



INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research

Volume 4 Nomor 5 Tahun 2024 Page 688-701

E-ISSN 2807-4238 and P-ISSN 2807-4246

Website: <https://j-innovative.org/index.php/Innovative>

Pemanfaatan Fly Ash Batubara dalam Penurunan Kadar Besi dan Mangan Limbah Air Asam Tambang PT Bukit Asam

Rahmaida Sari^{1✉}, Muhammad Yerizam², Robert Junaidi³

Politeknik Negeri Sriwijaya

Email: rahmaidasari21@gmail.com^{1✉}

Abstrak

PT Bukit Asam Tbk adalah salah satu produsen batubara terbesar di Indonesia. Fly ash, limbah utama dari operasional PLTU Bukit Asam, merupakan partikel halus sisa pembakaran batubara yang dapat menyebabkan pencemaran lingkungan jika tidak diolah dengan baik. Berdasarkan PP No 22 tahun 2021, fly ash tidak lagi dikategorikan sebagai limbah B3, sehingga penelitian tentang pemanfaatannya semakin banyak dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan fly ash dari PLTU Bukit Asam sebagai adsorben dalam menurunkan kandungan besi (Fe) dan mangan (Mn) dari air asam tambang PT Bukit Asam Tbk, dengan menggunakan NaOH sebagai aktivator basa serta memvariasikan waktu kontak dan massa adsorben. Karakterisasi morfologi fly ash menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) menunjukkan bahwa fly ash yang telah diaktivasi memiliki struktur yang lebih berpori dibandingkan sebelum aktivasi, meningkatkan luas permukaan spesifik dan potensi adsorpsi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi adsorpsi Fe meningkat seiring dengan peningkatan dosis adsorben, mencapai efisiensi tertinggi 99,95% pada dosis 500 gram dan waktu kontak 50 menit. Model isotherm Langmuir dan Freundlich digunakan untuk menggambarkan proses adsorpsi. Nilai koefisien determinasi (R^2) yang tinggi, berkisar antara 0,9474 hingga 0,9916 untuk Fe dan 0,99602 hingga 0,99862 untuk Mn, menunjukkan kesesuaian model tersebut dalam sistem adsorpsi yang diteliti.

Kata Kunci: *Fly ash, Air Asam Tambang, Adsorpsi, Variasi Berat, Variasi Waktu*

Abstract

PT Bukit Asam Tbk is one of the largest coal producers in Indonesia. Fly ash, the primary waste from the operations of PLTU Bukit Asam, is a fine particle residue from coal combustion that can cause environmental pollution if not properly managed. Based on Government Regulation No. 22 of 2021, fly ash is no longer categorized as hazardous waste (B3), leading to increased research on its utilization. This study aims to utilize fly ash from PLTU Bukit Asam as an adsorbent to reduce iron (Fe) and manganese (Mn) content from acid mine drainage at PT Bukit Asam Tbk, using NaOH as a basic activator and varying contact time and adsorbent mass. Characterization of the fly ash morphology using Scanning Electron Microscopy (SEM) showed that activated fly ash has a more porous structure compared to before activation, increasing the specific surface area and adsorption potential. The study results indicated that the adsorption efficiency of Fe increased with the increasing adsorbent dose, reaching the highest efficiency of 99.95% at a dose of 500 grams and a contact time of 50 minutes. The Langmuir and Freundlich isotherm models were used to describe the adsorption process. The high determination coefficient (R^2) values, ranging from 0.9474 to 0.9916 for Fe and 0.99602 to 0.99862 for Mn, indicate the suitability of these models in the studied adsorption system.

Keywords: *Fly Ash, Acid Mine Water, Adsorption, Weight Variation, Time Variation*

PENDAHULUAN

PT Bukit Asam Tbk adalah perusahaan BUMN yang bergerak dibidang energi yaitu sebagai salah satu produsen batubara terbesar di Indonesia. Main waste yang dihasilkan dari kegiatan operasional PLTU Bukit Asam sebagai anak afiliasi perusahaan yaitu *fly ash* batubara. Menurut situs kementerian Industri Kimia, Farmasi dan Tekstil, dijelaskan bahwa *fly ash* adalah partikel halus (berupa abu yang berterbangan) sisa hasil pembakaran batubara. Peningkatan produksi batubara menurut data Badan Pusat Statistik dari tahun 2017 s/d 2022 mengalami kenaikan sebesar 33%. Hal ini tentunya akan berdampak terhadap semakin banyaknya limbah *fly ash* batubara yang akan dihasilkan

Menurut Acosta (2009), abu terbang adalah limbah padat yang dihasilkan dari proses pembakaran dalam tungku di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Limbah ini terbawa keluar oleh sisa-sisa pembakaran dan ditangkap menggunakan elektrostatik precipitator. Pembakaran batubara menghasilkan limbah padat berupa abu dasar sebanyak 10% dan abu terbang sebanyak 85%. Limbah padat ini terus meningkat setiap hari dan bisa mencemari lingkungan jika tidak dimanfaatkan dan diolah dengan benar. Abu terbang dari batubara yang cukup besar dapat menyebabkan pencemaran yang berbahaya bagi lingkungan sekitar, seperti polusi udara yang bisa mengganggu pernapasan ketika fly ash tertiuap angin. Penanganan fly ash biasanya hanya ditumpuk di sekitar area industri atau dibuang ke landfill. Dengan meningkatnya penggunaan batubara, beban lingkungan juga

semakin berat, sehingga perlu diantisipasi dengan mencari cara pemanfaatan yang optimal untuk mengurangi pencemaran lingkungan (Irawan, C., Basri, dkk., 2015).

