

DESAIN KONSTRUKSI WETLAND UNTUK PENGELOLAAN AIR ASAM TAMBANG DI VOID PASCA TAMBANG BATUBARA

WETLAND CONSTRUCTION DESIGN FOR ACID MINE DRAINAGE MANAGEMENT IN POST-COAL MINING VOIDS

Bantar Tyas Suksmawati Rukmana^{1*}, Shofa Rijalul Haq², Oktarian Wisnu Lusantono³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Pertambangan, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta
Jalan Padjajaran 104 (Lingkar Utara), Condongcatur, Depok, Sleman, Yogyakarta 55283, Indonesia

*Email corresponding: bantartyas.suksmawatirukmana@upnyk.ac.id

²Email: shofa.haq@upnyk.ac.id

³Email: oktarian.lusantono@upnyk.ac.id

Cara sitasi: B. T. S. Rukmana, S. R. Haq, dan O. W. Lusantono, "Desain Konstruksi Wetland untuk Pengelolaan Air Asam Tambang di Void Pasca Tambang Batubara," *Kurvatek*, vol. 11, no. 1, pp. 19-28, 2026. doi: 10.33579/krvtk.v11i1.6136 [Online].

Abstrak— Air asam tambang (AAT) merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang sering dijumpai pada kegiatan pertambangan, termasuk di Kutai Barat, Kalimantan Timur. Adanya keberadaan AAT dapat menurunkan kualitas lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang constructed wetland sebagai solusi pengolahan AAT secara pasif dengan memanfaatkan tanaman *Typha sp.* dan mikroalga. Metode yang digunakan meliputi karakterisasi geokimia batuan, analisis hidrologi, dan pengujian *pilot project* dengan menggunakan 5 kompartemen. Hasil uji menunjukkan sebagian besar batuan pada area *low wall* tergolong pembentuk asam, sedangkan air *creek* di sekitar *void* memiliki pH 2–3,5. Hasil uji *pilot project* memperlihatkan bahwa penggunaan kapur dan pupuk organik pada media tanam dengan *Typha sp.* dapat meningkatkan pH air menjadi 6,91 dan menurunkan logam terlarut hingga di bawah baku mutu, serta memperbaiki kualitas tanah. Penelitian ini menyimpulkan bahwa lahan basah buatan berpotensi sebagai solusi pasif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan untuk pengelolaan air asam tambang.

Kata kunci: lahan basah buatan, *void*, kualitas air, *Typha*.

Abstract— Acid mine drainage (AMD) is one of the major environmental problems commonly encountered in mining activities, including in Kutai Barat, East Kalimantan. The presence of AMD reduces environmental quality. This study aimed to design a constructed wetland as a passive treatment solution for AMD by utilizing *Typha sp.* and microalgae. The methods included geochemical characterization of rocks, hydrological analysis, and a pilot project experiment using five compartments. The results indicated that most rocks in the low wall area were classified as acid-forming, while creek water around the void had a pH of 2–3.5. The pilot project showed that the application of lime and organic fertilizer in planting media with *Typha sp.* increased water pH to 6.91, reduced dissolved metals below quality standards, and improved soil quality. This study concludes that constructed wetlands have strong potential as a passive, environmentally friendly, and sustainable solution for acid mine drainage management.

Keywords: Coal, Resource estimation, 2D resistivity geoelectricity, Ordinary kriging, Wenner schlumberger.

I. PENDAHULUAN

Air asam tambang (AAT) merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang sering terjadi pada kegiatan pertambangan batubara [1]. Proses ini terjadi akibat oksidasi mineral sulfida, terutama pirit (FeS_2), yang bereaksi dengan oksigen dan air sehingga membentuk larutan bersifat asam dengan kandungan logam terlarut yang tinggi [2]. AAT yang tidak dikelola dengan baik dapat mengakibatkan penurunan pH perairan, peningkatan konsentrasi besi (Fe), mangan (Mn), dan sulfat (SO_4^{2-}), serta berdampak negatif pada biota perairan dan kualitas lingkungan di sekitar tambang [1].

Penambangan batubara yang beroperasi di Kabupaten Kutai Barat, Kalimantan Timur, memiliki salah satu *void* pasca tambang. *Void* ini terbentuk dari bekas galian tambang batubara dengan luas permukaan

± 132 hektar dan kedalaman mencapai ± 60 meter. Void pascatambang seringkali berkembang menjadi *pit lake* yang memiliki potensi pemanfaatan maupun risiko lingkungan [3]. Berdasarkan hasil karakterisasi geokimia, *void* ini memiliki potensi menghasilkan air asam tambang akibat adanya zona batuan yang mengandung mineral sulfida. Hasil pengamatan awal menunjukkan pH rendah (3,27–5,3) pada beberapa titik serta konsentrasi logam terlarut yang melebihi baku mutu KEPMEN LHK No. 5 Tahun 2022.

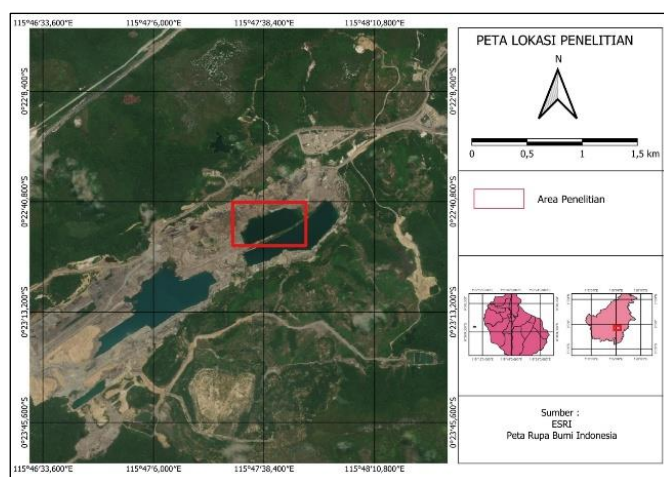
Pengelolaan air asam tambang dapat dilakukan secara aktif dan pasif. Metode aktif seperti penambahan kapur atau soda memerlukan biaya operasional tinggi dan pemeliharaan berkelanjutan [4]. Sebaliknya, metode pasif seperti lahan basah buatan (*constructed wetland*) menawarkan solusi berbiaya rendah, ramah lingkungan, dan memanfaatkan proses alami untuk menetralkan pH serta mengendapkan logam [5]. Tanaman air seperti *Typha sp.* dan mikroalga berperan penting dalam proses ini, masing-masing berfungsi sebagai penyerap logam dan penghasil oksigen yang mendukung aktivitas mikroba pengurang sulfat [6].

