

Kinerja Aktivasi dan Impregnasi Fly Ash sebagai Adsorben Fenol

Performance of Activation and Impregnation of Fly Ash as Adsorbent Fenol

Fatimah, Siti Hardianti*, Stephen Octaviannus

Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara,
Jalan Almamater Kampus USU, Medan, 20155, Indonesia

*Email: sitihardianty675@gmail.com

Abstrak

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik dan kinerja *fly ash* sebagai adsorben yang diaktivasi HCl dan diimpregnasi FeCl₃ untuk menyerap fenol. Pada penelitian ini telah dilakukan proses aktivasi *fly ash* dengan menggunakan HCl 8 M selama 2 jam dan diimpregnasi dengan FeCl₃ 2% selama 2 jam. *Fly ash* yang teraktivasi dan terimpregnasi kemudian dianalisis dengan *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spektrofotometer* (SEM-EDX). Hasil karakteristik permukaan *fly ash* teraktivasi dan terimpregnasi menggunakan SEM-EDX menunjukkan terdapat perubahan morfologi dan gugus fungsinya. Kemudian *fly ash* teraktivasi dan terimpregnasi digunakan untuk menyerap fenol pada variasi waktu kontak 60 menit, 120 menit, 180 menit, 240 menit dan 300 menit. Pada waktu kontak 180 menit, diperoleh titik kesetimbangan dengan efisiensi penyerapan sebesar 90,5%. Kinetika pseudo orde dua digunakan untuk adsorpsi fenol oleh *fly ash* yang terimpregnasi Fe⁺ ($R^2 = 0,9916$). Model isoterm yang digunakan pada proses adsorpsi fenol oleh *fly ash* yang di impregnasi Fe⁺ adalah Isoterm Langmuir ($R^2 = 0,9927$) dan Isoterm Freundlich ($R^2 = 0,9984$) yang artinya proses adsorpsi terjadi secara *multi layer* dan *mono layer*.

Kata kunci: adsorpsi, aktivasi, *fly ash*, fenol, impregnasi

Abstract

The purpose of this study was to determine the response and performance of fly ash as an adsorbent activated by HCl and impregnated with FeCl₃ to absorb phenol. In this study, the fly ash activation process was carried out using 8 M HCl for 2 hours and impregnated with 2% FeCl₃ for 2 hours. Activated and impregnated fly ash was analyzed using a Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectrophotometer (SEM-EDX). The results of the activated and impregnated fly ash surface using SEM-EDX showed that there were changes in morphology and functional groups. Then activated and impregnated fly ash was used to absorb phenol at a time variation of 60 minutes, 120 minutes, 180 minutes, 240 minutes and 300 minutes. At 180 minutes of contact time, the equilibrium point is obtained with an absorption efficiency of 90.5%. Second-order pseudo kinetics were used for phenol adsorption by Fe⁺ impregnated fly ash ($R^2 = 0.9916$). The isotherm models used in the phenol adsorption process by fly ash impregnated with Fe⁺ are Langmuir Isotherm ($R^2 = 0.9927$) and Freundlich Isotherm ($R^2 = 0.9984$), which means that the adsorption process occurs in multi-layer and mono-layers.

Keywords: adsorption, activation, fly ash, phenol, impregnation

Pendahuluan

Fenol merupakan salah satu senyawa organik yang berasal dari buangan industri yang berbahaya bagi lingkungan dan manusia. Dalam konsentrasi tertentu senyawa ini dapat memberikan efek yang buruk terhadap manusia, antara lain berupa kerusakan hati dan ginjal, penurunan tekanan darah, pelemahan detak jantung, hingga kematian [1]. Batas maksimum fenol yang aman pada lingkungan adalah 0.5-1.0 mg/L sesuai dengan KEP No. 51/MENLH/10/1995, sedangkan batas maksimum fenol dalam air minum

adalah 0.002 mg/L seperti yang dinyatakan oleh BAPEDAL (Badan Pengendalian Dampak Lingkungan). Oleh karena itu, dibutuhkan suatu metode yang efektif untuk menghilangkan fenol yang terdapat di perairan. Metode seperti oksidasi, presipitasi, pertukaran ion, adsorpsi dan pelarut ekstrak dapat digunakan untuk menghilangkan bahan fenolik dari air [2]. Namun, dalam pengolahan air paling banyak metode yang digunakan adalah adsorpsi karena biaya yang murah, mudah, dan efektif untuk pengolahan air dan limbah.

