

# EFEKTIVITAS PENGOLAHAN AKTIF-PASIF KAPUR DAN WETLAND TERHADAP PARAMETER pH DAN MANGAN AIR ASAM TAMBANG

## EFFECTIVENESS OF ACTIVE-PASSIVE TREATMENT USING LIME AND WETLAND ON pH AND MANGANESE IN ACID MINE DRAINAGE

Rifki Naufal<sup>1</sup>, Rr. Dina Asrifah<sup>2,\*</sup>

<sup>1,2</sup>Prodi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, UPN Veteran Yogyakarta  
Jalan Ring Road Utara, Ngropoh, Depok, Sleman, Yogyakarta 55281, Indonesia

Email: rifki0397@gmail.com

<sup>2</sup>PT Indominco Mandiri, Kalimantan Timur, Indonesia

\*Email corresponding: dina\_asrifah@upnyk.ac.id

**Cara Sitasi:** R. Naufal and R. D. Asrifah, "Efektivitas Pengolahan Aktif-Pasif Kapur Dan Wetland Terhadap Parameter Ph Dan Mangan Air Asam Tambang" *Kurvatek*, vol. 11, no. 1, pp. 101-110, 2026. doi: 10.33579/krvtek.v11i1.6439 [Online].

**Abstrak** — Air asam tambang merupakan salah satu permasalahan lingkungan utama pada kegiatan pertambangan batubara, khususnya metode tambang terbuka. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik AAT di *inlet settling pond* 39 PT Indominco Mandiri dan menganalisis efektivitas kombinasi pengolahan aktif (penambahan kapur tohor) dan pasif (fitoremediasi menggunakan *pistia stratiotes*) dalam meningkatkan pH serta menurunkan kadar Mn. Metode penelitian meliputi survei lapangan, uji laboratorium, dan percobaan skala laboratorium dengan empat variasi perlakuan: P1 tanpa pengolahan atau perlakuan (kontrol), P2 penambahan kapur (aktif), P3 penambahan kapur dan tanaman *pistia stratiotes* (kombinasi aktif-pasif), dan P4 penambahan tanaman saja (pasif) menggunakan sistem fitoremediasi statis selama 7 hari per periode. Parameter Mn diuji hingga hari ke-28, sedangkan pH dianalisis tiap 3 hari hingga hari ke-30. Hasil menunjukkan bahwa pH awal 3 dan Mn 13,95 mg/L dan didapatkan perlakuan P3 paling efektif, meningkatkan pH sebesar 138,67% dan menurunkan Mn sebesar 99,15% pada akhir percobaan.

**Kata kunci:** Air Asam Tambang, Pengolahan Aktif-Pasif, pH, Mangan

**Abstract** — Acid mine drainage is one of the main environmental problems in coal mining activities, especially open pit mining methods. This study aims to analyze the characteristics of acid mine drainage in settling pond 39 inlet of PT Indominco Mandiri and analyze the effectiveness of the combination of active (addition of quicklime) and passive (phytoremediation using *Pistia stratiotes*) treatment in increasing pH and reducing Mn levels. The research methods include field surveys, laboratory tests, and laboratory-scale experiments with four treatment variations: P1 without treatment or treatment (control), P2 addition of lime (active), P3 addition of lime and *pistia stratiotes* plants (active-passive combination), and P4 addition of plants only (passive) using a static phytoremediation system for 7 days per periode Mn parameters were tested until the 28th day, while pH were analyzed every 3 days until the 30th day. The results showed that the initial pH was 3 and Mn 13.95 mg/L and the P3 treatment was the most effective, increasing pH by 138.67% and reducing Mn by 99.15% at the end of the experiment.

**Keywords:** Acid Mine Drainage, Active-Passive Treatment, pH, Manganese

### I. PENDAHULUAN

Pertambangan merupakan salah satu komoditi terbesar yang cukup berkembang di Indonesia. Pertambangan ini adalah kegiatan ekstraksi atau pengambilan bahan galian yang memiliki nilai ekonomi dan bernilai jual, yang terdapat di dalam lapisan bumi [1]. Pertambangan yang dilakukan dapat berbagai jenisnya tergantung dari hasil dari pertambangan tersebut, salah satunya yaitu pertambangan batubara. Batubara merupakan bahan bakar fosil yang sampai saat ini masih menjadi kebutuhan energi di Indonesia [2]. Pertambangan batubara biasanya menggunakan metode penambangan secara terbuka atau metode *open pit*. Kegiatan eksploitasi batubara membawa dampak signifikan terhadap kondisi lingkungan, khususnya

kawasan hutan. Oleh sebab itu, perencanaan pengelolaan lingkungan yang menyeluruh mulai dari tahap awal hingga akhir operasi sangat diperlukan untuk menekan potensi dampak negatif akibat proses penambangan. Kegiatan pertambangan ini juga akan berhadapan dengan permasalahan air dimana akan menurunkan baik dari segi kuantitas dan kualitas, salah satunya adalah limbah air asam tambang.