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan efektivitas *Typha sp.* dalam menyerap logam berat pada sistem *wetland* (Fidriyanda et al., 2022; Hidayat et al., 2024) [6, 7]. Selain itu, pendekatan *constructed wetland* pada skala laboratorium juga terbukti mampu mereduksi kontaminan pada air tercemar [8]. Namun, belum banyak penelitian yang mengkaji kombinasi *Typha sp.* dan mikroalga untuk pengolahan air asam tambang pada skala *void* tambang di Indonesia, khususnya dengan desain spesifik sesuai kondisi lokal [9]. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengevaluasi *pilot project* sistem lahan basah buatan untuk pengolahan air asam tambang.

II. METODE PENELITIAN

A. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di salah satu *void* pascatambang batubara yang terletak di wilayah Kutai Barat, Kalimantan Timur. Lokasi ini merupakan area bekas tambang terbuka yang telah berhenti beroperasi dan secara alami maupun buatan membentuk danau (*pit lake*). Area penelitian ini memiliki luasan mencapai ± 132 ha dan kedalaman maksimum antara 60 m hingga 90 m berdasarkan hasil pengamatan lapangan serta survei topografi terbaru. Peta lokasi penelitian bisa dilihat pada Gambar 1. Formasi batuan yang terbentuk di area penelitian ini didominasi batupasir karbonan dan batulempung. Litologi yang tersingkap pada dinding *void* terdiri atas batuan bertekstur halus hingga sedang dan sebagian diantaranya teridentifikasi sebagai *Potential Acid Forming* (PAF). Secara geomorfologi, area *void* dikelilingi oleh dinding-dinding pit yang masih terbuka dan menunjukkan variasi kemiringan dan litologi. Vegetasi alami di sekitarnya didominasi oleh semak belukar dan rumputan, dengan sedikit keberadaan spesies endemik rawa. Area sekitar *void* sebagian besar masih dalam tahap revegetasi pascatambang, sehingga potensi limpasan sedimen dan masuknya beban pencemar masih tinggi.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

B. Pengambilan Sampel dan Analisis Laboratorium

Pengambilan sampel dalam penelitian ini dilakukan untuk memperoleh data karakteristik geokimia batuan, kualitas air *void*, serta tanaman yang digunakan dalam sistem *constructed wetland*. Pengambilan sampel dilakukan dengan memperhatikan sebaran lokasi dan kedalaman pengambilan sampel untuk memastikan kondisi lingkungan *void* secara spasial dan vertikal.

Sampel batuan dikumpulkan dari dinding pit yang masih tersingkap di sekitar *void*, dengan mempertimbangkan zona yang berpotensi tinggi membentuk air asam tambang. Sebanyak 23 sampel batuan diambil menggunakan metode *grab sampling*, yang tersebar di tiga lokasi utama: *high wall* (10 sampel), *low wall* (5 sampel), dan *side wall* (8 sampel). Lokasi pengambilan sampel bisa dilihat pada Gambar 2. Batuan yang diambil berupa batupasir dan batulempung berwarna kelabu gelap hingga kecoklatan, diperoleh dari area terbuka yang belum mengalami reklamasi. Proses pengambilan sampel dilakukan secara manual menggunakan palu geologi, kemudian sampel disimpan dalam kantong berlabel untuk dianalisis lebih lanjut.



Gambar 2. Lokasi Pengambilan Sampel

Sampel air dikumpulkan dari beberapa titik di *void* berdasarkan sebaran horizontal dan vertikal. Tahap pertama mencakup pengambilan air permukaan, air limpasan, dan genangan di sekitar *void*, sedangkan tahap kedua dilakukan pada kedalaman 0, 1, 5, 10, 20, 40, dan 60 meter di lokasi *void* utama menggunakan alat *multi-depth water sampler*. Pengukuran langsung di lapangan dilakukan terhadap pH, total padatan terlarut (TDS), potensi oksidasi-reduksi (ORP), konduktivitas listrik (EC), dan salinitas menggunakan *multi-parameter probe* digital. Sampel air untuk analisis logam berat dimasukkan ke dalam botol polietilen steril, diawetkan dengan HNO₃ pekat, disimpan pada suhu $\pm 4^{\circ}\text{C}$, dan dianalisis di laboratorium menggunakan metode AAS atau ICP-OES.

Pengambilan sampel tanah dilakukan dari kedalaman ± 20 cm di area sekitar vegetasi alami dan kompartemen percobaan *wetland*. Sampel ini dianalisis untuk mengetahui sifat fisik dan kimia tanah, meliputi pH, kandungan nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), dan kapasitas tukar kation (KTK). Tanaman *Typha sp.* diambil dari organ akar, batang, dan daun untuk dianalisis kandungan logam berat (Fe, Mn, Zn, Pb) yang terakumulasi, sehingga dapat dinilai efektivitasnya dalam proses fitoremediasi.

