



## STUDY ON THE POTENTIAL CONTAMINATION OF HEAVY METALS: ANALYSIS OF Cr AND Pb CONTENTS FROM POWER PLANTS IN INDONESIA USING THE BATCH LEACHING METHOD

Farrah Fadhillah Hanum<sup>1)\*</sup>, Siti Salamah<sup>2)</sup>, Ahmad Rifai Sanuhung<sup>2)</sup>, dan Budi Setya Wardhana<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan,  
Jl. Ahmad Yani, Banguntapan, Bantul, D.I. Yogyakarta, 55191. Indonesia;

<sup>2)</sup>Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan,  
Jl. Ahmad Yani, Banguntapan, Bantul, D.I. Yogyakarta, 55191. Indonesia

### ARTICLE INFO

Article history:

Received 09 Dec 2023,

Revised 19 Jan 2024,

Accepted 23 Jan 2024,

Available online 01 Feb 2024

Keywords:

- ✓ Bottom ash,
- ✓ Fly ash,
- ✓ Heavy metal,
- ✓ Batch leaching method,
- ✓ pH

\*corresponding author:

[farrah.hanum@che.uad.ac.id](mailto:farrah.hanum@che.uad.ac.id)

Phone: +6285602704861

[https://doi.org/10.31938/jsn.v](https://doi.org/10.31938/jsn.v14i1.689)

[14i1.689](https://doi.org/10.31938/jsn.v14i1.689)

### ABSTRACT

Coal ash, stemming from the combustion process in power plants, emerges as a potential pollution source due to its metal content. Recognized for housing various metals with environmental contamination potential, this study meticulously delves into the metal analysis of chromium (Cr) and lead (Pb) within four distinct samples of fly ash (FA) and bottom ash (BA) sourced from diverse coal-fired power plants across Indonesia. Employing the batch leaching method, the coal ash samples (FABA) underwent a 6-hour immersion in deionized water, replicating environmental scenarios akin to rainwater interaction with coal ash at disposal sites. XRF analysis scrutinized the chemical composition of each sample, while the leaching filtrate underwent analysis via pH meter and AAS to ascertain pH values and the concentrations of Pb and Cr. Results unveiled a substantial pH variation in the leachate, fluctuating from the initial deionized water pH of 7.00 to a range between 6.86 and 9.18. Notably, subsequent leaching indicated undetectable concentrations of Pb in all samples, with most exhibiting low Cr concentrations post-leaching, except for FA-2, FA-4, and BA-4, which displayed modest Cr concentrations. The scarcity or low concentrations of Pb and Cr post-leaching suggest an efficacious process inhibiting heavy metal release. This study offers profound insights into the chemical intricacies of coal ash, underlining its potential environmental ramifications. The absence of detectable heavy metal concentrations post-leaching underscores a minimal risk of environmental pollution, underscoring the imperative to comprehend the chemical reactions intrinsic to the leaching process for optimal waste management strategies.

### ABSTRAK

#### Studi Potensi Pencemaran Logam Berat: Analisis Kandungan Logam Cr dan Pb dari PLTU di Indonesia dengan Metode Batch Leaching

Abu batubara, yang berasal dari proses pembakaran pada pembangkit listrik, menjadi sumber potensial pencemaran karena kandungan logamnya. Dikenal mengandung berbagai logam yang dapat mencemari lingkungan, penelitian ini berfokus pada analisis logam kromium (Cr) dan timbal (Pb) dalam empat sampel abu terbang (*fly ash* - FA) dan abu dasar (*bottom ash* - BA) yang berasal dari berbagai pembangkit listrik tenaga batu bara di Indonesia. Dengan menggunakan metode pencucian *batch*, sampel abu batubara (FABA) direndam dalam air deionisasi selama 6 jam, meniru kondisi lingkungan saat air hujan berinteraksi dengan abu batubara di tempat pembuangan. Komposisi kimia setiap sampel diuji menggunakan analisis XRF, sementara filtrat dari proses pencucian dianalisis dengan pH meter dan AAS untuk mendapatkan nilai pH, konsentrasi Pb dan Cr. Hasil menunjukkan variasi pH yang signifikan pada air cucuran, berkisar dari pH akuades awal sebesar 7,00 menjadi kisaran 6,86 hingga 9,18. Hasil pencucian untuk Pb dan Cr menunjukkan konsentrasi Pb yang tidak terdeteksi dalam semua sampel setelah pencucian. Demikian pula, sebagian besar sampel menunjukkan konsentrasi Cr yang rendah setelah pencucian, kecuali pada sampel FA-2, FA-4, dan BA-4 yang menunjukkan konsentrasi Cr yang relatif kecil. Ketiadaan atau konsentrasi rendah Pb dan Cr setelah pencucian menunjukkan efektivitas proses pencucian dalam menghambat pelepasan logam berat ke dalam larutan. Penelitian ini memberikan wawasan mendalam tentang sifat kimia abu batubara dan dampak lingkungan potensialnya. Tidak ditemukannya konsentrasi logam berat tertentu setelah pencucian menandakan potensi rendah pencemaran lingkungan dan menekankan pentingnya memahami reaksi kimia yang terlibat dalam proses pencucian untuk strategi pengelolaan limbah yang efektif.