Komponen yang terkandung dalam abu terbang bervariasi tergantung pada sumber batubara yang dibakar, tetapi semua abu terbang mengandung silikon dioksida (SiO_2) dan kalsium oksida (CaO) (Muhrodi, 2010). Pengolahan dan penyimpanan limbah abu terbang yang terbentuk memerlukan biaya yang besar, sehingga pemanfaatan abu terbang menjadi salah satu solusi yang bisa dilakukan. Berdasarkan peraturan pemerintah dalam PP No 22 tahun 2021, bahwasanya FABA (*Fly Ash* dan *Bottom Ash*) telah dicabut sebagai limbah B3. Oleh karena itu, belakangan ini banyak peneliti yang berusaha memanfaatkan limbah FABA untuk pembuatan bahan bangunan seperti substitusi semen, jalan, serta resotasi tambang. Berbagai penelitian sedang dilakukan untuk memanfaatkan abu terbang batubara guna meningkatkan nilai ekonomisnya serta mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Air asam tambang adalah limbah yang diproduksi pada proses penambangan dimana kondisi air di dalam atau sekitar area pertambangan memiliki kadar keasaman yang sangat tinggi. Tiga unsur pembentuk air asam tambang adalah air, mineral sulfida, dan oksigen. Ketika mineral sulfida terkena oksigen dan air, maka akan terbentuk air asam tambang. Pada penelitian kali ini, peneliti akan memanfaatkan kemampuan daya serap limbah fly ash yang dihasilkan di PLTU Bukit Asam dalam penurunan kandungan besi dan mangan yang ada didalam limbah air asam tambang PT Bukit Asam Tbk, dengan menggunakan NaOH sebagai aktivator basa serta memvariasikan waktu kontak dan massa adsorben melalui proses adsorpsi.

METODE PENELITIAN

1. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan : oven, desikator, neraca analitik, kaca arloji, spatula, batang pengaduk, gelas kimia, gelas ukur, labu ukur, kertas saring, corong, kertas Ph, hotplate, magnetic stirrer

Bahan yang digunakan pada penelitian ini : *fly ash*, air asam tambang, natrium hidroksida, aquadest.

2. Instrumen

Variabel penelitian yang digunakan berupa variabel bebas dan variabel tetap, sebagai berikut:

- a. Variabel tetap : aktivator NaOH dengan konsentrasi 6 M
- b. Variabel bebas : variasi massa adsorben dan waktu pengontakan

- c. Variasi massa adsorben: 5 gr, 10 gr dan 15 gr
- d. Variasi waktu pengontakan: 15 menit, 30 menit, 45 menit dan 60 menit.

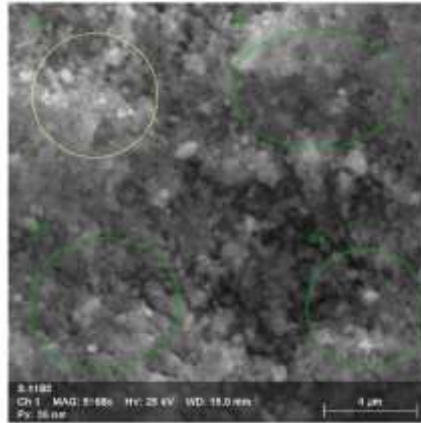
3. Prosedur Kerja

Fly ash yang sudah diambil kemudian dilakukan proses aktivasi dengan cara direndam menggunakan larutan NaOH dengan konsentrasi 6 M, kemudian diaduk hingga seluruh *fly ash* terendam dan didiamkan selama 24 jam. *Fly ash* disaring menggunakan kertas saring, kemudian mencuci *fly ash* menggunakan aquadest hingga kotoran terpisah dan memiliki pH netral. *Fly ash* yang telah netral, selanjutnya dikeringkan ke dalam oven pada suhu 105°C selama ± 1 jam. *Fly ash* yang sudah dikeringkan dengan oven kemudian didinginkan di dalam desikator selama 20 menit kemudian disimpan di dalam kantong plastik. Menyiapkan larutan air asam tambang PT. Bukit Asam Tbk pada masing – masing variasi sample dan dilakukan pengecekan kadar pH air, kandungan Fe dan Mn sebelum pengontakkan. Melakukan proses adsorpsi ke dalam pipa dengan tinggi 30 cm dan diameter 5 cm dengan menggunakan variasi massa adsorben dan waktu kontak. Kemudian, sample hasil adsorpsi dianalisa untuk menentukan kadar logam besi (Fe) dan logam mangan (Mn) yang terkandung dalam air asam tambang, serta dilakukan pengukuran pH. *Fly ash* yang telah dipisahkan kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105°C selama 1 jam, kemudian *fly ash* yang telah dingin dilanjutkan untuk analisa SEM Edx.