Analisis laboratorium dilakukan sesuai dengan standar MEND (2000), ASTM, dan Keputusan Menteri LHK No. 5 Tahun 2022. Pengujian batuan meliputi pH pasta, penentuan total sulfur menggunakan LECO analyzer, *Acid Neutralizing Capacity* (ANC) dengan metode titrasi, perhitungan *Maximum Potential Acidity* (MPA), *Net Acid Producing Potential* (NAPP), serta uji *Net Acid Generation* (NAG). Analisis kualitas air mencakup pH, TDS, EC, salinitas, ORP, logam berat (Fe, Mn, Al, Zn, Cu, Pb, Hg), nutrisi (NO₃⁻, NO₂⁻, PO₄³⁻, amonia), sulfat (SO₄²⁻), serta parameter BOD dan DO. Analisis tanah meliputi pH, N total, P, K, dan KTK, sedangkan tanaman *Typha sp.* dianalisis untuk distribusi logam berat di jaringan akar, batang, dan daun. Pada mikroalga dilakukan pengukuran biomassa kering dan kandungan klorofil a, b, dan total dengan metode spektrofotometri.

C. Kajian Hidrologi

Aspek hidrologi merupakan salah satu faktor utama dalam menganalisis sumber pembentukan air asam tambang sekaligus menjadi dasar penentuan strategi pengelolaan yang tepat. Perhitungan *water balance* volume air pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan metode *Curve Number* (CN). *Curve Number* atau *Soil Conservation Service Curve Number* (SCS-CN) adalah parameter empiris yang digunakan untuk memprediksi limpasan permukaan (*surface runoff*) dan infiltrasi, yang dikembangkan oleh *USDA Natural Resources Conservation Service* [10]. Metode ini dipilih karena mampu mengestimasi volume limpasan dengan mempertimbangkan kondisi tata guna lahan, jenis tanah, dan kelembapan awal tanah [11]. Dibandingkan dengan metode rasional, pendekatan SCS-CN memiliki

fleksibilitas lebih tinggi karena dapat dikombinasikan dengan berbagai metode pemodelan untuk menghasilkan parameter hidrologi yang lebih luas, termasuk proyeksi debit, beban sedimen, dan distribusi limpasan. Secara grafis, metode ini menggambarkan hubungan antara nilai CN, tebal hujan, dan tebal limpasan. Perhitungan tebal limpasan menggunakan persamaan:

$$Pe = \frac{(P-Ia)^2}{(P-Ia)+S} \quad (1)$$

dimana Pe merupakan kelebihan air hujan yang menjadi *runoff* (mm), P merupakan akumulasi curah hujan pada skala waktu tertentu (mm), S merupakan *potential maximum retention* atau kemampuan daerah tangkapan hujan dalam menyerap/menahan curah hujan ekstrim (mm), Ia atau *initial abstraction* merupakan jumlah air sebelum limpasan (infiltrasi atau intersepsi curah hujan oleh vegetasi) (mm), CN merupakan nilai *curve number*. Nilai S diturunkan dari nilai CN melalui persamaan:

$$S = \frac{1000-10CN}{CN} \quad (\text{foot - pound system})$$

$$S = \frac{25400-254CN}{CN} \quad (\text{SI})$$

$$Ia = 0,2 \times S \quad (2)$$

Hasil perhitungan limpasan digunakan untuk memproyeksikan debit masuk ke *void* pada berbagai skenario hujan. Proyeksi ini penting untuk mengestimasi peningkatan volume air yang dapat membawa beban pencemar dari area bukaan lahan, terutama mineral sulfida penyebab air asam tambang.

Selain metode analitis, pemodelan kondisi hidrologi *void* juga dilakukan menggunakan *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). SWAT adalah model yang dikembangkan oleh *Agricultural Research Service* (ARS)–USDA untuk memprediksi dampak pengelolaan lahan terhadap air, sedimen, dan kualitas air pada daerah aliran sungai (DAS) yang kompleks [12]. Model ini mempertimbangkan variasi jenis tanah, tata guna lahan, dan praktik manajemen, serta mampu melakukan simulasi jangka panjang [13]. Dalam penelitian ini, SWAT digunakan untuk memproyeksikan debit limpasan di titik *outlet void*, memprediksi potensi beban sedimen, serta mengevaluasi distribusi limpasan di seluruh area tangkapan hujan. Hasil model menjadi dasar perancangan kapasitas *constructed wetland*, menentukan waktu retensi hidrolik optimal, dan merancang strategi pengendalian aliran masuk agar pengolahan air asam tambang dapat dilakukan secara efektif pada berbagai kondisi cuaca [14]. Kombinasi teknologi pengolahan alami dengan tambahan proses sederhana terbukti efektif dalam menurunkan BOD dan TSS pada sistem pengolahan air [15].

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Karakteristik Geokimia Batuan

Karakterisasi geokimia batuan bertujuan untuk mengklasifikasikan suatu material yang berpotensi terjadinya pembentukan asam *Potential Acid Forming* (PAF) atau non pembentukan asam *Non Acid Performing* (NAF) [8]. Hal ini merupakan langkah penting dalam pengelolaan air asam tambang. Bahkan ketika suatu *void* tambang telah terbentuk, suatu kegiatan yang harus dilakukan adalah memastikan bahwa tidak ada bukaan atau area batuan yang terbuka pada dinding pit. Jika masih ada area yang terbuka maka perlu dilakukan karakterisasi geokimia batuan agar dapat memastikan bahwa batuan yang ada pada dinding pit berpotensi membentuk asam (PAF) atau batuan yang tidak berpotensi membentuk asam (NAF). Hal ini perlu dilakukan sebagai salah satu kajian dalam analisis air asam tambang.

Secara dimensi, *void* didaerah penelitian ini memiliki panjang sekitar 2 km dan lebar sekitar 600 - 800 m dengan kedalaman sekitar 70 m. Beberapa area di sekitar *void* tambang belum tertutup sempurna oleh tumbuhan, baik yang ditanam ketika kegiatan reklamasi maupun yang tumbuh secara alamiah. Beberapa sampel batuan pada dinding lereng *void* yang masih terbuka diambil untuk memastikan jenis batuan berdasarkan analisis geokimia batuan di sekitar *void* tambang. Kajian dilakukan pada *void* dengan melakukan analisis terhadap hasil uji yang telah dilakukan yaitu uji statik dan uji mineralogi.