Kata kunci: Abu bawah batubara, Abu terbang batubara, Logam berat, Metode *batch leaching*, pH



## PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara dengan sektor pembangkit listrik yang terus berkembang dan menghadapi tantangan serius terkait dampak lingkungan dari penggunaan batu bara sebagai sumber energi utama, salah satunya yaitu dari abu sisa proses pembakaran batubara. Abu batu bara terdiri dari abu terbang dan abu dasar, yang merupakan material yang "terbang" dan mengendap di bagian bawah tungku pembakaran (Prayoga & Afla, 2023). Abu terbang terbentuk ketika partikel-partikel kecil diangkat oleh aliran gas panas selama pembakaran dan membentuk abu halus yang melayang-layang di udara. Di sisi lain, abu dasar adalah partikel yang lebih besar yang mengendap di bagian bawah tungku. Material ini menjadi fokus perhatian karena mengandung logam berat yang berpotensi mencemari lingkungan diantaranya As, Se, B, dan F (Hanum et al., 2018; Hanum et al., 2019).

Logam berat dan unsur jejak ini dapat larut dalam air dan berpotensi mencemari tanah, air tanah, dan sumber air permukaan (Izquierdo & Querol, 2012; Leelarungroj et al., 2018). Logam berat dalam abu batubara biasanya berada dalam bentuk oksidanya. Mekanisme pelarutan oksida logam dalam air adalah suatu proses oksida logam mengalami reaksi kimia dengan molekul air, menghasilkan hidroksida atau senyawa ionik yang dapat larut dalam air. Dalam konteks abu batubara, proses ini dapat terjadi saat air bersentuhan dengan abu batubara yang mengandung oksida logam.

Pemilihan fokus pada logam berat timbal (Pb) dan kromium (Cr) dalam penelitian ini mendapat dukungan dari beberapa pertimbangan yang esensial. Pertama, baik timbal maupun kromium termasuk dalam kategori logam berat yang memiliki potensi toksisitas tinggi terhadap organisme hidup, termasuk manusia. Paparan jangka panjang terhadap timbal dapat menyebabkan masalah kesehatan serius, terutama pada sistem saraf dan organ-organ vital. Sementara itu, beberapa bentuk kromium, seperti kromium enam (VI) dan  $\text{CrO}_3$  yang diketahui bersifat karsinogenik dan dapat menyebabkan dampak kesehatan yang serius (Haura et al., 2017; Manurung et al., 2021). Kedua logam ini juga dikenal sebagai pencemar lingkungan potensial jika terlepas dan larut dalam air atau tanah, terutama melalui limbah abu batubara.

Pencemaran timbal dapat terjadi pada tanah dan air, mengancam ekosistem dan kesehatan manusia, sementara pencemaran kromium dapat

menyebabkan kerusakan ekosistem akuatik dan tanah, serta membahayakan organisme hidup. Kepentingan publik terkait dengan kesehatan dan lingkungan mendorong penelitian lebih lanjut untuk memahami sejauh mana logam berat ini terlepas dari abu batubara dan dapat mencemari sumber daya alam. Oleh karena itu, pemilihan timbal dan kromium sebagai fokus penelitian ini bukan hanya karena keberadaan mereka dalam abu batubara, tetapi juga karena potensi dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Studi ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih baik tentang distribusi dan perilaku logam berat khususnya kromium (Cr) dan timbal (Pb) dalam abu batubara hasil pembakaran PLTU di Indonesia.

Pada penelitian ini, dilakukan metode *batch leaching* untuk melihat kondisi kelarutan logam Cr dan Pb dari sampel abu batubara tersebut. Metode *leaching* adalah suatu pendekatan laboratorium yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan suatu material, seperti abu batu bara, dalam melepaskan zat kimia tertentu ke dalam larutan (Tian et al., 2018). Proses *leaching* mensimulasikan kondisi lingkungan dimana material tersebut dapat terpapar dengan larutan, mirip dengan situasi di lapangan (Hartuti et al., 2017). Dalam konteks abu batu bara, *leaching tests* penting untuk menilai sejauh mana logam berat dan unsur jejak lainnya yang terkandung dalam abu dapat terlarut dan berpotensi mencemari lingkungan. Penggunaan akuades sebagai pelarut dalam proses *leaching* sampel abu terbang (*fly ash* - FA) dan abu dasar (*bottom ash* - BA) di erlenmeyer didasarkan pada beberapa pertimbangan kritis. Pertama, akuades, atau air suling murni, dianggap sebagai pelarut yang bersih dan bebas dari kontaminan yang dapat mempengaruhi hasil analisis. Dengan menggunakan air murni, dapat menghindari adanya senyawa-senyawa tambahan yang dapat mengganggu analisis konsentrasi logam berat (Silalahi et al., 2023). Kedua, akuades memiliki sifat netral dan tidak memberikan kontribusi signifikan pada pH larutan. Hal ini penting karena pH larutan dapat mempengaruhi pelarutan oksida logam dan akurasi hasil *leaching*. Penggunaan air murni membantu mempertahankan kontrol lebih baik terhadap parameter pH selama proses *leaching*.

