xilem dan akan dilanjutkan dengan pengangkutan secara vertikal dari akar menuju batang sampai daun, kemudian baru dibawa ke seluruh bagian tumbuhan oleh jaringan tanaman yaitu floem. Sehingga konsentrasi Mn pada tanaman juga akan semakin meningkat (Azwardi & Triyono, 2019). Seperti penelitian yang dilakukan oleh Madaniyah (2016) yang menyebutkan logam Mn banyak diserap pada bagian akar. Mekanisme yang dilakukan oleh tanaman dalam menghilangkan Mn adalah dengan rizofiltrasi. Sedangkan untuk logam Mn pada tanaman eceng gondok penyerapan lebih besar pada akar daripada daun. Gambar 5. menunjukkan efektivitas fitoremediasi tanaman eceng gondok dalam menurunkan kadar mangan (Mn).



Gambar 5. Grafik Hubungan Waktu Tinggal dengan Efektivitas Penurunan Mangan (Mn)

Untuk mengetahui seberapa kuat hubungan antara laju penurunan Mn dengan periode percobaan dan 3 perlakuan sistem lahan basah buatan, hasil penelitian dianalisis menggunakan analisis regresi untuk setiap plot. Dari hasil ini akan diketahui perlakuan yang mana yang akan menurunkan Mn paling banyak dan paling cepat. Plotting grafik antara logam berat Mn sebagai Y (ordinat) dan Periode Percobaan sebagai X (axis) didapatkan sebagai berikut ini:



Gambar 6. Grafik Laju Penurunan Mn tiap Perlakuan terhadap Periode Percobaan

Laju penurunan logam berat Mn didapatkan persamaan terhadap setiap perlakuan dapat dilihat pada **Gambar 6**. Dari hasil analisis regresi yang dilakukan, diketahui laju penurunan Mn dengan periode percobaan pada perlakuan R3 memiliki hubungan yang kuat. Perlakuan yang paling cepat dalam menurunkan kandungan logam berat Mn pada air asam tambang adalah perlakuan R3 dengan nilai 0,9168 dengan persamaan modal $y = -0.2416x + 6,726$. Hal ini dikarenakan pada perlakuan R3 didapatkan sudut yang terkecil dan periode waktu tercepat penurunan mangan memiliki kadar 0 mg/L sebelum periode percobaan hari ke-28. Penurunan kadar Mn^{2+} dalam air sangat bergantung pada kondisi alkalinitas. Sehingga pada perlakuan R3 dengan kondisi alkalinitas yang tinggi juga berpengaruh pada proses biosorpsi logam oleh tanaman. Sedangkan pada R2 penurunan logam Mn tetap ada sampai memenuhi bakumutu pada periode percobaan minggu ketiga walaupun belum mendekati 0 gr/mL sampai akhir percobaan tetapi perlakuan yang dilakukan mampu menurunkan kadar Mn lebih tinggi dibandingkan perlakuan kontrol (R1).

Perubahan Morfologi Tanaman

Menurut Zubair dan Arsyad (2014) mekanisme fitoremediasi pada tanaman eceng gondok terjadi karena proses fitoekstraksi dan rizofiltrasi. Proses fitoekstraksi merupakan proses absorpsi oleh akar kemudian akan diangkut melalui xilem dan dikumpulkan di bagian batang dan daun. Selain fitoekstraksi, proses penting lain dalam fitoremediasi adalah *rizofiltrasi* yang merupakan proses pengendapan logam berat oleh akar. Berdasarkan pengamatan pada tanaman terlihat perubahan pada bagian batang, akar dan daun. Penelitian yang dilakukan oleh Madaniyah (2016) menyebutkan tanaman eceng gondok mempunyai kemampuan penyerapan logam berat pada bagian akar tetapi tidak mampu mentranslokasikannya ke bagian batang dan daun.