Proses penyisihan fenol dengan proses adsorpsi telah banyak dilakukan oleh penelitian terdahulu antara lain menggunakan zeolit alam yang dikombinasi dengan karbon aktif, *fly ash* yang ditambahkan karbon aktif, TiO₂/zeolit dari sekam padi dan limbah kertas, gambut, tanah liat, karbon aktif, silika, butiran karet ban bekas, resin polistiren yang dimodifikasi, lignit, poli (etilenamin) (PEI) / SiO₂, *Aspergillus niger biomass* dan *fly ash* [3].

Fly ash telah banyak digunakan sebagai adsorben. Berdasarkan komposisi nya *fly ash* terdiri dari beberapa senyawa kimia seperti SiO₂ (52,0%), Al₂O₃ (31,9%), Fe₂O₃ (5%), CaO (3%) dan MgO (5%) [4]. *Fly ash* juga memiliki luas permukaan 1,0 – 9,44 cm³/g dan ukuran partikel 0,01 – 125 mm [3]. Berdasarkan komposisi tersebut *fly ash* mengandung SiO₂ yang tinggi sehingga berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai adsorben untuk menyerap limbah fenol.

Aktivasi *fly ash* bertujuan untuk menghilangkan pengotor yang ada pada *fly ash* dan untuk meningkatkan kinerja penyerapan terhadap senyawa atau ion baik dari larutan maupun udara. Tujuan imregnasi yaitu untuk meningkatkan efisiensi adsorpsi adsorben untuk menghilangkan fenol.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik *fly ash* yang telah diaktivasi dan diimpregnasi dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM-EDX) dan melihat pengaruh variasi terhadap efisiensi penyerapan fenol dengan menggunakan spektrofotometer *UV-Vis*.

Teori

Batubara pada umumnya banyak dimanfaatkan pada berbagai industri antara lain PLTU, industri semen, industri tekstil, dan industri lainnya [5]. Penggunaan batubara sebagai bahan bakar akan menghasilkan abu terbang (*fly ash*) yang merupakan residu dari proses pembakaran pada pembangkit listrik.

Fly ash merupakan material yang di hasilkan dari proses pembakaran batubara pada alat pembangkit listrik, sehingga semua sifat-sifatnya juga ditentukan oleh komposisi dan sifat-sifat mineral-mineral pengotor dalam batubara serta proses pembakarannya. Adapun sifat-sifat fisiknya antara lain: (a) Warna: abu-abu keputihan, (b) Ukuran butir sangat halus yaitu sekitar 88 %. Keuntungan dari *fly ash* sebagai adsorben adalah biayanya yang murah karena *fly ash* berupa limbah yang dihasilkan terus menerus. Adsorben ini juga dapat digunakan dalam penyisihan logam berat, limbah zat warna berbahaya, senyawa organik pada pengolahan limbah, gas polutan dan gas organik [6].

Metodologi Penelitian

Bahan Baku dan Peralatan

Bahan baku yang digunakan yaitu *aquadest* (H₂O), asam klorida (HCl), besi klorida (FeCl₃) dan

limbah *fly ash* yang digunakan berasal dari PT. SOCIMAS Kabupaten Deli Serdang Sumatera Utara.

Alat yang digunakan meliputi seperangkat alat SEM-EDX, spektrofotometer *UV-Vis*, oven, *magnetic stirrer*, neraca analitik, kertas saring, ayakan 180 *mesh*, ayakan 200 *mesh*, *beaker glass*, *Erlenmeyer*, corong gelas, gelas ukur, pipet tetes, pH indikator.

Proses Preparasi

Fly ash diperoleh dari PT. SOCIMAS di Medan Sumatera Utara. Pada proses aktivasi sampel *Fly Ash* diberi perlakuan dalam rasio 1:2 (padat : cair) dengan larutan HCl dengan variasi 4 M, 6 M, 8 M, 9 M dan 10 M selama 2 jam. Campuran sampel dicuci beberapa kali hingga pH 6 (netral) dan dikeringkan dalam oven pada suhu 110 °C hingga berat konstan untuk menghilangkan kotoran dan kelembaban. Sebanyak 200g sampel kering kemudian ditambahkan larutan FeCl₃ dengan variasi 1%, 2% dan 3% Fe³⁺ dengan rasio 1:3 (padat:cair). Impregnasi dilakukan pada suhu 70 °C selama 2 jam. *Fly ash* yang di impregnasi dicuci hingga pH filtrat 5 dan dikeringkan dalam oven pada suhu 110 °C hingga berat konstan.

Adsorpsi Batch

Larutan baku Fenol 1000 mg/L dibuat dengan melarutkan 1 g kristal fenol murni dalam 1000 ml air aquadest dan disimpan dalam botol yang dilapisi aluminium foil untuk menghindari fotoksidasinya.

