

## Pemanfaatan *Fly Ash* PLTU X sebagai Adsorben *Total Dissolved Solid* (TDS) dalam Pengolahan Air Limbah

Indah Pratiwi <sup>1\*)</sup>, Zahra Ananda Lanos <sup>1)</sup>, Nadia Melisa Fitri <sup>1)</sup>, Ahmad Zydan Alhabsyi <sup>1)</sup>, Riski Apriansyah, <sup>1)</sup> Zurohaina, <sup>1)</sup> Isnandar Yunanto <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Teknik Energi, Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya

<sup>\*)Correspondence Author: indahp@polsri.ac.id</sup>

]

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan memanfaatkan *fly ash* dari PLTU X sebagai adsorben untuk menurunkan kadar *Total Dissolved Solid* (TDS) pada air limbah. Aktivasi *fly ash* dilakukan menggunakan larutan HCl dan NaOH pada konsentrasi 6M dan 8M melalui perendaman selama 24 jam, dilanjutkan pencucian hingga pH netral, pengeringan pada 105 °C, dan penyimpanan dalam desikator. Uji adsorpsi dilakukan dengan variasi waktu kontak 30, 60, dan 120 menit. Kadar TDS dihitung berdasarkan konduktivitas menggunakan persamaan empiris  $TDS = k \times EC$ , dengan konstanta k ditetapkan sebesar 0,5 mg/L per  $\mu\text{S/cm}$ . Hasil penelitian menunjukkan aktivasi menggunakan NaOH 8 M menghasilkan efektivitas adsorpsi tertinggi sebesar 15,35% pada waktu kontak 120 menit. Analisis regresi linier memberikan nilai  $R^2 > 0,99$ , menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara waktu kontak dan efektivitas adsorpsi. Temuan ini mengindikasikan bahwa *fly ash* teraktivasi dapat menjadi adsorben potensial dalam pengolahan air limbah.

**Kata Kunci:** *Fly Ash*, Adsorpsi, TDS, Air Limbah, PLTU

### PENDAHULUAN

Di tengah era digitalisasi ini, listrik adalah salah satu kebutuhan yang tidak bisa dilepaskan dari kehidupan sehari-hari manusia. Dalam memenuhi kebutuhan nasional, Indonesia sendiri masih mengandalkan penggunaan bahan bakar konvensional seperti batu bara. Setidaknya 54% pembangkit listrik di Indonesia adalah pembangkit listrik tenaga uap yang menggunakan bahan bakar batu bara (Kementrian ESDM, 2024). PLTU X adalah salah satu pembangkit listrik tenaga uap yang berkontribusi dalam memenuhi kebutuhan listrik nasional tersebut. Salah satu tantangan di sistem pembangkit listrik tenaga uap ini adalah limbah atau produk sampingan dari pembakaran batu bara. *Fly ash* atau abu terbang adalah limbah utama yang dihasilkan oleh PLTU X. *Fly ash* adalah senyawa anorganik kompleks, yang mana jika tidak dikelola dengan benar maka akan berdampak dalam mencemari lingkungan (Triana, 2023). Secara global pembakaran batu bara sendiri setidaknya menghasilkan lebih dari 500 miliar ton *fly ash* per tahun, namun hanya 25-30% yang dimanfaatkan (Mathapati *et al.*, 2022). Berdasarkan data primer pada PLTU X, *fly ash* yang dihasilkan setidaknya sebanyak 150 ton per hari. Namun, sebagian besar limbah ini hanya ditimbun di area terbuka tanpa pengolahan lebih lanjut. Dampak lingkungan yang dapat timbul dari penumpukan *fly ash* meliputi pencemaran tanah dan air, penurunan pH tanah, serta gangguan terhadap ekosistem dan rantai makanan (Munawer, 2018).

Dewasa ini, pemanfaatan *fly ash* di berbagai sektor menjadi hal yang dikembangkan oleh banyak peneliti. Ditemukan bahwa banyak dampak positif dalam pemanfaatan kembali limbah *fly ash*,

baik bagi lingkungan maupun industri. Bagi industri, penggunaan *fly ash* dapat membantu mengurangi biaya pembuangan limbah, menghemat penggunaan lahan sebagai tempat penimbunan, serta *fly ash* juga dapat menggantikan sumber daya alam yang berharga (Triana, 2023). *Fly ash* dapat menggantikan sumber daya alam yang berharga dikarenakan komposisi dari *fly ash* yang kaya akan mineral. Adapun komposisi kimia dominan dari *fly ash* adalah silika ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), dan besi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Kandungan tambahan lainnya dapat bervariasi tergantung pada asal pembangkit. Namun, secara umum *fly ash* memiliki karakteristik yang berpotensi untuk dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi teknik dan lingkungan (Yadav & Fulekar, 2020). Meninjau kandungan silika ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) yang tinggi di *fly ash*, hal ini membuat *fly ash* berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai adsorben dalam proses adsorpsi *Total Dissolved Solid* (TDS) pada air limbah. Kandungan  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  diketahui berperan penting dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi karena memiliki luas permukaan dan volume pori-pori yang besar, sehingga efektif sebagai bahan adsorben didalam proses penurunan TDS (Bahrin *et al.*, 2023). *Total Dissolved Solid* (TDS) adalah salah satu parameter dalam pengolahan air bersih, TDS sendiri mengarah kepada zat tersuspensi yang umumnya mengacu pada padatan terlarut didalam air. TDS sendiri mengacu kepada setiap mineral, logam berat, kation, anion, yang terlarut didalam air (Kusniawati *et al.*, 2023). Kandungan TDS dalam air berdampak kepada kesehatan dan lingkungan. Misalnya, kandungan TDS dalam air dapat menyebabkan efek pada manusia seperti gangguan gastrointestinal, kardiovaskular, genotoksik, pernapasan, kulit, dan hati (Pushpalatha *et al.*, 2022). Dalam penghilangan kandungan TDS dalam air limbah sendiri, salah satu metode yang bisa digunakan adalah adsorpsi.

