

Analisis Pengaruh Penambahan Abu Terbang dan Abu Dasar pada Kualitas Air Kolam Bekas Tambang

Nuansa Mare Apui Ganang^{1*}, Yunida Iashania², Yossa Yonathan Hutajulu³, Yusias Andri⁴, Aldibos Pranata Sinurat⁵

¹⁻⁵Universitas Palangka Raya, Indonesia

Corresponding Author's e-mail : Nuansamare@mining.upr.ac.id



e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

<https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada>

Vol. 04, No. 09 September, 2026

Page: 5003-5011

DOI:

<https://doi.org/10.55681/armada.v4i9.3708>

Article History:

Received: Juli 24, 2026

Revised: Agustus 29, 2026

Accepted: September 19, 2026

Abstract : The utilization of waste materials such as fly ash and bottom ash as an option to neutralize acid mine drainage in former mining voids can be use as a better environmental solution, though this application requires a specific approach for each individual void considering the differences in the types of excavated minerals. The research was conducted by collecting water samples from the same point and dividing them into six containers, where the first container served as a control, while the other five were treated with measured additions of coal ash to observe changes in acidity and other parameters. The results showed that fly ash can be added at 0.25 g/L to raise the pH to 8.21, whereas at 0.5 g/L and 1 g/L, the water pH exceeded the upper threshold limit of pH 9. For bottom ash, additions of 0.5 and 1 g/L could elevate the pH value to fall within the regulatory range of 6–9. Based on these findings, it is evident that coal ash is viable for treatment; however, fly ash tends to increase TDS and TSS values and has the potential to raise heavy metal concentrations, whereas bottom ash tends to improve BOD and COD levels, although the increase in its metal parameters is greater than that of fly ash at the same dosage.

Keywords : Acid Mine Drainage, Fly Ash, Bottom Ash

Abstrak : Pemanfaatan bahan limbah seperti abu terbang dan abu dasar untuk salah satu opsi untuk menetralkan air asam tambang pada bekas kolam penambangan dapat menjadi solusi lingkungan yang lebih baik, Pemanfaatan ini perlu pendekatan spesifik untuk masing-masing air kolam mengingat perbedaan jenis bahan galian yang digali. Penelitian dilakukan dengan cara mengambil sampel air pada titik yang sama kemudian air dibagi menjadi 6 wadah sampel, dimana wadah pertama merupakan kontrol, sedangkan 5 wadah lain merupakan air yang akan diberi treatment berupa penambahan abu batubara secara terukur untuk melihat perubahan keasaman serta parameter lainnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa abu terbang dapat ditambahkan 0,25 gr/liter untuk menaikkan pH menjadi 8,21 sedangkan pada 0,5 gram/liter serta 1 gram/liter, pH air naik melebihi ambang batas atas yaitu pH 9. Pada abu dasar, untuk penambahan 0,5 dan 1 gr/liter dapat menaikkan nilai pH hingga masuk dalam rentang 6-9. Melihat pada hasil ini, dapat dilihat bahwa abu batubara dapat digunakan untuk treatment, akan tetapi abu terbang cenderung untuk menaikkan nilai TDS dan TSS dan berpotensi menaikkan nilai logam berat sedangkan bottom ash cenderung memperbaiki nilai BOD dan COD

akan tetapi kenaikan pada parameter logamnya lebih besar daripada abu terbang dengan dosis yang sama.

Kata Kunci : Air Asam Tambang, Abu Terbang, Abu Dasar

PENDAHULUAN

Aktivitas pertambangan dan pembangkit listrik berbahan bakar batubara menghasilkan berbagai produk samping yang berpotensi memberikan dampak terhadap lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Salah satu limbah utama dari proses pembakaran batubara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah abu batubara yang terdiri atas abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*). Produksi abu batubara dalam jumlah besar dapat menjadi permasalahan lingkungan karena membutuhkan area penyimpanan yang luas dan berpotensi meningkatkan risiko pencemaran apabila tidak dilakukan pengelolaan secara berkelanjutan (Damayanti, 2018; Fauzi, 2023). Oleh karena itu, pemanfaatan kembali abu batubara menjadi salah satu pendekatan yang dikembangkan untuk mengurangi akumulasi limbah sekaligus menghasilkan manfaat baru dalam bidang lingkungan.

Abu batubara memiliki karakteristik kimia dan fisik yang memungkinkan untuk dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi, salah satunya sebagai bahan pengolahan lingkungan. Abu terbang merupakan material sisa hasil pembakaran batubara yang memiliki ukuran partikel halus dengan warna keabu-abuan, sedangkan abu dasar merupakan material abu yang terkumpul pada bagian bawah tungku pembakaran setelah proses pembakaran berlangsung (Fadhilah, 2022). Kandungan mineral tertentu dalam abu batubara memberikan potensi untuk digunakan sebagai material penetral dalam pengelolaan kualitas air, termasuk pada penanganan air asam tambang (AAT). Pemanfaatan abu batubara sebagai bahan pengolahan air dapat menjadi alternatif solusi untuk mengurangi volume penimbunan limbah PLTU sekaligus mendukung konsep pengelolaan limbah berbasis ekonomi sirkular.