Percobaan adsorpsi secara *batch* dilakukan dengan menggunakan konsentrasi awal fenol (C_o) 200 mg/L diadsorpsi dengan variasi massa *fly ash* 15 g, 20 g, 25 g dan 30 g dengan variasi waktu kontak 15 menit, 30 menit, 45 menit, 60 menit, 120 menit, 180 menit, 240 menit dan 300 menit dan diaduk pada kecepatan 120 rpm. pH larutan dikontrol menggunakan larutan HCl dan NaOH dengan variasi pH 6, 7, 8, 9, 10 dan 11. Kemudian sampel disaring dengan kertas Penyaring *Whatman*. Dilakukan percobaan adsorpsi pada konsentrasi awal dengan variasi konsentrasi 125 mg/L, 150 mg/L, 175 mg/L dan 200 mg/L. Untuk analisis fenol dengan menggunakan *spectrophotometer UV-Vis* dengan menggunakan absorbansi pada panjang gelombang 270 nm. Konsentrasi akhir dan persentase efisiensi penyerapan fenol ditentukan dengan menggunakan persamaan (1) dan (2).

Konsentrasi akhir:

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)}{W} V \dots\dots\dots (1)$$

Efisiensi Penjerapan:

$$\frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100 \% \dots\dots\dots (2)$$

Dimana C_o adalah konsentrasi awal fenol (mg/L), C_e adalah konsentrasi fenol saat tercapai kondisi

kesetimbangan (mg/L), q_e adalah konsentrasi kesetimbangan dalam adsorben (mg/L), V adalah jumlah volume larutan adsorbat (L), W adalah massa adsorben yaitu abu *fly ash* yang digunakan (g).

Karakterisasi Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX)

Morfologi adsorben dianalisa dengan Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX) pada 15 kV dan pembesaran 3000x.

Hasil

Karakterisasi Adsorben

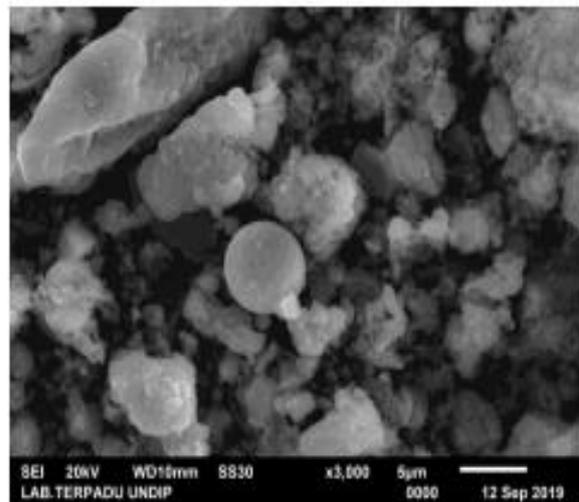
Fly ash yang diperoleh dari PT SOCIMAS dianalisis dengan analisa SEM. Dari hasil analisis SEM menunjukkan bahwa *fly ash* biasanya berbentuk bola bersama dengan adanya beberapa lubang dan partikel berongga. Gambar 1 merupakan *fly ash* yang belum diberi perlakuan dan Gambar 2 merupakan *fly ash* setelah diaktivasi. Hal ini menunjukkan bahwa partikel yang berbentuk bola mulai terdapat pori. Gambar 3 merupakan *fly ash* yang telah diimpregnasi dengan Fe. Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa partikel berongga dilapisi Fe sehingga permukaan lebih tidak beraturan dalam struktur yang menunjukkan adanya lapisan logam yang tinggi. Analisis EDX yang menampilkan komposisi unsur dari *fly ash* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi unsur *fly ash*

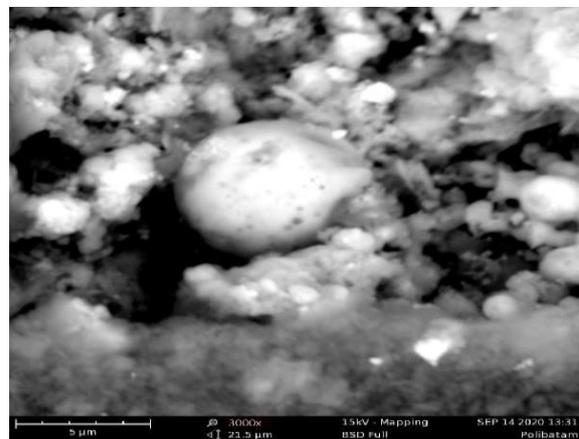
Nama Unsur	Persentase unsur (% wt)		
	<i>Fly Ash</i>	<i>Fly Ash</i> Diaktivasi HCl	<i>Fly Ash</i> Diimpregnasi FeCl ₃
Si	43,3	45,40	46,120
Al	36,8	33,60	31,700
Fe	9,30	7,20	12,700
C	6,04	5,72	5,970
Ca	2,70	0,70	-
S	0,60	-	-
Mg	0,50	0,30	0,400
O	0,47	6,48	2,900
K	0,11	-	0,020
Na	0,08	-	0,061
Ti	0,06	-	-
Zn	0,04	0,60	0,211