Air asam tambang merupakan hasil dari reaksi antara batuan yang mengandung mineral sulfida, seperti pirit, dengan air dan udara setelah batuan tersebut terbuka akibat aktivitas penambangan. Keberadaan air asam ini menjadi konsekuensi yang tidak terhindarkan dalam kegiatan penambangan, baik pada tambang batubara maupun penambangan bijih logam lainnya [3]. Sifat air asam tambang ini ditandai oleh pH rendah dan kandungan logam berat seperti besi (Fe), mangan (Mn), kadmium (Cd), aluminium (Al), sulfat, serta pirit, yang semuanya menimbulkan ancaman bagi lingkungan bila tidak diolah terlebih dahulu. Sehingga, air asam tambang ini harus dilakukan pengelolaan terlebih dahulu di daerah pertambangan yang memiliki curah hujan tinggi dan hampir di setiap kegiatan pertambangan di Indonesia [4].

PT Indominco Mandiri adalah perusahaan yang bergerak di bidang pertambangan batubara, yang beroperasi di Kecamatan Teluk Pandan, Kabupaten Kutai Timur, Kalimantan Timur. Perusahaan ini menjalankan penambangan dengan metode terbuka (*open-pit*) dan telah membangun sejumlah settling pond sebagai bagian dari sistem pengelolaan limbah air tambang, salah satunya yaitu *settling pond* 39. Pengelolaan yang sudah dilakukan pada settling pond 39 ini yaitu menggunakan metode pengkapuran. Bentuk dari *settling pond* 39 yang berada di PT Indominco Mandiri menggunakan kompartemen sebanyak 4 kolam yang terdiri dari kompartemen 1 sebagai kolam pengendapan awal, kompartemen 2 sebagai kolam treatment, kompartemen 3 sebagai kolam pengontrol kualitas air limbah sebelum masuk ke kompartemen akhir, dan kompartemen 4 sebagai kolam pengontrol kualitas air limbah sebelum di buang ke badan penerima.

Upaya pengelolaan yang sudah dilakukan ini merupakan sistem pengolahan aktif, yang dilakukan dengan adanya penambahan kapur. Oleh karena itu, penentuan dosis kapur secara optimum perlu dilakukan agar tidak menimbulkan masalah baru seperti endapan kapur yang berlebih dan over budget. Disamping itu keberadaan sistem pengelolaan pasif juga dapat dilakukan agar dapat mengurangi beban dari kompartemen sehingga kinerja *settling pond* akan lebih maksimal serta sebagai salah satu langkah optimalisasi pemanfaatan sistem lahan basah buatan (*constructed wetland*) yang sebelumnya belum dimanfaatkan menjadi salah satu alternatif solusi. Sejalan dengan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik air asam tambang (AAT) di *inlet settling pond* 39 PT Indominco Mandiri serta menganalisis efektivitas kombinasi pengolahan aktif (penambahan kapur tohor) dan pasif (fitoremediasi menggunakan *pistia stratiotes*) dalam meningkatkan pH serta menurunkan kadar Mn. Oleh karena itu, penelitian terhadap penentuan dosis optimum kapur dan optimalisasi kolam *treatment* perlu dilakukan untuk membuat efektivitasnya dalam mengelola air tambang secara optimal.

## II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan beberapa tahapan metode, yaitu metode survei, eksperimen atau percobaan, laboratorium, dan analisis deskriptif. Penelitian ini menggunakan air sampel dari *Settling Pond* 39 East Block PT Indominco Mandiri, Kutai Timur, Kalimantan Timur. Bahan utama yang digunakan meliputi sampel air asam tambang (AAT) yang diambil langsung dari *inlet settling pond*, kapur tohor (CaO) sebagai bahan netralisasi, tanaman kiambang (*Pistia stratiotes*) sebagai agen fitoremediasi, serta lumpur PAF yang digunakan sebagai media tumbuh bakteri pereduksi sulfat. Peralatan yang digunakan meliputi pH meter digital, *turbidity meter*, spektrofotometer serapan atom (AAS) untuk analisis logam Fe dan Mn, serta perangkat uji jartest untuk menentukan dosis optimum kapur tohor.

### A. Pembuatan Rancangan Percobaan

Rancangan penelitian dilakukan dalam skala laboratorium dengan empat variasi perlakuan, yaitu P1 sebagai kontrol tanpa pengolahan, P2 dengan pengolahan aktif menggunakan kapur tohor, P3 dengan kombinasi pengolahan aktif dan pasif melalui penambahan kapur tohor dilanjutkan fitoremediasi menggunakan kiambang, serta P4 yang menggunakan pengolahan pasif dengan tanaman kiambang saja. Setiap perlakuan dijalankan selama 30 hari dengan pengamatan parameter pH setiap tiga hari, sedangkan kandungan Mn dianalisis setiap tujuh hari.



