

Artikel Penelitian

Pemanfaatan Mikroalga dan Typha Untuk Penanganan Air Asam Tambang Pada Pertambangan Batubara

Utilization of Microalgae and Typha for Acid Mine Drainage Treatment in Coal Mining

Bantar Tyas Suksmawati Rukmana^{1*}, Shofa Rijalul Haq¹, Oktarian Wisnu Lusantono¹

¹Jurusan Teknik Pertambangan UPN "Veteran" Yogyakarta Jl. Padjajaran 104, Condongcatur, Depok Sleman Yogyakarta

*Penulis korespondensi

e-mail: bantartyas.suksmawatirukmana@upnyk.ac.id

ABSTRAK

Air asam tambang (AAT) merupakan salah satu permasalahan lingkungan utama pada kegiatan pertambangan batubara, termasuk pada void pascatambang di Kabupaten Kutai Barat yang memiliki potensi pembentukan asam akibat keberadaan mineral sulfida pada batuan penyusunnya. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas mikroalga lokal dan tanaman *Typha angustifolia* dalam sistem wetland buatan untuk meningkatkan kualitas air pada void tersebut. Penelitian dilakukan selama tiga bulan dengan memanfaatkan lima kompartemen yang mewakili zona mikroalga dan vegetasi *Typha*. Parameter kualitas air yang diamati meliputi pH, logam terlarut (Fe dan Mn), H_2S , serta BOD, baik pada inlet maupun outlet tiap kompartemen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikroalga pada Kompartemen 2 dan 4 mampu meningkatkan pH dari kisaran 6,0–6,7 menjadi hingga 7,74 dalam waktu 24 jam. Peningkatan ini dipengaruhi oleh aktivitas fotosintesis dan proses biogeokimia yang menurunkan keasaman air. Kompartemen 2, yang diberi tambahan nutrisi organik, memberikan kenaikan pH paling konsisten. Pada sistem *Typha*, Kompartemen 1, 3, dan 5 menunjukkan peningkatan pH yang bervariasi, dengan nilai tertinggi pada K1 akibat adanya penambahan kapur. Analisis jaringan tanaman menunjukkan kemampuan *Typha* dalam mengakumulasi logam, dengan serapan Fe terbesar pada akar dan Mn serta S pada daun. Kelangsungan hidup *Typha* tertinggi tercatat pada K5 (95,8%), sedangkan penggunaan bahan organik segar meningkatkan BOD dan menurunkan keberhasilan tanam. Secara keseluruhan, mikroalga lebih efektif dalam penetralan pH secara cepat, sementara *Typha* berperan dalam stabilisasi jangka panjang dan akumulasi logam. Kombinasi keduanya direkomendasikan sebagai strategi fitoremediasi terpadu yang adaptif dan berkelanjutan untuk pengelolaan AAT pada void tambang batubara.

Kata Kunci: air asam tambang, mikroalga, *Typha Angustifolia*, fitoremediasi, wetland buatan

ABSTRACT

*Acid mine drainage (AMD) is a major environmental issue associated with coal mining activities, including at the post-mining void in Kutai Barat, East Kalimantan, where sulfide-bearing rocks contribute to acid formation. This study evaluates the effectiveness of local microalgae and *Typha angustifolia* in an engineered wetland system designed to improve water quality in the void. The research was conducted over a three-month period using five compartments representing microalgae-dominated zones and *Typha* vegetation. Water quality parameters measured at the inlet and outlet of each compartment included pH, dissolved metals (Fe and Mn), H_2S , and BOD. Results indicate that microalgae in Compartments 2 and 4 effectively increased pH from 6.0–6.7 to as high as 7.74 within 24 hours. This improvement is attributed to photosynthetic activity and biogeochemical processes that reduce water acidity. Compartment 2, which received additional organic nutrients, exhibited the most stable pH enhancement. In the *Typha* system, Compartments 1, 3, and 5 demonstrated varying degrees of pH improvement, with the highest increase observed in Compartment 1 due to the addition of limestone. Metal uptake analysis showed that *Typha* accumulated substantial amounts of Fe in the roots and Mn and S in the leaves. Plant survival was highest in Compartment 5 (95.8%), while the use of undecomposed organic materials elevated BOD and reduced plant establishment. Overall, microalgae proved more effective for rapid pH neutralization, whereas *Typha* contributed to longer-term stabilization and metal accumulation. The integration of both biological agents is recommended as an adaptive and sustainable phytoremediation strategy for managing AMD in post-mining voids.*

Naskah masuk : 29 November 2025

Revisi pertama : 8 Desember 2025

Naskah diterima : 27 Januari 2026

Naskah dipublikasi online : 28 Januari 2026

*Keywords: acid mine drainage, microalgae, *Typha angustifolia*, phytoremediation, constructed wetland.*

I. PENDAHULUAN

Air asam tambang (AAT) merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang sering terjadi pada kegiatan pertambangan batubara. Fenomena ini juga terjadi pada lokasi penelitian yang terletak di Kabupaten Kutai Barat, Kalimantan Timur, yang memiliki void pascatambang seluas ± 132 ha dengan kedalaman mencapai 60 m. Kondisi geologi area tersebut menunjukkan keberadaan sulfur dalam batubara maupun material penutup, sehingga berpotensi menimbulkan reaksi oksidasi mineral sulfida ketika terekspos air dan oksigen. Proses oksidasi tersebut menghasilkan ion sulfat dan ion hidrogen yang berkontribusi terhadap pembentukan keasaman tinggi pada air void.

Terbentuknya AAT dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain kandungan mineral sulfida, intensitas paparan udara dan air akibat aktivitas penambangan, serta karakteristik litologi dan hidrogeologi setempat (Pat-Espadas dkk, 2018). Ketika air bersentuhan dengan material yang mengandung pirit atau mineral sulfida lainnya, reaksi berantai antara air, oksigen, dan sulfida menghasilkan asam sulfat (H_2SO_4) dan dapat mlarutkan logam berat. Oleh karena itu, pemahaman mengenai dinamika geokimia AAT menjadi kunci dalam merancang strategi mitigasi yang tepat dan berkelanjutan.