HASIL DAN PEMBAHASAN

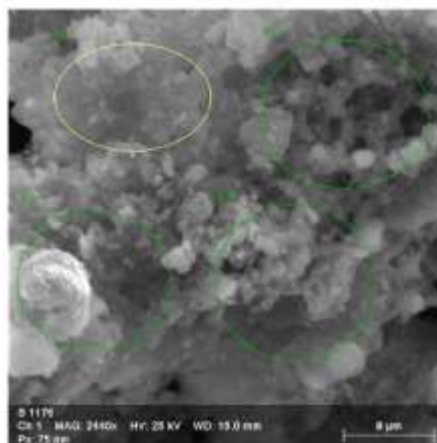
Karakterisasi *Fly Ash*

Adsorben yang dihasilkan dalam penelitian ini yaitu *fly ash* teraktivasi NaOH 6 M. Karakterisasi *fly ash* sebagai adsorben untuk menghilangkan Fe dan Mn dari limbah air asam tambang telah banyak diteliti sebelumnya. Komposisi kimia *fly ash* yang kaya akan oksida-oksida seperti SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kapasitas adsorpsinya (Ahmaruzzaman, 2010). Analisis struktur kristal dan morfologi permukaan menggunakan SEM menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki luas permukaan yang besar dan struktur berpori yang dapat meningkatkan kemampuan adsorpsinya (Wang., dkk., 2008). Pengukuran sifat fisikokimia seperti luas permukaan spesifik, distribusi ukuran pori, dan muatan permukaan juga penting untuk memahami mekanisme adsorpsi logam pada *fly ash* (Visa, 2016). Morfologi *fly ash* batubara sebelum aktivasi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Morfologi Fly Ash Batubara Sebelum Aktivasi (Pembesaran 5168 Kali)

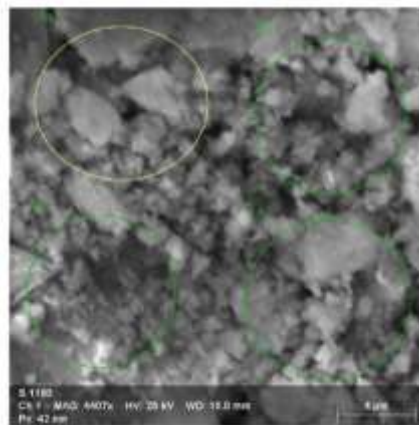
Gambar 1 *Scanning electron microscopy* abu terbang (fly ash) batubara sebelum aktivasi, yang menampilkan morfologi atau struktur fisik partikel-partikelnya pada pembesaran 5.168x. Partikel-partikel abu terbang tersebut memiliki struktur yang tidak teratur, bersudut, dan berpori, yang merupakan karakteristik khas dari abu terbang yang terdiri dari komponen mineral batubara yang tidak terbakar dan terbawa oleh gas buang selama pembakaran. Lingkaran hijau dalam gambar menyoroti beberapa partikel abu terbang yang berbeda, menunjukkan variasi ukuran dan bentuk yang umum dijumpai pada abu terbang. Skala bar di gambar menunjukkan luas pandang sekitar 4 mikrometer (μm) lebar, memberikan informasi berharga tentang karakteristik fisik abu terbang yang penting untuk memahami aplikasinya, seperti dalam produksi semen dan beton, stabilisasi tanah, atau sebagai bahan pengisi.



Gambar 2. Morfologi Fly Ash Batubara Sesudah Aktivasi (Pembesaran 2440 Kali)

Gambar 2 menunjukkan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dari partikel abu terbang batubara yang telah diaktivasi secara kimia, seperti menggunakan larutan NaOH. Proses aktivasi tersebut telah mengubah morfologi dan struktur partikel abu terbang, membuat mereka menjadi lebih berpori dan tidak teratur dibandingkan sebelum aktivasi.

Hal ini terlihat dari variasi ukuran partikel serta adanya peningkatan porositas yang ditandai dengan lingkaran hijau. Perubahan-perubahan struktur tersebut dapat meningkatkan luas permukaan spesifik partikel abu terbang, sehingga meningkatkan potensi aplikasinya sebagai adsorben. aktivasi abu terbang dengan larutan NaOH dapat secara signifikan meningkatkan luas permukaan spesifik dan volume pori, mencapai hingga $350 \text{ m}^2/\text{g}$ dan $0,25 \text{ cm}^3/\text{g}$. Hal ini terbukti meningkatkan kemampuan adsorpsi abu terbang yang teraktivasi untuk menyerap logam berat dan zat organik dari air limbah (Wang., dkk., 2019) Skala gambar menunjukkan bahwa luas pandang yang terekam adalah sekitar 8 mikrometer (μm), memberikan informasi penting mengenai ukuran dan karakteristik fisik partikel abu terbang yang telah diaktivasi.