**Gambar 1.** Rangkaian Reaktor Penelitian

### **B. Penentuan Dosis Optimum Kapur Tohor**

Sebelum percobaan utama dilakukan, uji jar test digunakan untuk menentukan dosis kapur optimum yang dapat meningkatkan pH air asam tambang hingga mendekati baku mutu tanpa menghasilkan endapan berlebih. Percobaan jar test dilakukan dengan menggunakan beberapa variasi dosis kapur sebagai koagulan serta memanfaatkan indikator hold pada alat pengukur pH. Dalam uji ini, setiap perlakuan menggunakan sampel air limbah tambang sebanyak 1000 mL, volume tersebut dipilih karena sesuai dengan kapasitas beaker pada alat jar test, memungkinkan proses pengadukan berlangsung merata, serta mempermudah perhitungan dosis koagulan dalam satuan g/mL sehingga hasil pengujian menjadi lebih representatif dan akurat. Tahapan selanjutnya dilakukan dengan mencampurkan sampel air dengan kapur sesuai dosis yang telah ditentukan melalui pendekatan variasi dosis. Rentang dosis yang digunakan, yaitu 0–0,30 gram, diterapkan secara bertahap dari dosis rendah hingga tinggi untuk mengamati respons air terhadap penambahan koagulan. Proses pencampuran dilakukan dengan kecepatan pengadukan konstan sebesar 700 rpm, yang bertujuan untuk memastikan homogenitas larutan selama proses reaksi berlangsung. Percobaan ini dimaksudkan untuk mengevaluasi efektivitas dari masing-masing dosis kapur dalam menetralkan pH serta mengendapkan padatan tersuspensi atau logam berat yang terdapat dalam air limbah tambang.



**Gambar 2.** Melakukan Metode Jar Test

**Tabel 1.** Hasil Metode Jar Test Kapur

No	Sampel	Jumlah air (mL)	Sebelum pH	Dosis Penambahan Kapur (gram)	Sesudah pH
1	SP-39	1000	3	0	3,00
2				0,10	3,35
3				0,15	3,68
4				0,20	4,23
5				0,25	5,01
6				0,30	6,32

Berdasarkan Tabel 1, di atas menunjukkan hasil uji metode jar test yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan kapur tohor (CaO) terhadap peningkatan pH air asam tambang dari sampel SP-39 sebanyak 1000 mL dengan pH awal sebesar 3. Dapat diketahui untuk penambahan dosis mulai dari 0,10 gram sampai pada dosis 0,25 gram, pH mengalami peningkatan meningkat secara signifikan namun masih belum sepenuhnya masuk dalam baku mutu. Sementara pada dosis 0,30 gram telah berhasil menaikkan pH hingga 6,32, yang artinya sudah melewati batas minimal baku mutu air tambang, Oleh karena itu, dosis ini layak dijadikan acuan dalam penerapan pada metode pengolahan aktif secara mandiri. Namun, apabila pengolahan yang diterapkan merupakan kombinasi antara metode aktif dan pasif, maka dosis kapur yang dibutuhkan dapat dikurangi karena proses penurunan keasaman turut dibantu oleh sistem pengolahan pasif seperti penggunaan tanaman fitoremediasi dalam *constructed wetland* sehingga menggunakan dosis 0,25 gram. Sebagai pembandingan, mengacu pada hasil penelitian sebelumnya yang menggunakan metode jartest, diketahui bahwa pemberian kapur tohor sebanyak 0,46 gram pada 1 liter air asam tambang dengan pH awal

3,35 dapat meningkatkan pH menjadi 7,69 [5]. Nilai tersebut sudah memenuhi standar baku mutu lingkungan berdasarkan peraturan yang berlaku. Hasil ini menunjukkan bahwa dosis yang sedikit lebih tinggi masih dalam batas efisiensi dan dapat memberikan hasil pengolahan yang sesuai standar.

### C. Uji Efektivitas Rancangan Percobaan

Pengoperasian reaktor *Constructed Wetland* (lahan basah buatan) skala laboratorium dilakukan dengan metode fitoremediasi statis, proses dimana air yang mengalami perbaikan kualitas melalui media tumbuhan, dilakukan dalam kondisi tidak mengalami pergerakan atau diam [6]. Waktu pengamatan ditetapkan selama 7 hari untuk setiap periode pengamatan parameter logam Mn, dengan pengambilan data dilakukan hingga hari ke-28. Sementara itu, parameter pH dianalisis setiap 3 hari sekali sampai hari ke-30, guna memperoleh gambaran perubahan kualitas air secara lebih detail dan berkala. Melalui pengujian ini dapat diketahui bahwa perlakuan mana yang paling efektif dalam menetralkan nilai pH serta menurunkan kadar Mn hingga sesuai dengan baku mutu yang ditetapkan dalam Perda Provinsi Kalimantan Timur No. 02 Tahun 2011 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air.



**Gambar 3.** Pengecekan dan Pengukuran pH

### D. Analisis Data

Data hasil penelitian dianalisis secara deskriptif untuk menggambarkan dan menjelaskan data secara sistematis sesuai dengan kondisi nyata yang teramati di lapangan, kemudian dilakukan perbandingan dengan suatu standar yang telah ditetapkan [7]. Analisis deskriptif dilakukan melalui penyajian data dalam bentuk tabel, grafik, dan narasi, sehingga dapat dilihat perubahan dari setiap parameter kualitas air. Metode deskriptif ini kemudian akan melakukan evaluasi terkait parameter yang digunakan dalam penelitian ini. Parameter tersebut nantinya akan dibandingkan dengan standar yang telah ditetapkan dalam Baku Mutu sesuai Peraturan Daerah Provinsi Kalimantan Timur Nomor 02 Tahun 2011 tentang Pengelolaan Air dan Pengendalian Pencemaran Air.