Filtrat yang dihasilkan dari proses *leaching* ini kemudian diukur pH dan kandungan unsur Cr dan Pb dengan menggunakan *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS). Penggunaan metode *batch*

*leaching* diharapkan memberikan pemahaman yang mendalam tentang kelarutan logam berat dalam abu batubara, yang penting untuk merencanakan langkah-langkah mitigasi dan pemanfaatan yang berkelanjutan dalam konteks energi dan pelestarian lingkungan.

## BAHAN DAN METODE

### Bahan dan Alat

Dalam penelitian ini, abu terbang (FA) dan abu bawah (BA) batubara diinvestigasi, berasal dari empat Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang beroperasi di berbagai lokasi di Indonesia, mencakup Pulau Jawa, Kalimantan, dan Sulawesi. Pada penelitian ini sampel disebutkan dengan penomoran sehingga menjadi: FA-1 dan BA-1 untuk sampel abu batubara yang berasal dari salah satu PLTU di Pulau Jawa, Sampel FA-2, BA-2 dan FA-3, BA-3 berasal dari dua PLTU di Pulau Kalimantan dan FA-4 dan BA-4 berasal dari salah PLTU di Pulau Sulawesi.

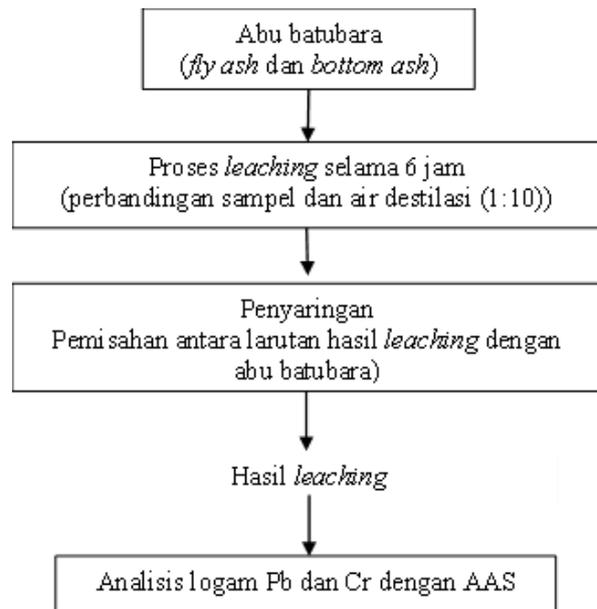
Metode eksperimen melibatkan penggunaan peralatan khusus seperti *magnetic stirrer*, erlenmeyer, corong penyaring, dan kertas saring untuk melaksanakan proses *batch leaching*. Pengukuran pH dilakukan menggunakan pH meter digital, sementara analisis komposisi kimia pada sampel FA dan BA sebelum proses *leaching* dilakukan dengan menggunakan teknik *X-ray Fluorescence* (XRF). Hasil dari proses *leaching* kemudian disaring, dan filtratnya dianalisis menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) untuk mengevaluasi konsentrasi logam berat, khususnya timbal (Pb) dan kromium (Cr).

### Metode

Gambar 1 menunjukkan alur proses yang dilakukan pada studi ini. Proses *leaching* logam berat dilaksanakan dengan cara mengontakkan sampel abu terbang (FA) dan abu bawah (BA) masing-masingnya dengan akuades selama 6 jam pada suhu ruang. Rasio yang digunakan untuk campuran sampel dan akuades adalah 1:10. FA dan BA ditambahkan akuades dalam erlenmeyer dan pengontakan dilakukan dengan *magnetic stirrer* untuk memfasilitasi reaksi antara oksida logam dan air. Pemilihan akuades sebagai pelarut dalam penelitian ini juga sejalan dengan upaya menyamakan kondisi lingkungan, yaitu abu batubara terkontak dengan air hujan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa air hujan cenderung memiliki sifat netral hingga sedikit bersifat asam, tergantung pada faktor-faktor

seperti lokasi geografis dan polusi atmosfer. Oleh karena itu, penggunaan akuades yang memiliki sifat netral dapat mencerminkan kondisi air hujan yang umumnya bersifat lemah asam atau netral.

Setelah periode 6 jam, proses *leaching* dihentikan, campuran disaring menggunakan kertas saring Whatman dan filtratnya dianalisis menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS). Pendekatan ini memberikan informasi yang signifikan tentang pelarutan logam berat dalam abu batubara dan membantu dalam mengevaluasi dampak potensialnya terhadap lingkungan.