Gambar 3. Morfologi Fly Ash Batubara Sesudah Adsorpsi (Pembesaran 4407 Kali)

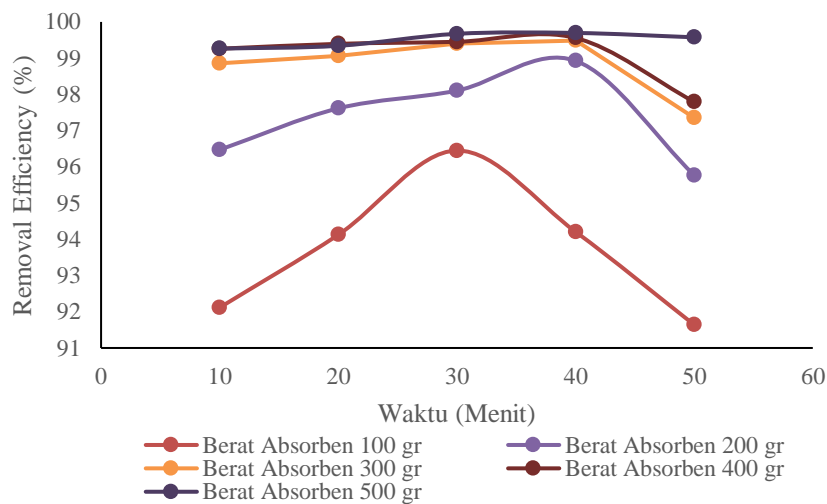
Gambar 4.3 menunjukkan morfologi partikel fly ash batubara setelah proses adsorpsi Fe dan Mn pada limbah air asam tambang. Perubahan signifikan terlihat pada permukaan dan struktur partikel, yang mengindikasikan keberhasilan proses adsorpsi. Aktivasi fly ash menggunakan larutan alkali seperti NaOH dapat meningkatkan porositas dan luas permukaan spesifik partikel (Ahmaruzzaman, 2010). Peningkatan karakteristik fisik ini tentunya akan meningkatkan kemampuan adsorpsi fly ash terhadap logam berat seperti Fe dan Mn. Dalam Gambar 3, terlihat adanya deposit atau endapan yang kemungkinan merupakan Fe dan Mn yang teradsorpsi ke dalam pori-pori dan permukaan partikel fly ash selama proses pengolahan air asam tambang.

Menurut Yao dkk (2015), pada partikel fly ash yang digunakan untuk mengadsorpsi logam berat menunjukkan perubahan morfologi dengan adanya deposit logam pada permukaannya. Analisis menggunakan teknik karakterisasi seperti SEM-EDX dapat digunakan untuk mengkonfirmasi komposisi deposit yang teramati pada permukaan partikel fly ash. Proses aktivasi dengan NaOH diketahui dapat meningkatkan sifat hidrofilik fly ash, sehingga meningkatkan afinitas terhadap logam berat dalam fasa air (Izidoro et al.,

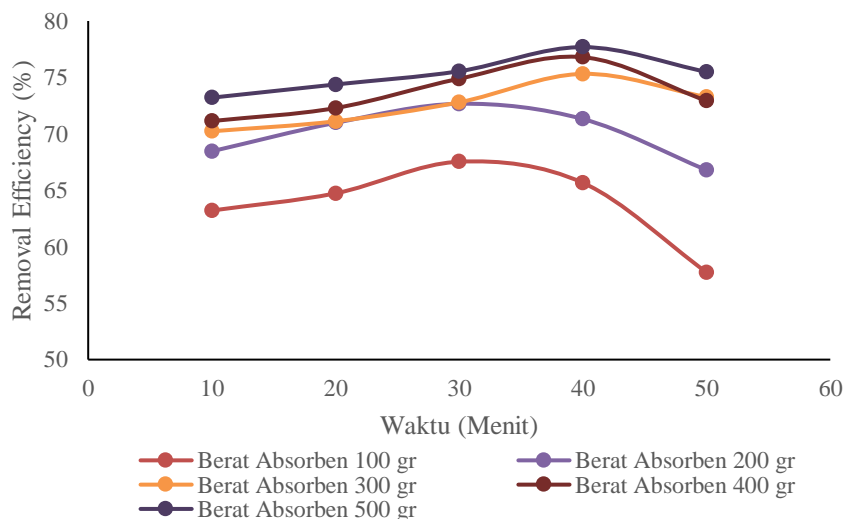
2013). Selain itu, aktivasi juga dapat menyebabkan pemutusan ikatan siloksan dalam struktur amorf fly ash, sehingga mengekspos lebih banyak site adsorpsi yang potensial (Wang & Wu, 2006).

Pengaruh Massa Adsorben Pada Efisiensi Penyisihan (Removal Efficiency)

Percobaan ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana kemampuan adsorben dari *fly ash* untuk menurunkan konsentrasi Fe dan Mn pada limbah air asam tambang. Pengujian nilai konsentrasi akan dilakukan dengan menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) dengan menggunakan variasi massa adsorben *fly ash* sebesar 100, 200, 300, 400 dan 500 gr. Hasil uji daya serap Fe dan Mn oleh *fly ash* dengan variasi massa dapat dilihat dari besar efisiensi penyisihan yang dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5 di bawah ini.



Gambar 4. Pengaruh Jumlah Adsorben terhadap Efisiensi Penyisihan (Removal Efficiency) Fe pada pada Limbah Air Asam Tambang



Gambar 5. Pengaruh Jumlah Adsorben terhadap Efisiensi Penyisihan (Removal Efficiency) Mn pada Pada Limbah Air Asam Tambang