Air asam tambang merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang sering ditemukan pada kegiatan pertambangan batubara maupun pertambangan mineral. Air asam tambang terbentuk akibat proses oksidasi mineral sulfida yang mengalami kontak dengan air dan oksigen sehingga menghasilkan kondisi air dengan tingkat keasaman tinggi serta kandungan logam terlarut yang meningkat (Tuheteru *et al.*, 2021; Sari, 2024). Proses pembentukan air asam tambang dipengaruhi oleh tiga komponen utama, yaitu keberadaan air, oksigen, dan batuan yang mengandung mineral sulfida (Budi, 2023). Kondisi tersebut menyebabkan pembentukan AAT sulit dihindari pada area bekas tambang sehingga strategi yang dapat dilakukan adalah melalui pengelolaan dan mitigasi dampaknya (Nugraha, 2021).

Kolam bekas tambang menjadi salah satu lokasi yang berpotensi mengalami permasalahan kualitas air akibat terbentuknya air asam tambang. Pada beberapa lokasi pascatambang, lubang bukaan yang tidak direklamasi dapat terisi air hujan maupun air tanah dan membentuk kolam dengan karakteristik kimia yang tidak stabil. Kondisi tersebut dapat ditemukan pada daerah Kecamatan Bukit Pinang, Palangka Raya, yang memiliki kolam bekas penambangan pasir yang sudah tidak aktif dan telah terisi air dalam kurun waktu tertentu. Apabila tidak dilakukan pengelolaan yang tepat, kolam bekas tambang tersebut berpotensi menjadi sumber pencemaran lingkungan akibat tingginya tingkat keasaman dan kandungan logam terlarut dalam air (Munawar, 2017). Tingginya konsentrasi logam berat dan metaloid pada air asam tambang dapat memberikan dampak negatif terhadap organisme karena bersifat toksik bagi tumbuhan, hewan, maupun manusia (Sefti, 2023). Selain itu, perubahan karakteristik kimia perairan akibat AAT juga dapat memengaruhi keseimbangan ekosistem akuatik, termasuk perubahan komposisi dan kelimpahan organisme perairan seperti plankton dan bentos (Simangunsong, 2022).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan air asam tambang, baik melalui metode aktif maupun pasif. Salah satu pendekatan yang memiliki potensi untuk dikembangkan adalah pemanfaatan material sisa industri, seperti abu terbang dan abu dasar, sebagai bahan penetral air asam tambang. Pemanfaatan abu batubara sebagai material pengolahan air memberikan dua manfaat sekaligus, yaitu mengurangi volume limbah hasil pembakaran batubara dan meningkatkan kualitas air pada area terdampak aktivitas pertambangan. Namun,

penelitian mengenai efektivitas kombinasi abu terbang dan abu dasar sebagai bahan penetral pada kolam bekas tambang masih perlu dikembangkan, terutama terkait pengaruhnya terhadap perubahan parameter kualitas air.

Penelitian terdahulu lebih banyak membahas pemanfaatan abu batubara pada bidang konstruksi maupun pengelolaan limbah secara umum, sedangkan kajian mengenai penggunaan kombinasi abu terbang dan abu dasar untuk memperbaiki kualitas air pada kolam bekas tambang masih memiliki ruang pengembangan. Kesenjangan penelitian (*research gap*) tersebut menunjukkan perlunya kajian eksperimental yang mengevaluasi perubahan parameter kualitas air sebelum dan setelah pemberian campuran abu batubara. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada pengujian pemanfaatan kombinasi abu terbang dan abu dasar sebagai material alternatif untuk mitigasi air asam tambang pada kolam bekas penambangan pasir di Kecamatan Bukit Pinang, Palangka Raya. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kualitas air pada kolam bekas tambang serta mengevaluasi pengaruh pemberian campuran abu terbang dan abu dasar terhadap perubahan parameter kualitas air sebelum dan setelah perlakuan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan metode pengelolaan air asam tambang yang lebih berkelanjutan melalui pemanfaatan limbah industri batubara. Selain itu, hasil penelitian dapat menjadi dasar pertimbangan bagi pengelolaan lingkungan pascatambang dan pengembangan strategi pemanfaatan limbah berbasis prinsip keberlanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode kuantitatif dengan cara mengambil sampel langsung dilapangan. Perlakuan pada sampel dengan menambahkan abu batubara pada air kolam dilakukan untuk menguji hipotesis mengenai pengaruh bahan yang dipilih pada kualitas air bekas penambangan. Data yang dikumpulkan berupa data hasil lab komposisi abu batubara (tabel 1) serta hasil lab dari kualitas air kolam awal sebelum dilakukan intervensi terhadap sampel dan setelah intervensi pada sampel air kolam. Abu terbang dan abu dasar di tambahkan pada air kolam bekas penambangan sebanyak 3 liter dengan komposisi yang telah ditentukan untuk melihat pengaruhnya. Data hasil pengujian laboratorium dikumpulkan dan disusun secara sistematis ke dalam bentuk tabel (tabulasi). Data hasil pengujian laboratorium yang telah di olah kemudian dianalisis menggunakan metode deskriptif komparatif dengan membandingkan nilai pada parameter sampel kontrol (Tanpa Perlakuan) terhadap parameter pada sampel yang telah diberi perlakuan variasi massa abu terbang (Kode FA1, FA2 dan FA3) serta abu dasar (Kode BA1 dan BA2). Perbandingan jumlah abu batubara yang ditambahkan ini dapat dilihat pada tabel 2 dibawah ini.