Adsorpsi adalah proses fisikokimia di mana zat baik organik maupun anorganik, seperti logam berat dan mineral dari air limbah akan menempel pada permukaan padatan yang disebut adsorben (Pushpalatha *et al.*, 2022). Silika menjadi material umum yang digunakan sebagai adsorben logam seperti besi (Fe) karena memiliki gugus aktif seperti Si-O-Si dan Si-OH. Silika mempunyai keunggulan sifat unik yang sukar ditemukan di senyawa anorganik lain. Contohnya silika memiliki sifat *inert*, mempunyai kemampuan adsorpsi dan pertukaran ion yang baik serta memiliki kestabilan termal dan mekanik yang tinggi (Deram *et al.*, 2024). Pada kajian kali ini, dilakukan proses adsorpsi untuk mengurangi kadar *Total Dissolved Solid* (TDS) pada limbah cair di instalasi pengolahan air limbah (*waste water treatment*) pada PLTU X. Meskipun parameter baku mutu pada limbah tersebut sudah tercapai sebelum dibuang ke lingkungan, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan pemanfaatan *fly ash* dari PLTU X sebagai adsorben sebagai langkah aplikatif untuk mendukung pengelolaan limbah. Berbagai studi telah mengungkap potensi *fly ash* sebagai material adsorben dalam pengolahan air limbah industri. Salah satu contohnya adalah penelitian oleh Wardani *et al.* (2023) yang mengevaluasi efektivitas abu terbang batu bara teraktivasi dalam menurunkan kadar logam Fe pada limbah cair di PT POMI. Penelitian lain oleh Sari *et al.* (2024) memanfaatkan *fly ash* dari PLTU Bukit Asam yang diaktivasi menggunakan NaOH untuk mengurangi kandungan logam Fe dan Mn dalam air asam tambang. Kedua studi tersebut memperluas pemahaman mengenai aplikasi *fly ash* sebagai adsorben dalam konteks pengolahan air. Sebagai bentuk pengembangan lebih lanjut dari kajian-kajian tersebut, penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan *fly ash* hasil limbah dari PLTU X sebagai adsorben untuk pengolahan air limbah dari fasilitas *Wastewater Treatment Plant* (WWTP). Fokus utama penelitian ini adalah mengevaluasi kemampuan *fly ash* dalam menurunkan kadar *Total Dissolved Solid* (TDS) dalam air limbah. Untuk memperoleh efektivitas optimum, penelitian ini memvariasikan jenis aktivator (HCl dan NaOH), konsentrasi aktivator, serta waktu kontak dalam proses adsorpsi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh jenis aktivator HCl dan NaOH, terhadap efektivitas *fly ash* sebagai adsorben dalam menurunkan kadar *Total Dissolved Solids* (TDS) pada air limbah dari WWTP. Selain itu, penelitian ini juga menelaah pengaruh variasi konsentrasi

aktivator terhadap kemampuan adsorpsi *fly ash*, serta mengevaluasi bagaimana waktu kontak memengaruhi kinerja adsorpsi dalam proses pengolahan air limbah. Diharapkan hasil penelitian ini tidak hanya memperkaya referensi ilmiah mengenai pemanfaatan *fly ash*, tetapi juga memberikan solusi praktis yang mendukung efisiensi dan keberlanjutan dalam pengolahan air limbah industri. Secara lingkungan, penggunaan *fly ash* sebagai adsorben berpotensi mengurangi pencemaran serta volume limbah padat yang dibuang ke lingkungan. Lebih jauh, penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sosial dengan mendukung pelestarian sumber daya air dan membuka peluang penerapan teknologi lokal yang berkelanjutan.