Dampak AAT terhadap lingkungan bersifat luas dan kompleks. Keasaman yang tinggi dapat menyebabkan degradasi kualitas perairan, menurunkan keanekaragaman hayati, serta mengganggu stabilitas ekosistem akuatik dan darat. Logam terlarut yang terbawa bersama AAT juga berpotensi memberikan efek toksik pada organisme perairan dan menghambat pertumbuhan vegetasi. Dalam perspektif sosial dan ekonomi, keberadaan AAT dapat menurunkan produktivitas lahan, meningkatkan biaya pemuliharaan lingkungan, dan memunculkan risiko kesehatan masyarakat akibat paparan logam berat (Saptawartono dkk, 2024).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengendalikan AAT, termasuk pendekatan aktif dan pasif. Salah satu metode pasif yang semakin banyak mendapat perhatian adalah fitoteknologi berbasis mikroorganisme fotosintetik (mikroalga) dan tanaman air. Mikroalga memiliki kemampuan meningkatkan pH melalui konsumsi CO_2 saat fotosintesis serta mengakumulasi logam melalui mekanisme biosorpsi. Biosorpsi adalah metode penyisihan logam berat dengan memanfaatkan bahan biologis salah satunya menggunakan mikroalga (Simamora dkk, 2024). Beberapa jenis mikroalga juga terbukti memiliki kapasitas biosorpsi logam berat yang tinggi melalui gugus fungsional pada dinding sel (Abidin dkk, 2021). Sementara itu, tanaman *Typha* sp. berperan sebagai

fitoremediator melalui serapan logam, stabilisasi sedimen, dan peningkatan kualitas habitat mikro (Fridriyanda dkk, 2022). *Typha angustifolia* sendiri merupakan salah satu spesies yang paling banyak direkomendasikan untuk remediasi AAT dalam wetland buatan (Habibullah dkk, 2021; Suharyadi dkk, 2023). Integrasi kedua organisme ini membentuk sistem fitoremediasi yang efisien, rendah biaya, dan ramah lingkungan, sehingga relevan diterapkan pada pengelolaan AAT di area void pascatambang.

II. METODE

Lokasi Penelitian

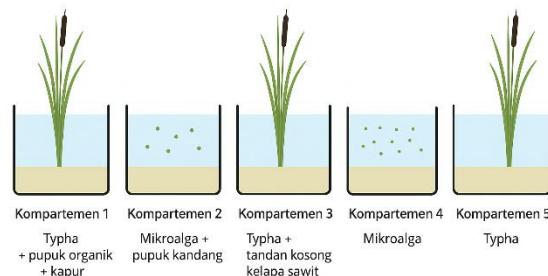
Penelitian ini dilaksanakan pada area void pascatambang batubara yang berlokasi di Kabupaten Kutai Barat, Provinsi Kalimantan Timur. Area void hasil kegiatan penambangan ini memiliki luas sekitar 132 hektar dengan kedalaman mencapai 60 meter dan menjadi salah satu lokasi prioritas pengelolaan air asam tambang (AAT).

Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen lapangan (*field-scale experiment*) yang memanfaatkan sistem alami void tambang sebagai media fitoremediasi. Void dibagi menjadi beberapa kompartemen berdasarkan distribusi vegetasi dan mikroalga alami di permukaan air.

Terdapat dua kompartemen utama yang menjadi fokus penelitian:

- Kompartemen mikroalga (kompartemen 2 dan 4), yaitu area permukaan air yang ditumbuhi dominan oleh koloni mikroalga dengan ciri warna kehijauan.
- Kompartemen *Typha* (kompartemen 1,3, dan 5), yaitu area tepian void yang ditumbuhi vegetasi air *Typha Angustifolia* (famili Typhaceae) dengan perlakuan tiap kompartemen yang berbeda-beda.



Gambar 1. Desain Tiap Kompartemen

Masing-masing kompartemen berukuran $p \times 1 \times t$ sebesar $10 \times 5 \times 0,5$ m. Pada kompartemen 1 berisi *Typha Angustifolia* dengan jumlah 20 tanaman, pupuk organik setebal 30 cm, dan kapur setebal 10 cm. Kompartemen 2 berisi mikroalga dengan komposisi

50% (v/v) mikroalga lokal dan 50% (v/v) AAT dan pupuk kandang setebal 10 cm. Kompartemen 3 berisi *Typha* dengan jumlah 20 tanaman dan tandan kosong kelapa sawit setebal 70 cm. Kompartemen 4 berisi mikroalga dengan komposisi 50% (v/v) mikroalga lokal dan 50% (v/v) AAT tanpa tambahan perlakuan sedangkan kompartemen 5 berisi *Typha* sejumlah 20 tanaman tanpa tambahan perlakuan. Setiap kompartemen dipantau secara periodik untuk menilai perubahan parameter kualitas air selama periode penelitian. Desain percobaan bersifat observasional-komparatif, dengan membandingkan parameter kualitas air antar kompartemen untuk menilai efektivitas alami mikroalga dan *Typha* dalam menurunkan keasaman dan kadar logam terlarut.

Pengambilan dan Analisis Sampel Air

Sampel air diambil secara in-situ dari tiap kompartemen menggunakan botol sampel polietilena steril berkapasitas 1 liter. Pengambilan dilakukan pada beberapa titik perwakilan (permukaan dan kedalaman 30–50 cm) untuk memperoleh data yang representatif.

Parameter air yang diukur meliputi pH, Nitrit (NO_3^-), Nitrat (NO_3^-), BOD, H_2S , Fe, dan Mn. Parameter kualitas air yang dianalisis dalam penelitian ini dipilih berdasarkan karakteristik umum air asam tambang (AAT) serta relevansinya terhadap proses fitoremediasi menggunakan mikroalga dan *Typha*. Pengukuran pH dilakukan karena merupakan indikator utama tingkat keasaman AAT dan menjadi parameter kunci keberhasilan proses penetrasi. Konsentrasi Fe dan Mn dianalisis karena kedua logam tersebut merupakan kontaminan dominan pada AAT hasil oksidasi mineral sulfida serta menjadi target utama biosorpsi dan akumulasi oleh mikroalga maupun tanaman air. Nitrat, nitrit, dan BOD dipilih untuk menggambarkan kondisi nutrisi dan beban organik perairan yang dapat memengaruhi pertumbuhan mikroalga serta aktivitas mikroorganisme pendukung fitoremediasi. Sementara itu, H_2S dianalisis karena merupakan produk samping dari aktivitas bakteri pereduksi sulfat yang berperan dalam pembentukan alkalinitas pada sistem wetland. Dengan demikian, pemilihan parameter tersebut sudah mewakili aspek kimia, logam, dan proses biologis utama yang relevan untuk mengevaluasi efektivitas sistem fitoremediasi yang diterapkan.