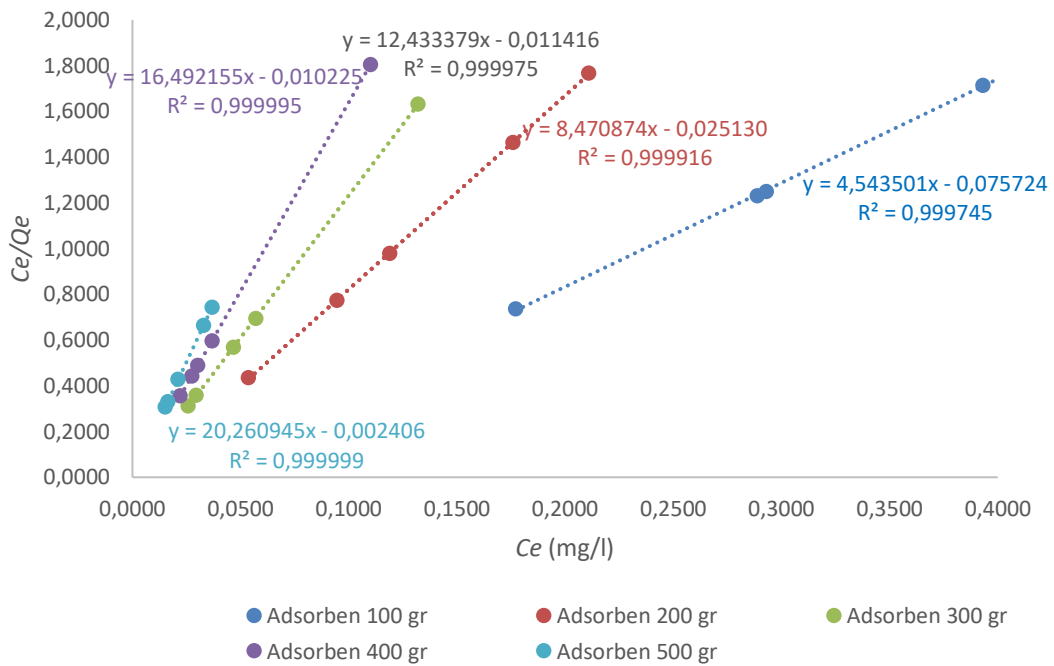
Efisiensi penyisihan menunjukkan seberapa efektif suatu adsorben dalam menyisihkan zat pencemar dari suatu larutan atau media. Semakin tinggi efisiensi penyisihan, semakin efektif adsorben tersebut. Pada Gambar 4 dan 5 menunjukkan Efisiensi adsorpsi Fe meningkat seiring dengan peningkatan dosis adsorben. Efisiensi tertinggi mencapai 99,70% pada dosis adsorben 500 gram dan waktu kontak 40 menit dan Efisiensi adsorpsi Mn meningkat seiring dengan peningkatan dosis adsorben. Efisiensi tertinggi mencapai 77,68% pada dosis adsorben 500 gram dan waktu kontak 40 menit. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar berat adsorben yang digunakan, semakin tinggi efisiensi penyerapan. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Dewi. dkk. (2018) Bahwa peningkatan jumlah adsorben akan menyediakan lebih banyak permukaan kontak dan pori-pori untuk menyerap air secara lebih efektif. Penelitian Nugroho., dkk. (2021) juga mendukung temuan ini. Mereka melaporkan bahwa semakin besar massa adsorben, semakin banyak site aktif yang tersedia untuk interaksi dengan molekul air, sehingga kapasitas penyerapan air meningkat. Selain itu, dengan massa adsorben yang lebih besar, terdapat lebih banyak saluran kapiler dan ruang kosong yang dapat diisi oleh air, meningkatkan kemampuan penyerapan.

Waktu kontak pada Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan bahwa pada awal pengukuran (0-10 menit), efisiensi penyerapan air meningkat dengan cepat. Namun, setelah menit ke-10, laju peningkatan efisiensi mulai melambat dan mencapai titik optimal pada waktu 40 menit. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Hidayat., dkk. (2020) dan Lestari., dkk. (2019). Hidayat., dkk. (2020) menjelaskan bahwa pada tahap awal, pori-pori adsorben yang masih kosong menyebabkan penyerapan air berlangsung dengan cepat. Seiring waktu, pori-pori tersebut akan terisi air, sehingga laju penyerapan menjadi lebih lambat. Lestari., dkk. (2019) juga menekankan adanya titik optimum waktu kontak untuk memaksimalkan penyerapan air oleh adsorben. Melewati titik optimum tersebut, efisiensi penyerapan tidak akan meningkat secara signifikan.