Tabel 1. Komposisi Bottom ash dan Fly ash

Sample Mark	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO%	MgO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	SO ₃ %
Bottom ash 1 & 2	59.90	6.82	14.11	10.66	4.67	1.19	0.88	0.51
Fly ash 1 & 2	41.15	9.54	16.47	16.69	9.33	1.49	0.97	3.00

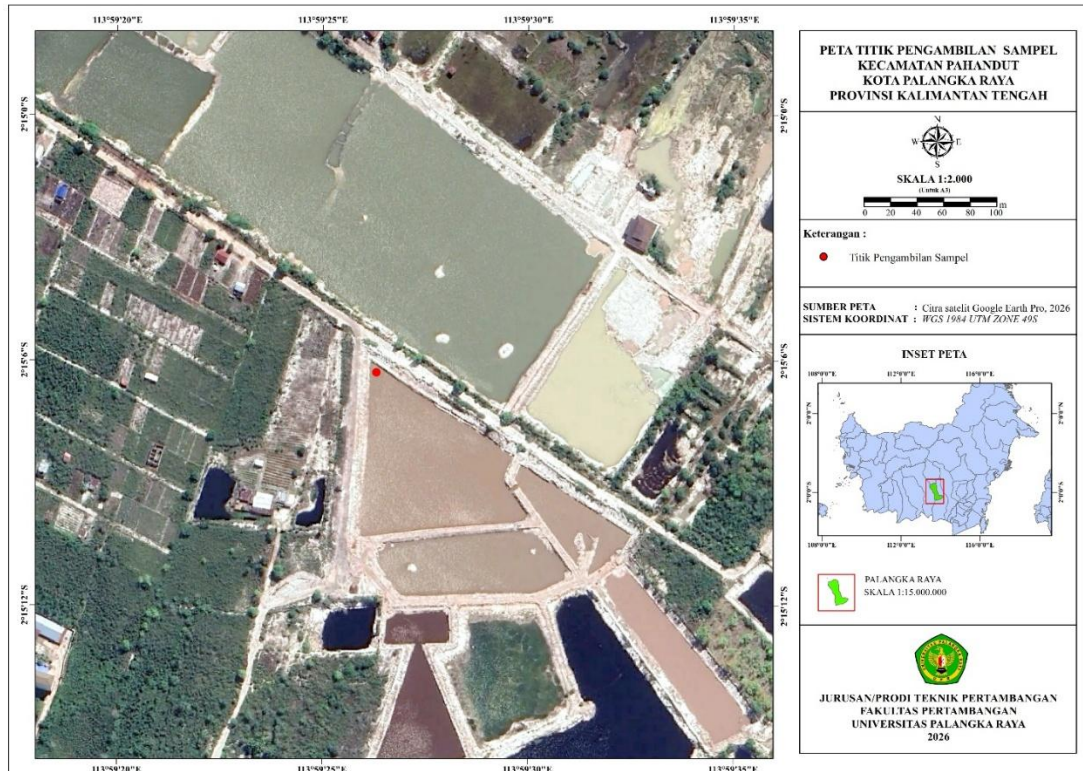
*Sumber : PLTU Pulang Pisau

Tabel 2. Perbandingan Penambahan Abu Batubara

Kode	Komposisi		
	Abu Terbang (gram)	Abu Dasar (gram)	Air Kolam (Liter)
Tanpa Perlakuan	~	~	
FA1	0,75	~	
FA2	1,5	~	
FA3	3	~	
BA1	~	1,5	
BA2	~	3	

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian yang telah dilakukan diawali dengan mengambil sampel abu batubara dari pembangkit listrik tenaga uap di kabupaten Pulang Pisau, kemudian dilanjutkan dengan pengambilan sampel air kolam bekas penambangan di kecamatan Bukit Pinang, kota Palangka Raya yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Lokasi Pengambilan Sampel

Pengadukan air dilakukan selama 5 menit secara bersamaan, kemudian sampel di diamkan selama 1 jam sebelum dipindahkan ke tempat penyimpanan dan dibawa ke lab UPT DLH Provinsi Kalimantan Tengah untuk di uji. Untuk sampel tanpa perlakuan merupakan kontrol dan diuji langsung setelah airnya diambil. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 3, dan nilai baku mutu yang digunakan adalah baku mutu air nasional menurut lampiran VI PP No. 22 Tahun 2021.