Hasil uji statik didapatkan sebanyak lima sampel batuan diambil dari area *low wall* (LP19, LP20, LP21, LP22, dan LP23). Berdasarkan hasil uji NAPP dan pH NAG, empat sampel (LP19, LP20, LP22, LP23) dikategorikan sebagai *Potentially Acid Forming* (PAF), sementara satu sampel (LP21) dikategorikan *Non Acid Forming* (NAF). Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar batuan pada area *low wall* memiliki kecenderungan tinggi dalam menghasilkan asam ketika terpapar oksigen dan air (Tabel 1).

Tabel 1. Hasil Uji Statik Area *Low Wall*

Kode Sampel	NAPP (kg H ₂ SO ₄ /t)	pH NAG	Kategori
LP19	Positif	3,1	PAF
LP20	Positif	3,2	PAF
LP21	Negatif	6,4	NAF
LP22	Positif	3,5	PAF
LP23	Positif	3,4	PAF

Temuan ini penting karena lapisan *low wall* secara langsung bersinggungan dengan sistem aliran air ke *void*, sehingga berpotensi besar menjadi sumber utama air asam tambang (AAT). Kondisi dominasi batuan PAF yang ditemukan dalam penelitian ini sejalan dengan studi terbaru yang menunjukkan bahwa batuan pembentuk asam merupakan sumber utama terbentuknya air asam tambang pada sistem *pit lake* terbuka [16].

Hasil uji statik didapatkan sebanyak 10 sampel batuan diperoleh dari area *high wall* (LP6–LP15). Hasil uji statik menunjukkan variasi kategori: satu sampel (LP7) termasuk NAF, satu sampel (LP15) tergolong PAF, sedangkan delapan sampel lainnya diklasifikasikan *uncertain*. Variasi ini mengindikasikan heterogenitas sifat geokimia batuan pada area *high wall*. Nilai pH pasta berkisar antara 4,5–5,41 untuk sampel dengan indikasi asam (LP6, LP10, LP11, LP14, LP15), sedangkan sampel lain menunjukkan pH relatif netral hingga basa (5,88–8,03). Sebagian sampel memiliki pH pasta rendah mengindikasikan potensi pelepasan asam dalam jangka panjang, meskipun tidak semua sampel memperlihatkan potensi serupa (Tabel 2).

Tabel 2. Hasil Uji Statik *High Wall*

Kode Sampel	NAPP (kg H ₂ SO ₄ /t)	pH NAG	Kategori	pH Pasta
LP6	Positif	3,3	<i>Uncertain</i>	4,5
LP7	Negatif	6,8	NAF	8,0
LP8	Positif	3,6	<i>Uncertain</i>	5,9
LP9	Positif	3,7	<i>Uncertain</i>	6,1
LP10	Positif	3,4	<i>Uncertain</i>	5,0
LP11	Positif	3,2	<i>Uncertain</i>	4,9
LP12	Positif	3,5	<i>Uncertain</i>	5,9
LP13	Positif	3,8	<i>Uncertain</i>	6,0
LP14	Positif	3,0	<i>Uncertain</i>	5,1
LP15	Positif	3,1	PAF	4,7

Hasil uji statik didapatkan sebanyak delapan sampel diambil dari area *side wall* (LP1–LP5, LP16–LP18). Berdasarkan uji statik, dua sampel (LP1 dan LP17) dikategorikan PAF, tiga sampel (LP4, LP16, LP18) tergolong NAF, sementara sisanya memperlihatkan nilai *borderline*. Hasil pH pasta mendukung temuan tersebut, dengan lima sampel (LP1, LP2, LP3, LP5, LP17) menunjukkan nilai pH rendah (3,3–5,17) yang mengindikasikan sifat asam, sementara tiga sampel lainnya relatif netral hingga basa (6,2–8,1). Dengan demikian, area *side wall* juga berkontribusi terhadap potensi pembentukan asam, meskipun dengan variasi yang lebih lebar antar sampel (Tabel 3).

Tabel 3. Hasil Uji Statik *Side Wall*

Kode Sampel	NAPP (kg H ₂ SO ₄ /t)	pH NAG	Kategori	pH Pasta
LP1	Positif	3,2	PAF	3,3
LP2	Positif	3,6	<i>Uncertain</i>	4,5
LP3	Positif	3,5	<i>Uncertain</i>	4,8
LP4	Negatif	6,2	NAF	6,2
LP5	Positif	3,8	<i>Uncertain</i>	5,1
LP16	Negatif	6,5	NAF	6,7
LP17	Positif	3,4	PAF	5,0
LP18	Negatif	6,3	NAF	8,1

Uji mineralogi dengan metode *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan pada empat sampel yang mewakili area *high wall* dan *side wall* (LP6, LP12, LP17, LP18). Sampel LP6 didominasi oleh mineral illite (63,08%), diikuti kaolinit (21,80%) dan kuarsa (15,12%) serta tidak terdeteksi mineral sulfida primer. Sampel LP12 memiliki dominasi illite (66,52%), kuarsa (26,06%), serta kandungan kecil kaolinit (6,51%) dan feldspar (0,91%). Sampel LP17 lebih bervariasi dengan illite (37,83%), kuarsa (31,94%), kaolinit (27,28%), serta jarosit (2,95%). Kehadiran jarosite dalam jumlah kecil menjadi indikasi mineral sekunder pembentuk asam. Sampel LP18 mengandung illite (59,72%), kuarsa (23,30%), kaolinit (15,38%), dan feldspar (1,60%).

Secara umum, mineral utama penyusun batuan adalah illite, kuarsa, dan kaolinit, tanpa keberadaan mineral sulfida primer seperti pirit. Namun adanya mineral sekunder pembentuk asam, terutama kaolinit yang konsisten ditemukan pada seluruh sampel, serta jarosit pada LP17 menunjukkan adanya potensi pembentukan asam. Hal ini menjelaskan mengapa sebagian sampel uji statik menunjukkan sifat asam meskipun tidak terdeteksi keberadaan sulfida primer. Implikasinya, meskipun batuan tidak secara langsung mengandung pirit dalam jumlah signifikan, proses pelapukan mineral sekunder tetap dapat menghasilkan kondisi asam yang berkontribusi terhadap pembentukan AAT pada *void*.