Gambar 1. Diagram Alir Tahapan Proses *Leaching* pada Abu Batubara

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Komposisi kimia pada *fly ash* dan *bottom ash* dengan metode XRF

Analisis komposisi kimia menggunakan metode Fluoresensi Sinar-X (XRF) merupakan teknik laboratorium yang sangat berperan dalam menentukan komposisi unsur kimia dalam suatu sampel. Metode ini didasarkan pada penggunaan sinar-X untuk merangsang atom dalam sampel sehingga menghasilkan fluoresensi sinar-X, yang kemudian dapat diukur dan dianalisis untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang hadir. Hasil analisis komposisi kimia dengan metode XRF memberikan informasi mendalam tentang unsur-unsur yang ada dalam sampel (Nurfitri & Febriyantiningrum, 2023). Selain kandungan unsur-unsur yang umumnya terdapat pada batubara seperti Si, Fe, Ca, dan Al, metode XRF

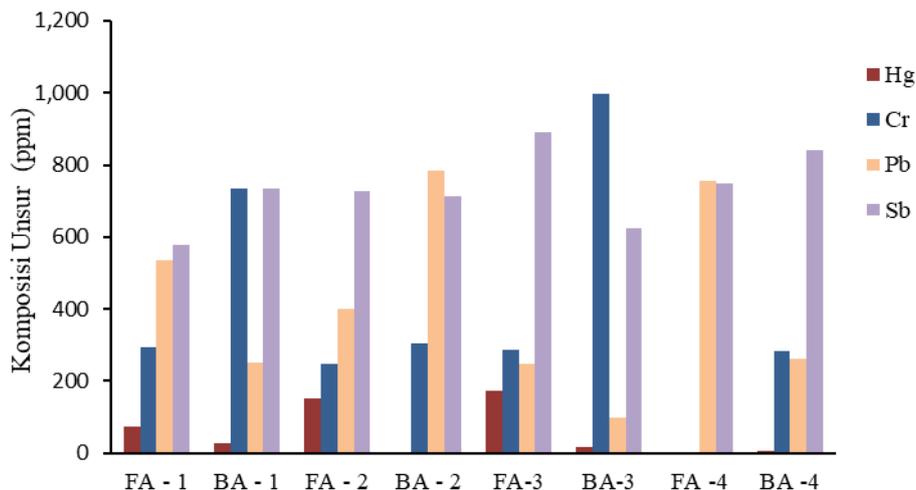
juga dapat memberikan informasi kritis tentang unsur-unsur logam berbahaya.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa limbah abu batubara mengandung beberapa unsur logam berbahaya seperti As, Se, B, F (Hanum et al., 2018), dan juga Cr, Cd, Pb (Firman et al., 2020). Hasil analisis XRF pada studi ini menyoroti konsentrasi logam yang berpotensi merusak lingkungan, baik dalam abu terbang (FA) maupun abu dasar (BA). Gambar 2 memberikan gambaran yang terinci mengenai kandungan logam berat, seperti Pb (timbal), Cr (kromium), Hg (merkuri), dan Sb (antimon), dalam sampel abu batubara yang telah dianalisis. Melalui hasil analisis ini, dapat diketahui bahwa konsentrasi logam-logam berat tersebut terdistribusi dalam rentang 70 ppm hingga 850 ppm, mengindikasikan bahwa mereka hadir dalam jumlah yang relatif kecil dalam abu batubara. Rentang konsentrasi yang relatif rendah ini dapat terkait dengan beberapa faktor geologi dan lingkungan. Secara umum, abu batubara yang berasal dari proses pembakaran batubara umumnya mengandung jumlah logam berat yang terbatas. Hubungan antara *major element* (seperti silikon, kalsium, dan aluminium) dan *trace element* (seperti Pb, Cr, Hg, dan Sb) dalam abu batubara juga memengaruhi konsentrasi logam berat. Komposisi mineral dan faktor mineralogi batubara, bersama dengan kondisi pembakaran, turut mempengaruhi distribusi logam-logam tersebut dalam rentang konsentrasi yang diamati (Hartuti et al., 2018).

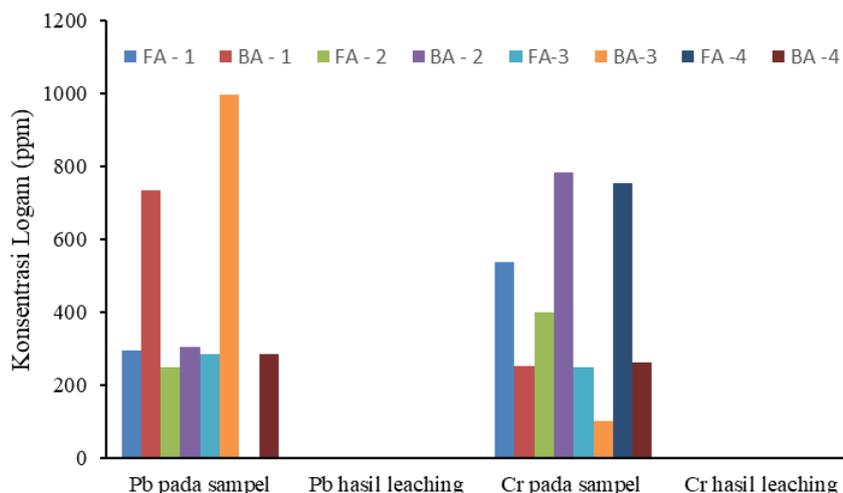
Hasil analisis XRF memungkinkan pemahaman mendalam tentang distribusi dan konsentrasi unsur-unsur ini, memberikan dasar penting untuk perencanaan tindakan remediasi atau penanganan yang tepat guna melindungi lingkungan. Dengan demikian, metode XRF tidak hanya menjadi alat analisis kimia yang canggih, tetapi juga instrumen penting dalam pengelolaan dan pemantauan dampak lingkungan dari material seperti abu batu bara. Pada penelitian ini akan didiskusikan potensi dari logam Cr dan Pb.