### III. HASIL DAN DISKUSI

#### A. Kualitas Air Limbah Tambang Batubara

Air asam tambang dari kegiatan pertambangan batubara pada lokasi penelitian diambil dari saluran masuk (*inlet*) sebelum melalui proses pengolahan. Analisis kualitas air asam tambang mengacu pada Peraturan Daerah Provinsi Kalimantan Timur Nomor 02 Tahun 2011. Parameter kualitas air limbah yang diukur pada kegiatan pertambangan batubara meliputi Besi (Fe), Mangan (Mn), pH, dan *Total Suspended Solid* (TSS). Berdasarkan parameter tersebut, karakteristik air asam tambang di lokasi penelitian dapat diketahui melalui hasil uji karakteristik awal yang disajikan pada tabel berikut.

**Tabel 2.** Uji Karakteristik Awal Air Asam Tambang

No	Parameter	Satuan	Bakumutu	Hasil Analisa
1	pH		6 – 9	3
2	TSS	mg/L	300	112
3	Fe	mg/L	7	2,12
4	Mn	mg/L	4	13,95

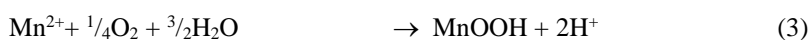
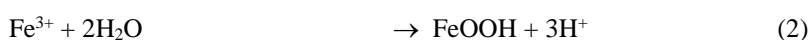
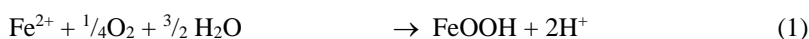
□ : Tidak Memenuhi Bakumutu

Tabel 2, menunjukkan karakteristik air asam tambang yang terdapat pada inlet *settling pond* 39 ini memiliki tingkat pH yang rendah, yang berarti kondisi airnya cukup asam. Keasaman ini menyebabkan kelarutan logam berat dalam air menjadi lebih tinggi. Di lokasi penelitian ini, air asam tambang menunjukkan kandungan mangan (Mn) yang terlarut dalam jumlah tinggi, sedangkan kandungan besi (Fe) yang terlarut lebih rendah dan masih berada dalam ambang batas baku mutu lingkungan. Rendahnya kelarutan Fe disebabkan oleh proses oksidasi dan hidrolisis yang berjalan lambat pada kondisi pH di bawah 5. Kandungan logam Mn dan Fe ini berasal dari sumber alami, yaitu tanah dan area disposal di sekitar lokasi, yang larut ke dalam air. Selain pirit ( $\text{FeS}_2$ ), batubara juga mengandung mineral lain seperti markasit ( $\text{FeS}_2$ ) dan rhodoksit ( $\text{MnCO}_3$ ), yang menjadi sumber utama logam berat besi dan mangan dalam air asam tambang. Ketika mineral-mineral tersebut mengalami proses oksidasi dan reduksi, terbentuk senyawa seperti ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ), ferri ( $\text{Fe}^{3+}$ ), mangan (Mn<sup>2+</sup>), dan mangani (Mn<sup>3+</sup>). Dalam kondisi air yang asam, senyawa ferro dan mangan cenderung lebih mudah larut. Oleh karena itu, dibutuhkan pengolahan yang sesuai seperti peningkatan pH melalui penambahan bahan alkali (seperti kapur atau kapur tohor/*quicklime*), aerasi untuk mempercepat oksidasi logam terlarut, dan pemanfaatan kolam *wetland* untuk memaksimalkan proses penurunan logam. Pengolahan ini bertujuan menurunkan konsentrasi logam berat hingga di bawah ambang baku mutu lingkungan dan menjaga kualitas air sebelum dialirkan ke badan air penerima.

Di samping itu, faktor iklim terutama curah hujan juga turut memengaruhi proses terbentuknya air asam tambang di *settling pond* 39. Tingginya intensitas hujan di lokasi penelitian menyebabkan bertambahnya volume air limbah yang harus ditangani, sehingga perencanaan konstruksi sistem pengolahan seperti lahan basah buatan (*wetland*) dan kompartemen kolam perlu dilakukan secara cermat agar mampu menampung dan mengolah air asam tambang dengan efektif. *Settling pond* 39 sendiri sangat dipengaruhi oleh volume air limpasan. Berdasarkan perhitungan menggunakan rumus rasional, diperoleh debit aliran sebesar 0,4735 m<sup>3</sup>/detik. Sebagai informasi pendukung, disajikan peta aliran air asam tambang yang memperlihatkan arah pergerakan dan area tangkapan aliran menuju ke *settling pond* 39.

Proses terbentuknya air asam tambang ini juga dipicu oleh adanya kehadiran oksigen dari udara sebagai agen pengoksidasi utama, sedangkan air berperan sebagai reaktan sekaligus media pelarut yang membantu melarutkan hasil oksidasi tersebut. Air yang terlibat dalam proses ini dapat berasal dari air hujan, air tanah, maupun limpasan permukaan [8].

Air asam tambang juga dapat terbentuk melalui mekanisme kimia maupun biologis. Proses kimiawi berlangsung ketika logam-logam terlarut mengalami hidrolisis yang menghasilkan ion H<sup>+</sup>, sehingga pirit teroksidasi dan memicu terbentuknya air asam tambang, sebagaimana dijelaskan pada reaksi (1), (2), dan (3).