B. Analisis Hidrologi

Hasil pengukuran kualitas air pada sistem *void* menunjukkan perbedaan karakteristik yang cukup signifikan antar lokasi. Nilai pH air pada *void* relatif netral, berkisar antara 6,3–6,9, dan masih memenuhi baku mutu air limbah pertambangan batubara. Sebaliknya, pengukuran pH pada air *creek* di area *low wall* bagian barat serta *side wall* bagian utara menunjukkan kisaran pH 2–3,5, yang masuk dalam kategori asam kuat. Kondisi ini berbeda dengan area *high wall* yang secara umum memperlihatkan pH 6–7. Pengamatan lapangan mendukung hasil tersebut, dimana singkapan batubara pada *floor* di sekitar *high wall* dan *side wall* utara memperlihatkan indikasi kuat sebagai sumber pembentukan AAT. Hal ini terlihat dari adanya lapisan tipis sulfur berwarna kuning di permukaan batuan, serta bau asam yang menyengat. Temuan ini diperkuat oleh pengukuran pH air *creek* di sekitar lokasi yang stabil pada kisaran 2–3,5. Karakteristik kualitas air pada *void* yang menunjukkan variasi pH dan logam terlarut juga telah dilaporkan pada berbagai studi *pit lake*, dimana interaksi antara geokimia batuan dan sistem hidrologi menjadi faktor pengontrol utama [17].

Curah hujan rata-rata tahunan di area penelitian mencapai 3438 mm/tahun dengan evapotranspirasi tahunan sebesar 1272 mm/tahun. Estimasi neraca air dilakukan menggunakan metode *Curve Number* (CN) bisa dilihat pada Tabel 4. Secara prinsip, neraca air *void* dihitung melalui persamaan:

$$V_{\text{masuk}} = V_{\text{runoff}} + V_{\text{air tanah}} - V_{\text{evapotranspirasi}} - V_{\text{infiltrasi}} \quad (3)$$

Tabel 4. Neraca Air *Void* Berdasarkan Metode *Curve Number*

DTH	Lokasi	Luas (ha)	Curve Number	Volume Air Tanah (m ³ /tahun)	Volume Runoff (m ³ /tahun)	Volume Loss (m ³ /tahun)
1 NAF	<i>Void</i>	128,4	100	3.154.000	2.780.071	1.634.041
2 NAF	High Wall & Side Wall S	216,2	80	-	4.523.457	2.910.639
3 NAF	Low Wall & Side Wall Utara	87,1	79	-	1.817.261	1.177.263
3 PAF	Low Wall & Side Wall Utara	1,3	90	-	27.712	16.982

Hasil analisis menunjukkan bahwa total debit limpasan rata-rata yang masuk ke dalam *void* mencapai 12.302.500 m³/tahun. Dengan mempertimbangkan volume tampungan air *void* sebesar 38.868.937 m³, maka diperoleh waktu retensi sebesar 3,2 tahun (Tabel 5). Waktu retensi yang panjang pada sistem perairan tambang memberikan peluang terjadinya proses alami seperti sedimentasi dan netralisasi kimia [18].

Tabel 5. Waktu Retensi Air *Void*

Total Volume Runoff Masuk (m ³ /tahun)	Volume Air <i>Void</i> (m ³)	Waktu Retensi (tahun)
12.302.500	38.868.937	3,2

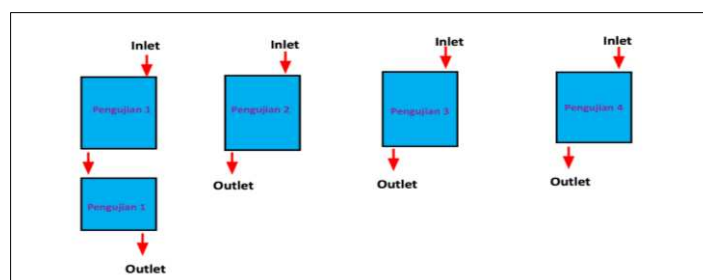
Proyeksi debit *overflow* serta sedimen terangkut dilakukan menggunakan model SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) dengan mempertimbangkan data iklim, curah hujan, topografi, jenis tanah, dan tutupan lahan. Model SWAT telah banyak digunakan dalam studi hidrologi untuk memprediksi limpasan dan kualitas air pada berbagai kondisi daerah aliran Sungai [19]. Hasil model memperlihatkan bahwa debit *overflow* rata-rata selama periode 2024–2045 adalah 0,164 m³/s, dengan debit maksimum hingga 6,6 m³/s pada kondisi hujan ekstrim. Rata-rata sedimen terangkut diperkirakan sebesar 0,1 ton/hari, dengan nilai maksimum mencapai 22 ton/hari. Jika dikonversi ke konsentrasi TSS (*Total Suspended Solid*), diperoleh rata-rata 7,07 mg/L dengan potensi maksimum 38,58 mg/L. Nilai ini relatif rendah dan sejalan dengan

kondisi visual di lapangan, dimana air *void* terlihat jernih. Rendahnya TSS juga dipengaruhi oleh keberhasilan program revegetasi di sekitar *void* serta dominasi material timbunan berupa pasir yang memiliki potensi erosi rendah.

Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa air yang masuk ke *void* terdiri atas dua komponen utama yaitu air bersifat asam kuat dengan pH rata-rata ± 3 yang berasal dari *creek* pada area PAF (*low wall* dan *side wall* utara) dan air netral dengan pH ± 7 yang berasal dari DTH NAF. Rasio kontribusi ini penting sebagai dasar desain sistem *wetland* karena memerlukan strategi khusus untuk menetralkan beban asam sekaligus menjaga kualitas air agar tetap berada dalam baku mutu lingkungan.

