

# SISTEM OTOMATISASI SKALA MINI ADSORPSI BESI DALAM AIR ASAM TAMBANG

## *Mini-Scale Automated System of Iron Adsorption in Acid Mine Drainage*

MYCELIA PARADISE<sup>1\*</sup> dan YUDHA A. PRATAMA<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup> Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, Jl. Babarsari, Tambak Bayan, Caturtunggal, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281.

<sup>2</sup> Teknik Geofisika, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Jalan Padjajaran (Lingkar Utara), Condong Catur, Sleman, Yogyakarta, 55283.

Korespondensi email: [mycelia@itny.ac.id](mailto:mycelia@itny.ac.id)

\* Kontributor Utama \*\* Kontributor Anggota

---

### ABSTRAK

Salah satu alternatif pengelolaan Air Asam Tambang (AAT), khususnya untuk mengurangi konsentrasi logam berat adalah adsorpsi. Selama ini adsorpsi masih dilakukan secara manual. Dalam penelitian ini, proses adsorpsi tidak lagi dilakukan secara manual namun diatur secara otomatis menggunakan Arduino. Efektivitas penggunaan Arduino dalam proses adsorpsi Fe dalam AAT diteliti melalui variasi parameter waktu proses adsorpsi pada AAT dengan konsentrasi awal Fe 42,807 mg/L dan pH 2,6. Hasil penelitian menunjukkan bahwa alat rakitan mampu menurunkan konsentrasi Fe hingga memenuhi baku mutu hanya dalam waktu 2 menit. Efektivitas adsorpsi Fe mencapai 96,79% dengan konsentrasi akhir 1,3724 mg/L. Kapasitas adsorpsi Fe mencapai 0,0414 mg/g tercapai pada menit kedua dengan pH akhir 4,15. Proses adsorpsi Fe dalam penelitian ini merupakan adsorpsi kimia.

Kata kunci: adsorpsi, AAT, Arduino, otomatisasi, Fe.

### ABSTRACT

*Adsorption is one alternative to acid mine drainage (AMD) management, particularly for reducing heavy metal concentrations. Adsorption is still performed manually at this time. In this study, the adsorption procedure is automated and controlled via Arduino rather than being performed manually. The efficacy of using an Arduino in the adsorption of AMD at a pH of 2.6 and an Fe initial concentration of 42.807 mg/L was assessed by modifying the adsorption time parameters. The results showed that the assembled instrument was able to reduce the Fe concentration to meet the quality standards in just 2 minutes. The effectiveness of Fe adsorption reached 96.79% with a final concentration of 1.3724 mg/L. Fe adsorption capacity reached 0.0414 mg/g in the second minute. The Fe adsorption process in this study is chemical adsorption.*

Keywords: *adsorption, acid mine drainage, Arduino, automation, Fe.*

---

### PENDAHULUAN

Sebagai alternatif perpindahan ibukota Indonesia, pengelolaan Ibukota Nusantara (IKN) membutuhkan banyak lahan. Namun, sebagian besar lahan tambang yang akan dijadikan lokasi IKN menghadapi masalah

lingkungan seperti pencemaran air akibat aktivitas pertambangan (Hernaningsih, 2023). Air Asam Tambang (AAT) mengandung senyawa asam sulfat, logam berat, dan bahan pencemar lainnya (Bernardes de Souza dan Mansur, 2011). AAT menyebabkan banyak kerusakan lingkungan, termasuk kerusakan

lahan sehingga tidak dapat digunakan untuk pertanian, penurunan kualitas air tanah dan air permukaan, dan gangguan terhadap makhluk hidup (Motsi, Rowson dan Simmons, 2009). Oleh karena itu, pengelolaan AAT harus dilakukan.

Dua kategori utama pendekatan pengelolaan AAT adalah aktif dan pasif. Bahan kimia yang mengandung kalsium seperti  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{NaOH}$ , dan atau  $\text{NH}_3$  dapat digunakan dalam pengelolaan aktif untuk mengolah AAT (Said, 2018). Salah satu metode pengelolaan AAT yang diklaim efisien adalah adsorpsi. Metode adsorpsi dengan adsorben adalah salah satu metode yang menarik untuk dipelajari.

Banyak pohon kelapa yang tumbuh di Indonesia memungkinkan penggunaan bagian tempurungnya sebagai arang aktif dan adsorben. Hal ini disebabkan oleh banyaknya pori-pori pada tempurung kelapa. Beberapa bahan lain yang juga dapat diolah menjadi arang aktif adalah kulit singkong (Rahmawati dan Santoso, 2013; Maulinda, Za dan Sari, 2015; Purwaningsih *dkk.*, 2019), cangkang buah karet (Meilianti, 2017), bambu (Huda, Ratnani dan Kurniasari, 2020; Hafidoh, 2021), ampas tebu (Sudibandriyo dan Lydia, 2018; Imani, Sukwika dan Febrina, 2021), kulit kacang (Harnowo, Hidayah dan Janah, 2019; Yanti *dkk.*, 2023), kulit pisang (Adinata, 2013; Masriatini, Fatimura dan Putri, 2020), pelepah kelapa sawit (Mentari, Handika dan Seri, 2018; Diharyo *dkk.*, 2020; Suherman *dkk.*, 2021), kulit padi (Juniar dan Sari, 2019), enceng gondok (Nuria, Anwar dan Purwaningsih, 2020), tanaman aren (Marina Olivia Esterlita dan Netti Herlina, 2015; Purnamawati, 2023), kayu bakau (Masthura dan Putra, 2018) dan batubara (Ghafarunnisa *dkk.*, 2017; Kusdarini, Budianto dan Ghafarunnisa, 2017; Nurrahman *dkk.*, 2021). Arang tempurung kelapa memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan bahan lain. Arang ini menghasilkan kadar abu yang lebih rendah, memiliki tingkat kelarutan dalam air yang lebih tinggi dan memiliki lebih banyak mikropori (Pambayun *dkk.*, 2013; Pranoto *dkk.*, 2020).

Claystone dapat digunakan untuk menghilangkan logam berat dari air limbah karena dapat menyerap logam berat yang terlarut dalam air melalui proses adsorpsi

(Musso *dkk.*, 2014). Zeolit adalah senyawa yang terdiri dari ikatan  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  dan  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  yang terhubung melalui atom oksigen untuk membentuk kerangka zeolit berongga. Zeolit memiliki kemampuan untuk menyerap logam berat, membuatnya sebagai alternatif yang ramah lingkungan dan efektif untuk proses adsorpsi (Suyanta dan Catri, 2016).

Peneliti di seluruh dunia telah melakukan berbagai penelitian tentang manfaat adsorpsi dalam pengolahan air limbah. Penelitian menunjukkan bahwa adsorpsi dengan arang aktif efektif menghilangkan senyawa organik dari AAT (Hong *dkk.*, 2014). Selain itu, campuran *clay*, zeolit, dan arang aktif dari tempurung kelapa dapat mengurangi kandungan logam berat besi dalam AAT dan meningkatkan pH (Paradise *dkk.*, 2022). Penelitian-penelitian ini menunjukkan bahwa metode adsorpsi dapat menjadi alternatif pengolahan AAT yang efektif. Proses adsorpsi masih dilakukan secara manual dan belum ada pengembangan teknologi adsorpsi yang lebih efisien.