## METODOLOGI PENELITIAN

Alat yang digunakan dalam penelitian ini mencakup neraca analitik, spatula, gelas kimia, gelas ukur, pipet ukur, labu ukur, batang pengaduk, *crucible*, oven, desikator, pH meter, serta konduktometer. Bahan yang digunakan antara lain akuades, kertas saring Whatman *grade 42*, serta larutan HCl dan NaOH. Sampel penelitian terdiri dari *fly ash* dan air limbah dari *Wastewater Treatment Plant* (WWTP) di PLTU X. Dalam penelitian ini, *fly ash* dari PLTU X digunakan sebagai adsorben setelah melalui proses aktivasi. Sebanyak 12 sampel *fly ash* dengan masing-masing seberat 5 gram ditimbang. Setiap sampel direndam ke dalam 50 ml larutan aktivator HCl dan NaOH dengan konsentrasi 6 M dan 8 M. Proses perendaman dilakukan selama 24 jam. Selanjutnya, sampel disaring menggunakan kertas saring Whatman *grade 42*, dicuci menggunakan akuades hingga pH netral, kemudian dikeringkan pada suhu 105 °C selama 1 jam lalu disimpan di dalam desikator selama 20 menit. Air limbah dari WWTP PLTU X digunakan sebagai media uji dengan volume 50 ml untuk setiap sampel, yang ditempatkan dalam gelas kimia berkapasitas 100 ml. Proses adsorpsi dilakukan dengan memvariasikan jenis aktivator yang digunakan pada *fly ash*, yaitu HCl dan NaOH, konsentrasi aktivator 6 M dan 8 M, serta waktu kontak di 30, 60, dan 120 menit.

Data penelitian diperoleh melalui pengukuran langsung di laboratorium PLTU X terhadap sampel air limbah dari WWTP. Parameter yang diamati adalah konduktivitas, sedangkan *Total Dissolved Solid* (TDS) dihitung berdasarkan nilai konduktivitas dan konstanta spesifik konduktivitas air menggunakan Persamaan 1. Data karakteristik kimia *fly ash* diperoleh langsung dari PLTU X, dan sebagai pendukung digunakan pula literatur relevan yang bersumber dari perusahaan maupun dari luar, seperti buku, jurnal, dan situs web.

Larutan hasil perlakuan dianalisis di laboratorium PLTU X untuk menilai perubahan kualitas air. Konduktivitas diukur menggunakan konduktometer, sedangkan nilai *Total Dissolved Solid* (TDS) dihitung dengan Persamaan 1 (Rusydi, 2018).

$$TDS = k \times EC \dots \dots \dots (1)$$

TDS dinyatakan dalam satuan mg/L, k adalah konstanta spesifik konduktivitas air, dan *Electrical Conductivity* (EC) merupakan konduktivitas spesifik yang dinyatakan dalam  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Hasil pengukuran konduktivitas sampel berada pada rentang 3-4  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Menurut Rusydi (2018), pada rentang tersebut konstanta spesifik konduktivitas air ditetapkan sebesar 0,5 TDS/EC.

Data hasil pengukuran laboratorium diolah menggunakan metode kuantitatif. Hasil pengujian setiap sampel dihitung untuk memperoleh persentase efektivitas adsorpsi pada sampel air limbah sebelum dan sesudah perlakuan (Sari *et al.*, 2024). Selanjutnya, dilakukan analisis regresi linier untuk mengevaluasi pengaruh signifikan jenis aktivator, konsentrasi aktivator, dan waktu kontak terhadap penurunan kadar TDS, serta konduktivitas dalam sampel. Analisis statistik ini dijalankan menggunakan Microsoft Excel, dan interpretasi hasil berdasarkan nilai signifikansi (*p-value*). Kesimpulan ditarik dengan tingkat kepercayaan 95% ( $\alpha = 0,05$ ).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik *Fly Ash* sebagai Adsorben

Adsorben yang digunakan dalam penelitian ini adalah *fly ash* dari PLTU X yang telah melalui proses aktivasi. *Fly ash* di PLTU X merupakan residu hasil pembakaran batu bara, di mana limbah ini terbawa bersama *flue gas* kemudian ditangkap dan dipisahkan dengan menggunakan *Electrostatic Precipitator* (ESP). Abu terbang tersebut memiliki ciri fisik berwarna abu-abu dengan ukuran partikel halus sekitar  $\pm 200$  mesh.

Sebagai perbandingan, penelitian Sari *et al.* (2024) memanfaatkan *fly ash* dari PLTU Bukit Asam sebagai adsorben. Penelitian tersebut hanya menyinggung bahwa senyawa kimia seperti  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  berperan penting dalam proses adsorpsi, namun belum menyajikan data komposisi kimia secara detail maupun dalam bentuk tabel. Hal ini menjadi keunggulan penelitian ini, karena karakterisasi kimia *fly ash* dari PLTU X ditampilkan secara rinci pada Tabel 1 dibawah ini.

**Tabel 1. Komposisi *fly ash* di PLTU X**

Komposisi	%wt
$\text{SiO}_2$	67,23
$\text{Al}_2\text{O}_3$	8,21
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,30
CaO	3,51
MgO	0,73
$\text{SO}_3$	0,64
$\text{Na}_2\text{O}$	0,35
$\text{K}_2\text{O}$	0,32

Kandungan utama *fly ash* PLTU X yang tinggi pada  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  menunjukkan kesesuaiannya sebagai material adsorben. Menurut Astuti *et al.* (2020), senyawa-senyawa tersebut berkontribusi dalam meningkatkan daya serap melalui pembentukan struktur berpori dan memperluas permukaan aktif.