Pengukuran pH dilakukan langsung di lapangan menggunakan alat multiparameter portable, sedangkan analisis kandungan logam dilakukan di laboratorium menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS).

Untuk menjamin ketepatan hasil, pengambilan sampel diulang tiga kali dan dilakukan pada kondisi cuaca cerah untuk menghindari pengenceran akibat hujan.

Identifikasi dan Pemantauan Mikroalga

Identifikasi mikroalga dilakukan secara mikroskopis dengan mengambil sampel air permukaan dari kompartemen 2 dan 4. Sampel diamati di bawah

mikroskop cahaya untuk mengenali morfologi sel dan genus dominan. Mikroalga yang ditemukan didominasi oleh *Oscillatoria* sp..

Kepadatan mikroalga dihitung berdasarkan metode counting chamber (hemocytometer), kemudian dikonversi menjadi jumlah sel per mililiter air. Perubahan warna air dari hijau tua menjadi hijau kekuningan juga digunakan sebagai indikator kualitatif aktivitas mikroalga.

Identifikasi dan Kondisi Vegetasi *Typha*

Vegetasi *Typha Angustifolia* diamati pada kompartemen 1, 3, dan 5. Penilaian dilakukan dengan mengukur kerapatan rumpun, tinggi tanaman, dan kondisi akar (rhizome) sebagai indikator kesehatan tanaman. *Typha* tumbuh di tepian void dengan kedalaman air ± 30 –60 cm. Sistem akar yang rapat dan panjang memungkinkan penyerapan logam terlarut dan meningkatkan aerasi tanah melalui difusi oksigen ke zona rhizosfer.

Analisis Perubahan Kualitas Air dan Penilaian Efektivitas Bioremediasi

Perubahan kualitas air antar kompartemen dievaluasi secara deskriptif berdasarkan hasil pengukuran parameter pH, Fe, Mn, dan sulfat. Efektivitas peran mikroalga dan *Typha* dalam perbaikan kualitas air dinilai dengan membandingkan tren peningkatan pH serta penurunan kadar logam antara kompartemen yang berbeda.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Geokimia Batuan

Analisis geokimia batuan dilakukan untuk mengidentifikasi potensi pembentukan air asam tambang (AAT) pada area void pascatambang di lokasi penelitian. Batuan yang terpapar udara dan air pada dinding pit berpotensi mengalami oksidasi mineral sulfida dan menghasilkan asam sulfat yang selanjutnya menurunkan kualitas air.

Sebanyak 23 sampel batuan dikumpulkan dari tiga zona utama: *high wall* (10 sampel), *low wall* (5 sampel), dan *side wall* (7 sampel), menggunakan metode *grab sampling*. Jenis batuan yang ditemukan meliputi batupasir, batuempung, lempung, pasir campuran, serta beberapa area dengan Batubara yang terekspos. Variasi litologi ini menunjukkan heterogenitas material penyusun dinding void.

Nilai pH tanah/batuan dari seluruh sampel berkisar antara 4,1 hingga 6,5 (Tabel 1). Beberapa sampel pada batupasir dan batubara memiliki pH lebih rendah (<5), yang mengindikasikan kandungan mineral sulfida lebih tinggi dan potensi pembentuk asam yang lebih kuat. Rentang pH ini sesuai dengan karakter batuan sedimen klastik yang umum menjadi pembawa sulfur dalam batubara.

Berdasarkan Tabel 1, dapat dilihat bahwa material dengan pH lebih rendah mempunyai potensi tinggi untuk melepaskan asam ketika teroksidasi dan

memperkuat indikasi bahwa geokimia batuan merupakan kontributor signifikan terhadap pembentukan AAT di lokasi penelitian.

Tabel 1. pH Tanah dan Jenis Batuan Lokasi Penelitian

Sampel pH Tanah	Jenis Batuan / Material
1	5,2 Pasir
2	5,2 Batupasir
3	5,1–6,2 Batulempung
4	5,0 Batulempung
5	4,7–6,0 Tanah
6	4,5–6,4 Tanah
7	4,5–5,5 Lempung HW
8	4,5–6,0 Lempung kecoklatan (Expose)
9	4,5–6,0 Lempung abu-abu gelap
10	4,5 Pasir abu kemerahan
11	4,5 Material disposal
12	4,5 Batupasir
13	– Batupasir kasar kemerahan
14	4,5–6,5 Pasir keputihan
15	4,5–6,5 Batulanau coklat terang
16	5,2–6,3 Batulempung fresh abu gelap
17	4,5–6,2 Sally coal
18	4,5–6,2 Batupasir halus abu gelap
19	5,0–6,0 Batupasir Kuarsa LW
20	5,0–6,0 LW, pH coal 5,7
21	5,0–6,0 Lempung kemerahan LW
22	4,1 Coal exposed bersulfur
23	– Material coal

Kualitas Air Void

Kondisi awal kualitas air pada void ditentukan melalui kegiatan pengukuran langsung (*in-situ*) dan analisis laboratorium. Pengukuran lapangan dilakukan dengan menggunakan prosedur berstandar SNI untuk pengambilan serta penanganan sampel air. Sampel air dari beberapa titik observasi (OT) kemudian dikirim ke laboratorium untuk dianalisis lebih lanjut yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik kimia air void, tingkat keasaman, serta kandungan logam dan nutrien lain yang relevan.

Tabel 2. Kualitas Air Void Lokasi Void

No Parameter	Satuan	Void 1 (Keramba Selatan)	Void 2 (Keramba Utara)
1	pH on Site	–	6,40 6,23
2	Nitrat (NO_3^-)	mg/L	0,605 0,844

No Parameter	Satuan	Void 1 (Keramba Selatan)	Void 2 (Keramba Utara)
3	Nitrit (NO_2^-)	mg/L	<0,018 0,028
4	Merkuri (Hg)	mg/L	<0,00009 <0,00009
5	Timbal (Pb)	mg/L	<0,0028 <0,0028
6	Amonia	mg/L	0,428 0,797
7	Total Fosfat	mg/L	<0,005 <0,005

Tabel 3. Hasil Pengukuran Kualitas Air Void OT4 dan Sungai

No	Parameter	Satuan	OT 4	Sungai
1	pH on Site	–	6,10	6,90
2	Kalium Terlarut (K)	mg/L	0,075	0,113
3	Total Fosfat (PO_4^-)	mg/L	<0,005	<0,005
4	Total Nitrogen	mg/L	<0,5	<0,5