Berdasarkan hasil EDX, pada *fly ash* yang telah diaktivasi % berat Si meningkat menjadi 45,4%. Hal ini disebabkan karena adanya perlakuan aktivasi dengan menggunakan HCl terhadap *fly ash* sehingga logam-logam pengotor yang terkandung di dalam *fly ash* hilang. Ketika *fly ash* kontak dengan larutan asam, ikatan Si-O pada permukaan adsorben meningkat karena terjadi pelarutan logam [7], sedangkan setelah diimpregnasi % berat Si dan Fe meningkat menjadi

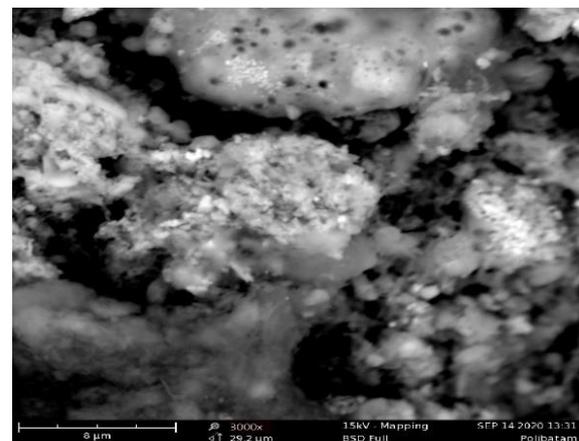
46,12% dan 12,7%. Perlakuan aktivasi dan impregnasi dapat mengubah struktur kandungan senyawa pada permukaan adsorben sehingga dapat meningkatkan kemampuan adsorpsi pada adsorben.



Gambar 1. Hasil analisa SEM permukaan *fly ash* sebelum aktivasi



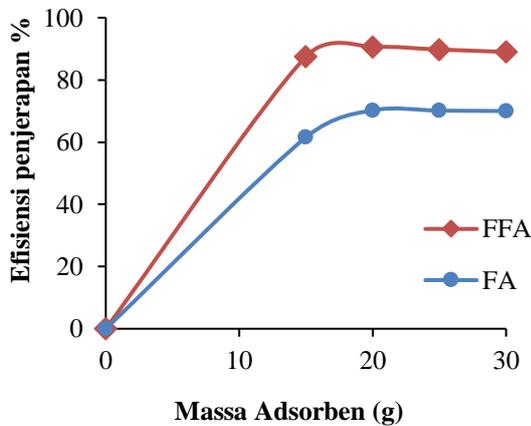
Gambar 2. Hasil analisa SEM permukaan *fly ash* setelah aktivasi



Gambar 3. Hasil analisa SEM permukaan *fly ash* setelah diimpregnasi

Pada hasil analisa SEM dengan pembesaran 3000x, *fly ash* yang terimpregnasi Fe memiliki struktur yang lebih kasar dan tidak beraturan. Gumpalan terang pada permukaan *fly ash* yang terimpregnasi berupa senyawa Fe_2O_3 . Fe_2O_3 pada permukaan *fly ash* dapat menyebabkan peningkatan yang signifikan terhadap porositas dan luas permukaan adsorben.

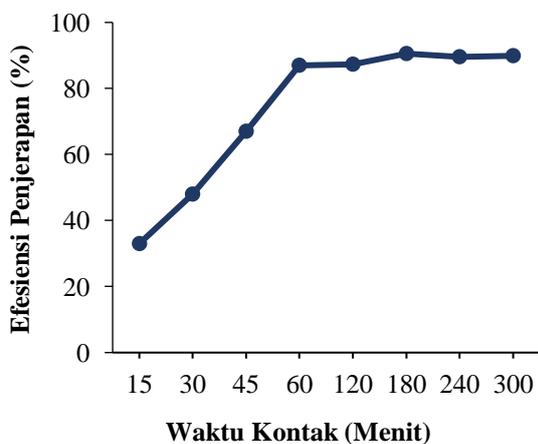
Studi Adsorpsi
Pengaruh Dosis Adsorben



Gambar 4. Pengaruh Massa Adsorben Terhadap Efisiensi Penjerapan

Berdasarkan Gambar 4 dapat diketahui bahwa penjerapan fenol bertambah seiring dengan ditambahnya massa adsorben. Kemampuan FFA (*Ferric Fly Ash*) memiliki penjerapan optimum sebesar 90,55 % dan pada FA (*Fly Ash*) tanpa perlakuan memiliki penjerapan optimum sebesar 70,22 %, sehingga terdapat perbedaan kenaikan penjerapan antara *fly ash* yang di impregnasi dengan *fly ash* tanpa perlakuan sebesar 20,33 %.