C. Pilot Project Wetland

Constructed *wetland* telah banyak digunakan sebagai metode pengolahan pasif air asam tambang karena kemampuannya dalam meningkatkan pH dan menurunkan konsentrasi logam secara alami [20]. Pilot project desain *wetland* dilakukan dengan membangun lima kompartemen uji (K1, K2, K3, K4, K5) di lapangan. Masing-masing kompartemen berukuran 10 m x 5 m x 0,5 m dengan saluran *inlet* dan *outlet* serta titik sampel. Air *void* dialirkan menuju kompartemen dengan debit rendah (<200 L/menit), sehingga ketinggian air dalam kolam stabil pada 30 cm dari permukaan substrat. Debit diatur menggunakan pintu air sederhana. Tanaman yang digunakan adalah *Typha sp.* dipilih karena ketersediaannya yang melimpah sebagai tanaman lokal. Tanaman *Typha sp.* dikenal memiliki kemampuan tinggi dalam proses fitoremediasi, khususnya dalam menyerap logam berat melalui sistem akar dan jaringan vegetatifnya [21]. Penanaman dilakukan secara manual dengan pola segi empat (50 cm x 50 cm) untuk meminimalkan stres transplantasi. Penelitian ini berlangsung selama 3 bulan dengan pemantauan kualitas air pada *inlet* dan *outlet* setiap kompartemen. Desain *pilot project wetland* bisa dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain Pilot Project Wetland

Keterangan:

- Pengujian 1 (*inlet*) : Lapisan dasar menggunakan kapur 10 cm + pupuk organik 30 cm + lumpur 20 cm tanaman *Typha* dengan genangan air 30 cm (K1)
 Pengujian 1 (*outlet*) : Hanya menggunakan mikroalga (K2)
 Pengujian 2 : Lapisan dasar menggunakan tandan kosong kelapa sawit 70 cm + lumpur 20 cm (tanpa kapur) dengan genangan air 30 cm (K3)
 Pengujian 3 : Tidak menggunakan lapisan dasar, hanya menggunakan Mikroalga (K4)
 Pengujian 4 : Tidak menggunakan lapisan dasar, hanya menggunakan tanaman *Typha* (K5)

Hasil pengukuran menunjukkan adanya variasi perubahan pH pada *outlet* tiap kompartemen (Tabel 6). Kenaikan pH paling signifikan terjadi pada K1 (6,91) karena adanya penambahan kapur dan pupuk organik yang mempercepat pembentukan alkalinitas bikarbonat. Pada K3 kenaikan pH lebih lambat (6,67), sedangkan K5 justru mengalami penurunan (6,53) akibat genangan air yang memicu akumulasi asam organik. Penambahan bahan organik dalam media *wetland* dapat meningkatkan alkalinitas, namun juga berpotensi meningkatkan nilai BOD akibat proses dekomposisi mikrobiologis [22].

Tabel 6. Perubahan pH Air Pada *Inlet* dan *Outlet* Kompartemen

Lokasi	pH on-site
<i>Inlet</i> Kompartemen	6,63
<i>Outlet</i> K1	6,91
<i>Outlet</i> K3	6,67
<i>Outlet</i> K5	6,53

Kadar maksimum kandungan besi (Fe) dan mangan (Mn) serta Kebutuhan Oksigen Biokimiawi (BOD) saat penambangan yaitu 7 mg/l pada Fe dan 4 mg/l pada Mn serta 30 mg/l pada BOD. Hasil

pengujian menunjukkan nilai dari Fe, Mn dan BOD sudah di bawah kadar maksimum yang artinya sudah memenuhi standar baku mutu air limbah pertambangan batubara (Tabel 7).

Tabel 7. Kualitas Air Pada *Void*, *Inlet* dan *Outlet*

No.	Parameter	Hasil (Mg/L)				
		<i>Inlet</i>	<i>Outlet K1</i>	<i>Outlet K3</i>	<i>Outlet K5</i>	<i>Void (Tengah Void)</i>
1	<i>Iron Dissolved</i> (Fe)	<0,055	<0,055	0,08	<0,055	<0,055
2	<i>Manganese Dissolved</i> (Mn)	0,26	0,264	0,352	0,564	0,332
3	<i>Sulfide</i> (H ₂ S)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
4	BOD	<2	10,053	4,075	<2	<2

Kandungan NPK pada tanah bisa dilihat pada Tabel 8. Pada K1 memiliki unsur N tertinggi sebesar 0,441% b/b dan P tertinggi sebesar 5417,32 mg/kg dibandingkan dengan kompartemen lainnya. Hal ini disebabkan adanya penggunaan pupuk organik dalam kompartemen satu. K3 memiliki unsur K tertinggi sebesar 2242,1 mg/kg.

Tabel 8. Kandungan NPK Pada Tanah

Kode Sampel	Parameter	Hasil	Satuan
K1	N total	0,441	% b/b
	P (Phospor)	5417,32	mg/kg
	K (Kalium)	1706,92	mg/kg
K3	N total	0,061	% b/b
	P (Phospor)	155,74	mg/kg
	K (Kalium)	2242,1	mg/kg
K5	N total	0,061	% b/b
	P (Phospor)	148,7	mg/kg
	K (Kalium)	2081,06	mg/kg
Sungai	N total	0,069	% b/b
	P (Phospor)	143,93	mg/kg
	K (Kalium)	1005,2	mg/kg

Berdasarkan serapan pada organ tanaman pada Tabel 9, kandungan Fe tertinggi diperoleh dari bagian akar tanaman sebesar 490,31 mg/kg, kandungan Mn dan tertinggi diperoleh dari bagian daun yaitu masing-masing sebesar 234,05 mg/kg Mn dan 3575,06 mg/kg S. Sementara itu berdasarkan lokasi, tanaman *Typha* yang hidup pada daerah aliran sungai memiliki serapan logam yang tinggi. Hal ini dikarenakan adanya aliran sungai yang membawa logam-logam tersebut dan kemudian diakumulasi oleh tanaman *Typha*. Sementara itu, tanaman yang ditumbuhkan dan mampu hidup pada kompartemen masih memiliki kemampuan akumulasi logam baik pada akar, batang dan daunnya. Mikroalga berperan dalam meningkatkan kadar oksigen terlarut dan mendukung proses bioremediasi melalui aktivitas fotosintesis dan interaksi dengan mikroorganisme [23]. Kualitas air pada *outlet* mengandung kadar logam yang rendah dan sesuai dengan baku mutu yang telah ditetapkan oleh KemenLHK. Apabila tanaman tidak memiliki kemampuan sebagai bioakumulator maka logam tersebut akan terdeteksi pada air yang diuji. Aktivitas dekomposisi yang tinggi dapat dilihat dari nilai BOD yang tinggi pada K1 dibanding kompartemen yang lain, yaitu 10.035 mg/L. Pada K3 juga terjadi hal yang sama karena menggunakan bahan organik segar yaitu tandan kosong kelapa sawit, akan meningkatkan BOD media sehingga bagi tanaman yang memiliki kemampuan adaptasi rendah akan mengalami kematian.