Tabel 3. Hasil Pengujian sampel air

No.	Parameter	Tanpa Perlakuan	FA1	FA2	FA3	BA1	BA2	Baku Mutu Kelas II
1.	pH	3,86	8,21	9,20	9,74	7,43	6,33	6-9
2.	Dissolved Oxygen (DO)	5,00	7,00	7,50	7,30	6,90	7,70	4
3.	Total Dissolved Solids (TDS)	3,44	19,7	36,2	57,6	6,24	6,50	1000
4.	Total Suspended Solids (TSS)	8,24	14,2	27,2	30,2	14,6	17,2	50
5.	Biological Oxygen Demand (BOD)*	12,1	4,03	6,04	4,03	< 2	4,0	3
6.	Chemical Oxygen Demand (COD)	22,3	15,3	23,2	13,4	3,50	16,9	25
7.	Besi (Fe)	0,476	0,524	0,187	0,699	0,706	1,06	~
8.	Mangan (Mn)	< 0,1	1,09	0,0146	0,0225	0,0554	0,0617	~

9.	Tembaga (Cu)	0,0183	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,0616	0,330	0,02
----	--------------	--------	--------	--------	--------	--------	-------	------

Sifat Fisika & Kimia Dasar (Dasar Kualitas Air)

Pada parameter pH, TDS dan TSS secara umum mengalami kenaikan nilai setelah diberikan perlakuan, semakin banyak abu terbang yang dimasukkan maka menghasilkan nilai pH yang semakin meningkat juga, hal ini dapat dilihat dari awalnya pH bernilai 3,86 yang bersifat asam naik sampai 9,74 yang bersifat basa pada sampel FA3 hal ini dikarenakan adanya kandungan Kalsium Oksida (CaO) dan Magnesium Oksida (MgO) yang ada pada abu terbang hasil pembakaran batubara. CaO dan MgO ini mengalami hidrolisis dan kemudian melepaskan ion hidroksil (OH⁻) yang dapat menetralkan air asam. Pada sampel BA1 dan BA2 berhasil menaikkan nilai pH menjadi lebih netral karena juga mengandung CaO dan MgO akan tetapi jumlahnya relatif lebih sedikit dibanding pada abu terbang. Pada pH, pencampuran yang bisa dilakukan hanya 0,25 gr/liter pada FA1, untuk dosis FA2 dan FA3 sudah melewati ambang batas pH aman untuk kolam yang berkisar antara 6-9, sedangkan untuk abu dasar masih bisa sampai 1 gr/liter seperti pada BA2. Hal ini menunjukkan bahwa abu terbang pada sampel ini bersifat basa, sedangkan abu dasarnya bersifat basa lemah.

Pada TDS dan TSS, kenaikan yang paling besar ada pada sampel FA3 dengan nilai 57,6 pada TDS dan 30,2 pada TSS, hal ini terjadi karena ukuran butir dari abu terbang cenderung kecil sehingga mudah larut dalam air dan dapat melayang di air lebih lama. Ukuran ini juga berpengaruh dan dapat dilihat pada abu dasar dengan takaran yang sama tidak menghasilkan jumlah TDS dan TSS yang lebih besar. Semakin banyak penambahan abu terbang maka air terlihat semakin gelap dan berwarna coklat, sedangkan pada abu dasar, air berubah warna akan tetapi tidak segelap pada abu terbang dengan dosis yang sama, hal ini karena pada abu dasar partikel lebih besar serta sebagian besar setelah pengadukan berada di dasar dari gelas ukur. Pada kedua parameter ini, sampel BA2 lebih baik karena dapat meningkatkan nilai pH mendekati netral akan tetapi relatif lebih sedikit meningkatkan nilai akhirnya setelah 1 jam. Peningkatan nilai pada parameter TDS pada semua sampel ini masih masuk kedalam batas aman di bawah 1000 untuk kelas 1. Pada parameter TSS, tidak ada sampel yang melewati batas nilai 40 yang merupakan syarat untuk kelas 1 sehingga semua sampel masih memenuhi standar baku mutu kelas 1. Kenampakan perubahan ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Kondisi Air Sampel Sesudah di berikan Perlakuan (atas) dan Sebelum diberi Perlakuan (bawah)

Parameter Organik & Oksigen Terlarut

Peningkatan nilai DO dari 5,00 pada sampel tanpa perlakuan (tidak diaduk) hingga 7,70 pada BA2 menunjukkan bahwa dengan pengadukan selama 5 menit dapat mempercepat transfer

massa gas oksigen secara aerasi mekanis sehingga nilai DO pada semua sampel yang diaduk dan dicampur abu batubara naik diatas 6 sehingga memenuhi syarat untuk kelas 1.