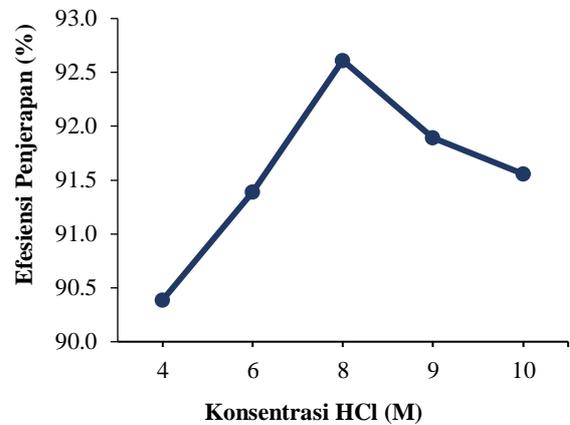
Pengaruh Waktu Kontak



Gambar 5. Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Efisiensi Penjerapan

Gambar 5 menunjukkan bahwa penjerapan fenol meningkat tajam sampai 120 menit [8], dan setelah itu meningkat optimum sampai 240 menit, kemudian menurun saat mencapai kesetimbangan. Hal ini disebabkan karena dari waktu awal 15 menit hingga waktu optimum 240 menit, *fly ash* mengalami proses adsorpsi karena sisi aktif *fly ash* yang kosong masih aktif menyerap fenol.

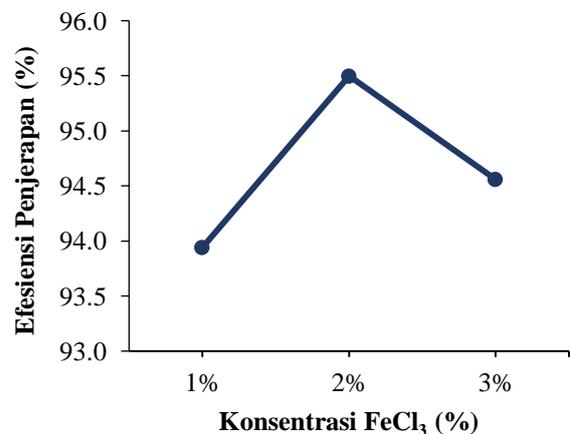
Pengaruh Konsentrasi Aktivasi HCl



Gambar 6. Pengaruh Konsentrasi HCL Terhadap Efisiensi Penjerapan

Berdasarkan Gambar 6 dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol memiliki pengaruh terhadap kemampuan *fly ash* dalam mengadsorpsi fenol. Konsentrasi HCl optimum dalam mengadsorpsi fenol adalah 8 M.

Pengaruh Konsentrasi Impregnasi $FeCl_3$

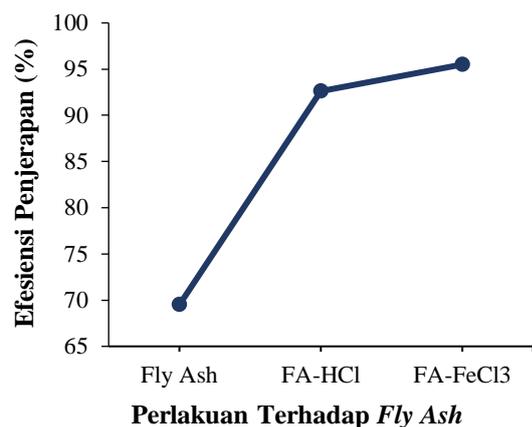


Gambar 7. Pengaruh Konsentrasi $FeCl_3$ Terhadap Efisiensi Penjerapan

Dari Gambar 7 dapat dilihat bahwa efisiensi penjerapan fenol maksimum pada adsorben yang terimpregnasi dengan menggunakan konsentrasi $FeCl_3$ 2 % yaitu sebesar 95,5 %.

Efisiensi penjerapan yang diperoleh mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya konsentrasi FeCl_3 , hal ini disebabkan adanya gaya tarik elektostatis antara ion fenolat ($\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^-$) dengan (Si^{3+} , Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^+$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{+4}$, Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})^+$ dan $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{+4}$) yang bertindak sebagai sisi aktif adsorben [8]. Bertambahnya massa adsorben terimpregnasi FeCl_3 sebanding dengan bertambahnya jumlah partikel dan luas permukaan adsorben sehingga menyebabkan dan efisiensi penjerapan pun meningkat.