Tabel 9. Serapan Logam Pada Tanaman *Typha*

Lokasi	Akar (mg/kg)			Batang (mg/kg)			Daun (mg/kg)		
	Fe	Mn	S	Fe	Mn	S	Fe	Mn	S
K1	369,74	78,83	3513,17	97,07	15,76	735,5	105,095	97,72	6550,24
K3	300,92	23,03	2229,01	232,325	46,935	1016,16	68,7	190,34	1824,32
K5	656,87	74,325	2647,42	263,34	45,29	1172,465	113,365	184,58	2416,49
Sungai	633,715	82,815	1895,07	656,18	93,035	1279,43	102,765	463,57	3509,18
Rata-rata	490,31	64,75	2571,17	312,23	50,26	1050,89	97,48	234,05	3575,06

Berdasarkan pengamatan dalam *pilot project wetland* dan data hasil uji laboratorium disimpulkan bahwa:

1. Tanaman *Typha* yang ditumbuhkan pada media dengan pupuk organik dan kapur memiliki keunggulan dapat meningkatkan pH air dengan cepat dan memperbaiki kualitas tanah serta lingkungan dalam jangka waktu lama. sedangkan Kelemahannya adalah kebutuhan biaya dalam pengadaan pupuk dan kapur yang disesuaikan dengan area *wetland* yang akan dibangun. kelemahan yang lain yaitu area tidak dapat langsung ditanam, setidaknya membutuhkan waktu 1 bulan sebelum tanam untuk memberikan waktu pupuk organik untuk dekomposisi sehingga dalam rentang tersebut kenaikan BOD akan terjadi.

2. Tanaman *Typha* yang ditumbuhkan pada media dengan campuran tandan kosong kelapa sawit (bahan organik) memiliki keunggulan dalam memperbaiki kualitas tanah dan lingkungan serta mampu menaikkan pH. Kelemahan dari metode ini yaitu terjadi peningkatan BOD akibat proses dekomposisi, kenaikan pH membutuhkan waktu yang lebih lama.
3. Tanaman *Typha* yang ditumbuhkan tanpa tambahan apa pun memiliki keunggulan secara ekonomis, dan mampu meningkatkan pH. Namun kelemahan dari metode ini adalah waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki kualitas lingkungan lebih lama bila dibandingkan dengan perlakuan lain dengan area *wetland* yang lebih luas dibanding perlakuan dengan penambahan kapur.

IV. KESIMPULAN

Hasil uji geokimia menunjukkan keberadaan batuan PAF pada area *low wall* dan *side wall* sebagai sumber utama AAT. Analisis hidrologi menegaskan bahwa *void* menerima beban air asam (pH ± 3) dan air netral (pH ± 7), sehingga memerlukan sistem pengendalian terintegrasi. Hasil uji *pilot project* memperlihatkan bahwa kompartemen dengan kombinasi kapur + pupuk organik + *Typha* (K1) paling efektif meningkatkan pH (6,91), menurunkan kandungan Fe dan Mn hingga di bawah baku mutu, serta memperbaiki kualitas tanah melalui peningkatan unsur hara. Tanaman *Typha* juga terbukti berperan sebagai bioakumulator logam, khususnya Fe di akar dan Mn di daun. Namun, penggunaan media organik segar meningkatkan nilai BOD sehingga perlu periode stabilisasi sebelum penanaman. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa sistem *constructed wetland* dapat menjadi solusi pasif, ramah lingkungan, dan biaya lebih rendah dibanding metode aktif untuk pengendalian AAT. Penerapan sistem ini berpotensi dikembangkan pada skala penuh dengan desain berbasis debit tahunan *void* dan integrasi teknologi mikroalga, sehingga dapat menjadi model pengelolaan berkelanjutan bagi *void* pascatambang di Indonesia.