Pada parameter BOD, semua sampel dapat menurunkan nilai BOD hingga mencapai kelas 3 (FA1, FA3 dan BA2) dan 4 (FA2) dan kelas 1 (BA1). Penurunan ini karena terjadi koagulasi dan adsorpsi (penyerapan) pada material organik akibat adanya reaksi dengan material yang ada pada abu terbang maupun abu dasar yang mengendap di dasar gelas ukur. Pada abu dasar (BA1) terjadi penurunan yang sangat maksimal hingga mencapai <2 yang merupakan batas pembacaan dari alat yang digunakan. Pada parameter COD, terjadi penurunan nilai di hampir semua sampel yang diuji, kecuali pada sampel FA2. Hal ini menunjukkan adanya leaching (pelarutan kembali) zat pereduksi anorganik bawaan abu terbang. Hal ini juga terjadi pada abu dasar, peningkatan kadar campuran juga menunjukkan adanya peningkatan kembali nilai COD dari 3,50 ke 16,9. Pada sampel BA1 didapati bahwa nilai COD memenuhi syarat kelas 1 (dibawah 10) sedangkan pada sampel lain berada di rentang kelas 2 dan kelas 3.

Kandungan Logam Berat

Pada parameter Fe, didapati bahwa hampir semua sampel mengalami penambahan kandungan besi dalam airnya kecuali pada sampel dengan kode FA2, hal ini terjadi karena diduga terjadi presipitasi kimiawi. Kenaikan pH menjadi 9,20 menyebabkan $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ bereaksi dengan ion OH^- sehingga menghasilkan padatan hidroksida $\text{Fe}(\text{OH})_3$ pada dasar gelas uji. Pada dosis yang lebih tinggi di FA3 didapati bahwa kandungan logam sudah melebihi batas sehingga menaikkan kembali hasil bacaan pada sampel tersebut. Pada sampel yang dicampur dengan abu dasar, sampel memiliki nilai yang lebih tinggi karena memiliki Fe_2O_3 yang lebih tinggi dibandingkan dengan abu terbang dengan dosis yang sama. Pada FA3 serta abu dasar, kenaikan ini disebabkan oleh pelarutan sekunder berupa *leaching* fraksi Fe yang terikat lemah pada permukaan partikel abu.

Pada parameter Mn didapati bahwa hampir semua sampel dapat menurunkan nilai Mn kecuali pada FA1. Hal ini karena diduga terjadi pelarutan sekunder (*leaching*) dari material sampel abu terbang yang secara alami mengandung oksida besi dan mangan. Pada aplikasi dosis rendah, meskipun pH naik ke 8,21 dan dilakukan pengadukan 5 menit, terjadi pelarutan fraksi logam mangan yang tidak stabil (*highly soluble fraction*) dari permukaan partikel abu ke dalam air karena kondisi kurang basa, sehingga diduga mengalahkan laju pengendapannya. Pada FA2 dan FA3, penurunan Mn terjadi karena adanya presipitasi hidroksida $\text{Mn}(\text{OH})_2$ yang disebabkan pH air sudah naik diatas 9. Pada perbandingan dosis yang sama antara abu terbang dan abu dasar menunjukkan bahwa abu dasar masih kurang efektif, hal ini karena partikel abu dasar yang cenderung besar dan padat sehingga mengurangi kontak antara bahan kimia yang ada.

Pada parameter Cu, abu terbang dapat menurunkan sampai <0,02 yang artinya nilai ini sudah berada di bawah batas penilaian dari alat sehingga tidak didapati perbedaan pada ketiga hasil sampel FA1 hingga FA3. Penurunan ini terjadi karena reaksi presipitasi hidroksida sehingga dapat dinyatakan bahwa abu terbang tidak melepaskan polutan tembaga sekunder pada air yang digunakan. Pada abu dasar BA1 dan BA2, nilainya akan semakin naik seiring dengan meningkatnya penambahan dosis campuran yang digunakan. Hal ini terjadi karena sampel abu dasar diduga memiliki senyawa tembaga CuO atau Cu_2O serta terjadinya pelarutan sekunder (*leaching*). Penambahan dosis abu dasar menghasilkan resiko yang lebih tinggi untuk melepaskan polutan sekunder berupa logam tembaga ke lingkungan.