### Pengaruh Metode *Batch Leaching* pada Kelarutan Logam Cr dan Pb

Metode *leaching* adalah suatu metode laboratorium yang efektif untuk mengevaluasi kemampuan suatu material dalam melepaskan zat kimia tertentu ke dalam larutan (Zhao et al., 2020). Penerapan metode ini umumnya digunakan untuk mengukur kelarutan logam berat dan unsur jejak lainnya pada berbagai jenis material, termasuk abu batubara. Dalam ranah analisis lingkungan, berbagai metode *leaching* telah dikembangkan, dan diantaranya adalah metode *batch leaching* yang akan diimplementasikan dalam penelitian ini. Metode *batch leaching* melibatkan langkah-langkah praktis yaitu sampel yang diuji dicampur dengan larutan *leaching* di dalam wadah dan campuran diaduk secara cermat selama periode waktu tertentu dengan kecepatan tertentu. Setelah proses *leaching* selesai, larutan yang dihasilkan dianalisis untuk menentukan konsentrasi logam terlarut.



Gambar 2. Perbandingan Konsentrasi Unsur Logam Berbahaya yang Terdapat pada Sampel Abu Batubara



Gambar 3. Perbandingan Hasil Analisis Pb dan Cr pada Sampel (XRF) dengan Pb dan Cr pada Larutan Hasil Proses *Leaching* (AAS) dari Masing-masing Sampel Abu Batubara

Tabel 1. Konsentrasi Filtrat Hasil *Leaching* Masing-masing Sampel (ppm)

	FA - 1	BA - 1	FA - 2	BA - 2	FA-3	BA-3	FA -4	BA -4
Konsentrasi <i>Leaching</i> Pb	0	0	0	0	0	0	0	0
Konsentrasi <i>Leaching</i> Cr	0	0	0,057	0	0	0	0,117	0,049

Gambar 3 memberikan perbandingan visual antara hasil analisis konsentrasi logam Pb dan Cr pada kondisi awal yaitu sampel dan konsentrasinya setelah proses *leaching*. Analisis perbandingan ini bertujuan utama untuk mengevaluasi kesesuaian hasil yang diperoleh dari kedua teknik analisis tersebut, memberikan wawasan mendalam mengenai karakteristik dan distribusi logam berat, khususnya timbal (Pb) dan kromium (Cr), dalam abu batubara. Dari Gambar 3 diketahui bahwa logam Pb dan Cr setelah *leaching* sangat kecil. Tabel 1 berikut menjelaskan bahwa grafik Pb tidak muncul adalah dikarenakan konsentrasi logam Pb hasil *leaching* semua sampel tidak terdeteksi dengan menggunakan analisis AAS dan hasil yang sama juga berlaku pada hasil analisis logam Cr untuk sampe FA-1, BA-1, BA-2, FA-3 dan BA-3. Sampel abu batubara FA-2, FA-4 dan BA-4 menunjukkan konsentrasi logam Cr yang relatif kecil yaitu 0,057; 0,117; dan 0,049 ppm secara berurutan.

Konsentrasi logam Pb dan Cr setelah proses *leaching* yang tidak terdeteksi, seperti yang tergambar pada Gambar 3 dan dijelaskan dalam Tabel 1, dapat disebabkan oleh beberapa faktor analitis dan karakteristik sampel. Analisis AAS yang digunakan untuk mengukur konsentrasi logam berat cenderung memiliki batas deteksi tertentu. Jika konsentrasi logam berat setelah

proses *leaching* sangat kecil, di bawah batas deteksi instrumen AAS, hasilnya mungkin tidak dapat terdeteksi secara akurat. Selain itu, konsentrasi logam Pb dan Cr setelah proses *leaching* dalam abu batubara juga dapat dihubungkan dengan kelarutan logam tersebut dalam air. Kelarutan logam dalam air adalah sifat yang menentukan seberapa baik suatu logam dapat larut dalam pelarut tertentu, seperti air. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kelarutan logam melibatkan interaksi antara logam dan senyawa kimia yang ada dalam larutan.