Penelitian yang dilakukan oleh Puspita, Siregar, dan Hidayati (2011) menyebutkan tanaman eceng gondok memiliki waktu tumbuh lebih lama dan penyerapan logam berat lebih banyak dikarenakan penyerapan pada tanaman ini dilakukan dengan 2 cara yaitu, secara pasif dengan bantuan cahaya matahari dan aktif dengan transpirasi. Pada cara aktif, penyerapan logam berat tergantung pada zat anion dan kation pada tumbuhan. Proses penyerapan ini akan melibatkan zat khelat dalam akar, zat khelat ini penting dalam mekanisme toleransi terhadap stress metal (kejenuhan terhadap logam berat). Zat Fitokhelatin ini berupa peptida kecil yang kaya asam amino sistein dan mengandung belerang, atom belerang yang terkandung akan melakukan pengikatan logam berat seperti Fe dan Mn dari media tumbuh, pada akar tanaman senyawa ini berfungsi dalam pengikatan logam berat dan membawahnya ke sel melalui transport aktif (Siswoyo, 2016).

Pada **Tabel 8** ditunjukkan pada minggu pertama pada perlakuan dengan kapur tohor maupun tanpa kapur tohor terlihat tanaman masih segar dan mengalami pertumbuhan seperti membentuk daun baru. Pada minggu kedua tanaman eceng gondok masih terlihat segar dan muncul beberapa bunga. Pada minggu ketiga pada tanaman eceng gondok mulai menguning dan layu. Pada minggu terakhir tanaman eceng gondok mulai mati dan layu. Penelitian yang dilakukan oleh Maryana dkk. (2020), gejala perubahan warna pada daun disebut gejala klorosis dan nekrosis. Selain perubahan pada warna daun, tanaman melakukan adaptasi dengan kerontokan pada daun dan akar serta pembusukan. Penyebab perubahan pada tanaman ini karena penyerapan zat pencemar telah dilakukan oleh tanaman dan akan dibuang dengan menggugurkan daun yang tua untuk pengurangan logam berat pada tanaman. Gejala klorosis terjadi saat terjadi penyerapan logam berat berlebihan yang menghambat enzim pada proses klorofil. Gejala nekrosis ditandai pada kematian sel tanaman yang menjadi penyebab kerusakan tanaman dan bercak pada daun tanaman yang ditunjukkan pada daun yang menguning dan mati.

Tabel 8. Kondisi Tanaman

Periode Percobaan (hari ke)	Eceng Gondok	Eceng Gondok + Kapur Tohor
Awal		
7		
14		
21		
28		

Sumber: Penulis (2023)

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang didapatkan dalam penelitian ini, dapat disimpulkan:

1. Parameter air asam tambang yang belum memenuhi baku mutu yaitu pH dan logam berat Mangan (Mn). Setelah dilakukan perlakuan R1, R2, R3, pH baru memenuhi baku mutu pada perlakuan R3 dengan campuran kapur tohor dan eceng gondok
2. Efektivitas pengolahan air asam tambang kombinasi aktif dan pasif dengan pembubuhan kapur tohor dan tanaman Eceng Gondok untuk penurunan mangan (Mn) tertinggi terjadi pada minggu kedua untuk perlakuan R3 dengan efektivitas 71,20%. Sedangkan pada R2 penurunan kadar mn tertinggi pada minggu ketiga dengan efektivitas 50,59%. Perlakuan R1 tanpa pengolahan tidak menunjukkan penurunan yang signifikan.