UCAPAN TERIMAKASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada PT. Studio Mineral Batubara serta semua pihak yang telah membantu penelitian ini sehingga dapat berjalan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Saptawartono, F. Murati, Y. Iashania, N. Firdayanti, S. Melinda, dan I. Y. Reba, "Pengelolaan dan Pengendalian Air Asam Tambang pada Kegiatan Pertambangan Batubara," *Jurnal Teknik Pertambangan*, vol. 24, no. 1, pp. 44-51, Februari 2024. DOI: <https://doi.org/10.36873/jtp.v24i1.11440>
- [2] S. Akburak, A. A. Kul, E. Makineci, E. Ozdemir, N. K. Aktaş, A. P. Gürbey, H. Yurtseven, M. Köse, and T. Akgün, "Chemical Water Parameters of end Pit Lakes in Abandoned Coal Mines," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 13, p. 569, July 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05598-y>
- [3] Maulida, S. Adnin dan I. F. Purwanti, "Kajian Pengelolaan Air Asam Tambang Industri Pertambangan Batubara dengan Constructed Wetland," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 12, no. 1, pp. 46-51, May 2023. DOI: <https://doi.org/10.12962/j23373539.v12i1.111230>
- [4] H. Suharyadi, O.W. Lusantono, I. A. Cusna, W. I. Pangestu, dan L. Qaushar, "Pemanfaatan Rawa Buatan (Constructed Wetland) dengan Menggunakan Tanaman Lembang (*Typha Angustifolia*) untuk Remediasi di Wilayah Tambang," *Jurnal Teknologi Pertambangan*, vol. 8, no. 2, Januari 2023. DOI: <https://doi.org/10.31315/jtp.v8i2.9288>
- [5] A. Fridtriyanda, H. D. Sutoyo, dan D. Herniti, "Studi Literatur Jenis Tanaman Pengelola Air Asam Tambang Batubara dengan Cara Fitoremediasi Pada Sistem Lahan Basah Buatan," *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi XVII (RETII)* pp. 494-500, November 2022. <https://journal.itny.ac.id/index.php/ReTII>
- [6] M. G. I. Al Hidayat, J. A. Fajri, dan D. Wulandari, "Evaluasi Penyerapan Kadar Logam pada Daun Tanaman Wetland Pasca Pengolahan Limbah Cair Tenun," *Jurnal Sains Teknologi dan Lingkungan*, vol. 10, no. 2, pp. 372-388, 2024. DOI: <https://doi.org/10.29303/jstl.v10i2.564>
- [7] S. A. Siwi, D. Asrifah, A. P. Wicaksono, dan E. Muryani, "Pengaruh Constructed Wetland dengan Penambahan Bahan Organik (Kompos dan Tandan Kosong Kelapa Sawit) terhadap Nilai Ph, Besi (Fe), dan Mangan (Mn) pada Air Asam Tambang Batubara," *Prosiding Seminar Nasional Teknik*

- Lingkungan Kebumihan Satu Bumi, pp. 206-216, Januari 2024. DOI: <https://doi.org/10.31315/psb.v5i1.11655>
- [8] D. E. Narendrasastri, L. Sabri, and Y. Wahyuddin, “Analisis Pengaruh Perubahan Penggunaan Lahan Jalan Tol terhadap Limpasan Permukaan di Kecamatan Pemalang,” *Jurnal Geodesi Undip*, vol. 10, no. 1, pp. 197-206, Dec. 2020. DOI: <https://doi.org/10.14710/jgundip.2021.29757>
- [9] D. S. Krisnayanti, D. F. Welkis, T. M. Sir, W. Bunganaen, and A. C. Damayanti, “Kajian Nilai Curve Number pada Daerah Aliran Sungai Manikin di Kabupaten Kupang,” *J. Teknik SDA*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, Jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.56860/jtsda.v1i1.3>
- [10] N. T. Zewde, M. A. Denboba, S. A. Tadesse, and Y. S. Getahun, “Predicting Runoff and Sediment Yields using Soil and Water Assessment Tools (SWAT) Model in The Jemma Subbasin of Upper Blue Nile, Central Ethiopia.” *Environmental Challenges*, vol. 14, p. 100806, Januari 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100806>
- [11] M. F. Dzulfiqar dan A. Sapei, “Kinerja Program Soil and Water Assessment Tools (SWAT) yang Dimodifikasi untuk Menduga Debit Sub-DAS Cimanuk Hulu,” *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, uol. 8, no. 3, pp. 157-166, Desember 2023. DOI: <https://doi.org/10.29244/jsil.8.3.157-166>
- [12] E. J. Tuheteru, R. S. Gautama, G. J. Kusuma, A. A. Kuntoro, K. Pranoto, and Y. Palinggi, “Water Balance of Pit Lake Development in The Equatorial Region,” *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 21, p. 3106, November 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13213106>
- [13] C. D. McCullough, M. Schultze, and J. Vandenberg, “Realizing Beneficial end uses from Abandoned Pit Lakes,” *Minerals*, vol. 10, no. 2, pp. 1–21, Februari 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/min10020133>
- [14] Prastica, R. M. Salve dan M. Sulaiman, “Pengembangan Floating Constructed Wetland Skala Laboratorium sebagai Reduktor Kandungan Kontaminan Limbah Domestik Badan Air Perkotaan,” *Media Komunikasi Teknik Sipil*, vol. 27, no. 1, Maret 2021. DOI: <https://doi.org/mkts.v27i1.26404>
- [15] Sahani, Wahyuni, dan A. M. Alfian, “Kombinasi Constructed Wetland dan Koagulasi dalam Menurunkan Kadar BOD dan TSS Air Limbah Domestik,” *Media Kesehatan Politeknik Kesehatan Makassar*, vol. XIX, no.1, Juni 2024. DOI: <https://doi.org/10.32382/medkes.v19i1>
- [16] B. G. Lottermoser, *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. 4th ed. Springer, Cham, 2022.
- [17] D. N. Castendyk and L. E. Eary, “Mine Pit Lakes: Characteristics, Predictive Modeling, and Sustainability,” *Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME)*, 2020.
- [18] A. Kumar, A. Pandey, and S. Sharma, “Mine water remediation: Recent trends and sustainable approaches,” *Journal of Environmental Management*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112417>
- [19] J. G. Arnold, D. N. Moriasi, P. W. Gassman, K. C. Abbaspour, M. J. White, R. Srinivasan, et al., “SWAT: Model use, calibration, and validation,” *Transactions of the ASABE*, vol. 61, no. 2, pp. 651–680, 2018.
- [20] J. Skousen, C. E. Zipper, and A. Rose, “Passive Treatment of Acid Mine Drainage using Constructed Wetlands,” *Mine Water and the Environment*, vol. 36–39 (update studies), 2017–2020.
- [21] J. Vymazal, “Constructed Wetlands for Wastewater Treatment,” *Water*, vol. 10, no.1, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10010021>
- [22] A. S. Sheoran and V. Sheoran, “Heavy Metal Removal Mechanism of Acid Mine Drainage in Wetlands: A Critical Review,” *Minerals Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 105-116, February 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.08.006>
- [23] I. Rawat, R. R. Kumar, T. Mutanda, and F. Bux, “Dual Role of Microalgae in Wastewater Treatment and Biofuel Production,” *Applied Energy*, vol. 88, no. 10, pp. 3411-3424, October 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.093>



©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/).