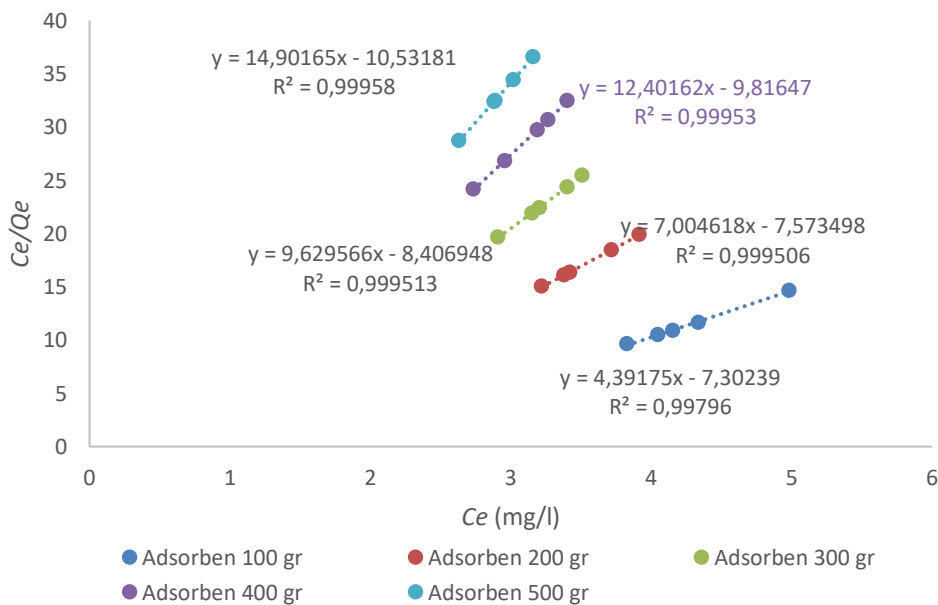
Isoterm Adsorpsi Langmuir

Isoterm adsorpsi Langmuir adalah salah satu model adsorpsi yang sering digunakan untuk menggambarkan hubungan antara konsentrasi adsorbat (zat yang diadsorpsi) dalam fasa cair dan jumlah adsorbat yang teradsorpsi per unit massa adsorben pada suhu konstan. Dari penelitian yang dilakukan dengan variasi massa adsorben dapat dihitung nilai dari kemampuan maksimum penyerapan Fe dan Mn pada limbah air asam tambang dari adsorben *fly ash* didapatkan nilai Fe dan Mn yang terserap serta kesetimbangan penyerapan Fe dan Mn yang akan digunakan untuk membuat grafik persamaan linear

isoterm Langmuir, dimana akan didapat nilai R^2 dari persamaan tersebut yang berguna untuk menentukan kesetimbangan pada suatu penelitian berdasarkan pada nilai koefisien regresi linier (R^2) yang tertinggi atau mendekati 1. Grafik persamaan linear dari isoterm Langmuir tersebut dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7



Gambar 6. Grafik Persamaan Isoterm Langmuir Penyerapan Fe



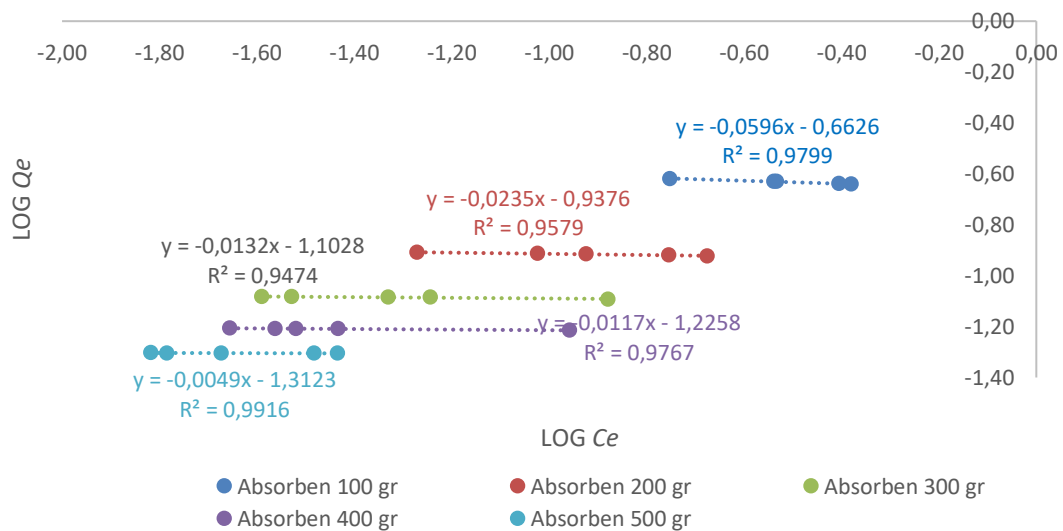
Gambar 7. Grafik Persamaan Isoterm Langmuir Penyerapan Mn

Dari grafik tersebut, koefisien regresi linier (R^2) dapat dihitung untuk mengetahui seberapa baik data percobaan adsorpsi sesuai dengan model Langmuir. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa model Langmuir dapat menjelaskan data adsorpsi