Dalam penelitian sebelumnya, telah dilakukan adsorpsi yang prosesnya dilakukan secara manual menggunakan *hot plate stirrer* dengan variasi parameter waktu kontak menggunakan komposit adsorben yang terdiri dari campuran *clay*, zeolit dan arang aktif tempurung kelapa dengan perbandingan 25:25:50. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposit adsorben mampu menurunkan konsentrasi Fe hingga memenuhi baku mutu dalam waktu optimum 30 menit. Efektivitas penurunan Fe yaitu 98,86% dan kapasitas adsorpsi 1,286 mg/g (Paradise *dkk.*, 2022).

Dalam penelitian ini, proses adsorpsi tidak lagi dilakukan secara manual namun diatur secara otomatis menggunakan Arduino, sebuah mikrokontroler yang dapat diprogram untuk mengotomatisasi proses adsorpsi. Proses adsorpsi dalam skala lab yang awalnya perlu menuang adsorben dan menghitung waktu pengadukan secara manual, sehingga harus berkali-kali menekan tombol on/off pada alat *hot plate stirrer*, maka pada penelitian ini dibuat semua proses serba otomatis menggunakan parameter yang sama pada penelitian menggunakan alat *hot plate stirrer*. Pada penelitian ini, alat dapat otomatis menuang adsorben ke dalam sampel AAT

melalui feeder, kemudian otomatis berjalan proses pengadukan selama waktu tertentu dan otomatis berhenti sesuai waktu yang telah di setting. Selain itu, AAT yang telah selesai di adsorpsi, akan otomatis terbangun ke kolam penampungan. Proses tersebut berjalan berulang terus-menerus secara otomatis. Efektivitas penggunaan Arduino dalam proses adsorpsi AAT diteliti melalui percobaan pengolahan sampel AAT serta pengaruh parameter waktu pada proses adsorpsi.

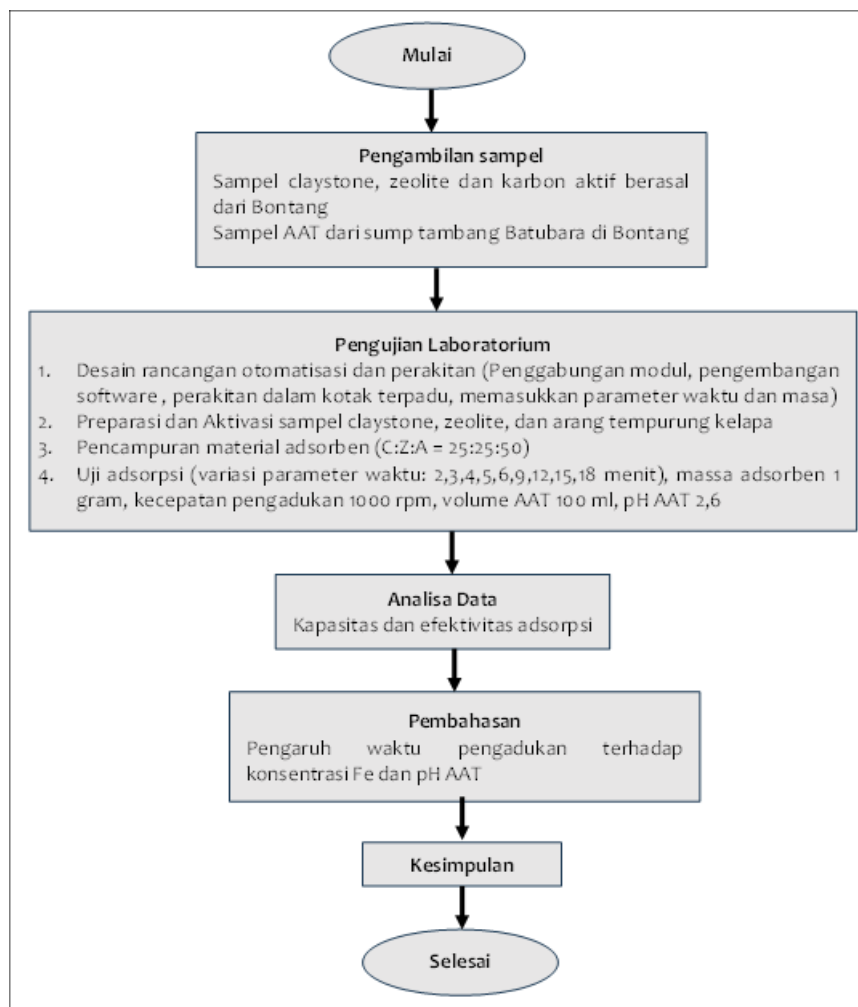
## METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental di laboratorium dengan menggunakan *claystone*, zeolit, dan arang tempurung kelapa yang komposit sebagai bahan

adsorben untuk menghilangkan logam besi (Fe) dari sampel AAT melalui uji adsorpsi sistem batch. Pengujian dilakukan pada variasi parameter waktu kontak, sehingga diperoleh kondisi optimal. Data primer dalam penelitian ini yaitu konsentrasi awal dan akhir Fe dalam sampel AAT serta pH akhir AAT. Sedangkan data sekunder dalam penelitian ini yaitu rasio perbandingan massa adsorben. Diagram alir penelitian tersaji pada Gambar 1.

### Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel menggunakan metode *purposive sampling*. Sampel *claystone*, zeolit dan arang aktif berasal dari Bontang, Kalimantan Timur. Sampel AAT diambil dari *sump* tambang batubara di Bontang. AAT diambil sebanyak 1 liter, terbagi menjadi 10 sampel untuk uji Fe.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

### Desain Rancangan Alat rakitan

#### 1. Tangki dan kapasitas *mixer*

##### a. Diameter tangki

Tangki adalah bejana tertutup berbentuk silinder.

$$V = \pi r^2 H \dots\dots\dots (1)$$

##### b. Tinggi tangki

$$H = V/(\pi r^2) \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

$V$  = volume sampel (ml)

$\pi$  = 3,14

$r$  = jari jari (cm)

$H$  = tinggi tangki (cm)

#### 2. Diameter Impeler ( $D_a$ ) dan Ketinggian Impeler

##### a. Ukuran ideal

$$D_a = E = (1/3) D_t \dots\dots\dots (3)$$

##### b. Lebar impeler ( $W$ )

$$W = (1/5) D_a \dots\dots\dots (4)$$

##### c. $W$ = Panjang impeler ( $L$ )

$$L = (1/4) D_a \dots\dots\dots (5)$$

### Pengujian Laboratorium

Sampel *claystone* (C), zeolit (Z), dan arang tempurung kelapa (A) diaktivasi secara fisika dan kimia kemudian dicampur dalam rasio (C:Z:A) 25:25:50 (Nursanto dan Paradise, 2021; Paradise dkk., 2022).