Pada saat mineral pirit ( $\text{FeS}_2$ ) terkena udara dan air, terjadi reaksi kimia yang menghasilkan zat besi dalam bentuk ferrous ( $\text{Fe}^{2+}$ ). Zat besi ini kemudian mengalami oksidasi menjadi ferric iron ( $\text{Fe}^{3+}$ ), yang selanjutnya terhidrolisis dan membentuk endapan berwarna kuning kecokelatan bernama FeOOH. Proses ini juga

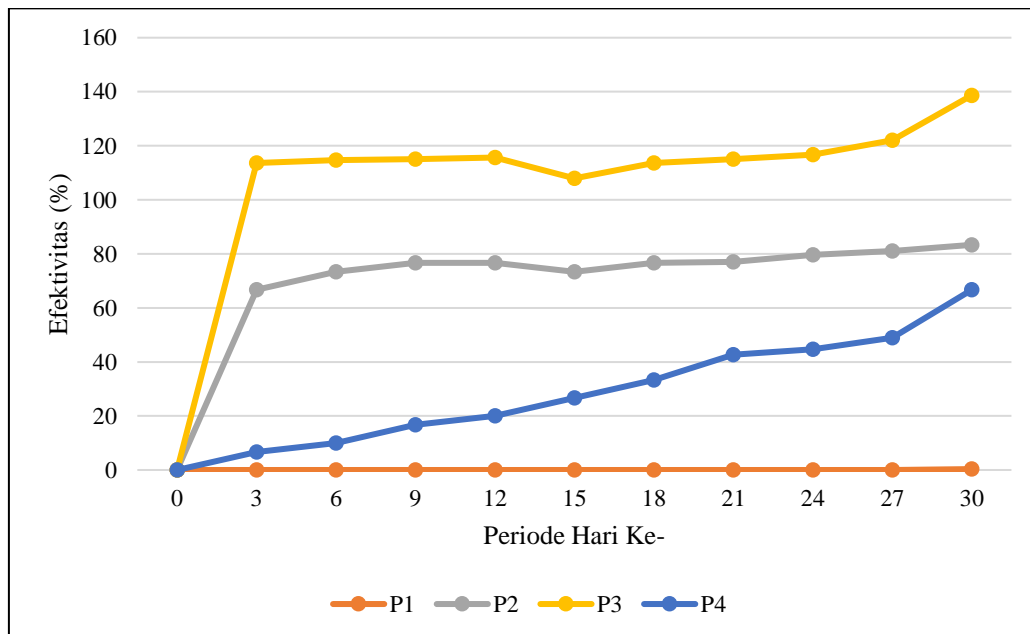
melepaskan ion hidrogen (H<sup>+</sup>), yang menyebabkan air menjadi asam. Selain itu, aktivitas bakteri tertentu mempercepat reaksi ini karena mereka memperoleh energi dari proses oksidasi mineral sulfida. Sehingga reaksi antara pirit, udara, dan air menghasilkan zat besi dan keasaman yang tinggi. Proses ini dapat semakin cepat akibat bantuan bakteri, sehingga memperbesar potensi terbentuknya air asam tambang [9]. Oleh karena itu fungsi utama *settling pond* 39 adalah sebagai kolam awal untuk menampung dan mengolah air tambang sebelum dialirkan lebih lanjut ke lingkungan sungai, sehingga efektivitasnya sangat berpengaruh terhadap upaya perlindungan lingkungan di sekitar area tambang.

**B. Efektivitas Kenaikan pH**

Kapur tohor dapat dimanfaatkan sebagai bahan penetralisir dalam pengolahan air asam tambang (AAT) batubara yang dapat mengatasi keasaman tinggi akibat oksidasi mineral sulfida seperti pirit. Selain itu, penggunaan kapur tohor dalam pengolahan AAT juga bersifat ramah lingkungan, ekonomis, dan mudah diterapkan di lapangan. Secara umum, kapur tohor terdiri dari 90-94% kalsium oksida (CaO) pada grade super, dengan sisanya magnesium oksida dan kotoran minor lainnya [10]. Berikut merupakan hasil pengukuran parameter pH setelah air asam tambang diolah menggunakan metode pengolahan aktif dan pasif.

**Tabel 3.** Efektivitas Pengolahan pH

Hari	pH awal	Kontrol P1		Kapur (0,25 gr) P2		Kapur (0,25 gr) + Tanaman P3		Tanaman saja P4	
		pH	%	pH	%	pH	%	pH	%
0		3	0.00	3	0.00	3	0.00	3	0.00
3		3	0.00	5	66.67	6.41	113.67	3.2	6.67
6		3	0.00	5.2	73.33	6.44	114.67	3.3	10.00
9		3	0.00	5.3	76.67	6.45	115.00	3.5	16.67
12		3	0.00	5.3	76.67	6.47	115.67	3.6	20.00
15	3	3	0.00	5.2	73.33	6.24	108.00	3.8	26.67
18		3	0.00	5.3	76.67	6.41	113.67	4	33.33
21		3	0.00	5	77.00	6.45	115.00	4.28	42.67
24		3	0.00	5.39	79.67	6.5	116.67	4.34	44.67
27		3	0.00	5.43	81.00	6.66	122.00	4.47	49.00
30		3.01	0.33	5.5	83.33	7.16	138.67	5	66.67