Dalam konteks abu batubara, oksida logam berat seperti Pb dan Cr dapat memiliki kelarutan yang rendah dalam air karena mereka cenderung membentuk senyawa kompleks atau endapan yang kurang larut (Rengga et al., 2019). Selama proses *leaching*, abu batubara berinteraksi dengan air, reaksi kimia dapat terjadi antara oksida logam dan air, membentuk senyawa yang mungkin memiliki kelarutan yang rendah. Dalam studi ini, ketidakhadiran logam pada hasil *leaching* dapat dianggap sebagai hasil yang baik. Hal ini menunjukkan bahwa potensi logam berat untuk mencemari lingkungan melalui abu batubara tersebut relatif rendah. Dengan kata lain, sebagian besar logam Pb dan Cr tidak terlepas ke dalam larutan selama proses *leaching*, mengindikasikan efisiensi proses tersebut dalam membatasi pelepasan logam berat ke lingkungan. Temuan ini

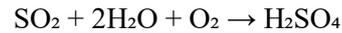
memiliki implikasi positif terhadap pengelolaan limbah abu batubara, menunjukkan bahwa abu batubara dari PLTU tersebut memiliki potensi yang rendah untuk menyebabkan dampak negatif pada lingkungan air dan tanah setempat, sehingga bisa digunakan langsung untuk dimanfaatkan di lingkungan seperti pemanfaatan sebagai media tanam pada bidang pertanian (Hanum et.al, 2023).

### Pengaruh Metode *Batch Leaching* pada pH

Pengaruh pH lingkungan signifikan pada kandungan logam berat dalam berbagai material (Nugraha & Rolliyah, 2021). Perubahan pH dapat mengubah bentuk dan ketersediaan logam berat dalam lingkungan. Nilai pH ini dapat mempengaruhi kemampuan tanah dan material geo-kimia lainnya untuk mengadsorpsi (menyimpan) dan mendesorpsi (melepaskan) logam berat.

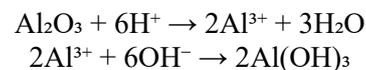
Gambar 4 menyajikan hasil pengukuran pH dari akuades dan larutan hasil *leaching* masing-masing sampel abu batubara. Perubahan nilai pH selama proses *leaching* abu batubara dari nilai pH akuades awal sebesar 7,00 menjadi nilai pH hasil *leaching* yang berkisar antara 6,86 dan 9,18 mencerminkan dinamika interaksi yang kompleks antara abu batubara dan akuades (H<sub>2</sub>O). Faktor-faktor yang berperan dalam variasi pH ini melibatkan sifat mineralogis dan komposisi kimia abu batubara. Kandungan komposisi kimia abu batubara dapat berperan dalam membentuk senyawa yang mempengaruhi pH larutan (Rengga et.al., 2019). Hasil *leaching* sampel FA-2, BA-2 dan FA-3 dan BA-3 memiliki penurunan sedikit nilai pH dari nilai pH akuades awal. Hal ini dapat disebabkan oleh adanya kandungan sulfur dalam bentuk sulfida atau sulfur dioksida dapat teroksidasi dan membentuk senyawa yang bersifat

asam. Reaksi ini dapat menyebabkan penurunan pH larutan karena asam sulfat bersifat asam.

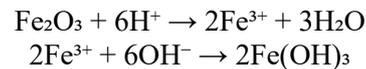


Dari hasil analisis XRF awal yang dilakukan terhadap masing-masing sampel diketahui bahwa sampel FA-2, BA-2 dan FA-3 dan BA-3 memiliki kandungan SO<sub>2</sub> yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan sampel lainnya yaitu sekitar 16,08–20,15 ppm dibandingkan dengan 1,04–4,33 ppm. Untuk sampel FA-1, BA-1 dan FA-4 dan BA-4 memiliki lonjakan pH yang cukup tinggi dari pH akuades awal yaitu dari 7,00 (pH akuades) menjadi 9,18 (pH larutan setelah proses *leaching*). Beberapa logam yang umumnya dapat berkontribusi pada kondisi basa dalam larutan melalui pembentukan senyawa hidroksida adalah logam-logam seperti aluminium (Al), besi (Fe), dan kalsium (Ca). Berdasarkan hasil uji awal XRF terhadap masing-masing sampel juga terlihat bahwa sampel FA-1, BA-1 dan FA-4 dan BA-4 memiliki nilai yang relatif tinggi yaitu sekitar 30-33% untuk kandungan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 22-23% untuk CaO, dan 7-9% untuk kandungan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Pembentukan senyawa basa dapat terlihat dari reaksi berikut :

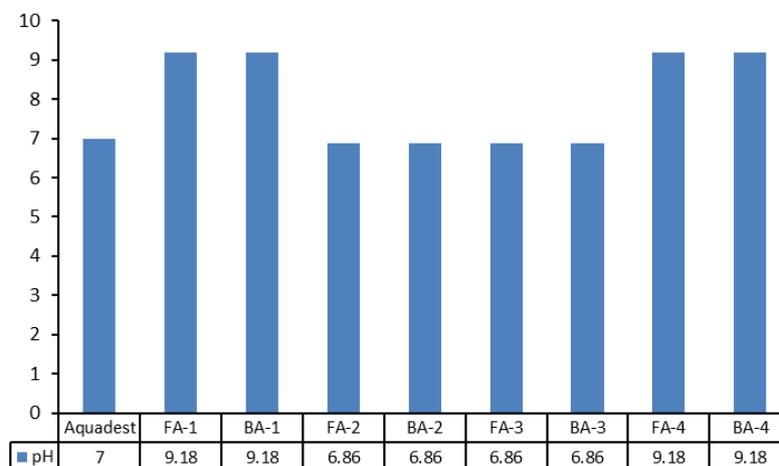
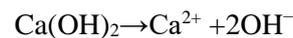
Pembentukan hidroksida aluminium:



Pembentukan hidroksida besi:



Pembentukan hidroksida kalsium :



Gambar 4. Perbandingan pH pada Larutan Hasil *leaching* Masing-masing Sampel Abu Batubara

Keberadaan kondisi basa ini dapat memiliki implikasi penting terhadap perilaku logam-logam tertentu, terutama logam Pb dan Cr, yang merupakan fokus utama penelitian. Kondisi basa dapat mempengaruhi kelarutan dan mobilitas logam-logam ini dalam larutan. Kondisi basa adalah faktor yang mendorong terikatnya logam Pb pada partikel tanah atau endapan. Dalam kondisi lingkungan yang bersifat asam, seperti di daerah dampak asam tambang, logam Pb dapat lebih mudah terlepas dan larut dalam air (Rumoe et al., 2020). Oleh karena itu, kondisi basa dapat memberikan perlindungan terhadap potensial pencemaran logam Pb. Kromium memiliki beberapa bentuk oksida yang dapat dipengaruhi oleh pH. Kromium dalam bentuk trivalen (Cr(III)) cenderung mengalami presipitasi atau pengendapan pada pH tinggi (basa), sementara kromium heksavalen (Cr(VI)) lebih larut pada pH rendah hingga netral (Chairunnisa et al., 2022). Cr(VI) merupakan bentuk kromium yang lebih toksik dan berpotensi mencemari air tanah. Meskipun kondisi lingkungan saat *leaching* adalah basa, konsentrasi *leaching* kromium hampir mendekati nol pada Gambar 3. Namun, hasil analisis XRF menunjukkan kandungan logam Cr yang relatif tinggi (berkisar 200-800 mg/L). Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menentukan jenis ion kromium yang dominan, sehingga pemanfaatan abu batubara dapat lebih aman bagi lingkungan (Ochedi et al., 2020 ; Misran et al., 2019 ; Anggraini et al., 2021).

## KESIMPULAN

Studi ini mengevaluasi potensi pencemaran logam berat, terutama Pb dan Cr, pada abu batubara yang berasal dari berbagai Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Indonesia. Proses *leaching* dilakukan dengan menggunakan akuades, dan hasilnya menunjukkan perubahan pH larutan dari nilai awal akuades sebesar 7,00 menjadi kisaran 6,86 hingga 9,18. Variasi pH ini dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara abu batubara dan air selama proses *leaching*. Hasil *leaching* Pb dan Cr pada abu batubara menunjukkan variasi yang signifikan dalam tingkat kelarutan dan pelepasan kedua logam tersebut selama proses *leaching*. Analisis AAS menghasilkan temuan bahwa konsentrasi logam Pb tidak terdeteksi dalam semua sampel setelah *leaching*. Demikian pula, hasil yang sama terjadi pada konsentrasi logam Cr untuk sebagian besar

sampel, kecuali pada sampel FA-2, FA-4, dan BA-4 yang menunjukkan konsentrasi logam Cr yang relatif kecil. Ketidakhadiran atau konsentrasi rendah logam Pb dan Cr setelah *leaching* merupakan indikasi positif, menunjukkan bahwa efisiensi proses *leaching* dalam menghambat pelepasan logam berat ke dalam larutan. Dalam konteks ini, *leaching* abu batubara dari PLTU tersebut memiliki potensi rendah untuk menyebabkan dampak negatif pada lingkungan air dan tanah setempat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anggarani, B. O., Rasgianti, R., Triani, M., & Sitanggang, R. B. (2021). The study of fly ash effect as fertilizer. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, *1098*(5), 052019. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1098/5/052019>
- Chairunnisa & Nasra, E. (2022). Pengaruh pH dan Konsentrasi Ion Logam Cr(VI) Terhadap Penyerapan Karbon Aktif Kulit Durian. *Chemistry Journal*, *11*(1), 45–50. <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/kimia>
- Firman, F. (2020). Analisis Kandungan Logam Berat Abu Batubara Pltu Bangko Barat Kab. Muara Enim Sumatera Selatan. *Journal of Science and Engineering*, *3*(1), 10–16. <https://doi.org/10.33387/josae.v3i1.2070>
- Hanum, F. F., Desfitri, E. R., Hayakawa, Y., & Kambara, S. (2018). Preliminary study on additives for controlling As, Se, B, and F *leaching* from coal fly ash. *Minerals*, *8*(11), 493–503. <https://doi.org/10.3390/min8110493>
- Hanum, F. F., Desfitri, E. R., Hayakawa, Y. & Kambara, S. (2019). The Role of Calcium Compound on Fluorine *Leaching* Concentration. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, *543*(1). doi: 10.1088/1757-899X/543/1/012091.
- Hanum, F. F., Pramudya, Y., Chusna, F. M. A. ., Desfitri, E. R., Hapsauqi, I., & Amrillah, N. A. Z. (2023). An Analysis of Coal Fly Ashes from Different Combustion Processes for The Agricultural Utilization. *Journal of Applied Agricultural Science and Technology*, *7*(2), 73-81. <https://doi.org/10.55043/jaast.v7i2.79>