Tabel 4. Hasil Pengukuran Kualitas Air Void Inlet, OT 1, OT 2 dan OT 3

No Parameter	Satuan	OT 1	OT2	OT3	Inlet
1	pH on Site	–	6,32	6,22	5,87 5,95
2	Fe	mg/L	<0,05	<0,05	<0,08 <0,05
3	Mn	mg/L	0,264	0,108	0,352 0,26
4	H_2S	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002 <0,002
5	BOD	mg/L	10,05	2,783	4,075 <2

Hasil analisis kualitas air pada beberapa titik pengukuran di area void menunjukkan bahwa kondisi air secara umum berada pada kisaran mendekati netral, dengan nilai pH antara 5,87 hingga 6,40, yang menandakan bahwa proses pembentukan air asam tambang sudah tidak berlangsung secara intensif. Konsentrasi nutrien seperti nitrat (0,605–0,844 mg/L), nitrit (<0,018–0,028 mg/L), total nitrogen (<0,5 mg/L), serta total fosfat (<0,005 mg/L) tergolong rendah dan mencirikan lingkungan perairan oligotrofik yang minim beban nutrien.

Kandungan logam berat berbahaya seperti merkuri (<0,00009 mg/L) dan timbal (<0,0028 mg/L) berada di bawah ambang batas mengacu pada PERMEN LHK No 5 Tahun 2022 tentang Baku Mutu Air Limbah Usaha dan/atau Kegiatan Pertambangan Mineral dan Batubara, sedangkan logam terlarut utama pada sistem

AAT seperti Fe dan Mn menunjukkan pola berbeda yaitu Fe berada pada kadar sangat rendah (<0,05–0,08 mg/L), sedangkan Mn berkisar antara 0,108–0,352 mg/L. Hal ini menjadi parameter yang menunjukkan indikasi keterpengaruhannya geokimia batuan penyusun void. Parameter organik seperti H₂S berada di bawah ambang batas (<0,002 mg/L) dan nilai BOD berkisar <2 hingga 10 mg/L, dengan nilai tertinggi teramat pada OT1 yang menunjukkan adanya input organik setempat.

Secara keseluruhan, kualitas air void menunjukkan kondisi yang relatif stabil dan tidak lagi mencerminkan karakter AAT yang berat, namun masih menyisakan tantangan pada parameter Mn dan variasi organik lokal, sehingga menjadi dasar penting untuk menilai peran mikroalga dan vegetasi *Typha* dalam meningkatkan kualitas air melalui proses bioremediasi alami.

Kultivasi Mikroalga Lokal

Pada sungai yang berada di sekitar area pit penambangan ditemukan koloni mikroalga alami yang diindikasikan oleh warna air sungai yang kehijauan. Keberadaan mikroalga lokal ini menjadi dasar dilakukannya kultivasi lebih lanjut untuk mengevaluasi potensi pemanfaatannya dalam penanganan air asam tambang (AAT). Proses kultivasi dilakukan dalam dua tahapan. Tahap pertama bertujuan untuk menilai kemampuan adaptasi serta efektivitas mikroalga lokal (strain Melak) ketika ditumbuhkan dalam media AAT. Kultur dilakukan menggunakan bioreaktor sederhana berukuran 1 L dengan komposisi 50% (v/v) mikroalga lokal dan 50% (v/v) AAT, serta diberi tambahan nutrisi komersial dengan rasio 1:1000 (v/v) untuk mendukung pertumbuhan sel. Dua kondisi diperlakukan dalam percobaan ini, yaitu kultur dengan aerasi dan tanpa aerasi. Kultivasi dilakukan dalam periode 14–21 hari.

Hasil kultivasi tahap pertama menunjukkan bahwa strain lokal mampu bertahan dan tumbuh selama 21 hari, melebihi waktu pertumbuhan normal mikroalga pada media ideal. Hal ini mengindikasikan bahwa strain mikroalga Melak membutuhkan waktu adaptasi yang lebih panjang ketika terpapar lingkungan AAT. Selain itu, terjadi peningkatan pH kultur hingga mencapai pH > 8, meningkat dari kondisi awal pH 5, yang menegaskan peran mikroalga dalam meningkatkan alkalinitas melalui konsumsi CO₂ saat fotosintesis.

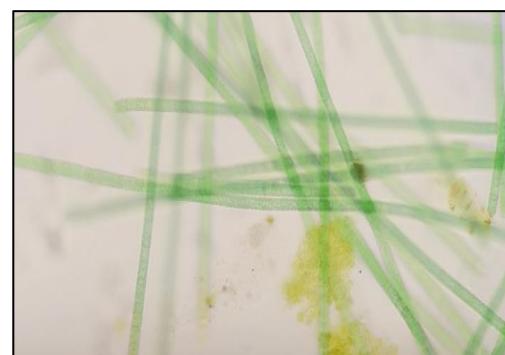
Perbedaan mencolok terlihat antara kultur tanpa aerasi dan dengan aerasi. Kultur tanpa aerasi (Gambar 2a) mengalami kegagalan yang ditandai dengan munculnya material organik berupa sel mikroalga mati yang mengapung dan mengendap. Ketiadaan aerasi menyebabkan tidak adanya suplai CO₂ serta tidak adanya pengadukan yang memadai, sehingga sel-sel mikroalga mengalami sedimentasi dan aglomerasi. Sebaliknya, kultur dengan aerasi (Gambar 2b) menunjukkan pertumbuhan optimal, ditandai dengan

warna kultur yang semakin pekat dan distribusi sel yang homogen. Aerasi berfungsi ganda dalam menyediakan CO₂ sebagai substrat fotosintesis dan menjaga kultur tetap homogen sehingga menghindari pengendapan sel.



Gambar 2. Kultivasi Tahap Dua (a) Tanpa Aerasi, (b) Dengan Aerasi

Selain uji kultivasi, dilakukan pula identifikasi mikroalga menggunakan mikroskop perbesaran 40x. Berdasarkan karakteristik morfologi dan studi literatur, mikroalga lokal diduga termasuk dalam genus *Oscillatoria* sp., salah satu kelompok sianobakteri yang dikenal toleran terhadap kondisi perairan dengan pH sub-neutra dan kandungan logam terlarut. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa komunitas mikroalga di perairan sekitar lokasi penelitian didominasi oleh genus ini (Gambar 3).