Perbandingan Adsorpsi Fly Ash Sebelum Perlakuan, Fly Ash Teraktivasi HCl dan Fly Ash Terimpregnasi FeCl_3



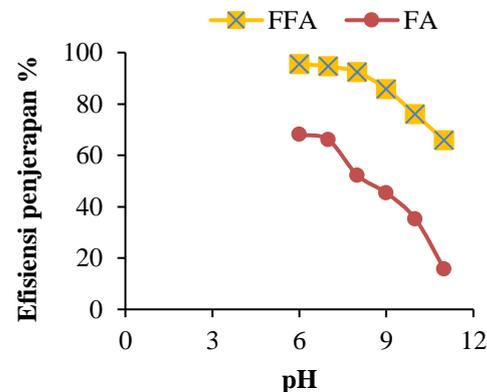
Gambar 8. Pengaruh Perlakuan Fly Ash Terhadap Efisiensi Penjerapan Fenol

Dari Gambar 8 dapat dilihat adanya perlakuan aktivasi dan impregnasi terhadap fly ash mampu meningkatkan efisiensi penjerapan fenol. Pada fly ash yang belum diberi perlakuan efisiensi penjerapan fenol sebesar 69,5% [8], Efisiensi penjerapan fenol meningkat ketika fly ash telah diaktivasi dengan menggunakan HCl 8 M dengan efisiensi penjerapan fenol menjadi 92,6 %. Sedangkan fly ash yang telah diimpregnasi efisiensi penjerapan fenol semakin meningkat yaitu 95,49 %. Kemampuan adsorpsi fly ash yang diimpregnasi meningkat 26% jika dibandingkan dengan fly ash tanpa perlakuan.

Pengaruh Ph Terhadap Efisiensi Penjerapan Fenol

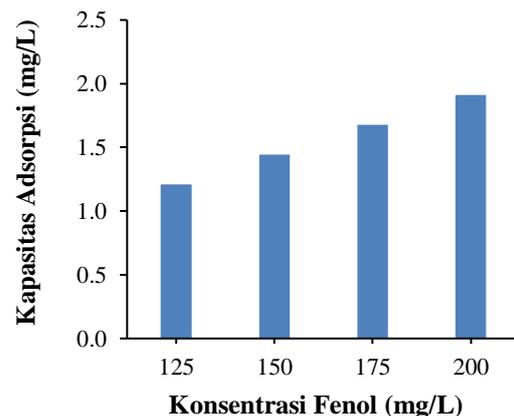
Pada Gambar 9 terlihat pH mempengaruhi efisiensi penjerapan fly ash. Dapat dilihat pH optimum terdapat pada nilai pH 6 dan ketika pH di ubah ke derajat basa perlahan mengalami penurunan efisiensi. Hal ini disebabkan karena adsorpsi fenol dibatasi oleh karakteristik asam-basa. Dapat juga terlihat perbedaan antara pH optimum fly ash yang di impregnasi 95,49 % dengan fly ash tanpa perlakuan 68 %. Adsorpsi fenol meningkat secara bertahap

dengan peningkatan pH karena gaya tarik elektrostatis antara ion fenolat ($\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^-$) dan muatan positif di atas permukaan pada pH rendah. Namun, setelah pH 7, terjadi penurunan karena permukaannya sekarang mengandung spesies AlO^- dan SiO^- membuatnya bermuatan negatif sehingga laju adsorpsi menurun [8]. Fenol adalah asam lemah ($\text{pKa} = 10$) dan akan terserap pada tingkat yang lebih rendah pada pH yang lebih tinggi [9].



Gambar 9. Pengaruh pH Terhadap Efisiensi Penjerapan

Pengaruh Konsentrasi Fenol Terhadap Efisiensi Penjerapan Fenol



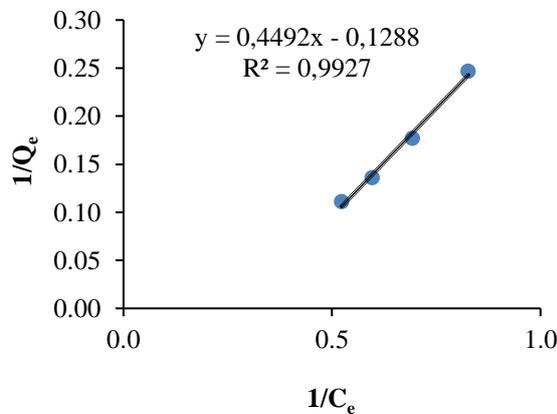
Gambar 10. Pengaruh Konsentrasi Fenol Terhadap Kapasitas Adsorpsi

Dari Gambar 10 terlihat bahwa kapasitas adsorpsi meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi fenol dari konsentrasi 125 mg/L dengan kapasitas adsorpsi 1,20 mg/g hingga konsentrasi 200 mg/L dengan kapasitas adsorpsi 1,90 mg/g. Kenaikan ini disebabkan karena semakin banyaknya adsorben dan adsorbat yang saling berinteraksi. Semakin besar konsentrasi, semakin tinggi jumlah molekul dalam larutan, sehingga meningkatkan laju adsorpsi antara molekul adsorbat dan adsorben [10].