**Gambar 4.** Grafik Efektivitas Pengolahan pH

Berdasarkan data yang ditampilkan pada tabel dan grafik, menunjukkan bahwa efektivitas peningkatan pH paling menonjol terjadi pada perlakuan 3 (P3). Perlakuan tersebut menunjukkan kenaikan pH yang

signifikan, terutama pada hari ke-30, dengan persentase peningkatan mencapai 139% dari kondisi awal pH sebesar 3. Peningkatan tersebut disebabkan oleh adanya penambahan kapur tohor (CaO) di awal perlakuan begitu juga dengan perlakuan perlakuan 2 (P2), yang memberikan dampak langsung terhadap peningkatan pH secara cepat dan signifikan. Perlakuan P2 dan P4 juga memperlihatkan peningkatan pH, meskipun belum mencapai nilai baku mutu yang ditetapkan. Kenaikan pH tertinggi untuk kedua perlakuan ini tercatat pada hari ke-30, dengan efektivitas peningkatan masing-masing sebesar 83% untuk P2 dan 67% untuk P4. Peningkatan pada P2 disebabkan karena adanya penambahan kapur namun perlakuan P2 ini mengalami stagnan pada area pH 5 hal ini karena terbatas pada reaksi kimia dari kapur saja, yang pada titik tertentu tidak cukup kuat untuk mencapai pH netral tanpa dukungan biologis. Sedangkan P3 dapat mencapai pH 7 karena ada sinergi antara reaksi kimia dan proses biologis, sehingga menjadikannya lebih efektif dalam menetralkan keasaman air asam tambang. Sedangkan pada P4 diduga berasal dari adanya penambahan substrat organik yang berasal dari dekomposisi tanaman mati, di mana substrat tersebut berfungsi sebagai media tumbuh mikroorganisme yang berperan dalam menguraikan senyawa organik maupun anorganik di dalam air. Proses fotosintesis oleh tanaman juga turut berkontribusi melalui produksi oksigen (O<sub>2</sub>) yang mendukung reaksi oksidasi senyawa organik. Selain itu, keberadaan bakteri pereduksi sulfat di dasar reaktor yang berkembang akibat adanya lumpur dan tanaman juga berperan dalam meningkatkan alkalinitas serta mengubah logam menjadi bentuk endapan disulfida, sehingga turut membantu dalam peningkatan pH.

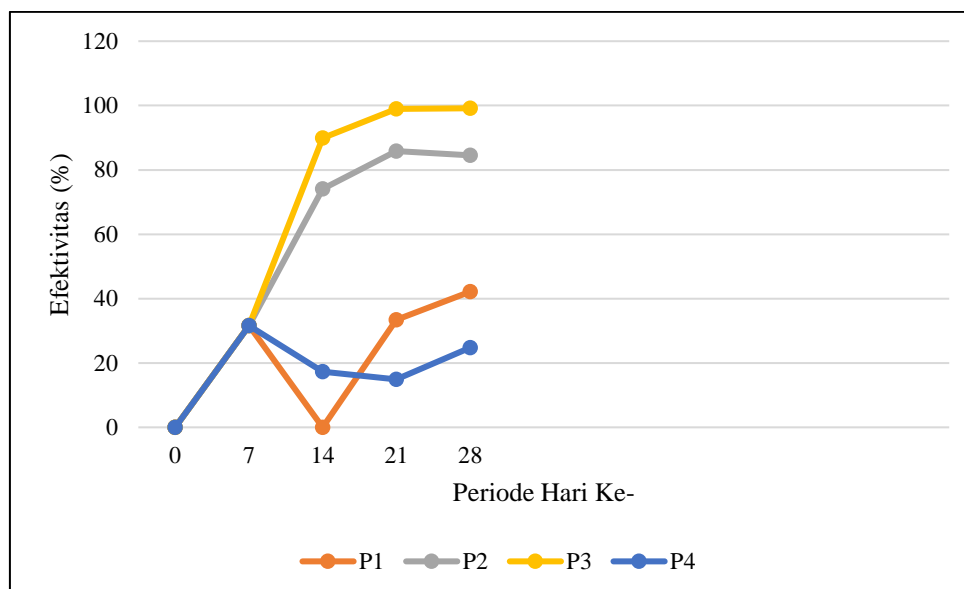
Sehingga perlakuan pengelolaan air asam tambang (AAT) menggunakan pendekatan pasif yaitu tanaman air kiambang (*Pistia stratiotes*), tanaman ini memiliki kemampuan biofiltrasi yang cukup baik, terutama dalam proses fitoremediasi terhadap parameter pH. Hasil percobaan menunjukkan bahwa kiambang mampu meningkatkan pH, meskipun tidak secepat atau setinggi efektivitas kapur. Namun, keunggulan kiambang terletak pada biaya yang rendah, kemampuan adaptasi di lingkungan tercemar, serta potensi jangka panjang yang ramah lingkungan. Dengan demikian, kombinasi antara pengolahan aktif dan pasif dapat menjadi strategi pengelolaan AAT yang optimal, yaitu menggunakan kapur untuk netralisasi cepat, kemudian dilanjutkan dengan kiambang untuk menjaga stabilitas kualitas air secara alami sebelum dialirkan ke lingkungan perairan. Karena itu efektivitas pengolahan terhadap parameter pH menunjukkan hasil yang cukup baik. Hal ini menjadi indikasi bahwa perlakuan percobaan pengelolaan air limbah telah berjalan optimal, sehingga dapat menjaga kualitas lingkungan dan memastikan air limbah yang dilepaskan tidak mencemari perairan di sekitarnya dan tetap mendukung upaya pelestarian lingkungan.