Gambar 3. Citra Mikroskop Strain Mikroalga Melak

Tahap kedua kultivasi dilakukan menggunakan bioreaktor berukuran lebih lebar dan tanpa aerasi. Berbeda dengan percobaan sebelumnya, mikroalga dapat tumbuh dengan baik (Gambar III-8). Wadah yang lebih lebar memungkinkan sel-sel mikroalga tetap tersuspensi akibat pengaruh gravitasi yang lebih rendah, sehingga mengurangi risiko aglomerasi. Keberhasilan pada tahap ini memberikan indikasi positif bahwa aplikasi mikroalga Melak dalam kondisi aktual di void tambang memungkinkan untuk diterapkan tanpa dukungan aerasi, terutama pada sistem dengan luas permukaan air yang besar seperti kolam atau kompartemen alami void.

Namun demikian, potensi risiko perlu diperhatikan. Pertumbuhan mikroalga yang tidak terkontrol dapat menyebabkan blooming algae, yang berpotensi menghasilkan racun dan menurunkan kualitas

ekosistem melalui shading yang menutupi penetrasi cahaya matahari. Oleh karena itu, praktik pengelolaan seperti pengaturan nutrisi, sirkulasi air, introduksi hewan pemakan alga, serta pengaturan parameter lingkungan seperti salinitas dan kandungan fosfat diperlukan untuk mencegah terjadinya ledakan populasi mikroalga yang merugikan. Risiko blooming mikroalga dan fluktuasi nutrien juga telah dicatat pada studi budidaya mikroalga untuk pengolahan AAT (Wastuwidya & Moersidik, 2020), sehingga kontrol nutrisi dan sirkulasi air menjadi faktor penting.

Perubahan Kualitas Air pada Kompartemen Mikroalga

Kompartemen mikroalga, yaitu kompartemen 2 dan kompartemen 4, menunjukkan perubahan kualitas air yang konsisten selama periode pemantauan. Kedua kompartemen ini menggunakan mikroalga lokal yang berasal dari perairan sungai sekitar area penambangan, yang telah berhasil dikultivasi sebelumnya di laboratorium dan diidentifikasi sebagai *Oscillatoria* sp.. Strain ini terbukti dapat beradaptasi pada media AAT dan mampu tumbuh baik pada kondisi dengan maupun tanpa aerasi.

Tabel 5. Hasil Pengukuran Kompartemen 2

Pengamatan pH Inlet pH Outlet		
1	6,15	6,5
2	6,44	6,8
3	6,49	6,78
4	6,63	6,77
5	6,73	6,75
6	6,55	7
7	6,45	7,34
8	6,39	7,36
9	6,3	7,65
10	6,28	6,53
11	6,32	6,66
12	6,21	6,52
13	6,22	6,59
14	6,33	6,54
15	6,01	6,23
16	6,39	6,56
17	6,25	6,76
18	6,36	6,86

Hasil pengukuran harian menunjukkan bahwa pH air pada kedua kompartemen mengalami peningkatan signifikan dalam 24 jam setelah air masuk dari inlet. Pada Kompartemen 2, pH inlet yang berada pada kisaran 6,0–6,7 meningkat menjadi 6,23–7,65 pada outlet. Peningkatan serupa juga terjadi pada Kompartemen 4, dengan nilai outlet mencapai 6,06–7,74. Data ini mengindikasikan bahwa mikroalga memiliki kontribusi langsung terhadap peningkatan pH air void.

Perbedaan efektivitas antar kompartemen terlihat jelas dari konsistensi kenaikan pH. Kompartemen 2 menunjukkan peningkatan yang lebih stabil dibandingkan kompartemen 4. Hal ini sejalan dengan perlakuan pada desain penelitian, dimana kompartemen 2 memperoleh tambahan nutrisi berupa pupuk kandang yang mengandung unsur N, P, dan K sehingga mendukung pertumbuhan mikroalga lebih optimal. Pertumbuhan mikroalga yang lebih baik secara langsung meningkatkan proses reduksi sulfat dan penetrasi air asam.

Tabel 6. Hasil Pengukuran Kompartemen 4

Pengamatan pH Inlet pH Outlet		
1	6,15	6,28
2	6,44	6,62
3	6,49	6,65
4	6,63	6,72
5	6,73	6,7
6	6,55	7,17
7	6,45	7,14
8	6,39	7,18
9	6,3	7,74
10	6,28	6,74
11	6,32	6,64
12	6,21	6,42
13	6,22	6,58
14	6,33	6,68
15	6,01	6,06
16	6,39	6,54
17	6,25	6,59
18	6,36	6,44

Mekanisme yang berperan dalam peningkatan pH pada kedua kompartemen adalah melibatkan reduksi sulfat oleh bakteri pereduksi sulfat (SRB) yang menghasilkan hidrogen sulfida (H_2S) dan meningkatkan alkalinitas, serta reaksi lanjutan yang menyebabkan presipitasi logam dan konsumsi ion H^+ . Selain itu, proses fotosintesis mikroalga pada siang hari turut mengonsumsi CO_2 dan mendukung kenaikan pH. Mekanisme peningkatan pH oleh mikroalga melalui konsumsi CO_2 dan peningkatan DO telah banyak dilaporkan pada penelitian biosorpsi logam menggunakan strain Chlorella dan Spirulina (Almomani & Bhosale, 2021; Buhani dkk, 2021).

Secara keseluruhan, kedua kompartemen mikroalga menunjukkan bahwa mikroalga lokal mampu berfungsi sebagai agen bioremediasi yang efektif dalam meningkatkan pH AAT pada skala lapangan. Kompartemen 2 memberikan hasil terbaik, sedangkan Kompartemen 4 tetap menunjukkan kemampuan yang baik meskipun tanpa tambahan nutrisi.

Selain peningkatan pH, kompartemen mikroalga juga menunjukkan penurunan kadar Fe dan Mn dibandingkan titik-titik lainnya. Meskipun pada kondisi awal Fe berada pada kadar rendah ($<0,05-0,08$ mg/L), keberadaan mikroalga turut berperan dalam mempertahankan Fe dalam bentuk presipitat melalui proses oksidasi-hidrolisis yang dipercepat oleh lingkungan yang lebih alkalis. Penurunan Mn lebih terlihat nyata, mengingat Mn pada kondisi awal masih berada pada kisaran $0,108-0,352$ mg/L, sedangkan pada kompartemen mikroalga nilai tersebut cenderung menurun akibat adanya proses biosorpsi dan pengendapan biologis pada permukaan sel mikroalga.