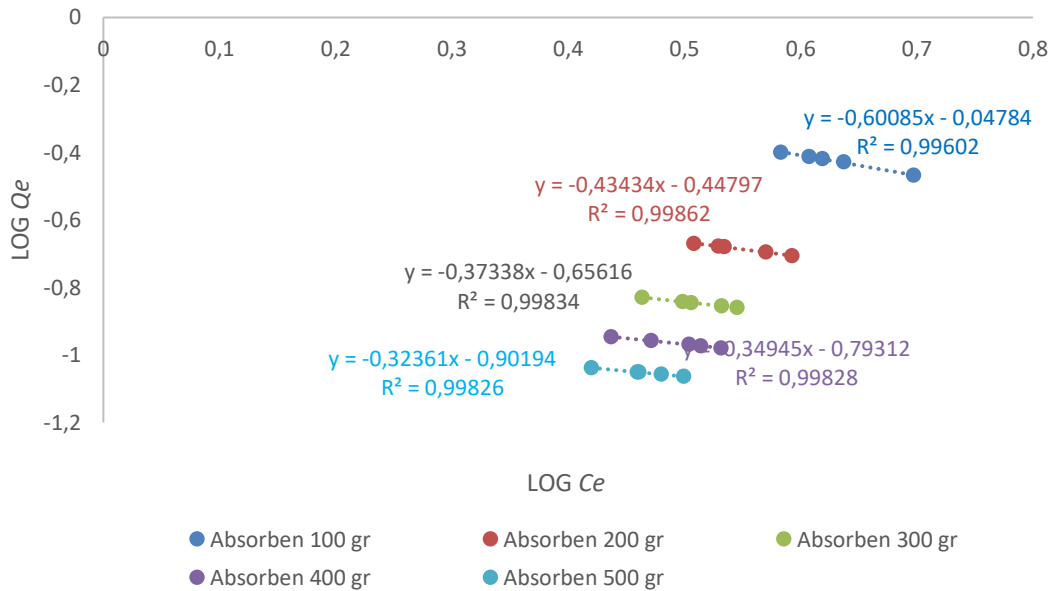
dengan baik Al-Ghouthi, M. A., dkk. (2020). Semakin tinggi nilai R^2 , semakin baik model Langmuir dalam menggambarkan proses adsorpsi yang terjadi. Pada Gambar 6 dan Gambar 7 semua variasi massa adsorben, nilai koefisien determinasi (R^2) baik parameter Fe maupun Mn mendapatkan nilai R^2 yang mendekati nilai 1. Hal ini mengindikasikan bahwa model isoterm Langmuir sangat sesuai untuk menggambarkan proses adsorpsi yang terjadi.

Isoterm Adsorpsi Freundlich

Isoterm adsorpsi Freundlich adalah salah satu model yang sering digunakan untuk menggambarkan perilaku adsorpsi pada permukaan heterogen. Yang dapat diaplikasikan dalam Adsorpsi kontaminan dalam air dan limbah (seperti logam berat, zat organik, dll), Adsorpsi gas pada permukaan padat, Adsorpsi zat warna pada karbon aktif, dan Adsorpsi obat-obatan pada biomassa (Hutson, N. D., dkk. 1997). Grafik persamaan linear dari isoterm Freundlich tersebut dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9



Gambar 8. Grafik Persamaan Isoterm Freundlich Penyerapan Fe



Gambar 9. Grafik Persamaan Isoterm Freundlich Penyerapan Mn

Persamaan garis regresi linier untuk masing-masing berat adsorben ditampilkan, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang cukup baik, berkisar antara 0,9474 hingga 0,9916 pada Persamaan Isoterm Freundlich Penyerapan Fe dan 0,99602 hingga 0,99862. Nilai determinasi (R^2) ini menunjukkan proses absorpsi sesuai dengan metode Isoterm adsorpsi Freundlich.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Scanning Electron Microscopy (SEM) morfologi partikel fly ash batubara yang belum diaktivasi memiliki Partikel-partikel fly ash memiliki struktur yang tidak teratur, bersudut, dan berpori, yang merupakan karakteristik khas dari fly ash. Sedangkan setelah diaktivasi secara kimia dengan menggunakan larutan NaOH 6 M mengubah morfologi dan struktur partikel fly ash, menjadi lebih berpori dibandingkan sebelum aktivasi. Peningkatan porositas dan variasi ukuran partikel dapat terlihat, seperti yang ditandai oleh lingkaran hijau. Perubahan-perubahan struktur tersebut dapat meningkatkan luas permukaan spesifik partikel fly ash, sehingga meningkatkan potensi aplikasinya sebagai adsorben.
2. Efisiensi adsorpsi Fe meningkat seiring dengan peningkatan dosis adsorben. Efisiensi tertinggi mencapai 99,95% pada dosis adsorben 500 gram dan waktu kontak 50 menit. Efisiensi adsorpsi Fe meningkat seiring dengan peningkatan dosis adsorben. Efisiensi tertinggi mencapai 99,95% pada dosis adsorben 500 gram dan waktu

kontak 50 menit. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak permukaan kontak dan pori-pori yang tersedia, semakin efektif fly ash dalam menyerap Fe dan Mn dari limbah.

3. Adsorpsi Fe dan Mn pada limbah air asam tambang Semua variasi massa adsorben, nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh dari persamaan garis linier berada di atas 0,95. Nilai R^2 yang mendekati 1 mengindikasikan bahwa model isoterm Langmuir sangat sesuai untuk menggambarkan proses adsorpsi yang terjadi. Hal ini menunjukkan bahwa asumsi-asumsi dalam model Langmuir, seperti adsorpsi terjadi pada permukaan homogen dan terbentuknya monolayer adsorbat, cukup terpenuhi dalam sistem adsorpsi yang diteliti.
4. Persamaan garis regresi linier untuk masing-masing berat adsorben menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) yang cukup baik, berkisar antara 0,9474 hingga 0,9916 untuk penyerapan Fe, dan 0,99602 hingga 0,99862 untuk penyerapan Mn. Hal ini menunjukkan bahwa model Freundlich dapat menggambarkan proses penyerapan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327-363.
- Al-Ghouti, M. A., Da'ana, D. A., Khraisheh, M., & Ahmad, M. N. (2020). Competitive adsorption of dyes on activated carbon derived from olive stones: Experimental and computational study. *Chemical Engineering Journal*, 389, 124401.
- Dewi, I. R., Purwanto, A., & Yulianto, A. (2018). Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution Using Activated Carbon Derived from Coconut Shell. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 343, 012024.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2-10.
- Hayati, S. 2020. Upaya Penetralan Air Asam Tambang dengan Menggunakan Membran Keramik di CV.Tahiti Coal Sawahlunto. Sekolah Tinggi Teknologi Industri Padang: Padang.
- Hidayat, A., Radjaram, A., Prasetyo, D. E., & Trihadiningrum, Y. (2020). Adsorption of methylene blue using activated carbon from palm kernel shell. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 456(1), 012062.