Sebelum digunakan, *fly ash* terlebih dahulu diaktivasi untuk meningkatkan reaktivitas permukaan serta membuka pori-porinya. Proses ini bertujuan memperbesar luas permukaan efektif sehingga kapasitas adsorpsinya terhadap zat terlarut dalam limbah cair meningkat. Purbasari *et al.* (2020) menjelaskan bahwa aktivasi mampu menghasilkan struktur *fly ash* dengan luas permukaan lebih besar dan distribusi pori yang lebih optimal dalam mengadsorpsi ion logam berat.

### Korelasi Antara Nilai Konduktivitas dan Nilai *Total Dissolved Solid* (TDS)

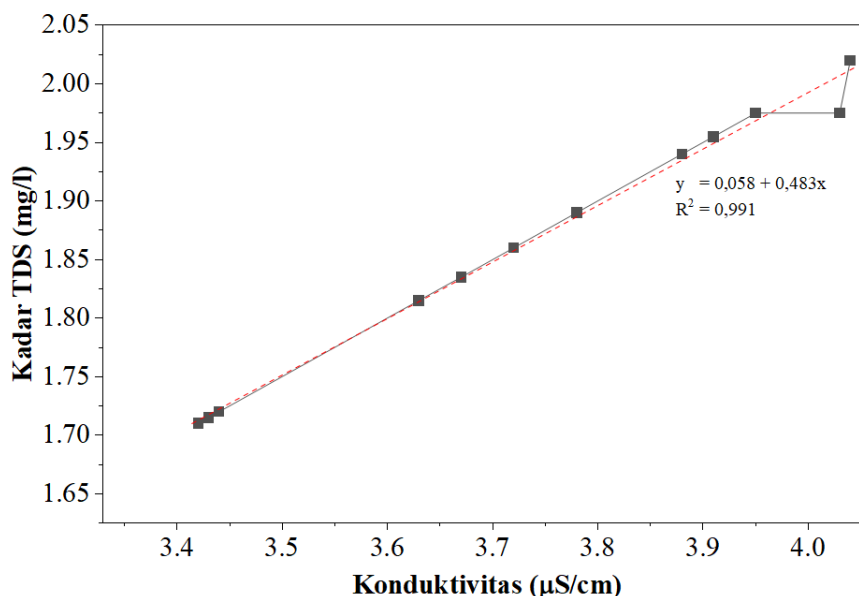
Pada bagian ini membahas hubungan antara nilai konduktivitas dan *Total Dissolved Solid* (TDS) pada sampel air yang dianalisis. Analisis ini penting untuk mengetahui sejauh mana konduktivitas dapat dijadikan indikator empiris dalam memperkirakan jumlah padatan terlarut, sehingga proses evaluasi kualitas air dapat dilakukan dengan lebih efisien.

Konduktivitas didefinisikan sebagai kemampuan suatu zat untuk menghantarkan arus listrik (Hem & Survey, 1985). Parameter ini banyak digunakan sebagai salah satu indikator kualitas air karena sensitif terhadap keberadaan ion-ion terlarut. Sementara itu, *Total Dissolved Solid* (TDS) mengacu pada jumlah total padatan terlarut yang mencakup mineral, logam berat, kation, dan anion yang terdapat dalam air (Kusniawati *et al.*, 2023).

Penentuan nilai TDS secara langsung sangat penting untuk menilai kualitas air. Namun, metode pengukurannya memerlukan prosedur yang relatif kompleks dan biaya yang cukup mahal. Oleh karena itu, pendekatan empiris yang menghubungkan nilai konduktivitas dengan nilai TDS sering digunakan

untuk memperkirakan kandungan padatan terlarut. Hubungan ini dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan empiris sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 1 (Rusydi, 2018).

Gambar 1 menunjukkan hasil pengolahan data primer yang diperoleh dari pengukuran konduktivitas dan estimasi nilai TDS pada sampel air yang dianalisis. Pola linier yang terlihat pada grafik tersebut konsisten dengan hubungan empiris yang telah banyak digunakan dalam penelitian kualitas air, dengan pendekatan teoritis yang diadaptasi dari Hem & Survey (1985) dan Rusydi (2018). Persamaan regresi pada Gambar 1, yaitu  $y = 0,058 + 0,483x$  dengan  $R^2 = 0,991$  menunjukkan korelasi yang sangat kuat antara nilai konduktivitas dan TDS dalam rentang data yang diamati.