Dalam konteks mekanisme biologis, mikroalga memiliki beberapa peran penting:

- Biosorpsi logam melalui ikatan gugus fungsional pada dinding sel seperti $-COOH$, $-OH$, dan $-SO_4$ yang mampu menangkap ion logam terlarut.
- Biopresipitasi Fe dan Mn akibat meningkatnya pH yang memicu hidroksidasi logam menjadi bentuk tidak larut.
- Peningkatan oksigen terlarut (DO) sebagai hasil fotosintesis, yang mendukung reaksi oksidasi Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} .
- Peningkatan kualitas air secara visual, ditandai dengan kejernihan yang lebih baik dan berkurangnya endapan tersuspensi.

Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa mikroalga memiliki efektivitas tinggi dalam meningkatkan kualitas air pada kondisi void, terutama pada fase awal proses bioremediasi. Kompartemen ini berperan sebagai zona penetralan biologis yang memberikan dampak cepat terhadap parameter kunci seperti pH dan Mn. Perubahan ini sekaligus menjadi dasar untuk membandingkan efektivitas antara sistem mikroalga dan sistem vegetasi *Typha*.

Perubahan Kualitas Air pada Kompartemen *Typha*.

Typha Angustifolia merupakan salah satu tanaman fitoremediator yang umum digunakan dalam sistem wetland buatan karena kemampuannya menyerap logam, meningkatkan oksigenasi rhizosfer, serta beradaptasi pada kondisi genangan (Habibullah dkk, 2021). Pada penelitian ini, *Typha* ditanam pada tiga kompartemen yaitu Kompartemen 1 (K1), Kompartemen 3 (K3), dan Kompartemen 5 (K5), dengan perlakuan media yang berbeda untuk mengevaluasi pengaruh masing-masing metode terhadap perubahan kualitas air dan kemampuan tanaman dalam menyerap logam. Kompartemen 1 menggunakan tambahan campuran pupuk organik dan kapur, kompartemen 3 menggunakan tandan kosong kelapa sawit (TKKS), dan kompartemen 5 hanya menggunakan tanaman *Thypha* (tidak ada perlakuan tambahan).

Data pH awal pada inlet sebesar 6,63 memberikan dasar evaluasi terhadap efektivitas penetralan pada tiap kompartemen. Pada kompartemen 1 menunjukkan

peningkatan pH tertinggi hingga 6,91. Hal ini berkaitan langsung dengan pelarutan $CaCO_3$ dan pembentukan alkalinitas bikarbonat yang berperan menetralkan keasaman. Penggunaan bahan organik pada K1 juga memicu aktivitas mikroba anaerob pereduksi sulfat, yang menghasilkan HCO_3^- tambahan dan mempercepat proses peningkatan pH. Penambahan bahan organik pada beberapa kompartemen bertujuan menyediakan sumber karbon bagi bakteri pereduksi sulfat, yang diketahui memegang peranan penting dalam proses netralisasi AAT (Pujawati & Apong, 2020).

Pada kompartemen 3 hanya mengalami peningkatan pH kecil (6,67) karena bahan organik segar masih mengalami dekomposisi aktif. Kondisi ini meningkatkan BOD dan menghasilkan senyawa asam organik yang menurunkan efektivitas penetralan pH pada tahap awal. Sebaliknya, pada kompartemen 5 yang tidak menerima perlakuan tambahan justru menunjukkan sedikit penurunan pH menjadi 6,53 akibat debit air yang rendah dan genangan yang menurunkan oksigenasi akar *Typha*, sehingga memicu produksi asam organik di zona rhizosfer. Meskipun demikian, seluruh kompartemen tetap memenuhi baku mutu pH 6-9 untuk air limbah pertambangan.

Tabel 7. Perubahan pH Air Pada *Inlet* dan *Outlet* Kompartemen

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

Kualitas air berdasarkan Fe, Mn, H_2S , dan BOD memperlihatkan bahwa seluruh kompartemen telah berada di bawah baku mutu, dengan Fe stabil pada $<0,055-0,08$ mg/L dan Mn masih menunjukkan variasi, terutama pada K5 yang mencapai 0,564 mg/L. Nilai BOD menjadi indikator penting dalam membedakan kinerja media. BOD (Biochemical Oxygen Demand) adalah jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk mengoksidasi secara biokimia zat-zat organic (Esrahwati dkk, 2025). K1 mengalami lonjakan BOD tertinggi (10,053 mg/L), menunjukkan dekomposisi organik intensif yang secara langsung berdampak pada stres perakaran dan menurunkan keberhasilan hidup *Typha*. K3 memiliki BOD sedang (4,075 mg/L), sementara K5 menunjukkan kondisi paling stabil dengan BOD <2 mg/L.

Tabel 8. Kualitas Air *Inlet* dan *Outlet*

No	Parameter	Hasil (Mg/L)			
		<i>Outlet</i> K1	<i>Outlet</i> K3	<i>Outlet</i> K5	<i>Inlet</i>
1	H_2S	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
2	Mn	0,264	0,352	0,564	0,26

No	Parameter	Hasil (Mg/L)			
		Outlet K1	Outlet K3	Outlet K5	Inlet
3	Fe	<0,055	0,08	<0,055	<0,055
4	BOD	10,053	4,075	<2	<2

Kemampuan *Typha* dalam menyerap logam tercermin jelas pada hasil analisis jaringan tanaman. Serapan Fe didominasi oleh akar dengan rata-rata 490,31 mg/kg, menunjukkan mekanisme fitostabilisasi yang kuat, sedangkan Mn dan S terakumulasi lebih banyak pada daun, mengindikasikan kemampuan translokasi logam yang efektif. Pola akumulasi Fe yang dominan pada akar dan Mn pada daun sesuai dengan karakter umum fitostabilisasi dan fitodegradasi pada spesies emergen (Fridriyanda dkk, 2022). Tanaman pada daerah sungai mencatat akumulasi logam tertinggi karena paparan yang lebih besar, namun *Typha* pada kompartemen tetap menunjukkan kapasitas bioakumulasi yang baik dan konsisten dengan rendahnya kandungan logam pada outlet kompartemen.