Pembahasan

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas pemanfaatan abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*) sebagai material alternatif dalam pengelolaan kualitas air pada kolam bekas penambangan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pemberian abu batubara memberikan pengaruh terhadap perubahan karakteristik fisika dan kimia air, meliputi parameter pH, Total Dissolved Solids (TDS), Total Suspended Solids (TSS), Dissolved Oxygen (DO), Biological Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), serta kandungan logam Fe, Mn, dan Cu. Perubahan parameter tersebut menunjukkan bahwa abu batubara memiliki kemampuan untuk memengaruhi kondisi kimia air melalui mekanisme netralisasi, adsorpsi, presipitasi, maupun pelepasan kembali unsur tertentu (*leaching*). Pemanfaatan abu batubara sebagai material remediasi lingkungan telah banyak dikaji karena kandungan mineral anorganiknya memiliki

potensi untuk mengikat kontaminan serta memperbaiki karakteristik air tercemar (Blissett & Rowson, 2012).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sampel air tanpa perlakuan memiliki nilai pH sebesar 3,86 yang menunjukkan karakteristik air asam. Setelah diberikan perlakuan menggunakan abu terbang dan abu dasar, nilai pH mengalami peningkatan hingga mencapai 9,74 pada perlakuan FA3 dan 7,43 pada perlakuan BA1. Peningkatan nilai pH tersebut menunjukkan bahwa abu batubara memiliki kemampuan dalam menetralkan kondisi asam pada air kolam bekas tambang. Fenomena ini berkaitan dengan keberadaan senyawa oksida basa seperti kalsium oksida (CaO) dan magnesium oksida (MgO) yang terdapat pada abu batubara. Ketika senyawa tersebut bereaksi dengan air, terjadi proses hidrasi yang menghasilkan ion hidroksil (OH^-), sehingga meningkatkan alkalinitas dan menurunkan tingkat keasaman air (Damayanti, 2018; Fadhilah, 2022).

Kemampuan abu batubara dalam meningkatkan pH air asam tambang juga dilaporkan oleh Gitari *et al.* (2008), yang menunjukkan bahwa *fly ash* dapat digunakan sebagai material penetral melalui mekanisme pelepasan alkalinitas dan reaksi dengan ion hidrogen dalam air asam tambang. Kandungan mineral seperti kalsit, oksida kalsium, dan mineral aluminosilikat pada *fly ash* berperan dalam meningkatkan kapasitas netralisasi. Hasil penelitian ini memperkuat temuan tersebut karena peningkatan pH terjadi secara signifikan setelah penambahan abu terbang. Namun, peningkatan dosis abu terbang perlu dikendalikan karena penggunaan dosis tinggi menyebabkan nilai pH meningkat melewati rentang optimal kualitas air. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa efektivitas abu terbang tidak hanya ditentukan oleh kemampuan meningkatkan pH, tetapi juga oleh optimasi dosis agar tidak menghasilkan kondisi air yang terlalu basa.

Perbandingan antara abu terbang dan abu dasar menunjukkan bahwa abu terbang memiliki kemampuan netralisasi yang lebih tinggi dibandingkan abu dasar. Hal tersebut terlihat dari peningkatan pH pada perlakuan FA1 hingga FA3 yang lebih besar dibandingkan BA1 dan BA2. Perbedaan ini berkaitan dengan karakteristik fisik kedua material tersebut. Abu terbang memiliki ukuran partikel yang lebih kecil sehingga luas permukaan kontak dengan air lebih besar dan mempercepat proses pelarutan mineral basa. Sebaliknya, abu dasar memiliki ukuran partikel lebih besar sehingga reaksi antara mineral aktif dan air berlangsung lebih lambat. Blissett dan Rowson (2012) menjelaskan bahwa karakteristik ukuran partikel dan komposisi mineral merupakan faktor penting yang menentukan reaktivitas abu batubara dalam aplikasi lingkungan.

Pada parameter TDS dan TSS, seluruh perlakuan menunjukkan peningkatan nilai setelah penambahan abu batubara. Peningkatan tertinggi terjadi pada perlakuan FA3 dengan nilai TDS sebesar 57,6 mg/L dan TSS sebesar 30,2 mg/L. Kondisi tersebut terjadi karena abu terbang memiliki ukuran partikel yang sangat halus sehingga sebagian material mudah terdispersi dan mengalami pelarutan selama proses pengadukan. Partikel halus menyebabkan peningkatan jumlah padatan terlarut dan tersuspensi dalam air. Fenomena serupa juga ditemukan dalam penelitian Blissett dan Rowson (2012), yang menjelaskan bahwa karakteristik fisik *fly ash* menyebabkan material tersebut memiliki luas permukaan tinggi sehingga lebih reaktif dalam proses interaksi dengan media air.

Meskipun terjadi peningkatan nilai TDS dan TSS, seluruh perlakuan masih berada di bawah batas baku mutu yang ditetapkan dalam PP Nomor 22 Tahun 2021. Hal tersebut menunjukkan bahwa penggunaan abu batubara dalam dosis tertentu masih dapat diterapkan tanpa menyebabkan peningkatan padatan yang berpotensi menurunkan kualitas air secara signifikan. Pada perlakuan abu dasar, peningkatan TDS dan TSS relatif lebih rendah dibandingkan abu terbang karena ukuran partikelnya lebih besar dan sebagian besar material mengalami sedimentasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa abu dasar memiliki karakteristik pelepasan partikel yang lebih rendah dibandingkan abu terbang.