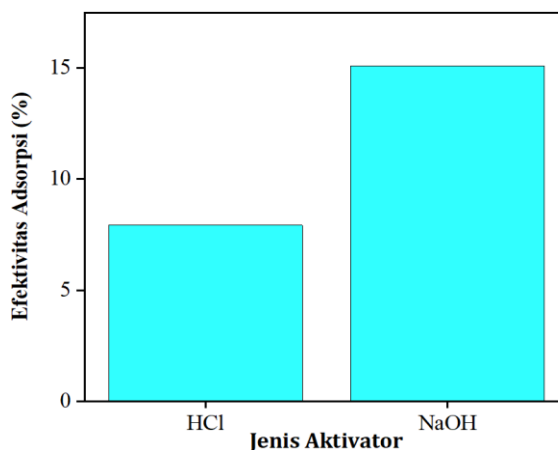


Gambar 1. Hubungan linier antara konduktivitas dan TDS berdasarkan data pengukuran Lapangan

Dengan demikian hasil yang didapatkan mengindikasikan bahwa konduktivitas dapat dijadikan indikator praktis untuk memperkirakan TDS atau jumlah padatan terlarut pada air. Peningkatan nilai konduktivitas didalam kajian ini sejalan dengan peningkatan konsentrasi TDS, sehingga parameter ini dapat digunakan sebagai metode estimasi yang cepat dan efisien.

#### **Pengaruh Jenis Aktivator terhadap Efektivitas Adsorpsi**

Salah satu variabel yang dikaji dalam penelitian ini adalah jenis aktivator pada proses aktivasi *fly ash*. Penelitian terdahulu oleh Sari *et al.* (2024) dan Wardani *et al.* (2023) memanfaatkan *fly ash* sebagai adsorben tetapi tidak membahas peran aktivator, khususnya aktivator asam seperti HCl. Untuk itu, penelitian ini membandingkan dua jenis aktivator, yaitu larutan asam (HCl) dan larutan basa (NaOH), dengan tujuan menganalisa pengaruhnya terhadap efektivitas adsorpsi. Pada pengujian ini variabel konsentrasi aktivator dan waktu kontak ditetapkan secara konstan, yaitu 6 M dan 120 menit, sehingga analisis dapat difokuskan pada perbedaan jenis aktivator. Hasil pengujian ditampilkan pada Gambar 2.



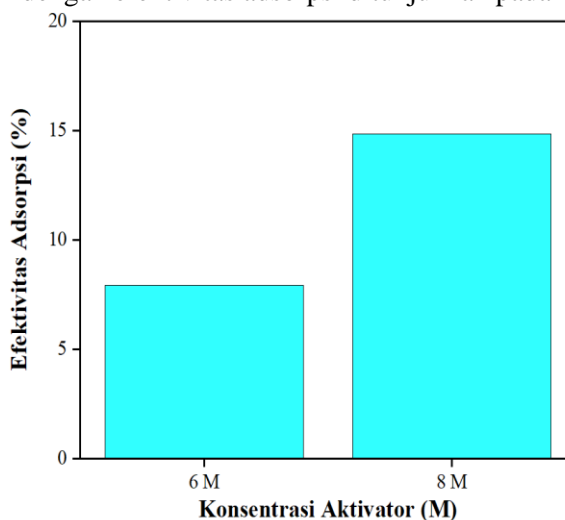
**Gambar 2. Pengaruh jenis aktivator**

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 2, *fly ash* yang diaktivasi dengan NaOH memiliki efektivitas adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan HCl. Efektivitas adsorpsi tertinggi mencapai 15,1% menggunakan NaOH, sedangkan aktivasi dengan HCl hanya sebesar 7,92%. Temuan ini mengindikasikan bahwa larutan basa lebih efektif dalam memperluas struktur pori dan meningkatkan jumlah gugus hidroksil (-OH) pada permukaan material.

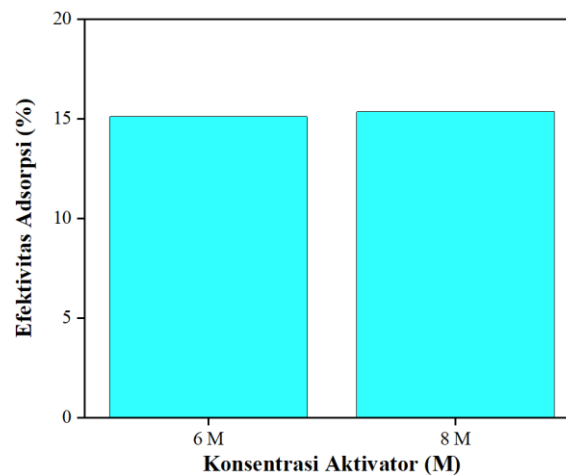
Hasil pengujian ini sejalan dengan temuan Cai *et al.* (2023) yang menjelaskan bahwa perlakuan dengan NaOH menghasilkan distribusi amorf yang merata pada permukaan *fly ash*, sehingga memperluas area aktif dan meningkatkan kemampuan adsorpsi. Sedangkan, aktivasi menggunakan HCl kurang optimal karena sifat asam hanya berfungsi membersihkan permukaan tanpa menambah jumlah gugus hidroksil. Kondisi asam juga dapat melarutkan sebagian komponen silika dan alumina, yang pada akhirnya merusak struktur pori yang berperan penting dalam proses adsorpsi. Qi *et al.* (2020) menjelaskan bahwa lingkungan asam dapat memicu reaksi kimia tambahan pada *fly ash* dan menyebabkan degradasi strukturnya.