Keberhasilan pertumbuhan *Typha* memperlihatkan tren yang sejalan dengan stabilitas media. Kompartemen 5 menunjukkan tingkat keberhasilan tertinggi (95,8%), diikuti K3 (85,95%), sementara K1 memiliki tingkat keberhasilan terendah (71,7%) akibat kondisi media yang terlalu kaya bahan organik dan menghasilkan panas selama dekomposisi. Perbedaan ini menegaskan bahwa *Typha* dapat tumbuh optimal pada media minim perlakuan, dan penggunaan bahan organik harus dikontrol dengan baik untuk menghindari lonjakan BOD dan kondisi anaerob berlebih.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa *Typha* memiliki kemampuan fitoremediasi yang baik melalui mekanisme penyerapan dan stabilisasi logam, peningkatan alkalinitas, serta perbaikan visual dan biologis pada lingkungan perairan. Namun, efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh karakteristik media tanam, tingkat dekomposisi bahan organik, dan kondisi hidrologi. Kompartemen dengan perlakuan kapur menghasilkan peningkatan pH paling cepat, tetapi berisiko terhadap kesehatan tanaman, sementara kompartemen tanpa perlakuan justru paling stabil secara ekologis. Temuan ini memberikan dasar penting untuk merancang sistem wetland buatan yang efisien dan berkelanjutan pada area void pascatambang.

Efektivitas Mikroalga dan *Typha* Dalam Pengolahan Air Asam Tambang

Evaluasi efektivitas mikroalga dan *Typha* dalam sistem wetland buatan pada area void pascatambang menunjukkan bahwa kedua fitoremediator memiliki kontribusi yang berbeda namun saling melengkapi dalam memperbaiki kualitas air. Perbedaan mekanisme biologis dan kondisi media pada masing-masing kompartemen menghasilkan variasi respons yang dapat digunakan untuk merancang sistem

pengolahan AAT yang lebih efisien dan adaptif sesuai karakter lahan.

Mikroalga pada Kompartemen 2 dan 4 menunjukkan efektivitas yang sangat tinggi dalam meningkatkan pH dalam waktu relatif cepat. Hasil pemantauan harian menunjukkan bahwa pH inlet yang berada pada kisaran 6,0–6,73 meningkat menjadi 6,23–7,74 setelah melewati kompartemen yang ditumbuhi mikroalga. Kenaikan ini terutama dipengaruhi oleh aktivitas fotosintesis yang mengonsumsi CO₂ terlarut sehingga menurunkan konsentrasi ion H⁺ dan meningkatkan alkalinitas. Selain itu, keberadaan nutrisi tambahan pada Kompartemen 2 meningkatkan pertumbuhan mikroalga dan mempercepat proses reduksi sulfat oleh mikroorganisme pendukung. Perbedaan perlakuan pada K2 dan K4 memperlihatkan pengaruh signifikan dari ketersediaan nutrisi terhadap respons pengolahan. K2 dengan tambahan pupuk organik memberikan kenaikan pH paling stabil, sedangkan K4 tetap efektif meski tanpa penambahan bahan organik, menunjukkan bahwa mikroalga lokal memiliki kemampuan adaptasi tinggi pada kondisi AAT.

Selain meningkatkan pH, mikroalga juga berperan dalam mempertahankan dan menurunkan kadar logam terlarut, terutama Mn, melalui mekanisme biosorpsi, biopresipitasi, dan peningkatan oksigen terlarut. Walaupun kadar Fe pada kondisi awal sudah rendah, kehadiran mikroalga mampu mencegah remobilisasi logam melalui pembentukan kondisi perairan yang lebih oksidatif dan stabil. Secara keseluruhan, mikroalga bekerja optimal pada fase awal penyisihan keasaman dan stabilisasi logam dengan perubahan visual perairan yang lebih jernih dan warna kehijauan yang stabil.

Di sisi lain, *Typha* menunjukkan efektivitas berbeda dengan mekanisme utama berupa penyerapan logam, peningkatan stabilitas ekosistem jangka panjang, dan penetrasi pH yang lebih lambat namun berkelanjutan. Peningkatan pH pada kompartemen *Typha* bervariasi: Kompartemen 1 mencapai pH 6,91 karena adanya kapur yang meningkatkan alkalinitas secara cepat, Kompartemen 3 hanya mencapai 6,67 akibat tingginya aktivitas dekomposisi bahan organik, dan Kompartemen 5 justru sedikit menurun ke 6,53 karena genangan dan oksigenasi akar yang rendah. Perbedaan ini memperlihatkan bahwa efektivitas *Typha* sangat bergantung pada kondisi media dan tingkat dekomposisi bahan organik dalam kompartemen.

Selain pH, kemampuan *Typha* sebagai bioakumulator terbukti kuat. Analisis jaringan tanaman menunjukkan bahwa Fe paling banyak terserap pada akar, mengindikasikan mekanisme fitostabilisasi, sedangkan Mn serta sulfur terakumulasi lebih tinggi pada daun, menunjukkan kemampuan translokasi logam ke jaringan atas. *Typha* dalam semua kompartemen mampu menyerap logam meskipun tingkat serapannya dipengaruhi oleh kualitas dan pergerakan air. Tanaman yang tumbuh pada Sungai

memiliki serapan tertinggi karena paparan logam yang lebih besar akibat aliran permukaan, namun *Typha* dalam kompartemen tetap menunjukkan kapasitas akumulasi yang konsisten sehingga logam pada outlet air berada dalam batas baku mutu.

Efektivitas *Typha* juga dapat dilihat dari tingkat keberhasilan hidup tanaman. Kompartemen 5 menunjukkan persentase hidup tertinggi (95,8%), menunjukkan stabilitas lingkungan yang baik meskipun tanpa perlakuan tambahan. Sebaliknya, Kompartemen 1 memiliki tingkat keberhasilan rendah (71,7%) karena tingginya aktivitas dekomposisi pupuk organik yang meningkatkan BOD dan menyebabkan stres akar. Kompartemen 3 menempati posisi menengah dengan tingkat keberhasilan 85,95%, dipengaruhi oleh tingginya senyawa organik dari TKKS yang juga meningkatkan BOD di awal.

Jika dievaluasi secara komprehensif, mikroalga menunjukkan efektivitas paling kuat pada tahap awal pengolahan, terutama dalam meningkatkan pH dengan cepat dan mempertahankan kondisi oksidatif perairan. Sementara itu, *Typha* lebih efektif sebagai penguat ekosistem jangka panjang, penstabil kualitas air, dan bioakumulator logam. Mikroalga memberikan respons cepat dan signifikan, sementara *Typha* memberikan stabilitas, penyerapan logam, dan perbaikan lingkungan secara gradual. Hasil peningkatan pH melalui kombinasi media organik, kapur, dan vegetasi *Typha* pada penelitian ini selaras dengan temuan studi literatur yang menunjukkan bahwa *constructed wetland* mampu meningkatkan alkalinitas dan menurunkan logam terlarut pada sistem AAT (Andrawina & Ernawati, 2020).