- Hartuti, S., Hanum, F. F., Takeyama, A., & Kambara, S. (2017). Effect of additives on arsenic, boron and selenium leaching from coal fly ash. *Minerals*, 7(6). <https://doi.org/10.3390/min7060099>
- Hartuti, S., Kambara, S., Takeyama, A., Hanum, F. F., & Desfitri, E. R. (2017). Chemical Stabilization of Coal Fly Ash for Simultaneous Suppressing of As, B, and Se Leaching. In S. A. Akinyemi & M. W. Gitari (Eds.), *Coal Fly Ash Beneficiation - Treatment of Acid Mine Drainage with Coal Fly Ash*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72135>
- Haura, U., Razi, F., & Meilina, H. (2017). Karakterisasi Adsorben dari Kulit Manggis dan Kinerjanya pada Adsorpsi Logam Pb(II) dan Cr(VI). *Biopropal Industri*, 8(1), 47-54. <https://doi.org/10.36974/jbi.v8i1.2590>
- Izquierdo, M., & Querol, X. (2012). Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview. *International Journal of Coal Geology*, 94, 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.10.006>
- Leelarunroj, K., Likitlersuang, S., Chompoorat, T., & Janjaroen, D. (2018). Leaching Mechanisms of Heavy Metals from Fly Ash Stabilised Soils. *Waste Management & Research*, 36(7), 616-623. doi: 10.1177/0734242X18775494
- Manurung, M.M., Putra, A.A., & Oktavia, I. (2021). Preparasi Arang Bambu Dengan Metode Konvensional, Aktivasi Termal Dan Karakterisasi Serta Aplikasinya Sebagai Adsorben Logam Pb(II) Dan Cr(III). *Jurnal Kimia*, 15(1), 50-58. <https://doi.org/10.24843/JCHEM.2021.v15.i01.p08>
- Misran, E., Bani, O., Dina, S. F., Harahap, R., & Wahyuni, N. (2019). Characterization of Coal Fly Ash Based Adsorbent for CO<sub>2</sub> Removal. *Journal of Physics: Conference Series*, 1230(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1230/1/012042>
- 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.
- Nurfitri, N., & Febriyantiningrum, K. (2023). Studi Pemanfaatan Limbah Fly Ash Batu Bara. *Biology Natural Resource Journal (BINAR)*, 2(2), 75–79. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.55719/binar.v2i2.723>
- Ochedi, F. O., Liu, Y., & Hussain, A. (2020). A review on coal fly ash-based adsorbents for mercury and arsenic removal. *Journal of Cleaner Production*, 267, 122143. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122143>
- Prayoga, M. B. R., & Afla, R. A. (2023). Utilization of fly ash and bottom ash waste: a study at PLTU Tanjung Jati B, Jepara, Indonesia. *Asian Journal of Toxicology, Environmental, and Occupational Health*, 1(1), 9–19. <https://doi.org/10.61511/ajteoh.v1i1.2023.167>
- Rumoey, D. S., Umar, N. A., & Hadijah, H. (2022). Perbandingan Kandungan Logam Berat (Cd, Cr, Pb) Dalam Air Dan Kerang Antar Ekosistem Sungai, Muara Dan Pantai Di Perairan Sungai Tallo Makassar. *Journal of Aquaculture and Environment*, 4(2), 27–32. <https://doi.org/10.35965/jae.v4i2.1379>
- Rengga, W.D., Harianingsih, H., Erwanto, A., & Cahyono, B. (2019). Kesetimbangan Adsorpsi Isotermal Logam Pb Dan Cr Pada Limbah Batik Menggunakan Adsorben Tongkol Jagung (*Zea mays*). *Journal of Chemical Process Engineering*, 4(2), 56-62.
- Robi, R., Aritonang, A., & Juane Sofiana, M. S. (2021). Kandungan Logam Berat Pb, Cd dan Hg pada Air dan Sedimen di Perairan Samudera Indah Kabupaten Bengkayang, Kalimantan Barat. *Jurnal Laut Khatulistiwa*, 4(1), 20. <https://doi.org/10.26418/lkuntan.v4i1.44922>
- Silalahi, F.R., Zainuri, M., & Wulandari, S.Y. (2023). Studi Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) dan Seng (Zn) di Perairan Muara Sungai Cisadane Kabupaten Tangerang. *Indonesian Journal of*

*Oceanography*, 5(1), 1-6.  
<https://doi.org/10.14710/ijoce.v5i1.14564>

Tian, Q., Guo, B., Nakama, S., & Sasaki, K. (2018). Distributions and leaching behaviors of toxic elements in fly ash. *ACS Omega*, 3(10), 13055–13064. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02096>

Zhao, L., Dai, S., Finkelman, R. B., French, D., Graham, I. T., Yang, Y., Li, J., & Yang, P. (2020). Leaching behavior of trace elements from fly ashes of five Chinese coal power plants. *International Journal of Coal Geology*, 219, 103381. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.103381>