#### **Pengaruh Konsentrasi Aktivator terhadap Efektivitas Adsorpsi**

Selain jenis aktivator, konsentrasi larutan juga berperan penting dalam menentukan efektivitas adsorpsi. Oleh karena itu, variasi konsentrasi perlu dianalisis untuk mengoptimalkan proses aktivasi kimia. Uji variasi konsentrasi ini dilakukan selama 120 menit untuk masing-masing aktivator. Hubungan antara konsentrasi aktivator dengan efektivitas adsorpsi ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4.



**Gambar 3. Pengaruh konsentrasi aktivator HCl terhadap efektivitas adsorpsi**



**Gambar 4. Pengaruh konsentrasi aktivator NaOH terhadap efektivitas adsorpsi**

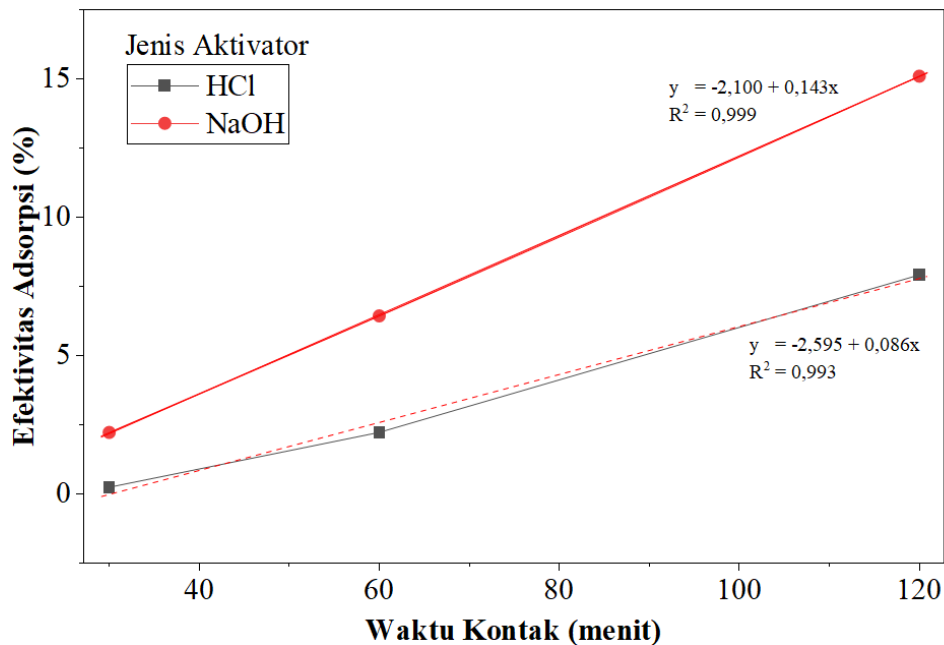
Hasil penelitian menunjukkan adanya variasi efektivitas adsorpsi pada setiap konsentrasi aktivator. Pada HCl, efektivitas adsorpsi TDS meningkat dari 7,92% pada 6 M menjadi 14,85% pada 8 M. Pada aktivator NaOH, efektivitas adsorpsi TDS meningkat dari 15,1 menjadi 15,35% pada variasi konsentrasi yang sama. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem mungkin telah mencapai titik optimum aktivasi, sehingga penambahan konsentrasi NaOH tidak lagi memberikan peningkatan efektivitas yang signifikan.

Fenomena ini terjadi dikarenakan peningkatan konsentrasi dapat memperbaiki karakteristik adsorben melalui pembentukan pori-pori baru dan penambahan jumlah situs aktif, sehingga kapasitas adsorpsi ion semakin optimal. Menurut HR *et al.* (2023) konsentrasi aktivator yang lebih tinggi mampu memperbesar kapasitas adsorpsi dan luas permukaan karbon melalui pembentukan pori baru akibat terlarutnya tar dan zat volatil saat pencucian. Temuan ini sejalan dengan penelitian pada mineral glauconite oleh Hamd *et al.* (2023) yang menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi terbukti menambah situs aktif sekaligus mempercepat laju adsorpsi ion logam.

#### **Pengaruh Waktu Kontak terhadap Efektivitas Adsorpsi**

Pengaruh waktu kontak terhadap efisiensi adsorpsi merupakan faktor penting yang menentukan jumlah adsorbat yang dapat terikat hingga tercapai kondisi kesetimbangan (Sadhu *et al.*, 2021). Oleh karena itu, pada kajian ini dilakukan variasi waktu kontak pada proses adsorpsi menggunakan adsorben *fly ash* teraktivasi, dengan variasi waktu 30, 60, dan 120 menit. Hasil pengolahan data ditampilkan pada Gambar 5, yang menunjukkan hubungan linier positif antara waktu kontak dan efisiensi adsorpsi pada konsentrasi aktivator 6 M.