Sinergi keduanya memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk mengembangkan sistem wetland bertingkat (multi-stage wetland). Mikroalga dapat ditempatkan di kompartemen awal sebagai zona penetralan cepat dan pengurangan Mn, sedangkan *Typha* dapat digunakan pada zona berikutnya sebagai area stabilisasi, akumulasi logam, dan pemulihan ekosistem dalam jangka panjang. Efektivitas ganda ini menjadikan kombinasi mikroalga-*Typha* sebagai pendekatan terintegrasi yang potensial dan berkelanjutan dalam pengelolaan air asam tambang pada void pascatambang batubara.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa void pascatambang di Kutai Barat memiliki potensi pembentukan air asam tambang akibat kandungan mineral sulfida pada batuan dinding pit. Sistem wetland buatan yang dikembangkan menggunakan mikroalga lokal dan tanaman *Typha* terbukti mampu meningkatkan kualitas air void. Mikroalga pada Kompartemen 2 dan 4 efektif menaikkan pH inlet ($\pm 6,0-6,7$) menjadi hingga 7,7 dalam 24 jam melalui aktivitas fotosintesis dan proses biogeokimia yang menurunkan ion H^+ . Efektivitas tertinggi terjadi pada kompartemen yang diberi tambahan nutrisi. Sementara itu, *Typha* pada

Kompartemen 1, 3, dan 5 berperan dalam stabilisasi jangka panjang dan akumulasi logam, dengan penyerapan tertinggi pada akar (Fe) dan daun (Mn, S). Kelangsungan hidup *Typha* terbaik ditemukan pada K5 (95,8%), sedangkan perlakuan bahan organik berlebih meningkatkan BOD dan menurunkan keberhasilan tanam. Secara keseluruhan, mikroalga lebih efektif untuk peningkatan pH secara cepat, sedangkan *Typha* lebih kuat dalam penyerapan logam dan pemulihan ekosistem. Kombinasi keduanya memberikan pendekatan fitoremediasi yang efektif, adaptif, dan berkelanjutan untuk pengelolaan AAT di void tambang.

UCAPAN TERIMA KASIH

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

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, F., Franita, & Chrisropaul. (2021). Pemanfaatan Biomassa Alga *Turbinaria* sp. sebagai Biosorben Ion Kromium pada Air Limbah. Prosiding 5th Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat. 151-153.
- Almomani, F., & Bhosale, R.R. (2021). Bio-Sorption of Toxic Metals from Industrial Wastewater by Algae Strains *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris*: Application of Isotherm, Kinetic Models and Process Optimization. *Sci Total Environ.* 755.
- Andrawina, & Ernawati, R. Penerapan Metode Constructed Wetland dalam Upaya Pengelolaan Limbah Air Asam Tambang pada Penambangan Batubara, Berdasarkan Literatur Review. Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi XV Tahun 2020 (ReTII).
- Buhani, T.A., Wijayanti, Suharso, Sumadi, & Ansori, M. (2021). Application of Modified Green Algae *Nannochloropsis* sp. as Adsorbent in The Simultaneous Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) Cations in Solution. *Sustain Environ Res.* 31 (1), 1-12.
- Brar, K.K., Etteieb, S., Magdouli, S., Calugaru, L., & Brar, S.K. (2022). Novel Approach for The Management of Acid Mine Drainage (AMD) for The Recovery of Heavy Metals Along with Lipid Production by *Chlorella vulgaris*. *Journal of Environmental Management*, 308.
- Esrahwati, Riani, E., & Nurmawati, S. (2025). Efektifitas beberapa tumbuhan air untuk meningkatkan kualitas limbah cair industri tahu pada pabrik tahu Podomoro Desa Sebidai Kecamatan Sesayap Kab. Tana Tidung. *Ulin: Jurnal Hut Trop.*, 9(1), 51-59. <https://doi.org/10.32522/ujht.v9i1.14801>

- Fridtriyanda, A., Sutoyo, H. D., & Herniti, D. (2022). Studi literatur jenis tanaman pengelola air asam tambang batubara dengan cara fitoremediasi pada sistem lahan basah buatan. Dalam *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi XVII (ReTII)* (pp. 494–500).
- Habibullah, A., Khamidah, N., & Saputra, R. A. (2021). Pemanfaatan *Typha angustifolia* dan fungi mikoriza arbuskular untuk fitoremediasi air asam tambang. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 17(2), 95–105. <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol17. No 2. 2021.1163>.
- Pat-Espadas, A. M., Loredo Portales, R., Amabilis-Sosa, L. E., Gómez, G., & Vidal, G. (2018). Review of andrawinaconstructed wetlands for acid mine drainage treatment. *Water*, 10(11), 1685. <https://doi.org/10.3390/w10111685>.
- Pujawati Suryatmana, dan Apong. Potensi Bakteri Pereduksi Sulfat dan Jenis Bahan Organik dalam Pengolahan Air ASAM Tambang Menggunakan System Constructed Wetland Tanaman Akar Wangi (*Vetiveria Zizanioides* L). Soilrens. Desember 2020. Volume 18
- Rahmalia, Handayani. Penetralan Air Asam Tambang Menggunakan Tumbuhan Purun Tikus (*Eleocharis Dulcis*). *Jurnal Pertambangan*. Mei 2020. Volume 4 No. 2
- Saptawartono, Murati, F., Iashania, Y., Firdayanti, N., Melinda, S., & Reba, I. Y. (2024). Pengelolaan dan pengendalian air asam tambang pada kegiatan pertambangan batubara. *Jurnal Teknik Pertambangan (JTP)*, 24(1), 44–51.
- Simamora, E., Nurcholis, M., Ardian, A., Ernawati, R., & Winarno, E. (2024). Studi literatur: Potensi fitoremediasi berbasis strain alga sebagai biosorben kontaminan logam berat pada air asam tambang. *GeoScienceEd: Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, dan Geofisika*, 5(3). <http://jpfis.unram.ac.id/index.php/GeoScienceEdu/index>.
- Suharyadi, H., Lusantono, O. W., Cusna, I. A., Pangestu, W. I., & Qausha, L. (2023). Pemanfaatan rawa buatan (constructed wetland) dengan menggunakan tanaman lembang (*Typha angustifolia*) untuk remediasi di wilayah tambang. *Jurnal Teknologi Pertambangan*, 8(2), 60–67.
- Wastuwidya, F.B., & Moersidik S. (2020). Adaptation and Growth of *Botryococcus braunii* on Acid Mine Drainage. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 9(3),238-341.