- Hutson, N. D., Yang, R. T., & Kazantzis, N. (1997). Adsorbent Characterization and Adsorption Processes for Carbon Dioxide Separation. In Gas Separation and Purification (Vol. 11, No. 3, pp. 151-157). Pergamon.
- Izidoro, J. C., Fungaro, D. A., dos Santos, F. S., & Wang, S. (2013). Characteristics of Brazilian coal fly ashes and their application in synthesized zeolites. *Fuel Processing Technology*, 97, 38-44.
- Jefri.H, 2021. Pengaruh Penguat Fly Ash dan Karbon Hitam Terhadap Sifat Keramik Kaolin untuk Material Pelapis Pipa Baja Penyalur Limbah Fly Ash. Universitas Lampung: Bandar Lampung.
- Lestari, S. D., Syafruddin, S., & Hidayat, N. (2019). Activated carbon from palm kernel shell for adsorption of methylene blue dye. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 557(1), 012036.
- Nugroho, W. A., Hamid, H., & Muharam, Y. (2021). Adsorption of lead (Pb) from aqueous solution using activated carbon prepared from durian shell. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 733(1), 012014.
- Putri Ayu, Selia. 2021. Efektivitas Karbon Aktif dari Tandan Kosong Kelapa Sawit pada Penurunan Logam Besi (Fe) dalam Limbah Cair Artifisial. Politeknik Negeri Sriwijaya.
- Rahayu.S.L. 2022. Analisis Pemanfaatan Fly Ash Hasil Pembakarwn Batubara PLTU Terhadap Upaya Penetralan Air Asam Tambang (AAT) Batubara di Kecamatan Palaran Kota Samarinda Kalimantan Timur. Universitas Hasanuddin: Makassar.
- Raspi, N.N.L. 2023. Studi Pemanfaatan Fly Ash Sebagai Pengganti Sebagian Semen Ditinjau Dari Kuat Tekan dan Daya Serap Air Batako. Universitas Muhammadiyah Mataram: Mataram.
- Rendy. A. 2021. Studi Netralisasi Air Asam Tambang dengan Metode Aerasi dan Menggunakan Fly Ash Batubara di PT Bukit Asam Tbk. Tanjung Enim. Universitas Sriwijaya: Palembang
- Riam, M.A., Rizto, S.Z. dan Muhammad.R.F. 2021. Analisis Pengaruh Penggunaan Fly Ash dan Kapur Tohor pada Penetralan pH Air Asam Tambang di PT. Mandiangin Bara Prima. *Jurnal Sains dan Teknologi* Vol. 21 no. 1, Juni 2021.Padang.
- Said. N.I., 2014. Teknologi Pengolahan Air Asam Tambang Batubara "Alternatif Pemilihan Teknologi". *JAI* Vol. 7 No. 2, 2014. Pusat Teknologi Lingkungan, BPPT.
- Subriyer. N., Dkk. Aplikasi Berbagai Jenis Adsorben pada Pengolahan Air Asam Tambang Sintetik Skala Mini Plant. *Jurnal Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*: 249-256. Universitas Sriwijaya: Palembang.

- Suhermono., Athaillah. M., Emmy. S.M., dan Chairuddin. GT. 2014. Analisis Kandungan Besi (Fe), Mangan (Mn), dan pH Air Tamah Hasil Pemboran Geoteknik di Tambang Batubara PT Adaro Indonesia Kabupaten Tabalong dan Balangan Provinsi Kalimantan Selatan. *EnviroScientea* 10(2014) 103-111; ISSN 1978-8096.
- Visa, I. (2016). Trends in renewable energy sources utilization across the world. *Energy Procedia*, 85, 566-577.
- Wang, S., & Wu, H. (2006). Environmental-benign utilisation of fly ash as low-cost adsorbents. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 482-501.
- Wang, S., Boyjoo, Y., Choueib, A., & Zhu, Z. H. (2005). Removal of dyes from aqueous solution using fly ash and red mud. *Water Research*, 39(1), 129-138.
- Wang, X., Shen, Y., Guo, S., & Wang, F. (2019). Removal of heavy metals from aqueous solutions using various low-cost adsorbents obtained from agricultural and industrial wastes. *Journal of Environmental Management*, 246, 130-140.
- Wardani. L.D.K. 2018. Karakteristik Fly Ash (Abu Layang) Batubara Sebagai Material Adsorben pada Limbah Cair yang Mengandung Logam. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Yao, Z., Wang, L., & Qi, J. (2015). Adsorption of heavy metals by fly ash and slag from flue gas desulfurization (FGD): Competition and specificity. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 34(3), 675-681.
- Yulianis., Riskal.H., Novita.D.I.Z., dan Mahidin. 2022. Adsorpsi Ion Logam Fe³⁺ dalam Air Asam Tambang Menggunakan Nano Zeolit Alam. Direktorat Jendral Mineral dan Batubara, Kementerian ESDM dan Universitas Syiah Kuala.