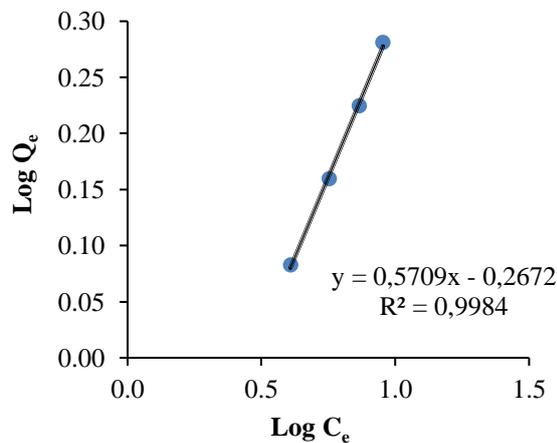
Pemodelan

Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi adalah model matematis yang menggambarkan distribusi adsorbat antara cairan dan adsorben berdasarkan asumsi terutama terkait dengan homogenitas/ heterogenitas adsorben, jenis cakupan, dan kemungkinan interaksi. Model isoterm adsorpsi yang digunakan untuk menguji model isoterm adsorpsi menggunakan model Langmuir dan Freundlich.



Gambar 11. Isoterm Langmuir



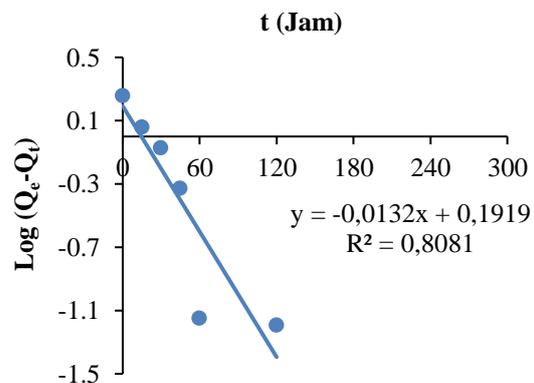
Gambar 12. Isoterm Freundlich

Berdasarkan Gambar 11 dan Gambar 12 diperoleh nilai R² untuk masing masing isoterm langmuir sebesar 0,9927 dan isoterm freundlich 0,9984. Hasil Analisis data diatas menunjukan bahwa adsorpsi fenol dengan *fly ash* cocok menggunakan isoterm keduanya yang menandakan bahwa proses adsorpsi terjadi secara *multilayer* dan *monolayer*. Model Langmuir dibuat berdasarkan asumsi bahwa *binding sites* terdistribusi secara homogen di seluruh permukaan adsorben, dimana adsorpsi terjadi pada satu lapisan (*single layer*). Pada isoterm Freundlich, permukaan adsorben bersifat heterogen dan interaksi permukaan adsorben dengan molekul adsorbat terjadi karena adanya interaksi secara fisika serta distribusi

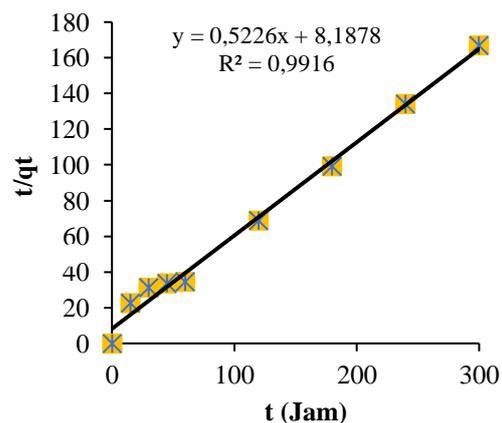
molekul adsorbat ke permukaan adsorben terjadi secara multilayer [11].

Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi adalah model adsorpsi yang memperlihatkan bagaimana mekanisme proses adsorpsi yang terjadi berdasarkan asumsi yang terkait dengan kimisorpsi/fisorpsi. *Fly Ash* yang ditentukan kinetika reaksinya adalah *fly ash* hasil terbaik yaitu massa 20 gram. Studi kinetika adsorpsi selalu menggunakan dua model kinetik, yaitu model orde pertama semu dan model orde kedua semu untuk menyesuaikan data percobaan dengan nilai prediksi model yang dinyatakan dalam koefisien korelasi (R²).