Pada Gambar 5, didapatkan hasil bahwa untuk adsorben yang diaktivasi dengan HCl, diperoleh persamaan regresi linier  $y = -2,595 + 0,086x$  dengan koefisien determinasi  $R^2 = 0,993$ . Sementara itu, pada adsorben yang diaktivasi dengan NaOH, persamaan regresi linier yang diperoleh adalah  $y = -2,100 + 0,143x$  dengan  $R^2 = 0,999$ , yang menunjukkan tingkat korelasi yang sangat kuat. Berdasarkan hasil kajian ini, diperoleh bahwa peningkatan waktu kontak berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi adsorpsi hingga mencapai titik optimum pada waktu kontak 120 menit. Hal ini terlihat dari nilai regresi linier yang sangat tinggi ( $R^2 > 0,99$ ), baik pada sampel dengan aktivator HCl maupun NaOH, yang menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara kedua variabel.



**Gambar 5. Pengaruh waktu kontak terhadap efektivitas adsorpsi**

Fenomena ini dapat terjadi dikarenakan pada waktu kontak yang terlalu singkat, sebagian besar situs aktif adsorben belum terisi sehingga proses adsorpsi belum berjalan optimal. Seiring bertambahnya waktu, jumlah adsorbat yang terikat meningkat hingga mencapai titik maksimum. Setelah kondisi kesetimbangan tercapai, penambahan waktu kontak tidak memberikan peningkatan efisiensi yang signifikan, karena adsorben telah mencapai titik jenuh (Kusumaningrum *et al.*, 2022). Temuan ini menegaskan pentingnya penentuan waktu kontak optimum untuk memaksimalkan kapasitas adsorpsi sekaligus mencegah pemborosan waktu dan material.

## KESIMPULAN

Hasil kajian ini menunjukkan bahwa *fly ash* yang berasal dari limbah PLTU X berpotensi besar dimanfaatkan sebagai adsorben untuk menurunkan kandungan *Total Dissolved Solid* (TDS) pada air limbah di *Wastewater Treatment Plant* (WWTP). Penurunan kadar TDS terkonfirmasi melalui hubungan linier yang kuat antara nilai konduktivitas dan TDS ( $R^2 > 0,99$ ), sehingga konduktivitas dapat dijadikan indikator praktis untuk memantau efektivitas proses adsorpsi.

*Fly ash* yang diaktivasi dengan NaOH menunjukkan efektivitas adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan aktivasi menggunakan HCl, dengan efektivitas maksimum mencapai 15,1% berbanding 7,92%. Aktivasi menggunakan konsentrasi yang lebih tinggi juga meningkatkan efektivitas adsorpsi. Efektivitas adsorpsi pada NaOH dan HCl dengan konsentrasi 8 M masing-masing meningkat menjadi 15,35% dan 14,85%. Hasil ini menegaskan bahwa peningkatan konsentrasi aktivator mampu meningkatkan kinerja adsorben hingga batas tertentu.

Selain itu, variasi waktu kontak berpengaruh nyata terhadap efisiensi adsorpsi. Peningkatan waktu kontak menghasilkan peningkatan efisiensi hingga mencapai titik optimum pada 120 menit, setelah itu tidak terjadi peningkatan signifikan akibat sistem mencapai kondisi kesetimbangan. Hal ini menegaskan pentingnya pemilihan waktu kontak optimum agar proses adsorpsi berjalan efektif.

Secara keseluruhan, penelitian ini mengonfirmasi bahwa aktivasi *fly ash* dan optimasi waktu kontak merupakan langkah penting dalam memaksimalkan penurunan kadar TDS pada air limbah. Hasil