Pada parameter DO, seluruh sampel yang diberikan perlakuan mengalami peningkatan dibandingkan sampel kontrol. Nilai DO meningkat dari 5,00 mg/L menjadi 7,70 mg/L pada perlakuan BA2. Peningkatan ini dipengaruhi oleh proses pengadukan yang meningkatkan kontak antara air dan udara sehingga mempercepat transfer oksigen melalui proses aerasi mekanis. Peningkatan kadar oksigen terlarut memiliki peran penting dalam pemulihan kualitas perairan

karena oksigen merupakan faktor utama dalam mendukung aktivitas biologis organisme akuatik (Simangunsong, 2022).

Pada parameter BOD, seluruh perlakuan menunjukkan penurunan dibandingkan sampel tanpa perlakuan. Penurunan terbesar terjadi pada perlakuan BA1 dengan nilai kurang dari 2 mg/L. Penurunan BOD menunjukkan bahwa material abu batubara memiliki kemampuan adsorpsi terhadap senyawa organik dalam air. Permukaan mineral pada abu dapat menjadi tempat melekatnya senyawa organik sehingga mengurangi jumlah bahan organik yang tersedia untuk proses dekomposisi biologis. Mekanisme adsorpsi oleh material berbasis mineral juga menjadi salah satu alasan pemanfaatan abu batubara dalam pengolahan limbah cair (Pandey & Singh, 2010).

Pada parameter COD, sebagian besar perlakuan menunjukkan penurunan nilai dibandingkan kontrol, tetapi terdapat peningkatan pada perlakuan FA2 dan BA2. Penurunan COD menunjukkan adanya pengurangan senyawa yang dapat teroksidasi, sedangkan peningkatan pada beberapa perlakuan menunjukkan adanya kemungkinan pelepasan kembali senyawa terlarut dari material abu. Proses *leaching* menjadi salah satu aspek penting dalam penggunaan abu batubara sebagai material remediasi karena material tersebut dapat berfungsi sebagai penyerap kontaminan sekaligus menjadi sumber pelepasan unsur tertentu apabila kondisi kimia air mendukung proses pelarutan (Gitari *et al.*, 2008).

Pada parameter logam berat, perubahan konsentrasi Fe, Mn, dan Cu menunjukkan bahwa mekanisme interaksi antara abu batubara dan air berlangsung melalui kombinasi proses presipitasi, adsorpsi, dan pelarutan kembali. Peningkatan pH akibat penambahan abu menyebabkan beberapa logam mengalami pembentukan hidroksida dan mengendap. Namun, pada dosis tertentu terjadi peningkatan konsentrasi logam akibat pelepasan unsur dari material abu. Skousen *et al.* (2017) menjelaskan bahwa pengelolaan air asam tambang menggunakan material pasif seperti abu harus mempertimbangkan keseimbangan antara kapasitas netralisasi dan potensi pelepasan unsur sekunder. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa abu terbang dan abu dasar memiliki potensi sebagai material alternatif dalam pengelolaan air asam tambang. Abu terbang menunjukkan kemampuan lebih tinggi dalam meningkatkan pH karena karakteristik partikel dan kandungan mineralnya, sedangkan abu dasar menunjukkan pelepasan unsur yang relatif lebih rendah. Oleh karena itu, pemilihan jenis abu dan dosis aplikasi menjadi faktor penting dalam menghasilkan proses remediasi yang efektif dan aman bagi lingkungan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Karakteristik air kolam awal teridentifikasi sebagai air asam tambang (AAT) dengan tingkat keasaman yang tinggi, ditandai oleh nilai pH sebesar 3,86 yang berada jauh di bawah ambang batas baku mutu seluruh kelas (Kelas I–IV). Selain itu, air awal memiliki beban pencemar organik dan logam yang tinggi, di mana parameter BOD (12,1 mg/L) dan Besi/Fe (0,476 mg/L) telah melebihi baku mutu lingkungan untuk Kelas I. Kondisi ini menegaskan bahwa air kolam awal tidak aman bagi lingkungan dan memerlukan penanganan khusus sebelum dapat dimanfaatkan lebih lanjut. Pemberian abu batubara (abu terbang dan abu dasar) memberikan pengaruh yang signifikan namun berbeda karakteristik dalam memperbaiki kualitas air kolam bekas penambangan. Pengaruh abu terbang (FA) efektif dalam menetralkan keasaman air. Dosis minimum (FA1: 0,25 gr/L) merupakan dosis paling optimal dalam penelitian ini untuk menaikkan pH ke rentang aman baku mutu (pH 8,21), karena penambahan dosis yang lebih tinggi (FA2 dan FA3) menyebabkan kondisi air terlalu basa (pH > 9).