### C. Efektivitas Penurunan Mangan (Mn)

Penggunaan kapur tohor dimanfaatkan karena bahan ini mudah didapat secara lokal di Indonesia dan dapat mengurangi ketergantungan pada bahan kimia impor dalam pengolahan mangan (Mn) pada air asam tambang. Selain itu, penerapan kapur tohor dalam pengolahan limbah juga bersifat ramah lingkungan, ekonomis, dan efektif menurunkan konsentrasi Mn melalui presipitasi. Salah satu logam berat yang dapat ditangani untuk menjernihkan air tambang adalah mangan, di mana kandungan CaO pada kapur tohor bereaksi membentuk senyawa tidak larut dengan ion Mn [11]. Berikut merupakan hasil pengukuran parameter pH setelah air asam tambang diolah menggunakan metode pengolahan aktif dan pasif.

**Tabel 4.** Efektivitas Penurunan Mn

Hari	Mn awal (mg/L)	Kontrol P1		Kapur (0,25 gr) P2		Kapur (0,25 gr) + Tanaman P3		Tanaman saja P4	
		Mn	%	Mn	%	Mn	%	Mn	%
0		13.95	0.00	13.95	0.00	13.95	0.00	13.95	0.00
7		9.54	31.60	9.54	31.60	9.54	31.60	9.54	31.60
14	13.95	13.95	0.00	3.61	74.11	1.41	89.86	11.54	17.30
21		9.29	33.41	1.97	85.85	0.15	98.92	11.87	14.94
28		8.07	42.15	2.16	84.51	0.12	99.15	10.49	24.78



**Gambar 5.** Grafik Efektivitas Penurunan Mn

Berdasarkan tabel dan grafik efektivitas penurunan kadar Mn, terlihat bahwa keempat perlakuan (P1, P2, P3, dan P4) menunjukkan penurunan yang bervariasi selama periode pengamatan 28 hari. Perlakuan P3 menunjukkan efektivitas tertinggi dan paling stabil dalam menurunkan Mn, dengan lonjakan drastis pada hari ke-14 hingga mencapai efektivitas sekitar 90%, lalu meningkat hingga hampir 100% dan bertahan sampai hari ke-28. Hal ini menunjukkan bahwa P3 merupakan perlakuan paling efektif dalam mengeliminasi kandungan Mn dari air asam tambang. Efektivitas tinggi pada P3 kemungkinan besar disebabkan oleh kombinasi pengaruh pH yang meningkat akibat penambahan kapur tohor (CaO) dan waktu tinggal yang cukup lama, sehingga memungkinkan  $Mn^{2+}$  untuk mengendap sebagai  $MnO_2$  atau  $Mn(OH)_2$ . Senyawa mangan lebih stabil untuk mengendap pada pH yang lebih tinggi dan dalam kondisi oksidatif, yang bisa terjadi akibat adanya aerasi alami atau aktivitas fotosintetik dari tanaman air dalam sistem terbuka. Perlakuan P2 juga menunjukkan efektivitas yang cukup baik, dengan peningkatan stabil hingga hari ke-14 dan mencapai efektivitas sekitar 85% di akhir periode. Ini menunjukkan bahwa penambahan kapur tanpa kombinasi tanaman tetap mampu meningkatkan pH cukup signifikan untuk membantu presipitasi Mn, meskipun tidak seefisien P3. Sementara itu, perlakuan P4 (yang mengandalkan tanaman kiambang saja secara dominan memperlihatkan hasil yang fluktuatif. Efektivitas awal cukup tinggi pada hari ke-7, namun mengalami penurunan pada hari ke-14 dan kemudian kembali naik perlahan hingga hari ke-30 dengan efektivitas maksimum sekitar 26%. Penurunan ini dapat disebabkan oleh kondisi pH yang belum mencapai ambang optimal untuk pengendapan Mn, mengingat Mn memerlukan pH lebih tinggi (di atas 8,5) agar bisa mengendap secara efektif. Selain itu, proses biologis melalui tanaman dan mikroorganisme biasanya lebih lambat dan tidak langsung memberikan efek signifikan pada logam seperti mangan. Perlakuan P1, yang merupakan kontrol tanpa penambahan kapur atau tanaman, menunjukkan efektivitas paling rendah dan fluktuatif, dengan nilai yang hanya mencapai sekitar 40% di akhir periode. Hal ini menegaskan bahwa pengurangan Mn secara alami tanpa perlakuan tambahan sangat lambat dan tidak efisien.