Gambar 13. Psuedo Orde Satu



Gambar 14. Psuedo Orde Dua

Berdasarkan Gambar 13 dan Gambar 14 diperoleh nilai R² untuk masing masing psuedo orde pertama sebesar 0,8081 dan psuedo orde dua sebesar 0,9916. Model kinetika yang cocok digunakan untuk proses adsorpsi fenol adalah *psuedo* orde dua yang menandakan bahwa proses laju adsorpsi dikontrol oleh kemisorpsi. Psuedo orde dua menyatakan bahwa proses adsorpsi terjadi secara adsorpsi kimia. Model kinetika reaksi psuedo orde satu menunjukkan bahwa proses adsorpsi dikontrol oleh proses fisika (adsorpsi fisika) [12].

Kesimpulan

Dari penelitian ini didapatkan adsorben terbaik dengan kondisi yaitu dengan berat adsorben 20 g, waktu kontak 180 menit konsentrasi HCl 8 M dan Konsentrasi FeCl₃ 2 % dengan efisiensi penjerapan 95,49 %. Model isoterm adsorpsi yang cocok untuk adsorpsi fenol menggunakan *fly ash* adalah isoterm langmuir dan freundlich. Model kinetika adsorpsi yang sesuai yaitu model kinetika Psuedo Orde Dua dengan persamaan $t/qt = 0,5226t + 8,1878$ dan koefisien korelasi (R^2) sebesar 0,9916.

Daftar Pustaka

- [1] A. Jabbar, "Penyisihan fenol menggunakan kombinasi proses adsorpsi dan fotokatalisis pada reaktor skala pilot", Skripsi, Universitas Indonesia, Depok, 2017.
- [2] S. Rengaraj, S. H. Moon, R. Sivabalan, B. Arabindoo, and V. Murugesan, "Removal of phenol from aqueous solution and resin manufacturing industry wastewater using an agricultural waste: Rubber seed coat", *J. Hazard. Mater.*, vol. 89, no. 2–3, pp. 185–196, 2002.
- [3] R. Sharan, G. Singh, and S. K. Gupta, "Adsorption of phenol from aqueous solution onto fly ash from a thermal power plant," *Adsorpt. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 267–279, 2009.
- [4] B. G. Kutchko and A. G. Kim, "Fly ash characterization by SEM-EDS," *Fuel*, vol. 85, no. 17–18, pp. 2537–2544, 2006.
- [5] H. Haspiadi, "Pemanfaatan abu terbang (*Fly ash*) batu bara sebagai campuran pembuatan bata beton," *J. Ris. Teknol. Ind.*, vol. 3, no. 6, 2016.
- [6] N. H. Haryanti, "Uji abu terbang PLTU asam asam sebagai bahan pembuatan bata ringan," *J. Fis. FLUX*, vol. 11, no. 2, pp. 114–124, 2014.
- [7] A. S. M. Hosseini et al., "Synthesis of hydrous iron oxide/aluminum hydroxide composite loaded on coal fly ash as an effective mesoporous and low-cost sorbent for Cr (VI) sorption: Fuzzy Logic Modeling," Asia Pacific Conference on Environmental Science and Technology (APEST 2012), vol. 6, pp.1-45, 2012.
- [8] N. Chaudhary, C. Balomajumder, B. Agrawal, and V. S. Jagati, "Removal of phenol using fly ash and impregnated fly ash: An approach to equilibrium, kinetic, and thermodynamic study," *Sep. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 5, pp. 690–699, 2015.
- [9] B. Abussaud, H. A. Asmaly, A. Saleh, and V. Kumar, "Sorption of phenol from waters on activated carbon impregnated with iron oxide, aluminum oxide and titanium oxide," *J. Mol. Liq.*, 2015.
- [10] L. M. Barros Júnior, G. R. Macedo, M. M. L. Duarte, E. P. Silva, and A. K. C. L. Lobato, "Biosorption of cadmium using the fungus *Aspergillus niger*," *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 20, no. 3, pp. 229–239, Sep. 2003.
- [11] M. Thripuranthaka et al., "Temperature dependent raman spectroscopy of chemically derived few layer MoS₂ and WS₂ nanosheets," vol. 081911, 2014.
- [12] A. Siczka and E. Koda, "Kinetic and equilibrium studies of sorption of ammonium in the soil-water environment in agricultural areas of central Poland," *Appl. Sci.*, vol. 6, no. 269, pp. 1-14, 2016.