Material adsorben diaktivasi menggunakan langkah berikut:

#### 1. Aktivasi *claystone* (Nwosu dkk., 2018; Mukarrom dkk., 2020; Paradise dkk., 2022).

- Claystone* dibersihkan, dihaluskan dan diayak dengan ayakan 100 mesh, selanjutnya dicuci dengan akuades,

disaring, dan dikeringkan pada 105°C selama 4 jam;

- sebanyak 150 gram *claystone* direndam dalam 300 ml larutan NaOH 3M selama 3 jam;

- larutan disaring, dicuci dengan akuades, kemudian disaring lagi;

- claystone* dipanaskan pada *furnace* hingga mencapai suhu 700°C selama 30 menit, didinginkan, dihaluskan dan disaring kembali dengan ayakan 100 mesh.

#### 2. Aktivasi zeolit (Kunarti, Sutarno dan Baralangi, 2015; Dala Ngapa dan Gago, 2019; Paradise dkk., 2022).

- Zeolit yang sudah bersih direndam dengan akuades selama 24 jam kemudian dikeringkan selama 24 jam pada 120°C;

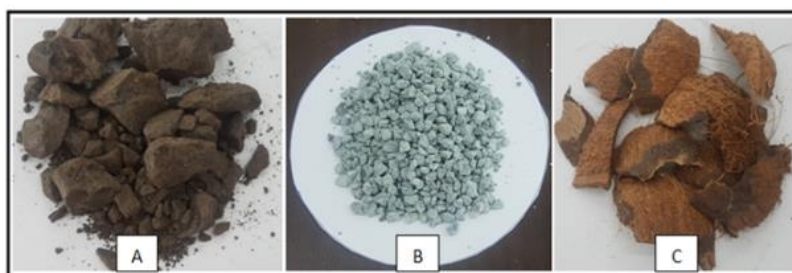
- zeolit direndam selama 3 jam dalam larutan HCl dengan perbandingan 1:2 kemudian dikeringkan selama 24 jam pada 80°C.

#### 3. Aktivasi arang tempurung kelapa (Tan dkk., 2017; Mukarrom dkk., 2020; Pranoto dkk., 2020; Paradise dkk., 2022).

- Arang tempurung kelapa direndam selama 24 jam dalam larutan HCl 4M;
- Pengeringan arang tempurung kelapa selama 3 jam pada suhu 110°C;
- arang aktif didinginkan.

Adsorben digunakan untuk uji adsorpsi menggunakan alat rakitan di laboratorium. Berikut alat serta bahan yang digunakan:

- Komponen, modul elektronik, yang terdiri dari: *mini pump* 12V (2 buah), *feeder servo* (1 buah), *Arduino*, *power supply*, *relay*, *dinamo* 12V, *propeller* (1 buah), *voltage regulator* 12V *stepdown*, *compiler IDE*, *laptop*, *kabel*, *selang*, *plastic jar*, *lem bakar*, *baut*, *tenol*, *solder*, *flux paste*, *kabel steker*, *solenoid valve*, *peltier heater*.



Gambar 2. Material adsorben: a. *claystone*, b. zeolit, c. tempurung kelapa.

2. Seperangkat alat *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) merk Shimadzu.
3. Peralatan laboratorium: timbangan analitik merk Kenko, ayakan ukuran 100 mesh merk ABM, lumpang dan mortar, labu ukur, erlenmeyer, gelas beker, corong kaca, spatula, oven, cawan petri, *furnace*, tang penjepit (tangkrus), pH meter merk Hanna.
4. *Claystone*, zeolit, arang aktif tempurung kelapa, AAT, aquades, 300 ml NaOH 3M, 300 ml HCl 3M, 300 ml HCl 4M, kertas saring Whatman No. 41.



Gambar 3. Komposit adsorben

### Uji Adsorpsi

Uji adsorpsi dilakukan dengan parameter sesuai Tabel 1.

Tabel 1. Variasi parameter

| Parameter       | Variasi              |
|-----------------|----------------------|
| Waktu (menit)   | 2,3,4,5,6,9,12,15,18 |
| Massa (gram)    | 1                    |
| Kecepatan (rpm) | 1000                 |
| Temperatur (°C) | 28                   |
| Volume AAT (ml) | 100                  |
| pH AAT          | 2,6                  |

### Analisis Data

Kapasitas adsorpsi ( $x/m$ ) (mg/g) dan efektivitas penyerapan ( $Q$ ) (%) dapat diketahui menggunakan Persamaan (6) dan (7) (Balintova dkk., 2014).

$$(x/m) = \{(Co-Ce)V\}/W \dots\dots\dots (6)$$

$$Q = \{(Co-Ce)/Co\} \times 100\% \dots\dots\dots (7)$$

$V$  adalah volume larutan dalam liter,  $W$  merupakan massa adsorben dalam gram,  $Co$  adalah tingkat konsentrasi awal dalam larutan, dalam mg/liter, sementara  $Ce$  merujuk pada konsentrasi akhir logam berat dalam larutan dalam mg/liter.  $Co$  dan  $Ce$  dianalisis menggunakan alat AAS.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Komposit

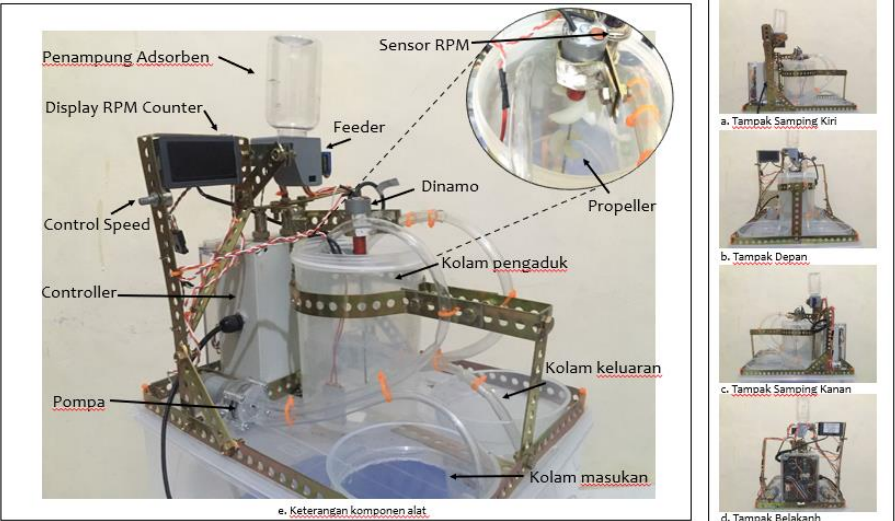
Material adsorben dicampur menjadi komposit dengan rasio (C:Z:A) 25:25:50 berukuran 100 mesh (Gambar 3).

### Alat rakitan

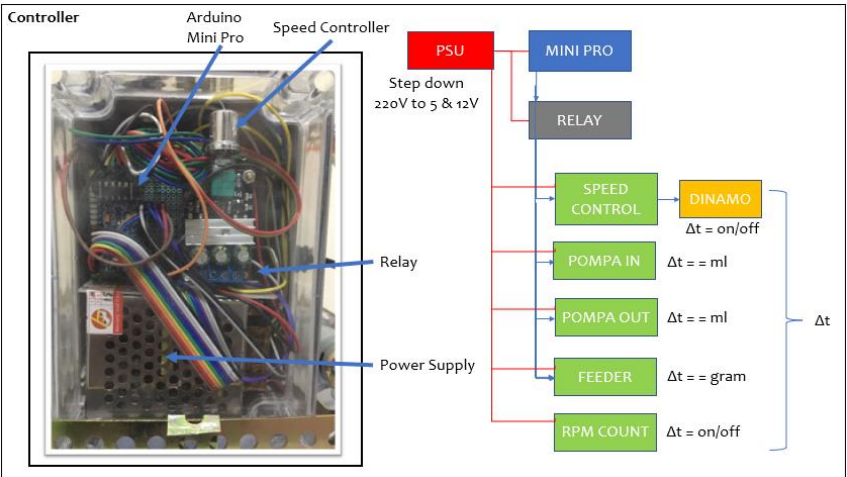
Untuk melengkapi penelitian ini dibuat prototipe (alat rakitan) adsorpsi yang akan digunakan untuk uji adsorpsi. Rangkaian alat dapat dilihat pada Gambar 4, 5, dan 6.