Hasil menunjukkan bahwa untuk parameter Mn, pendekatan aktif dengan penambahan kapur jauh lebih efektif dibanding pendekatan pasif, namun penggunaannya secara mandiri memiliki keterbatasan dalam jangka panjang dan efektivitas keberlanjutan. Sehingga kombinasi keduanya seperti pada Perlakuan ke 3 menjadi solusi paling optimal, karena dapat mengatasi keterbatasan masing-masing metode dan menghasilkan efektivitas tinggi dan stabil dalam jangka waktu relatif singkat serta memiliki keunggulan dari sisi ekologis dan juga biaya. Hal ini penting untuk menjamin bahwa air asam tambang yang akan dibuang ke lingkungan memenuhi baku mutu logam berat, terutama mangan, yang berbahaya bagi ekosistem perairan. Sehingga mampu menjaga kualitas air limbah tambang agar tidak mencemari lingkungan sekitar serta mendukung kelestarian ekosistem perairan secara berkelanjutan.

#### IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa air asam tambang di *Settling Pond* 39 PT Indominco Mandiri memiliki karakteristik asam dengan pH 3 dan kandungan logam berat seperti Fe sebesar 2,12 mg/L dan Mn sebesar 13,95 mg/L, sehingga masih memerlukan pengolahan sebelum dilepaskan ke lingkungan. Kombinasi metode pengolahan aktif menggunakan kapur tohor dan pengolahan pasif dengan tanaman kiambang terbukti paling efektif dengan percobaan laboratorium menggunakan kombinasi kapur tohor sebanyak 0,25 gram/liter dan tanaman kiambang menunjukkan efektivitas tinggi sebesar 138,67% untuk meningkatkan pH dan 99,15% untuk menurunkan kadar logam Mn. Oleh karena itu, penerapan sistem kombinasi ini pada *constructed wetland* secara kontinyu direkomendasikan untuk mengoptimalkan kinerja pengolahan air asam tambang dan mengurangi beban pencemar pada unit pengolahan di lapangan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas limpahan nikmat, rahmat, dan anugerah Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing di Jurusan Teknik Lingkungan UPN "Veteran Yogyakarta atas ilmu dan arahan yang telah diberikan kepada saya selama proses penyusunan penelitian ini. Juga, kepada seluruh bagian pada Departemen Environment PT Indominco Mandiri dan kepada kedua orangtua yang senantiasa memberikan dukungan moril ataupun materil dan semua pihak yang turut serta membantu dalam penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Rahma, "Dampak Pertambangan Batu Bara Pada Kesehatan Lingkungan: A Systematic Review," *Health Safety Environment Journal*, vol. 2, no. 2, 2021.
- [2] R. Pahlevi, S. Thamrin, I. Ahmad, and F. B. Nugroho, "Masa Depan Pemanfaatan Batubara sebagai Sumber Energi di Indonesia," *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, vol. 5, no. 2, pp. 50-60, 2024.
- [3] I. Nortoris, A. A. I. Adnyano, and E. Sumarjono, "Kajian Teknis Pencegahan dan Penanganan Air Asam Tambang pada Penambangan Batubara PT. Kayan Putra Utama Coal - Site Separi," *MINING INSIGHT*, vol. 1, no. 02, pp. 203-210, 2020.
- [4] Y. Iashania, F. Murati, N. Fidayanti, S. Melinda, I. Y. and Reba, "Pengelolaan dan Pengendalian Air Asam Tambang pada Kegiatan Pertambangan Batubara: Management and Control of Acid Mine Water in Coal Mining Activities," *Jurnal Teknik Pertambangan*, vol. 24, no. 1, pp. 44-51, 2024.
- [5] T. Maretha, "Kajian Teknis Pengelolaan AAT Menggunakan Kapur Tohor dan Rekomendasi Aerator pada KPL Pit 1 Timur, PTBA, TBK," *Jurnal Eksakta Kebumihan*, vol. 2, no. 1, pp. 92-97, 2021.
- [6] Madaniyah, "Efektivitas Tanaman Air dalam Pembersihan Logam Berat pada Air Asam Tambang," Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor, 2016
- [7] M. Ramdhan, "Metode penelitian," Cipta Media Nusantara, 2021.
- [8] L. Rianti and D. A. A. R. Saputra, "Analisis Penetralan Air Asam Tambang dengan Metode Aktif Menggunakan Powerbase di Pit Timur PT. Dizamatra Powerindo Kabupaten Lahat Provinsi Sumatera Selatan," *Jurnal Ilmiah Hospitality*, vol. 11, no. 2, pp. 1421-1426, 2022.
- [9] E. Kusdarini, P. R. Sania, and Budianto, "Netralisasi Air Asam Tambang menggunakan Pengolahan Aktif dan Pasif," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 22, no. 3, pp. 808-815, 2024.
- [10] I. S. Ambarsari, S. Sunandar, dan M. D. Setiawan, "Kajian Pengolahan Air Asam Tambang Menggunakan Kapur Tohor (Ca (OH) 2) di Kolam Pengendapan Lumpur (Settling Pond) Daerah Kalimantan Selatan," *Mining Science And Technology Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 91-96, 2023.
- [11] W. Sholikah san F. Dinna, "Studi Perbandingan antara Kapur Tohor (CaO) dengan Greenhydro LM-50 C pada Pengolahan Air Asam Tambang di Settling Pond Azalea PT. Kaltim Prima Coal Sangatta Kabupaten Kutai Timur, Kalimantan Timur," *Jurnal Teknologi Mineral FT UNMUL*, vol. 5, no. 1, 2018.



©2026. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).