ini dapat menjadi dasar pengembangan teknologi pengolahan air limbah berbasis pemanfaatan limbah padat industri, sehingga mendukung konsep ekonomi sirkular dan pengelolaan limbah berkelanjutan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Astuti, D. H., . S., Fadilla, A. K. N., & Mahendra, Y. I. (2020). KAJIAN KUALITAS KOMPOSISI ADSORBEN BERBAHAN BAKU LUMPUR PANAS SIDOARJO. *Jurnal Teknik Kimia*, 14(2). [https://doi.org/10.33005/jurnal\\_tekkim.v14i2.2033](https://doi.org/10.33005/jurnal_tekkim.v14i2.2033)
- Bahrin, D., Rizwan, M., Fauzan, D., Despac, D., Septiana, T. E., Agustina, P., Conniwanti, P., & Selpiana. (2023). *Pembuatan dan karakterisasi  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> sebagai penyangga adsorben untuk penyisihan SO<sub>2</sub> dari gas cerobong PLTU-batubara*. Seminar Nasional Insinyur Profesional (SNIP), Universitas Lampung.
- Cai, Z., Du, B., Dai, X., Wang, T., Wang, J., & Zhang, Y. (2023). Coupling of alkaline and mechanical modified fly ash for HCl and SO<sub>2</sub> removal in the municipal solid waste incineration plant. *Fuel*, 346, 128354. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128354>
- Deram, R., Anarato, A., Lestarani, D., Neolaka, Y., Lawa, Y., Kalla, E., Baunsele, A., Nitti, F., & Naat, J. (2024). Model Isotherm Adsorpsi Triptamin menggunakan Adsorben Silika termodifikasi BSA. *Jurnal Beta Kimia*, 4(2). <https://doi.org/10.35508/jbk.v4i2.19684>
- Hamd, A., Salah, D., Alyafei, H. F., Soliman, N. K., El-Reedy, A. A. M., Elzanaty, A. M., Al-Saeedi, S. I., Al-Ghamdi, A., Shaban, M., El-Sayed, R., & Ahmed, S. A. (2023). NaOH-Activated Natural Glaucosite for Low-Cost Adsorption of Congo Red Dye. *Water*, 15(21), 3753. <https://doi.org/10.3390/w15213753>
- Hem, J., & Survey, U. S. G. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. In *Water Supply Paper* (3rd ed.). <https://doi.org/10.3133/wsp2254>
- HR, Y., Todingbu'a, A., Astuti Herawati, D., Setiawati, H., Musfirah Adhar, A., Ayu Ningsih Putri Zainal, I., & Adriani Idris, I. (2023). KOH Activator Concentration Study on The Capacity and Surface Area of Kluwak Carbon for Methylene Blue Adsorption. *Jurnal Kimia Dan Rekayasa*, 3(2), 46–53. <https://doi.org/10.31001/jkireka.v3i2.47>
- Kementrian ESDM. (2024). *Statistik Ketenagalistrikan 2023* (37th ed.). Sekretaris Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan.
- Kusniawati, E., Sari, D., & Putri, M. (2023). PEMANFAATAN SEKAM PADI SEBAGAI KARBON AKTIF UNTUK MENURUNKAN KADAR pH, TURBIDITY, TSS, DAN

- TDS. *Journal of Innovation Research and Knowledge*, 2, 4183–4198.  
<https://doi.org/10.53625/jirk.v2i10.5405>
- Kusumaningrum, D. I. P., Sudarni, D. H. A., & Wahyuningsih, S. (2022). Optimasi Pengaruh Waktu Kontak dan Dosis Adsorben Limbah Daun Kayu Putih (*Melaleuca cajuputi*) dengan Metode Isoterm Adsorpsi Langmuir. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 11(2), 72–79.  
<https://doi.org/10.32734/jtk.v11i2.9119>
- Mathapati, M., Amate, K., Durga Prasad, C., Jayavardhana, M. L., & Hemanth Raju, T. (2022). A review on fly ash utilization. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1535–1540.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.106>
- Munawer, M. E. (2018). Human health and environmental impacts of coal combustion and post-combustion wastes. *Journal of Sustainable Mining*, 17(2), 87–96.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsm.2017.12.007>
- Purbasari, A., Ariyanti, D., & Sumardiono, S. (2020). Preparation and application of fly ash-based geopolymer for heavy metal removal. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2197). <https://doi.org/10.1063/1.5140918>
- Pushpalatha, N., Vinod, S., Karthik, R., & Saravanan, G. (2022). Total Dissolved Solids and Their Removal Techniques. *International Journal of Environmental Sustainability and Protection*, 2, 13–20. <https://doi.org/10.35745/ijesp2022v02.02.0002>
- Qi, L., Liu, K., Wang, R., Li, J., Zhang, Y., & Chen, L. (2020). Removal of Chlorine Ions from Desulfurization Wastewater by Modified Fly Ash Hydrotalcite. *ACS Omega*, 5(49), 31665–31672. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04074>
- Rusydi, A. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118, 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012019>
- Sadhu, M., Bhattacharya, P., Vithanage, M., & Padmaja Sudhakar, P. (2021). Adsorptive removal of fluoride using biochar – A potential application in drinking water treatment. *Separation and Purification Technology*, 278, 119106.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119106>
- Sari, R., Yerizam, M., & Junaidi, R. (2024). Pemanfaatan Fly Ash Batubara dalam Penurunan Kadar Besi dan Mangan Limbah Air Asam Tambang PT Bukit Asam. *Journal Of Social Science Research*, 4, 688–701.

- Triana, D. (2023). Utilization of Fly Ash in Construction Materials: Review. *Fondasi : Jurnal Teknik Sipil*. <https://doi.org/https://doi.org/10.36055/fondasi.v12i2.20392>
- Wardani, A. P., Maulidz, S. D., Takwanto, A., & Yulianto, E. (2023). PEMANFAATAN FLY ASH SEBAGAI MATERIAL ADSORBEN UNTUK MENURUNKAN KANDUNGAN LOGAM FE PADA LIMBAH CAIR DI UNIT WASTE WATER TREATMENT PLANT PT POMI. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 7(1), 51–57. <https://doi.org/10.33795/distilat.v7i1.183>
- Yadav, V. K., & Fulekar, M. H. (2020). Advances in Methods for Recovery of Ferrous, Alumina, and Silica Nanoparticles from Fly Ash Waste. *Ceramics*, 3(3), 384–420. <https://doi.org/10.3390/ceramics3030034>