Parameter pada *agitator mixing plant* alat ini adalah sebagai berikut:

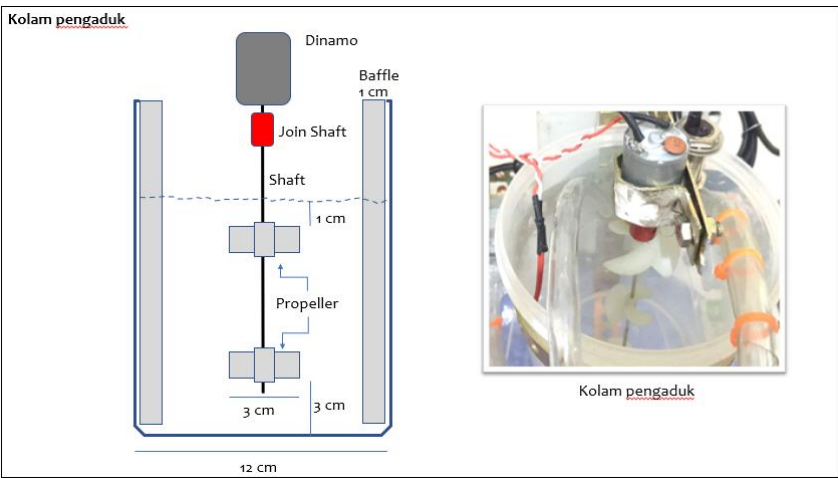
1. Tipe pengaduk (*mixer*) menggunakan pengaduk dengan tangki diam dan pengaduk bergerak.
2. Jumlah pengaduk: menggunakan satu pengaduk untuk sampel AAT viskositas rendah.
3. Prinsip pencampuran: pencampuran merupakan proses pelengkap dengan tujuan mempercepat reaksi kimia.
4. Jenis agregat: campuran berupa padatan adsorben dan cairan berupa AAT dan campuran bahan
5. Volume sampel: 100 ml AAT
6. Tangki dan kapasitas pengaduk:
  - a. diameter tangki: 5 cm, dengan 100 ml sampel dianggap sebagai kapasitas pengaduk;
  - b. tinggi tangki: 5 cm (berdasarkan perhitungan menggunakan Persamaan 2);
  - c. Tinggi kolom sampel ( $H$ ): 5,09 cm ( $\sim 5$ cm),  $Dt=H=1$  sehingga untuk sampel sebanyak 100 ml dengan diameter tangki sebesar 5 cm maka didapatkan tinggi tangki yang relatif sama dan kondisi dianggap Ideal;



Gambar 4. Alat rakitan



Gambar 5. Kontroler pada alat rakitan



Gambar 6. Tangki pengaduk pada alat

- d. Bentuk Tangki: silinder;
  - e. *Baffle*: dua buah dengan diameter 5 mm;
  - f. *Jacket* atau *coil*: tidak ada;
  - g. Letak lubang masukan (*inlet*) dan pengeluaran (*outlet*): lubang masukan terletak diatas dan lubang pengeluaran terletak di bawah.
7. Diameter impeler ( $D_a$ ) dan Ketinggian Impeler
    - a. ukuran ideal:  
diketahui menggunakan  $D_t = 5$  cm, maka ketinggian impeler terhadap dasar tangki sebesar  $E = 1,67$  cm dan diameter Impeler  $D_a = 1,67$  cm;
    - b. lebar impeler ( $W$ ):  
diketahui  $D_a = 1,67$  cm ( $\sim 1,6$  cm), maka  $W = 0,3$  cm = 3 mm;
    - c. panjang impeler ( $L$ )  
diketahui  $D_a = 1,6$  cm, maka  $L = 0,4$  cm = 4 mm.
  8. Agitator (pengaduk):  
Pengaduk turbin memiliki banyak daun dan pengaduk yang berukuran pendek, digunakan pada kecepatan tinggi untuk cairan dengan kekentalan yang besar. Diameter turbin biasanya 30% sampai 50%

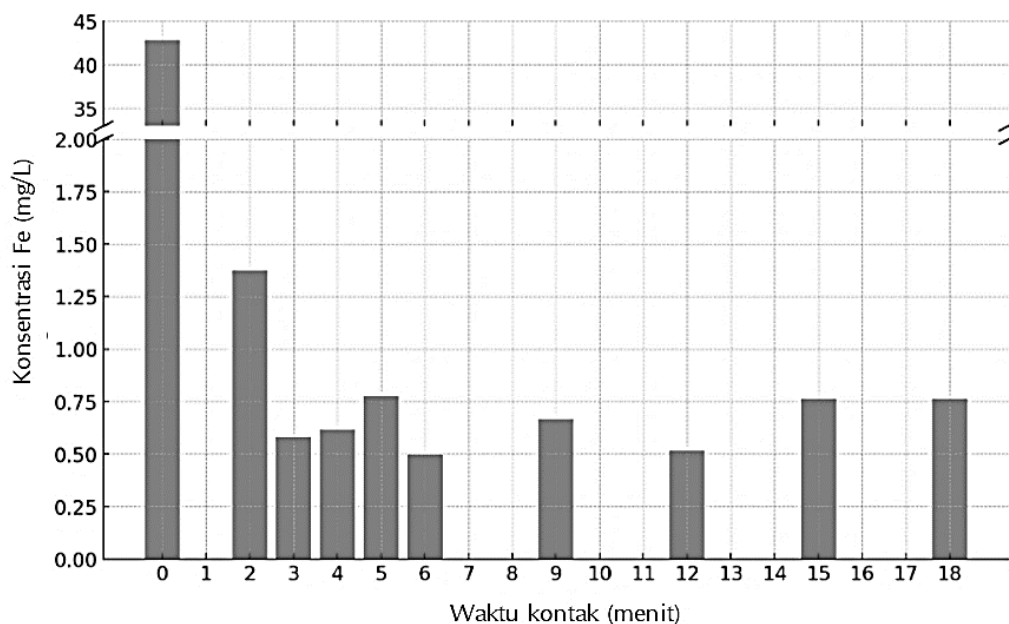
dari ukuran diameter tangki. Daun turbin di buat miring 45 derajat, beberapa aliran aksial akan terbentuk sehingga kombinasi aliran aksial dan radial akan terbentuk. Jenis ini berguna dalam suspensi padatan karena aliran akan menyapu ke bawah padatan ke atas. Pengaduk dengan aliran aksial menghasilkan pergerakan fluida yang lebih besar dan pencampuran per satuan daya dan sangat berguna dalam suspensi padatan. Agitator (pengaduk) pada penelitian ini menggunakan tipe turbin.

9. Bilah Pengaduk: 3 bilah dengan kemiringan 45 derajat.

10. Motor: DC brush motor dengan pengatur kecepatan 1000 rpm.

### Hasil Uji Adsorpsi Menggunakan Alat Rakitan

Alat rakitan telah diatur dengan parameter tertentu yang digunakan untuk uji adsorpsi menggunakan sistem automatisasi. Berdasarkan hasil uji Fe total menggunakan metode SNI 6989.84-2019 yang dilakukan di Laboratorium Balai Besar Teknik Kesehatan Lingkungan dan Pengendalian Penyakit Yogyakarta, diperoleh konsentrasi akhir Fe pada AAT setelah adsorpsi terhadap waktu kontak (Gambar 7).



Gambar 7. Konsentrasi Fe dalam AAT setelah proses adsorpsi

Gambar 7 menunjukkan bahwa material yang digunakan dalam proses adsorpsi mampu mengurangi konsentrasi Fe dalam AAT berdasarkan waktu kontak. Meskipun terjadi fluktuasi pada beberapa titik waktu kontak, konsentrasi Fe pada AAT tetap rendah dan stabil pada kisaran 0,4956 mg/L hingga 0,7621 mg/L setelah menit ke-6 hingga menit ke-18. Setelah menit ke-3, adsorpsi Fe mulai mencapai titik jenuh yang ditandai dengan penurunan konsentrasi Fe yang tidak lagi signifikan. Pada menit ke-4 terjadi peningkatan konsentrasi Fe kembali dibandingkan pada menit ke-3. Hal ini menunjukkan bahwa logam berat Fe mulai terlepas kembali karena sudah mencapai titik jenuhnya. Ketika adsorben mencapai titik jenuh, jumlah situs adsorpsi yang tersedia sudah terisi dan tidak dapat menyerap lebih banyak zat lagi pada kondisi tertentu.

Penurunan konsentrasi Fe dalam AAT merupakan hasil positif dari penelitian ini yang menunjukkan potensi adsorben (*claystone*, zeolit dan arang batok kelapa) dalam mengatasi masalah pencemaran logam berat besi di lingkungan. Alat rakitan yang dirancang terbukti mampu menurunkan konsentrasi Fe hingga memenuhi baku mutu hanya dalam waktu 2 menit.

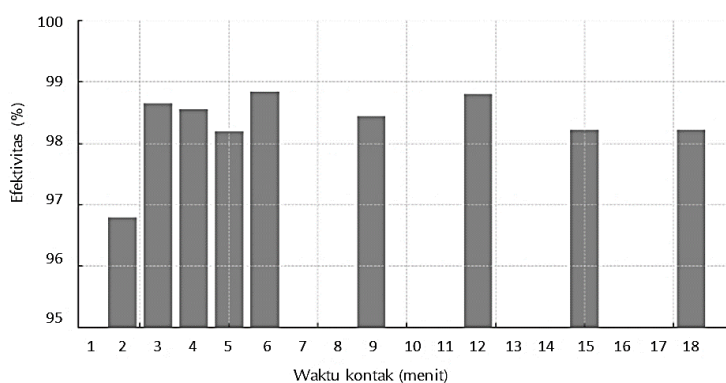
Gambar 8 menyajikan tingkat efisiensi adsorpsi Fe dalam AAT seiring bertambahnya waktu. Berdasarkan data yang diberikan, efektivitas penyerapan Fe dalam AAT meningkat hingga titik optimum seiring dengan bertambahnya waktu kontak. Konsentrasi awal Fe pada sampel AAT adalah 42,81 mg/l. Pada awal eksperimen, efektivitas penyerapan Fe mencapai 96,79% pada waktu kontak 2 menit

dan meningkat secara signifikan hingga mencapai 98,65% pada waktu kontak 3 menit.

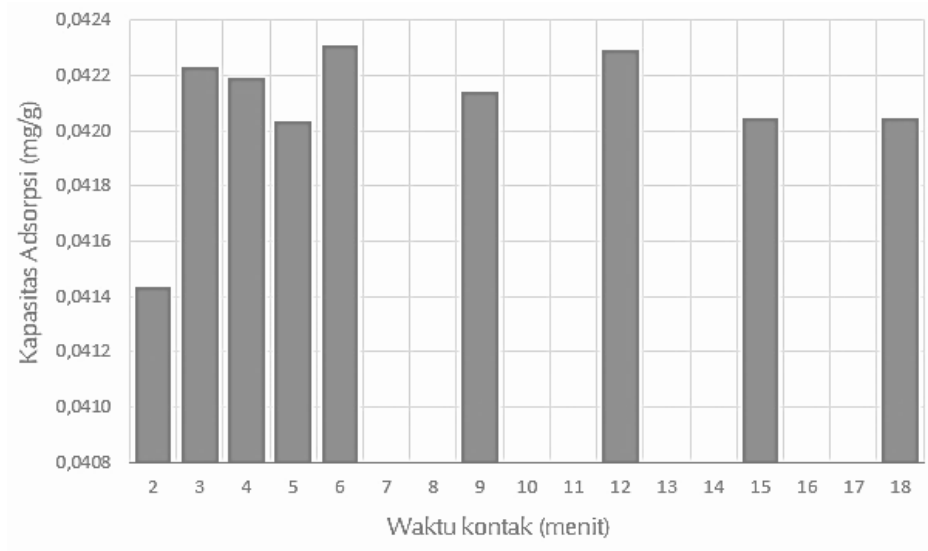
Berdasarkan Gambar 9, kapasitas adsorpsi cukup stabil pada rentang waktu tertentu. Pada awal penelitian, pada waktu kontak 2 menit, kapasitas adsorpsi Fe adalah 0,0414 mg/g. Kemudian, pada waktu kontak 3 dan 4 menit kapasitas adsorpsi tetap relatif stabil dengan nilai 0,0422 mg/g. Hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi Fe dalam AAT mencapai titik jenuh kapasitas adsorpsi pada tingkat tertentu, dan tidak ada peningkatan signifikan dalam jumlah Fe yang dapat diserap per gram adsorben. Seiring berjalannya waktu, kapasitas adsorpsi hanya mengalami fluktuasi kecil pada beberapa titik waktu.

### pH AAT setelah Adsorpsi

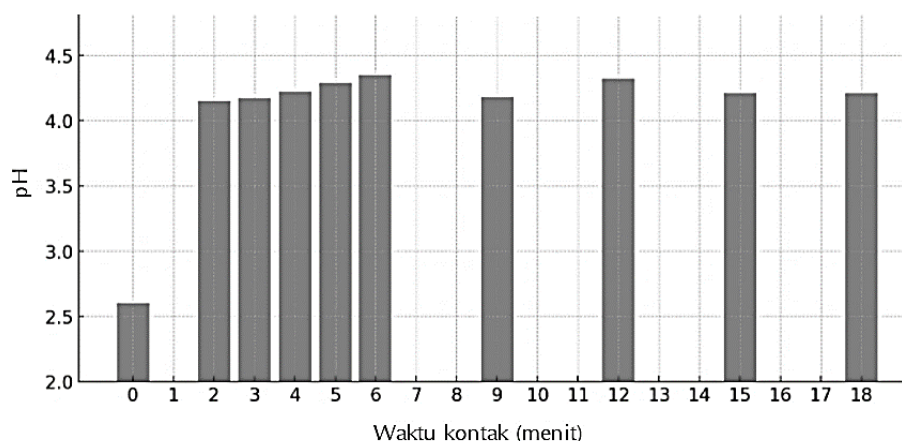
Perubahan pH AAT setelah adsorpsi dapat dilihat pada Gambar 10. Meningkatnya pH AAT setelah adsorpsi disebabkan oleh dua faktor utama yaitu penyerapan logam Fe oleh komposit adsorben dan adanya kandungan kation basa pada komposit adsorben. Komposit mampu menyerap Fe dari AAT. Penurunan konsentrasi Fe dalam AAT akan meningkatkan pH AAT. Komposit adsorben mengandung kation Na, K, Mg, Ca yang bersifat basa. Kation basa ini meningkatkan pH AAT. *Claystone*, salah satu bahan penyusun komposit, mengandung mineral kaolinit dan montmorilonit. Kedua mineral ini memiliki kapasitas tukar kation yang tinggi (kaolinit 2-16 meq/100 g dan montmorilonit 60-100 meq/100 g). Kapasitas tukar kation yang tinggi ini memungkinkan *claystone* untuk menyerap ion  $H^+$  dari AAT, sehingga meningkatkan pH AAT.



Gambar 8. Efektivitas penyerapan Fe



Gambar 9. Kapasitas adsorpsi Fe



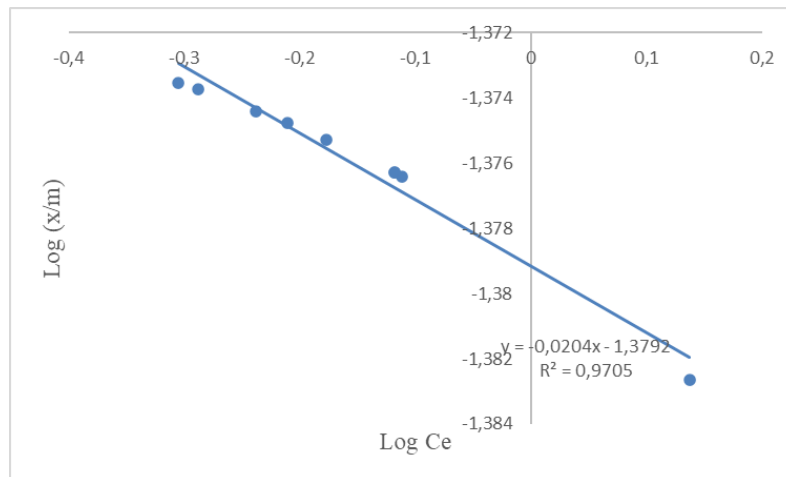
Gambar 10. pH AAT setelah adsorpsi

### Isoterm Adsorpsi

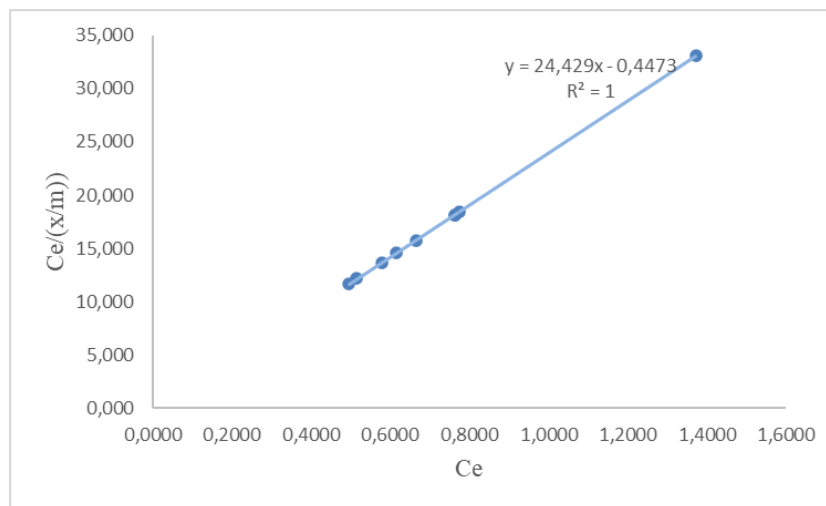
Pola adsorpsi dapat dikenali melalui kurva isoterm adsorpsi dengan nilai koefisien korelasi ( $R^2$ ) mendekati 1. Pada proses adsorpsi logam Fe, pola isoterm Freundlich memiliki  $R^2$  sebesar 0,9705 (Gambar 11), sementara pola isoterm Langmuir memiliki  $R^2$  sebesar 1 (Gambar 12). Dari nilai  $R^2$  ini, dapat disimpulkan bahwa pola isoterm Langmuir Fe memiliki koefisien korelasi yang lebih tinggi daripada pola isoterm Freundlichnya.

Dari nilai korelasi yang tinggi pada kedua isoterm, baik Freundlich maupun Langmuir, dapat disimpulkan bahwa proses adsorpsi Fe

dalam penelitian ini mengikuti pola isoterm Langmuir dengan nilai  $R^2=1$ . Hal ini mengindikasikan bahwa molekul-molekul yang teradsorpsi di permukaan komposit membentuk satu lapisan atau monolayer. Selain itu, dapat diasumsikan juga bahwa permukaan komposit adsorben bersifat homogen dan setiap molekul memiliki penyerapan yang serupa dalam energi pengikat pada setiap sisi aktifnya. Berdasarkan kapasitas adsorpsi Fe yang stabil dan tidak mengalami perubahan yang signifikan setelah mencapai titik tertentu, menunjukkan adanya saturasi. Saturasi ini dapat dicapai jika jumlah situs adsorpsi pada permukaan adsorben telah terisi sepenuhnya oleh zat yang diserap.



Gambar 11. Kurva isotherm Freundlich

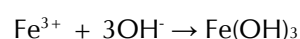


Gambar 12. Kurva isotherm Langmuir

Model isotherm yang digunakan untuk menjelaskan fenomena ini tergantung pada sifat adsorben dan proses adsorpsi yang terjadi. Jika jumlah situs adsorpsi yang tersedia tetap dan kapasitas adsorpsi mencapai titik jenuh, model Langmuir lebih cocok untuk menggambarkan adsorpsi. Model Langmuir didasarkan pada asumsi bahwa adsorpsi terjadi pada situs adsorpsi yang homogen dan bahwa setiap situs memiliki kemampuan untuk menyerap satu molekul pada satu waktu.

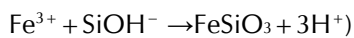
Dengan demikian, diperkirakan bahwa proses adsorpsi Fe dalam penelitian ini bersifat adsorpsi kimia yaitu terjadi ikatan kuat antara adsorbat dan permukaan adsorben, sehingga bersifat *irreversible* (sulit dilepaskan). Kondisi

ini disebabkan oleh keterikatan adsorbat pada permukaan adsorben yang mencegahnya bergerak dari satu bagian ke bagian lain pada permukaan adsorben. Reaksi kimia yang mungkin terjadi pada adsorpsi ini adalah reaksi antara ion Fe dalam larutan AAT dengan gugus hidroksil yang terdapat pada permukaan adsorben. Hal ini adalah representasi umum dari adsorpsi kimia, yaitu ion Fe membentuk ikatan dengan gugus fungsional pada permukaan adsorben:

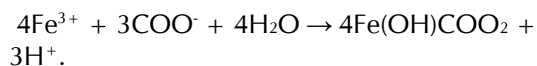


Reaksi terjadi antara ion Fe dengan gugus hidroksil pada permukaan adsorben yang mengandung silika. Proses ini melibatkan

pembentukan senyawa padat  $\text{FeSiO}_3$  pada permukaan adsorben yang mengandung silika, seperti *claystone* atau zeolit:



Selanjutnya reaksi antara ion Fe dengan gugus karboksilat ( $\text{COO}^-$ ) pada permukaan adsorben yang mengandung arang aktif. Proses ini melibatkan pembentukan kompleks  $\text{FeCOO}^{2+}$  serta pelepasan ion  $\text{OH}^-$ .



## KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa alat rakitan dengan menggunakan sistem otomatisasi teruji dapat digunakan dalam uji penurunan konsentrasi Fe pada AAT. Selain itu bahan komposit *claystone*, zeolit dan arang tempurung kelapa terbukti efektif menurunkan konsentrasi Fe hingga memenuhi baku mutu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adsorpsi Fe pada penelitian ini mengikuti isoterm Langmuir dan jenis adsorpsi yang terjadi yaitu adsorpsi kimia.

Penelitian ini dapat dilanjutkan terhadap penurunan konsentrasi logam berat lain seperti Mn menggunakan alat rakitan. Selain itu dapat dilakukan penambahan  $\text{CaCO}_3$  dalam AAT untuk menetralkan pH.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Bapak Era dan Bapak Raymond yang telah memfasilitasi pengambilan sampel, serta LPPMI ITNY yang telah mendanai penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adinata, M.R. (2013) *Pemanfaatan limbah kulit pisang sebagai karbon aktif*. Yogyakarta.
- Balintova, M., Holub, M., Stevulova, N., Cigasova, J. dan Tesarcikova, M. (2014) "Sorption in acidic environment - Biosorbents in comparison with commercial adsorbents," *Chemical Engineering*

*Transactions*, 39, hal. 625–630. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3303/CET1439105>.

- Bernardes de Souza, C.M. dan Mansur, M.B. (2011) "Modelling of acid mine drainage (AMD) in columns," *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 28(3), hal. 425–432. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1590/S0104-66322011000300008>.

- Dala Ngapa, Y. dan Gago, J. (2019) "Adsorpsi ion Pb(II) oleh zeolit alam Ende teraktivasi asam," *Cakra Kimia (Indonesian E-Journal of Applied Chemistry)*, 7(2), hal. 84–91.

- Diharyo, Dohong, S., Gumiri, S. dan Damanik, Z. (2020) "Pengaruh lama aktivasi dengan  $\text{H}_3\text{PO}_4$  dan ukuran butir arang cangkang kelapa sawit terhadap ukuran pori dan luas permukaan butir arang aktif," *Prosiding Seminar Nasional Lingkungan Lahan Basah*, 5(1), hal. 48–54.

- Ghafarunnisa, D., Rauf, A., Tyas, B. dan Rukmana, S. (2017) "Pemanfaatan batubara menjadi karbon aktif dengan proses karbonisasi dan aktivasi menggunakan reagen asam fosfat ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) dan ammonium bikarbonat ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ )," in *Prosiding Seminar Nasional XII "Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi 2017 Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta"*. Yogyakarta, hal. 36–41.

- Hafidoh, D.M. (2021) *Pembuatan dan karakterisasi karbon aktif dari bambu menggunakan aktivator HCl sebagai adsorben timbal (Pb)*. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.

- Harnowo, A., Hidayah, E.N. dan Janah, M. (2019) "Kapasitas adsorbansi arang aktif kulit kacang tanah pada penyisihan logam Fe," *Jurnal Mineral Energi dan Lingkungan*, 3(1), hal. 53–59. Tersedia pada: <https://doi.org/10.31315/jmel.v3i1.2991>.

- Hernaningsih (2023) "Application of the concept of smart city and smart water management for the new capital city," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1201(1), hal. 1755–1315. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1201/1/012103>.

- Hong, S., Cannon, F.S., Hou, P., Byrne, T. dan Nieto-Delgado, C. (2014) "Sulfate removal from acid mine drainage using polypyrrole-grafted granular activated carbon," *Carbon*, 73, hal. 51–60. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.02.036>.

- Huda, S., Ratnani, R.D. dan Kurniasari, L. (2020) "Karakterisasi karbon aktif dari bambu ori

- (*Bambusa arundinacea*) yang diaktivasi menggunakan asam klorida (HCl)," *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*, 5(1). Tersedia pada: <https://doi.org/10.31942/inteka.v5i1.3397>.
- Imani, A., Sukwika, T. dan Febrina, L. (2021) "Karbon aktif ampas tebu sebagai adsorben penurunan kadar besi dan mangan limbah air asam tambang," *Jurnal Teknologi Universitas Muhamadiyah Jakarta*, 13(1), hal. 33–42.
- Juniar, H. dan Sari, U.M. (2019) "Perbandingan efektivitas karbon aktif sekam padi dan kulit pisang kepok sebagai adsorben pada pengolahan air Sungai Enim," in *Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2019 Fakultas Teknik Universitas Muhamadiyah Jakarta*. Jakarta, hal. 1–13.
- Kunarti, E.S., Sutarno, S. dan Baralangi, S. (2015) "Adsorpsi polutan ion dikromat menggunakan zeolit alam termodifikasi amina," *Jurnal Manusia dan Lingkungan*, 22(3), hal. 298. Tersedia pada: <https://doi.org/10.22146/jml.18754>.
- Kusdarini, E., Budianto, A. dan Ghafarunnisa, D. (2017) "Produksi karbon aktif dari batubara bituminus dengan aktivasi tunggal  $H_3PO_4$ , kombinasi  $H_3PO_4-NH_4HCO_3$  dan termal," *Reaktor*, 17(2), hal. 74–80. Tersedia pada: <https://doi.org/10.14710/reaktor.17.2.74-80>.
- Marina Olivia Esterlita dan Netti Herlina (2015) "Pengaruh penambahan aktivator  $ZnCl_2$ , KOH, dan  $H_3PO_4$  dalam pembuatan karbon aktif dari pelepah aren (*Arenga pinnata*)," *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(1), hal. 47–52. Tersedia pada: <https://doi.org/10.32734/jtk.v4i1.1460>.
- Masriatini, R., Fatimura, M. dan Putri, F. (2020) "Pemanfaatan limbah kulit pisang menjadi karbon aktif dengan variasi konsentrasi aktivator NaCl," *Jurnal Redoks*, 5(2), hal. 87–95. Tersedia pada: <https://doi.org/10.31851/redoks.v5i2.4924>.
- Masthura, M. dan Putra, Z. (2018) "Karakterisasi mikrostruktur karbon aktif tempurung kelapa dan kayu bakau," *Elkawanie*, 4(1), hal. 45–54. Tersedia pada: <https://doi.org/10.22373/ekw.v4i1.3076>.
- Maulinda, L., ZA, N. dan Sari, D.N. (2017) "Pemanfaatan kulit singkong sebagai bahan baku karbon aktif," *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 4(2), hal. 11. Tersedia pada: <https://doi.org/10.29103/jtku.v4i2.69>.
- Meilianti, M. (2017) "Karakteristik karbon aktif dari cangkang buah karet menggunakan aktivator  $H_3PO_4$ ," *Jurnal Distilasi*, 2(2), hal. 1–9. Tersedia pada: <https://doi.org/10.32502/jd.v2i2.1146>.
- Mentari, V.A., Handika, G. dan Seri, M. (2018) "Perbandingan Gugus Fungsi dan Morfologi Permukaan Karbon Aktif dari Pelepah Kelapa Sawit Menggunakan Aktivator Asam Fosfat ( $H_3PO_4$ ) dan Asam Nitrat ( $HNO_3$ )," *Jurnal Teknik Kimia USU*, 7(1), hal. 16–20. Tersedia pada: <https://doi.org/10.32734/jtk.v7i1.1629>.
- Motsi, T., Rowson, N.A. dan Simmons, M.J.H. (2009) "Adsorption of heavy metals from acid mine drainage by natural zeolite," *International Journal of Mineral Processing*, 92(1–2), hal. 42–48. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.02.005>.
- Mukarrom, F., Pranoto, Karsidi, R., Gravitaniani, E., Astuti, F. dan Maharditya, W. (2020) "The assessment of claystone, quartz and coconut shell charcoal for adsorbing heavy metals ions in acid mine drainage," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 858(1), hal. 0–8. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/858/1/012040>.
- Musso, T.B., Parolo, M.E., Pettinari, G. dan Francisca, F.M. (2014) "Cu(II) and Zn(II) Adsorption Capacity of Three Different Clay Liner Materials," *Journal of Environmental Management*, 146, hal. 50–58. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.026>.
- Nuria, F.I., Anwar, M. dan Purwaningsih, D.Y. (2020) "Pembuatan karbon aktif dari enceng gondok," *Tecnoscienza*, 5(1), hal. 38–48.
- Nurrahman, A., Permana, E., Gusti, D.R. dan Lestari, I. (2021) "Pengaruh konsentrasi aktivator terhadap kualitas karbon aktif dari batubara lignit," *Jurnal Daur Lingkungan*, 4(2), hal. 44–53. Tersedia pada: <https://doi.org/10.33087/daurling.v4i2.86>.
- Nursanto, E. dan Pradise, M. (2021) "Adsorption of iron (Fe) heavy metal in acid mine drainage from coal mining," *RSF Conference Series: Engineering and Technology*, 1(1), hal. 500–509. Tersedia pada: <https://doi.org/10.31098/cset.v1i1.421>.
- Nwosu, F.O., Ajala, O.J., Owoyemi, R.M. dan Raheem, B.G. (2018) "Preparation and characterization of adsorbents derived from bentonite and kaolin clays," *Applied Water Science*, 8(7), hal. 195. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0827-2>.

- Pambayun, G.S., Yulianto, R.Y.E., Rachimoellah, M. dan Putri, E.M.M. (2013) "Pembuatan karbon aktif dari arang tempurung kelapa dengan aktivator  $ZnCl_2$  dan  $Na_2CO_3$  sebagai adsorben untuk mengurai kadar fenol dalam air limbah," *Jurnal Teknik POMITS*, 2(1), hal. F-116-F-120. Tersedia pada: <https://doi.org/10.12962/j23373539.v2i1.2437>.
- Paradise, M., Nursanto, E., Nurkhamim dan Haq, S.R. (2022) "Use of claystone, zeolite, and activated carbon as a composite to remove heavy metals from acid mine drainage in coal mining," *ASEAN Engineering Journal*, 12(2), hal. 75–81. Tersedia pada: <https://doi.org/10.11113/aej.V12.16982>.
- Pranoto, Martini, T., Astuti, F. dan Maharditya, W. (2020) "Test the effectiveness and characterization of quartz sand/coconut shell charcoal composite as adsorbent of manganese heavy metal," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 858(1), hal. 0–8. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/858/1/012041>.
- Purnamawati, N. (2023) "Uji kualitas sintesis karbon aktif dari pelepah aren teraktivasi asam fosfat," *Journal of Research and Education Chemistry*, 5(2), hal. 120. Tersedia pada: [https://doi.org/10.25299/jrec.2023.vol5\(2\).15225](https://doi.org/10.25299/jrec.2023.vol5(2).15225).
- Purwaningsih, D.Y., Budianto, A., Ningrum, A.A. dan Kosagi, B.T. (2019) "Produksi karbon aktif dari kulit singkong dengan aktivasi Kimia fisika menggunakan gelombang mikro," in *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan VII*, hal. 663–670.
- Rahmawati, A. dan Santoso, S.J. (2013) "Studi adsorpsi logam  $Pb(II)$  dan  $Cd(II)$  pada asam humat dalam medium air," *Alchemy*, 2(1), hal. 46–57. Tersedia pada: <https://doi.org/10.18860/al.v0i0.2296>.
- Said, N.I. (2018) "Teknologi pengolahan air asam tambang batubara 'Alternatif pemilihan teknologi,'" *Jurnal Air Indonesia*, 7(2). Tersedia pada: <https://doi.org/10.29122/jai.v7i2.2411>.
- Sudibandriyo, M. dan Lydia, L. (2018) "Karakteristik luas permukaan karbon aktif dari ampas tebu dengan aktivasi kimia," *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, 10(3), hal. 149. Tersedia pada: <https://doi.org/10.5614/jtki.2011.10.3.6>.
- Suherman, Hasanah, M., Ariandi, R. dan Ilmi (2021) "Pengaruh suhu aktivasi terhadap karakteristik dan mikrostruktur karbon aktif pelepah kelapa sawit (*Elaeis guineensis*)," *Jurnal Industri Hasil Perkebunan*, 16(1), hal. 1–9.
- Suyanta dan Catri, C.R. (2016) "Pemisahan ion logam tembaga(II) dalam air kolam renang dengan metode adsorpsi kolom," *Jurnal Penelitian Saintek*, 21(2), hal. 87–97. Tersedia pada: <https://doi.org/10.21831/jps.v21i2.12506>.
- Tan, I.A.W., Abdullah, M.O., Lim, L.L.P. dan Yeo, T.H.C. (2017) "Surface modification and characterization of coconut shell-based activated carbon subjected to acidic and alkaline treatments," *Journal of Applied Science & Process Engineering*, 4(2), hal. 186–194. Tersedia pada: <https://doi.org/10.33736/jaspe.435.2017>.
- Yanti, W., Sosidi, H., Indriani, Prismawiryanti, Puspitasari, D.J., Mirzan, M., Abdul Rahim, E. dan Irmawati Inda, N. (2023) "Pemanfaatan karbon aktif kulit kacang tanah untuk menurunkan kadar ion logam  $Ca^{2+}$  dan  $Mg^{2+}$  dalam air," *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, 9(2), hal. 157–163. Tersedia pada: <https://doi.org/10.22487/kovalen.2023.v9.i2.16397>.