Abu terbang pada dosis 0,5 gr/L (FA2) juga sangat efektif mereduksi logam Fe dan Mn, meskipun pada dosis rendah (FA1) terdapat risiko *leaching* (pelandian) pada parameter Mangan (Mn) hingga mencapai 1,09 mg/L. Pada abu dasar (BA), penambahan dapat mereduksi kontaminan organik, di mana dosis BA1 (0,5 gr/L) mampu menurunkan nilai BOD hingga 2 mg/L dan COD hingga 3,5 mg/L (memenuhi standar Kelas I) serta menjaga pH tetap stabil di rentang netral (6,33–7,43). Namun, abu dasar memiliki kelemahan karena memicu pelepasan kembali (*leaching*) logam berat Besi (Fe) dan Tembaga (Cu) ke dalam air yang melebihi batas aman baku mutu Kelas I–IV. Penaburan abu batubara secara langsung ke dalam kolam bekas penambangan akan mengalami keterbatasan dalam hal fleksibilitas kontrol prosesnya. Penerapan teknik penaburan terukur menggunakan *slurry injection* atau *floating diffuser* dapat dipertimbangkan.

Selain itu, pengaplikasian abu batubara pada kolam pengendapan bersekat dengan pengolahan aktif dapat dipertimbangkan karena dapat memberikan hasil yang lebih terkontrol.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih penulis ucapkan kepada pihak fakultas teknik Universitas Palangka Raya sebagai pemberi dana penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Basu, M., Pande, M., Bhadoria, P. B. S., & Mahapatra, S. C. (2009). Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. *Progress in Natural Science*, 19(10), 1173–1186. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.12.006>
- Blissett, R. S., & Rowson, N. A. (2012). A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel*, 97, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.024>
- Budi, A. S., Marpaung, N. D., & Onwardana, M. E. (2023). Studi pemanfaatan bottom ash untuk pencegahan air asam tambang dan menurunkan konsentrasi logam terlarut pada batuan breksi vulkanik dengan skala laboratorium. *Jurnal Sains dan Teknologi ISTP*, 20(1), 86–97.
- Damayanti, R. (2018). Abu batubara dan pemanfaatannya: Tinjauan teknis karakteristik secara kimia dan toksikologinya. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 14(3), 213–231.
- Fadhilah, Ramadhan, F., & Rusli, H. (2022). Treatment of acid mine drainage using fly ash, bottom ash, and lime mixed. *JIPF (Jurnal Ilmu Pendidikan Fisika)*, 7(2), 168–177.
- Fauzi, M. A. R., Prasetya, A., & Sutijan. (2023). Utilisasi limbah abu terbang untuk remediasi limbah asam tambang batubara. *Prosiding Seminar Nasional UNIMUS*, 6, 1019–1028.
- Gitari, M. W., Petrik, L. F., Etchebers, O., Key, D. L., Iwuoha, E., & Okujeni, C. (2008). Passive neutralisation of acid mine drainage by fly ash and its derivatives: A review. *Environmental Geology*, 54, 1525–1536. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0929-2>
- Kumar, V., Sinha, A. K., Makkar, H. P. S., De Boeck, G., & Becker, K. (2012). Standardization of pH and dissolved oxygen requirements for aquatic ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*, 19, 296–307.
- Munawar, A. (2017). *Pengelolaan air asam tambang: Prinsip-prinsip dan penerapannya*. UNIB Press.
- Nugraha, C., & Rolliyah. (2021). *Pemanfaatan fly ash dan bottom ash untuk pengelolaan batuan dan air asam di tambang batubara*. Direktorat Penilaian Kinerja Pengelolaan Limbah B3 dan Limbah Non B3, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Pandey, V. C., & Singh, N. (2010). Impact of fly ash incorporation in soil systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 136(1–2), 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.11.013>
- Sari, R., Yerizam, M., & Junaidi, R. (2024). Pemanfaatan fly ash batubara dalam penurunan kadar besi dan mangan limbah air asam tambang PT Bukit Asam. *INNOVATIVE: Journal of Social Science Research*, 4(5), 688–701.
- Sefti, A., Nursanto, E., & Ernawati, R. (2023). Overview pengelolaan air asam tambang dengan menggunakan zeolit. *Jurnal Mineral, Energi dan Lingkungan*, 7(2), 1–7.
- Simangunsong, S., & Manalu, R. (2022). Pemanfaatan fly ash dalam pencegahan air asam tambang dan uji kelarutan logam dengan skala laboratorium. *Jurnal Darma Agung*, 30(2), 375–388.
- Skousen, J., Zipper, C. E., Rose, A., Ziemkiewicz, P. F., Nairn, R., McDonald, L. M., & Kleinmann, R. L. P. (2017). Review of passive systems for acid mine drainage treatment. *Mine Water and the Environment*, 36, 133–153. <https://doi.org/10.1007/s10230-016-0417-1>
- Tuheteru, E. J., Kusuma, G. J., Pranoto, K., Palingi, Y., & Gautama, R. S. (2021). Studi kualitas air dan potensi pemanfaatan danau bekas tambang JVoid PT Kaltim Prima Coal, Kalimantan Timur. *Indonesian Mining and Energy Journal*, 4(1), 52–59.