3. Perlakuan yang paling cepat dalam menurunkan kandungan logam berat Mn pada air asam tambang adalah perlakuan R3 dengan nilai 0,9168 dengan persamaan modal $y = -0.2416x + 6,726$. Hal ini dikarenakan pada perlakuan R3 didapatkan sudut yang terkecil dan periode waktu tercepat penurunan mangan memiliki kadar 0 mg/L sebelum periode percobaan hari ke-28.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan penulis untuk Ibu Ika Wahyuning Widiarti S.Si., M.Eng yang sudah membimbing penulis dan kepala Jurusan Teknik Lingkungan Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta atas fasilitas yang telah diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Asrifah, R.D., Anasstasia, T.T., Aurilia, M.F., Utama, V.F., Wulandari, D., Widhiananto, P.A., & Wibowo, B.Y. (2020). The Effect of Flow Rate Discharge on TDS, pH, TSS, and Cu in Electrocoagulation with Continuous Reactors. In Proceeding of LPPM UPN “Veteran” Yogyakarta Conference Series-Engineering and Science Series, 1(1), 737- 746. <https://doi.org/10.31098/ess.v1i1.171>
- Azwardi, F., & Triyono, J. (2019). Fitoremediasi Logam Fe dalam Air Asam Tambang Menggunakan Eceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*) Fitoremediation of Heavy Metal Fe in Mining Acid Water with Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*). Buletin LOUPE, 15, 02.
- Hamdani, A. H., & Senjaya, Y. A. (2011). Geokimia Batuan Penutup (Overburden) Batubara Untuk Memprediksi Potensi Air Asam Tambang Di Pit 1 Iup Pwr, Di Daerah Kasai, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur. Bulletin of Scientific Contribution, 9(2), 77–96.
- Madaniyah. (2016). Efektivitas Tanaman Air Dalam Pembersihan Logam Berat Pada Air Asam Tambang Madaniyah. Thesis Institut Pertanian Bogor.
- Muryani, E., & Widiarti, I. W. (2018). Efektivitas Fitoremediasi Tanaman Air Dalam Menurunkan Kadar Total Suspended Solid (Tss) Air Lindi. Prosiding Seminar Nasional Tahun Ke-4 Call For Paper Dan Pameran Hasil Penelitian Dan Pengabdian Kemenristekdikti, 130–139.
- Puspita, U. R., Siregar, A. S., & Hidayati, N. V. (2011). Kemampuan Tumbuhan Air Sebagai Agen Fitoremediator Logam Berat Kromium (Cr) Yang Terdapat Pada Limbah Cair Industri Batik. Berkala Perikanan Terubuk, 39(1), 58–64.
- Rahmat, Y., & Prihatini, N. S. (2018). Fitoremediasi Fe dan Mn Air Asam Tambang Batubara dengan Eceng Gondok (*Eichornia crassipes*) dan Purun Tikus (*Eleocharis dulcis*) pada Sistem LBB di PT Phytoremediation of Fe and Mn Acid of Coal Mine with Eceng Gondok (*Eichornia Crassipes*) and LBB System at PT. JBG South Kalimantan: Jurnal Sainsmat. Vol. VII (Nomor 1). Cetak. <http://ojs.unm.ac.id/index.php/sainsmat>
- Said, N. I. (2014). Teknologi Pengolahan Air Asam Tambang Batubara “Alternatif Pemilihan Teknologi.” Jurnal Air Indonesia, 7(2), 119–138.
- Skousen. (1998). Handbook Of Technologies For Avoidance And Remediation Of Acid Mine Drainage Acid Drainage Technology Initiative (Adti).
- Suryanti, S., Yusmidiarti, & Jubaidi. (2013). Efektifitas Tumbuhan Enceng Gondok (*Eichornia Crassipes*) Sebagai Fitoremediasi Dalam Menurunkan Kadar Besi (Fe), Timah Hitam (Pb), Mangan (Mn) Pada Leachate Tpa. Jurnal Media Kesehatan, 6(2), 102–200.
- Zubair, A., & Arsyad, A. (2014). Fitoremediasi Logam Berat Kadmium (Cd) Menggunakan Kombinasi Eceng Gondok (*Eichornia Crassipes*) Dan Kayu Apu (*Pistia Stratiotes*) Dengan Aliran Batch. Jurusan Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin.