

Adsorpsi Karbon Aktif Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Variasi Massa dan Waktu Kontak pada Air Asam Tambang

Febrina Zulya^{1)*}, Ika Meicahayanti¹⁾, Elcha Meliana Ramadhani¹⁾

¹⁾Fakultas Teknik, Teknik Lingkungan, Universitas Mulawarman

E-mail: febrinazulya@ft.unmul.ac.id

ABSTRAK

Penambangan batubara berpotensi menimbulkan pencemaran akibat air asam tambang. Selain itu, Kalimantan Timur memiliki perkebunan kelapa sawit yang sangat luas, menghasilkan limbah padat Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). Namun, pemanfaatan TKKS masih terbatas. Penelitian ini membahas pemanfaatan limbah TKKS menjadi karbon aktif yang berfungsi sebagai adsorben untuk menurunkan kadar Fe, Mn, TSS, serta menetralkan pH pada air asam tambang. Kualitas adsorben dianalisis melalui uji rendemen, proksimat, dan luas permukaan, serta studi kinetika adsorpsi berdasarkan persamaan Langmuir dan Freundlich. Proses pembuatan meliputi preparasi, karbonisasi pada suhu 450 °C selama 90 menit, dan aktivasi menggunakan larutan H₃PO₄ 6 N. Karbon aktif yang dihasilkan kemudian dikontakkan dengan air asam tambang yang telah diendapkan selama 1 jam melalui metode *jar test*, dengan variasi massa (2, 4, 8 gram) dan waktu kontak (40, 80, 120, 160 menit) pada kecepatan 100 rpm. Hasil penelitian menunjukkan beberapa parameter proksimat, seperti kadar air dan abu, sesuai dengan SNI, sedangkan kadar volatil, karbon murni, dan daya serap iodin belum memenuhi standar. Suhu dan waktu karbonisasi serta jenis aktivator berpengaruh terhadap karakteristik karbon. Adsorpsi berhasil menurunkan Fe, Mn, dan TSS hingga di bawah baku mutu. Kondisi optimal untuk Fe dan Mn dicapai pada massa 8 gram dengan kontak 160 menit (efisiensi 44,95 % dan 66,83 %), sedangkan TSS optimal pada massa 4 gram dan kontak 80 menit dengan efisiensi 100 %. Namun, adsorben tidak mampu menetralkan pH, bahkan peningkatan massa dan waktu kontak menurunkan pH lebih lanjut. Studi kinetika adsorpsi menunjukkan bahwa seluruh parameter mengikuti pola isoterm Freundlich.

Kata Kunci: Air Asam Tambang, Tandan Kosong Kelapa Sawit, Karbon Aktif, Adsorpsi, Pengolahan Air Limbah

ABSTRACT

Coal mining can cause pollution through acid mine drainage, while East Kalimantan's extensive palm oil plantations generate large amounts of solid waste in the form of Oil Palm Empty Fruit Bunches (EFB), which remain underutilized. This study examines the utilization of EFB waste to produce activated carbon as an adsorbent for reducing Fe, Mn, and TSS and neutralizing the pH in acid mine drainage. The quality of the adsorbent was assessed through yield, proximate analysis, surface area, and adsorption kinetics, using Langmuir and Freundlich models. The production process involved preparation, carbonization at 450 °C for 90 minutes, and activation with a 6 N H₃PO₄ solution. The activated carbon was then contacted with acid mine drainage that had been settled for 1 hour. The adsorption process was tested using the jar method, with mass variations (2, 4, and 8 grams) and contact times (40, 80, 120, and 160 minutes) at 100 rpm. Results show that moisture and ash content met SNI standards, but volatile matter, pure carbon, and iodine adsorption did not. Carbonization conditions and the type of activator affected the characteristics of the carbon. Adsorption effectively reduced Fe, Mn, and TSS to below quality standards. Optimal Fe and Mn removal occurred at 8 grams with 160 minutes of contact (44.95 % and 66.83 % efficiency), while TSS removal was optimal at 4 grams and 80 minutes (100 % efficiency). However, the adsorbent failed to neutralize the pH. Adsorption kinetics followed the Freundlich isotherm pattern.

Keyword: Acid Mine Drainage, Oil Palm Empty Fruit Bunches, Activated Carbon, Adsorption, Wastewater Treatment

1. Pendahuluan

Sektor pertambangan merupakan salah satu penggerak utama perekonomian Indonesia (Oktorina, 2018). Pada tahun 2024, produksi batubara mencapai 812–831 juta ton, melampaui target 710 juta ton

(ESDM, 2024). Aktivitas penambangan memberi dua sisi dampak, yaitu meningkatkan pertumbuhan ekonomi sekaligus menimbulkan kerusakan lingkungan. Penambangan terbuka umumnya menyebabkan perubahan bentang alam serta sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, sehingga ekosistem dan tata air di sekitarnya ikut terdampak (Hidayat, 2017).

Salah satu dampak negatif pertambangan batubara adalah pencemaran dan penurunan kualitas air akibat terbentuknya air asam tambang (Murati dkk., 2024). Limbah ini muncul ketika mineral pirit (FeS_2) dan sulfida lain tersingkap ke permukaan, kemudian bereaksi secara kimia dan biologis menghasilkan sulfat dengan tingkat keasaman tinggi. Kondisi tersebut menurunkan kualitas lingkungan dan mengganggu organisme hidup (Wahyudin dkk., 2018). Air asam tambang umumnya ditandai dengan pH rendah serta kandungan logam berat dan TSS yang tinggi.

Berdasarkan Peraturan Daerah Kalimantan Timur No. 2 Tahun 2011, baku mutu kualitas air asam tambang ditetapkan untuk TSS sebesar 300 mg/L, Fe sebesar 7 mg/L, Mn sebesar 4 mg/L, dan pH sebesar 6–9. Pengelolaannya wajib mengikuti Permen ESDM No. 26 Tahun 2018 tentang reklamasi dan pascatambang. Saat ini, terdapat dua pendekatan pengelolaan, yaitu teknologi aktif dan pasif, dengan metode umum berupa netralisasi menggunakan bahan kimia basa seperti kapur (CaCO_3), *hydrated lime* ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), dan *soda ash* (Na_2CO_3) (Murati dkk., 2024).

Salah satu metode pengolahan air asam tambang adalah penggunaan karbon aktif, yang diproduksi melalui proses karbonisasi dan aktivasi, atau dengan bahan kimia seperti ZnCl_2 , H_3PO_4 , dan hidroksida logam alkali. Imani dkk. (2021) menunjukkan bahwa karbon aktif berbahan ampas tebu teraktivasi HCl 0,1 N efektif menurunkan Fe (79,65%) dan Mn (60%). Penelitian Paramita dkk. (2018) menggunakan *fly ash* batubara juga berhasil meningkatkan pH serta menurunkan Fe (85,95%) dan Mn (81,77%). Karbon aktif terbukti mampu mengadsorpsi kontaminan organik maupun anorganik berkat struktur internal yang terbentuk dari proses karbonisasi dan aktivasi (Kusdarini dkk., 2017; Yuliastuti & Dwicahyono, 2018).

Karbon aktif dapat dibuat dari beragam bahan yang mengandung lignoselulosa, seperti Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). TKKS merupakan limbah padat yang mencapai 20–23% dari tandan buah segar (Utami dkk., 2017). Pemanfaatannya oleh pabrik masih terbatas, umumnya melalui pembakaran yang menimbulkan polusi udara, penimbunan yang menyebabkan pencemaran tanah, mulsa, atau kompos. Di Kalimantan Timur, dengan luas perkebunan 1,32 juta hektare (BPS Kalimantan Timur, 2024), jumlah limbah TKKS sangat besar. TKKS dipilih sebagai bahan karbon aktif karena kandungan lignoselulosa (55–60% berat kering), yang terdiri atas lignin, selulosa, dan hemiselulosa. Kandungan ini memiliki gugus aktif –OH dan –COOH yang efektif dalam mengadsorpsi logam berat (Muhammad dkk., 2019).

Berdasarkan uraian permasalahan di atas, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kualitas adsorben karbon aktif dari tandan kosong kelapa sawit. Penelitian ini juga ditujukan untuk mengetahui pengaruh massa dan waktu kontak adsorpsi terhadap parameter Fe, Mn, dan TSS pada air asam tambang. Selain itu, penelitian ini juga ditujukan untuk mengetahui karakteristik adsorpsi karbon aktif tandan kosong kelapa sawit dengan persamaan isoterm Langmuir dan Freundlich.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan di beberapa lokasi. Sampel air asam tambang diambil dari PT X di Loa Janan, Kutai Kartanegara, sedangkan sampel tandan kosong kelapa sawit diperoleh dari perkebunan PT X di Muara Badak, Kutai Kartanegara. Proses pengeringan, pengolahan, serta uji pH dan TSS dilakukan di Laboratorium Teknologi Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman, Samarinda. Analisis volatil karbon aktif dilakukan di Laboratorium Teknologi Mineral dan Batubara, Universitas Mulawarman, sedangkan analisis BET dilakukan di Laboratorium Analisis Terpadu, Universitas Islam Indonesia, Sleman. Analisis kadar Fe dan Mn dilakukan di PT Laboratorindo Alam Bestari, Samarinda.

A. Variabel Penelitian

Tabel 1. Variabel Bebas

No.	Variabel Bebas	Variasi
1.	Massa Adsorben	2 gram 4 gram

No.	Variabel Bebas	Variasi
		8 gram
		40 menit
2.	Waktu Kontak	80 menit
		120 menit
		160 menit

Variabel terikat pada penelitian ini adalah kadar Fe, Mn, pH, dan TSS dalam air asam tambang. Variabel kontrol pada penelitian ini adalah proses karbonisasi 450°C selama 90 menit dengan ukuran bahan baku ± 6 cm, aktivator H₃PO₄ 6 N, ukuran karbon aktif 100 mesh, dan kecepatan pengadukan 100 rpm.

B. Tahap Penelitian

1) Pengambilan Sampel Air Asam Tambang

Air asam tambang diambil dengan metode *grab sampling* yang merupakan teknik pengambilan sampel secara sesaat dalam waktu sesaat pada lokasi tertentu (Hasan, 2002). Sampel diambil secara *grab* agar mewakili kondisi kualitas sampel pada waktu pengambilan secara spesifik. Adapun lokasi pengambilan sampel berada di *sump* yang merupakan kolam atau tempat penampungan air sementara yang dibangun di area tambang, khususnya di area tambang terbuka (*open pit*).



Gambar 1. Lokasi Pengambilan Sampel Air Asam Tambang

2) Persiapan Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah gelas ukur, gelas kimia, *jar test*, oven, *furnace*, neraca analitik, desikator, mortar dan alu, botol PE, jerigen, ayakan 100 mesh, spatula, batang pengaduk, pompa vakum, labu vakum, corong kaca, *magnetic stirrer*, tabung sentrifugal, sentrifugal *separator*, buret, statif dan klem, cawan porselen, pipet, labu ukur, labu erlenmeyer, dan pH meter. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah air limbah asam tambang, tandan kosong kelapa sawit, kertas saring *whatman* no. 42, *aluminium foil*, larutan H₃PO₄ 6 N, larutan Na₂S₂O₃ 0,1 N, larutan amilum 1%, dan larutan Iod 0,1 N.

3) Dehidrasi Tandan Kosong Kelapa Sawit

Proses dehidrasi tandan kosong kelapa sawit dilakukan dengan beberapa langkah mengacu pada penelitian oleh Putra dkk. (2017) dan Viena dkk. (2019), yaitu TKKS dipotong-potong hingga berukuran ± 6 × 6 cm, kemudian dicuci dengan air bersih secara perlahan. Selanjutnya, TKKS ditimbang berat awal dari tandan kosong kelapa sawit yang telah dipotong, lalu dikeringkan tandan kosong kelapa sawit di oven dengan suhu 105°C. Ulangi proses pengeringan hingga mencapai berat konstan.



Gambar 2. Pencucian TKKS (a) dan Pengeringan TKKS (b)

4) Karbonisasi Tandan Kosong Kelapa Sawit

Proses karbonisasi TKKS dilakukan dengan beberapa langkah mengacu pada penelitian oleh Putra dkk. (2017) dan Kosim dkk. (2022), yaitu TKKS yang telah kering dikarbonisasi menggunakan *furnace* dengan suhu 450°C selama 90 menit, didinginkan TKKS di dalam desikator selama 30 menit, dihaluskan TKKS menggunakan mortar dan alu. Selanjutnya, TKKS yang telah halus diayak menggunakan ayakan berukuran 100 mesh.



Gambar 3. Karbonisasi TKKS (a) dan Penghalusan Karbon TKKS (b)

5) Aktivasi Kimia Karbon Tandan Kosong Kelapa Sawit

Proses aktivasi kimia karbon TKKS dilakukan dengan beberapa langkah mengacu pada penelitian oleh Yuliastuti & Dwicahyono (2018) dan Maysharoh dkk. (2018), yaitu ditimbang karbon TKKS dan dimasukkan dalam gelas kimia 1000 mL, dimasukkan larutan H₃PO₄ 6 N dengan rasio 10% (b/v), diaduk karbon dan aktivator hingga merata, didiamkan selama 24 jam dalam suhu ruang, dan dibilas karbon aktif dengan akuades hingga pH filtrat mendekati 7. Terakhir, dikeringkan karbon aktif dalam oven pada suhu 105°C selama 3 jam.



Gambar 4. Pengayakan Karbon TKKS (a) dan Aktivasi Karbon TKKS (b)

C. Proses Sedimentasi dan Adsorpsi

Sebelum dilakukannya proses adsorpsi, air limbah diendapkan terlebih dahulu pada reaktor sedimentasi dengan waktu detensi 1 jam mengacu pada standar bak sedimentasi menurut Metcalf dan Eddy (2004) dengan rentang efisiensi *removal* sebesar 50 – 70% untuk parameter TSS. Selanjutnya, limbah air asam tambang dengan volume 200 mL (Yulianti dkk., 2024) dikontakkan dengan adsorben berdasarkan variasi massa dan variasi waktu kontak. Limbah dan adsorben diaduk menggunakan alat *jar test* dengan kecepatan pengadukan 150 rpm (Putri dkk., 2021). Setelah proses adsorpsi, air limbah dipipet sebanyak 25 mL untuk analisis TSS dengan metode gravimetri. Air limbah yang tersisa dalam gelas kimia akan disaring menggunakan kertas saring, kemudian dianalisis parameter pH, Fe, dan Mn.

Tabel 2. Variasi Perlakuan Penelitian

Massa Adsorben	Waktu Kontak			
	40 menit	80 menit	120 menit	160 menit
2 gram	A1	A2	A3	A4
4 gram	B1	B2	B3	B4
8 gram	C1	C2	C3	C4
Total			12 sampel	



Gambar 5. Proses Sedimentasi (a) dan Proses Adsorpsi (b)

D. Tahap Analisis

1) Rendemen

Rendemen merupakan jumlah total adsorben yang dihasilkan setelah melewati proses karbonisasi. Rendemen karbon ditetapkan dengan menghitung perbandingan berat bahan baku awal terhadap berat karbon yang dihasilkan (Wijayanti & Kurniawati, 2019). Perhitungan jumlah rendemen tidak diatur oleh SNI.

$$\text{Rendemen} = \frac{b}{a} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

a = massa bahan baku yang dikarbonisasi (gram)

b = berat karbon yang dihasilkan (gram)

2) Kadar Air

Analisis kadar air dilakukan untuk menentukan jumlah air yang terkandung dalam karbon aktif. Sebanyak 1 gram adsorben diletakkan di cawan porselin yang telah diketahui massanya. Keringkan adsorben dengan oven pada suhu 115°C selama 3 jam lalu dinginkan dalam desikator. Lakukan penimbangan hingga diperoleh massa konstan (SNI 06-3730-1995). Kadar air dapat dihitung dengan persamaan:

$$\text{Kadar Air} = \frac{a - b}{a} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

a = massa karbon aktif mula-mula (gram)

b = massa karbon aktif setelah dikeringkan (gram)

3) Kadar Abu

Kadar abu mengindikasikan jumlah bahan dan mineral yang tidak terbakar selama proses karbonisasi (Erawati & Fernando, 2018). Uji kadar abu dilakukan dengan menimbang adsorben sebanyak 2 gram, kemudian letakkan dalam cawan porselein yang telah diketahui massanya. Masukkan adsorben yang berada di dalam cawan ke dalam *furnace* pada suhu 800°C selama 2 jam, setelah itu didinginkan ke dalam desikator dan ditimbang (SNI 06-3730-1995). Kadar abu dapat dihitung dengan persamaan:

$$\text{Kadar Abu} = \frac{b}{a} \times 100\% \quad (3)$$

Keterangan:

a = massa awal karbon aktif (gram)

b = massa akhir karbon aktif (gram)

4) Kadar Zat Terbang (*Volatile Matter*)

Kadar zat terbang merupakan hasil dari dekomposisi komponen-komponen penyusun arang yang terjadi selama proses pemanasan pada tahap pengarangan, dan bukanlah komponen pembentuk arang itu sendiri (Kusdarini dkk., 2017). Sebanyak 1 gram adsorben dimasukkan ke dalam cawan porselein yang telah diketahui massanya. Masukkan ke dalam *furnace* dengan suhu 950°C. Dinginkan di dalam desikator lalu ditimbang (SNI 06-3730-1995). Kadar zat terbang dapat dihitung dengan persamaan:

$$\text{Kadar Volatil} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (4)$$

Keterangan:

W_1 = berat karbon aktif mula-mula (gram)

W_2 = berat akhir karbon aktif setelah pemanasan (gram)

5) Daya Serap Iodin

Daya serap karbon aktif terhadap iodin mengukur jumlah miligram iodin yang dapat diadsorpsi oleh satu gram karbon aktif (Erawati & Fernando, 2018). Karbon aktif dipanaskan terlebih dahulu dalam oven dengan suhu 115°C selama 1 jam. Karbon aktif ditimbang sebanyak 0,5 gram dan dicampurkan dengan 50 mL larutan iodium 0,1 N, dan dihomogenkan dengan *shaker* selama 15 menit. Pindahkan ke tabung sentrifugal selama 30 menit hingga adsorben turun. Ambil 10 mL larutan tersebut dan titrasi dengan larutan natrium tiosulfat 0,1 N. Jika warna kuning pada larutan mulai samar, tambahkan larutan kanji 1% sebagai indikator. Titrasi kembali hingga warna biru tua berubah menjadi bening (SNI 06-3730-1995). Daya serap iodin dapat dihitung dengan persamaan:

$$\text{Daya Serap Iodin} = \frac{(10 - \frac{V \times N}{0,1}) \times 12,69 \times 5}{W} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan:

V = volume larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ yang diperlukan (mL)

N = normalitas larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

12,69 = jumlah iod sesuai dengan 1 mL larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,1 N

W = berat karbon aktif (gram)

6) Kadar Karbon Murni (*Fixed Carbon*)

Kadar karbon murni adalah jumlah karbon yang terdapat dalam arang. Kadar karbon murni dapat dihitung dengan persamaan:

$$\text{Kadar Karbon Murni} = 100 \% - (\text{Kadar Abu} + \text{Kadar Zat Terbang}) \quad (6)$$

7) Luas Permukaan Karbon

Luas permukaan karbon diukur dengan metode Brunauer, Emmett, and Teller (BET). Sebelum menganalisis sampel karbon, proses *degassing* dilakukan terlebih dahulu untuk menghilangkan kontaminasi gas pada mikropori karbon aktif, sehingga menghasilkan analisis yang lebih akurat (Mutiara dan Fajri, 2016). Analisis BET dilakukan di Laboratorium Analisis Terpadu, Universitas Islam Indonesia.

8) Efisiensi Penurunan Parameter Fe, Mn, dan TSS

Efisiensi adsorpsi dapat dihitung dengan persamaan (Kasman & Rani, 2022).

$$\text{Efisiensi} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (7)$$

9) Analisis Isoterm Langmuir dan Freundlich

Model Langmuir merupakan suatu model yang menggambarkan kondisi kesetimbangan adsorpsi homogen monolayer (Yulianti dkk., 2024). Persamaan isotermal adsorpsi Langmuir, yaitu (Wijayanti & Kurniawati, 2019):

$$Q = \frac{b \cdot K \cdot C_e}{1 + K \cdot C_e} \quad (8)$$

Persamaan tersebut dapat diturunkan secara linier menjadi:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{b \cdot K} + \frac{1}{C_e} + \frac{1}{b} \quad (9)$$

Keterangan:

C_e = konsentrasi kesetimbangan adsorbat dalam larutan setelah adsorpsi (mg/L)

Q = jumlah adsorbat teradsorpsi per bobot adsorben (mg/g)

K = konstanta kesetimbangan adsorpsi

b = kapasitas adsorpsi maksimum dari adsorben (mg/g)

Isoterm adsorpsi Freundlich merupakan model yang menggambarkan adsorpsi non linear dan pembentukan multilayer (Yulianti dkk., 2024). Persamaan isotermal adsorpsi Freundlich, yaitu (Wijayanti & Kurniawati, 2019):

$$Q = k \times C_e^{\frac{1}{n}} \quad (10)$$

Persamaan tersebut dapat diturunkan secara linier menjadi:

$$\ln Q = \ln k + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (11)$$

Keterangan:

C_e = konsentrasi kesetimbangan adsorbat dalam larutan setelah adsorpsi (mg/L)

k = konstanta adsorpsi Freundlich

n = konstanta empiris

Q = jumlah adsorbat teradsorpsi per bobot adsorben (mg/g)

3. Hasil dan Pembahasan

A. Karakterisasi Karbon Aktif TKKS

Tabel 3. Hasil Uji Karakteristik Karbon Aktif TKKS

No.	Parameter	SNI 06-3730-1995	Hasil Uji	Keterangan
1.	Rendemen (%)	-	39,28	-
2.	Kadar air (%)	Maks. 15	1,24	Memenuhi
3.	Kadar abu (%)	Maks. 10	8,98	Memenuhi
4.	Kadar volatil (%)	Maks 25	45,5	Tidak Memenuhi
5.	Karbon murni (%)	Min. 65	21,91	Tidak Memenuhi
6.	Daya serap terhadap iodin (mg/g)	Min. 750	482,21	Tidak Memenuhi
7.	Luas permukaan karbon (m^2/g)	-	5,359	-

Sumber: Data Primer, 2025

1) Rendemen

Uji rendemen bertujuan menilai keberhasilan pembentukan karbon aktif. Semakin tinggi nilainya, semakin banyak karbon aktif yang dihasilkan (Purnamawati, 2023). Dari 228 gram bahan baku sebelum karbonisasi, diperoleh 100 gram karbon, lalu setelah aktivasi massanya menjadi 89,55 gram sehingga persentase rendemen 39,28%. Berkurangnya massa karbon aktif pada saat karbonisasi disebabkan karena penguapan air, pelepasan zat volatil, dan dekomposisi senyawa organik pada saat bahan baku dipanaskan (Pradnyana & Sukarta, 2017).

2) Kadar Air

Uji kadar air bertujuan mengetahui sifat hidroskopis karbon aktif, yaitu kemampuannya menyerap dan menahan air dari lingkungan (Lestari dkk., 2016). Nilai kadar air karbon aktif pada penelitian ini adalah 1,24%. Rendahnya kadar air pada karbon aktif TKKS menunjukkan bahwa air

bebas maupun terikat telah menguap selama karbonisasi, sejalan dengan sifat higroskopis aktivator H_3PO_4 (Lestari dkk., 2016).

3) Kadar Abu

Uji kadar abu bertujuan mengetahui sisa kandungan oksida logam dalam karbon aktif setelah karbonisasi dan aktivasi (Novianty, 2025). Nilai kadar abu karbon aktif pada penelitian ini adalah 8,98%. Nilai kadar abu rendah karena aktivator melarutkan oksida logam pada proses aktivasi. Karbon aktif yang awalnya mengandung pengotor anorganik pada pori-porinya menjadi lebih bersih setelah pengotor tersebut larut (Lestari dkk., 2016).

4) Kadar Zat Terbang

Penetapan kadar zat volatil bertujuan untuk mengetahui jumlah senyawa yang belum menguap pada proses karbonisasi dan aktivasi, tetapi dapat menguap pada suhu 950°C (Lestari dkk., 2016). Nilai kadar zat terbang karbon aktif pada penelitian ini adalah 45,5%. Adawi dkk. (2021) menyatakan bahwa tinggi rendahnya kadar volatil yang dihasilkan menunjukkan bahwa permukaan karbon aktif masih ditutupi oleh senyawa non karbon, sehingga mempengaruhi kemampuan daya serapnya.

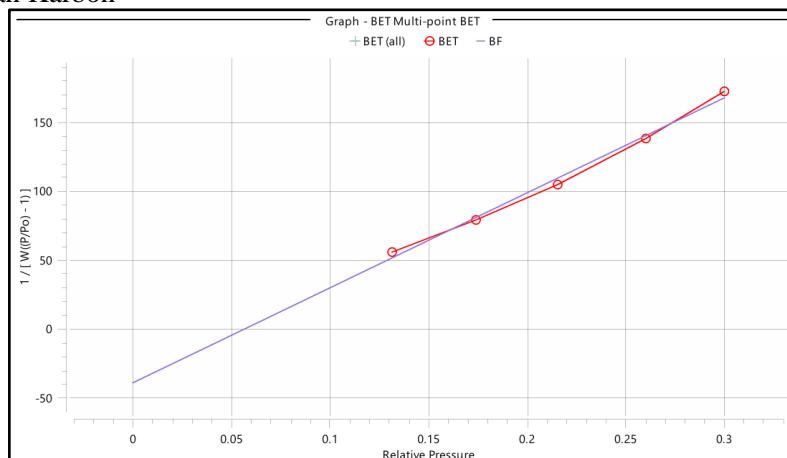
5) Karbon Murni

Peningkatan kadar zat menguap dan kadar abu cenderung menurunkan proporsi karbon murni dalam material (Lestari dkk., 2016). Kadar karbon murni pada penelitian ini adalah 21,91%. Nilai karbon murni yang rendah pada penelitian ini disebabkan oleh tingginya kadar abu dan kadar volatil yang dihasilkan. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh Maulana dkk. (2017), yang menyatakan bahwa semakin tinggi kadar abu dan zat volatil, maka semakin rendah kandungan karbon murninya.

6) Daya Serap terhadap Iodin

Penentuan daya serap iodin bertujuan untuk mengetahui kemampuan karbon aktif dalam menyerap larutan berwarna atau kotoran (Maulana dkk., 2017). Daya serap karbon aktif terhadap iodin pada penelitian ini adalah 482,21 mg/g yang mana nilai ini tidak memenuhi standar SNI, yaitu minimal 750 mg/g. Semakin rendah kadar karbon murni, semakin kecil pori dan luas permukaan karbon aktif, sehingga daya serap iodin juga menurun (Maulana dkk., 2017).

7) Luas Permukaan Karbon



Gambar 6. Grafik Hasil Uji BET Luas Permukaan Karbon Aktif

Hasil uji menunjukkan luas permukaan karbon aktif hanya $5,359 \text{ m}^2/\text{g}$, jauh lebih rendah dibandingkan karbon aktif dari batubara ($296,379 \text{ m}^2/\text{g}$; Yulianti dkk., 2024) dan kayu mahoni ($105,492 \text{ m}^2/\text{g}$; Aziz dkk., 2022). Rendahnya nilai ini diduga akibat tingginya kadar abu dan volatil yang menyumbat pori-pori karbon, sehingga mengurangi luas permukaan (Oko dkk., 2021).

B. Analisis Karakteristik Awal dan Efektivitas Sedimentasi pada Air Asam Tambang

Tabel 4. Analisis Parameter Awal Air Asam Tambang

No.	Parameter	Satuan	Air Sampel	Baku Mutu	Metode Uji	Keterangan
1.	Fe	mg/L	12,19	7	SNI 6989.5-2009	Tidak Memenuhi
2.	Mn	mg/L	5,12	4	SNI 6989.5-2009	Tidak Memenuhi
3.	TSS	mg/L	2.964	300	SNI 06-6989.27-2005	Tidak Memenuhi

4.	pH	-	4,15	6 – 9	SNI 06-6989.11-2004	Tidak Memenuhi
Sumber: Data Primer, 2025						

Proses sedimentasi dilakukan untuk menurunkan TSS awal pada air asam tambang, dengan waktu detensi 1 jam sesuai standar bak sedimentasi Metcalf dan Eddy (2004). Sedimentasi dengan waktu detensi 1 jam menurunkan TSS hingga 81,85% menjadi 538 mg/L, namun tidak efektif untuk Fe dan Mn yang hadir sebagai ion terlarut (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+}) sehingga tidak dapat mengendap dengan gravitasi (Linggasari, 2023; Rafif dkk., 2024). Proses ini juga tidak memengaruhi pH sampel.

C. Analisis Efektivitas Adsorpsi Karbon Aktif Tandan Kosong Kelapa Sawit terhadap Parameter Air Asam Tambang

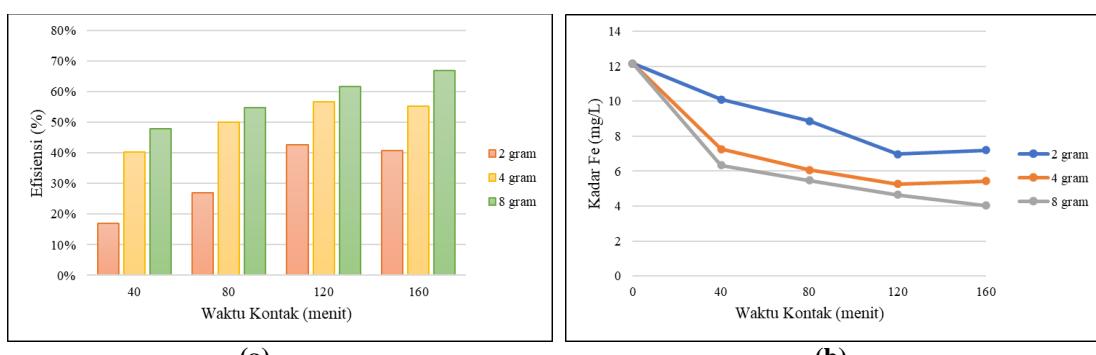
1) Parameter Fe

Tabel 5. Hasil Adsorpsi Parameter Fe Karbon Aktif TKKS

Kode Sampe I	Waktu Kontak (menit)	Massa (gram)	Nilai Fe (mg/L)		% Efisiensi
			Awal	Akhir	
A1	40			10,09	16,95%
A2	80			8,86	27,08%
A3	120	2		6,97	42,63%
A4	160			7,19	40,82%
B1	40			7,26	40,25%
B2	80			6,07	50,04%
B3	120	4	12,15	5,27	56,63%
B4	160			5,43	55,31%
C1	40			6,34	47,82%
C2	80			5,48	54,90%
C3	120	8		4,65	61,73%
C4	160			4,03	66,83%

Sumber: Data Primer, 2025

Pengolahan air asam tambang dengan adsorpsi karbon aktif TKKS menunjukkan penurunan Fe tertinggi pada menit ke-160 dengan massa adsorben 8 gram, mencapai efisiensi 66,83%.



Gambar 7. Perbandingan Efisiensi (a) dan Pengaruh Waktu (b) terhadap Konsentrasi Fe

Massa adsorben yang lebih besar meningkatkan luas permukaan karbon aktif sehingga menyediakan lebih banyak situs aktif untuk mengikat Fe (Eso dkk., 2021). Bertambahnya waktu kontak juga meningkatkan kesempatan bagi adsorbat untuk bereaksi dengan adsorben (Putri dan Asnadi, 2021). Namun, pada massa 2 g dan 4 g dengan kontak 160 menit terjadi kenaikan konsentrasi Fe akibat fenomena desorpsi, yaitu pelepasan adsorbat ketika adsorben mencapai titik

jenuh (Ischak dkk., 2021). Kondisi ini menurunkan laju adsorpsi sehingga waktu kontak tidak lagi berpengaruh, karena seluruh pori dan situs aktif telah terisi (Siswanti dkk., 2024).

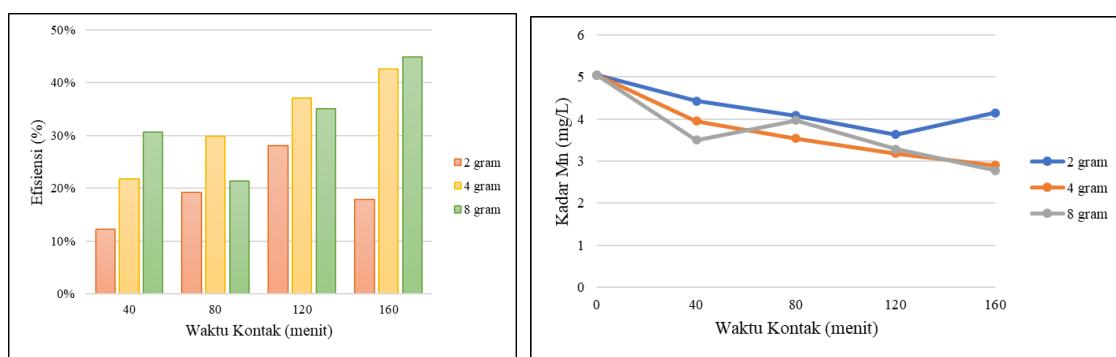
2) Parameter Mn

Tabel 6. Hasil Adsorpsi Parameter Mn Karbon Aktif TKKS

Kode Sampel	Waktu Kontak (menit)	Massa (gram)	Nilai Mn (mg/L)		% Efisiensi
			Awal	Akhir	
A1	40	2		4,43	12,28%
A2	80			4,08	19,21%
A3	120			3,63	28,12%
A4	160			4,15	17,82%
B1	40	4		3,95	21,78%
B2	80		5,05	3,54	29,90%
B3	120			3,18	37,03%
B4	160			2,90	42,57%
C1	40	8		3,50	30,69%
C2	80			3,97	21,39%
C3	120			3,28	35,05%
C4	160			2,78	44,95%

Sumber: Data Primer, 2025

Pengolahan air asam tambang dengan adsorpsi karbon aktif TKKS menunjukkan penurunan Mn tertinggi pada menit ke-160 dengan massa adsorben 8 gram, mencapai efisiensi 44,95%.



Gambar 8. Perbandingan Efisiensi (a) dan Pengaruh Waktu (b) terhadap Konsentrasi Mn

Konsentrasi Mn menurun seiring bertambahnya massa adsorben, namun terjadi kenaikan pada variasi 8 gram dan waktu 80 menit yang diduga akibat penurunan pH, sehingga ion H⁺ berkompetisi dengan ion logam pada situs aktif adsorben (Anggraini dkk., 2022). Peningkatan juga terlihat pada variasi 2 gram dan waktu 160 menit karena desorpsi akibat kejemuhan adsorben sehingga melepaskan kembali molekul adsorbatnya (Ischak dkk., 2021).

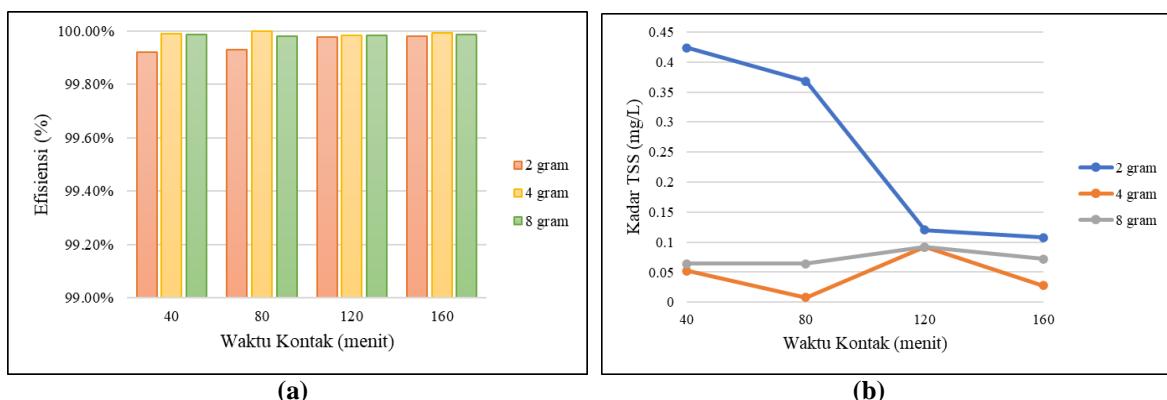
3) Parameter TSS

Tabel 7. Hasil Adsorpsi Parameter TSS Karbon Aktif TKKS

Kode Sampel	Waktu Kontak (menit)	Massa (gram)	Nilai TSS (mg/L)		% Efisiensi
			Awal	Akhir	
A1	40	2		0,424	99,92%
A2	80			0,368	99,93%
A3	120			0,12	99,98%
A4	160			0,108	99,98%
B1	40	4		0,052	99,99%
B2	80		538	0,008	100,00%
B3	120			0,092	99,98%
B4	160			0,028	99,99%
C1	40	8		0,064	99,99%
C2	80			0,096	99,98%
C3	120			0,092	99,98%
C4	160			0,072	99,99%

Sumber: Data Primer, 2025

Pengolahan air asam tambang dengan adsorpsi karbon aktif TKKS menunjukkan penurunan TSS tertinggi pada menit ke-80 dengan massa adsorben 4 gram, mencapai efisiensi 100%.



Gambar 9. Perbandingan Efisiensi (a) dan Pengaruh Waktu (b) terhadap Konsentrasi TSS

Terdapat kenaikan konsentrasi TSS pada massa 8 gram. Kenaikan konsentrasi tersebut tidak besar, tetapi berpengaruh pada persentase efisiensi. Massa adsorben yang terlalu besar menyebabkan pengukuran TSS kurang valid karena terdapat partikel adsorben yang sulit diendapkan sehingga partikel tersebut ikut terbawa dan terukur pada analisis TSS dengan metode gravimetri.

Pada penelitian ini terdapat perbedaan perlakuan saat pengambilan sampel air setelah adsorpsi, yaitu air sampel diendapkan terlebih dahulu dan diambil menggunakan pipet berukuran kecil mempengaruhi kondisi kadar TSS pada air sampel akhir. TSS dapat turun pada proses pengendapan tersebut dan partikel tersuspensi tidak terbawa pada saat air sampel dipipet sehingga pengukuran TSS kurang valid.

4) Parameter pH

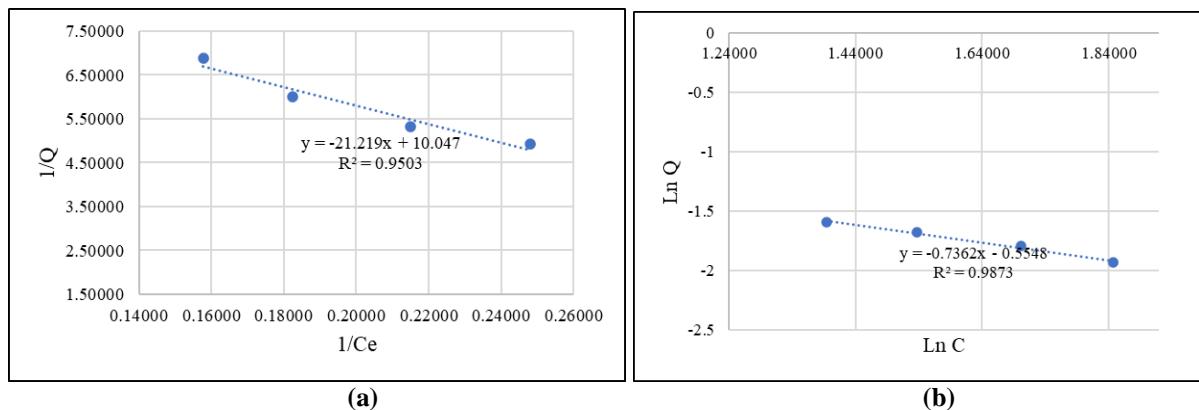
Tabel 8. Hasil Adsorpsi Parameter pH Karbon Aktif TKKS

Kode Sampel	Waktu Kontak (menit)	Massa (gram)	Nilai pH (mg/L)	
			Awal	Akhir
A1	40			4,48
A2	80			4,38
A3	120	2		4,9
A4	160			4,3
B1	40			4,21
B2	80			4,28
B3	120	4	4.15	4,32
B4	160			4,18
C1	40			4,14
C2	80			4,04
C3	120	8		4,05
C4	160			4,08

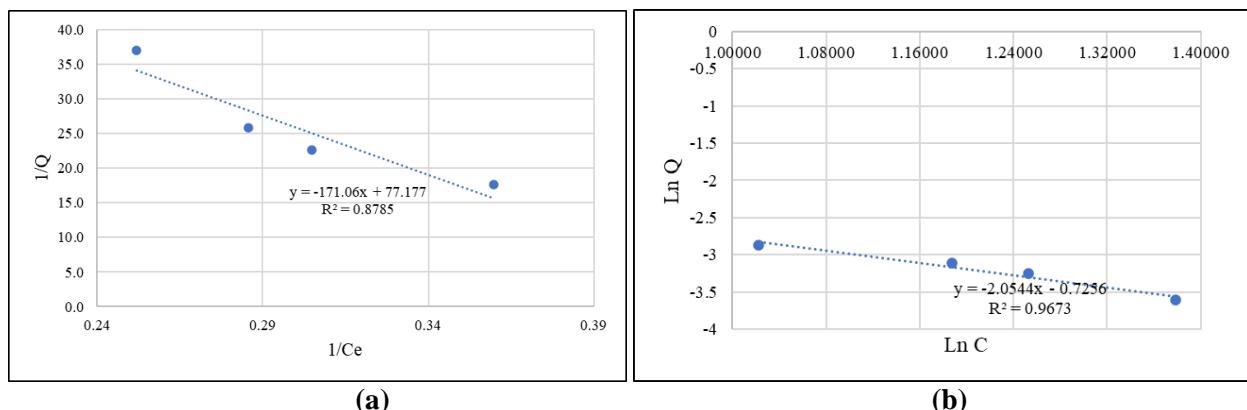
Sumber: Data Primer, 2025

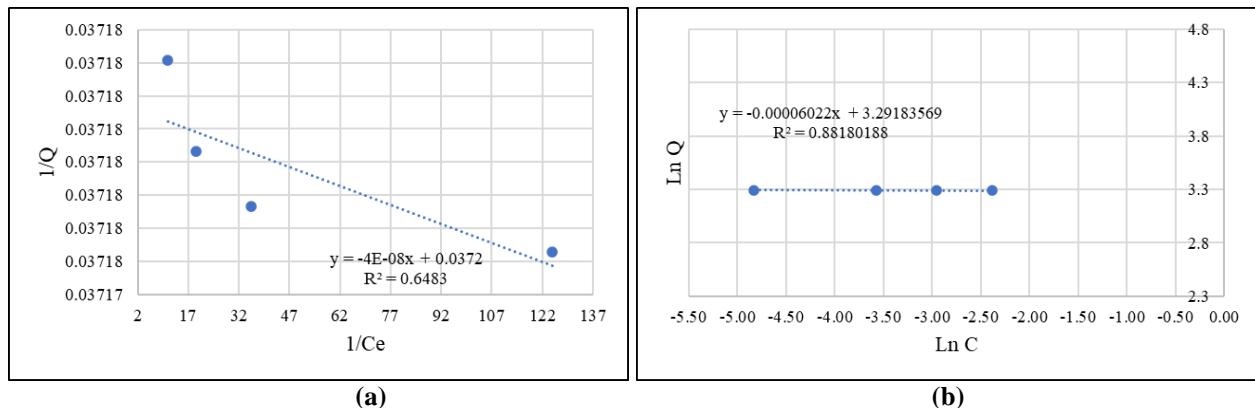
Pengolahan air asam tambang dengan adsorben karbon aktif TKKS tidak efektif menetralkan pH. Pada variasi massa 8 gram, pH justru semakin asam. Menurut Febrianti dkk. (2023), H_3PO_4 sebagai asam lemah hanya terionisasi sebagian, sehingga tidak semua ion hidrogen pada karbon aktif larut saat pembilasan dan sebagian terperangkap dalam pori. Ion tersebut kemudian dapat terlepas ke air limbah selama adsorpsi, menyebabkan penurunan pH.

D. Kinetika Adsorpsi



Gambar 10. Kurva Langmuir (a) dan Freundlich (b) terhadap Parameter Fe



Gambar 11. Kurva Langmuir (a) dan Freundlich (b) terhadap Parameter Mn**Gambar 12.** Kurva Langmuir (a) dan Freundlich (b) terhadap Parameter TSS

Mekanisme adsorpsi Fe, Mn, dan TSS pada air asam tambang mengikuti isoterm Freundlich karena nilai R^2 lebih tinggi dibanding Langmuir. Hal ini menunjukkan adsorpsi berlangsung secara fisika dengan pelekatan pada permukaan heterogen, di mana pori-pori karbon aktif memungkinkan terbentuknya lapisan multilayer oleh adsorbat. Pada permukaan heterogen, panas dan afinitas adsorpsi tidak harus terdistribusi secara seragam (Miri & Narimo, 2022).

Berdasarkan persamaan Langmuir, kapasitas adsorpsi Fe optimal terjadi pada waktu kontak 160 menit dengan nilai adsorpsi 0,2091 mg/g. Berdasarkan persamaan Freundlich, adsorpsi optimal Fe terjadi pada waktu kontak 160 menit dengan nilai adsorpsi 0,20580 mg/g.

Berdasarkan persamaan Langmuir, kapasitas adsorpsi Mn optimal terjadi pada waktu kontak 160 menit dengan nilai adsorpsi 0,00001297 mg/g. Berdasarkan persamaan Freundlich, adsorpsi optimal Mn terjadi pada waktu kontak 160 menit dengan nilai adsorpsi 0,05924 mg/g.

Berdasarkan persamaan Langmuir, kapasitas adsorpsi TSS optimal terjadi pada waktu kontak 80 menit dengan nilai adsorpsi 26,8853 mg/g. Berdasarkan persamaan Freundlich, adsorpsi optimal TSS terjadi pada waktu kontak 80 menit dengan nilai adsorpsi 26,9000 mg/g.

4. Kesimpulan

Hasil uji karakteristik karbon aktif TKKS menunjukkan dua parameter memenuhi SNI (kadar air 1,24% dan kadar abu 8,98%), sementara tiga parameter tidak memenuhi standar, yaitu kadar volatil (45,5%), karbon murni (21,91%), dan daya serap iodin (482,21 mg/g). Rendemen adsorben tercatat 39,28%, sedangkan uji BET menghasilkan luas permukaan 5,359 m²/g.

Variasi optimal untuk menurunkan Fe dan Mn adalah C4 (massa 8 g, waktu kontak 160 menit) dengan efisiensi 66,83% dan 44,95%. TSS optimal pada variasi B2 (massa 4 g, 80 menit) dengan efisiensi 100%. Namun, perlu diingat bahwa penurunan TSS dibarengi dengan adanya proses pengendapan setelah proses adsorpsi. Adsorben TKKS efektif menurunkan Fe, Mn, dan TSS hingga di bawah ambang batas, namun belum mampu menetralkan pH. Peningkatan massa dan waktu kontak justru menurunkan pH, dengan nilai tertinggi pada variasi A3 (2 g, 120 menit) sebesar 4,9 atau naik 18,07%, tetapi masih di bawah standar kualitas air asam tambang.

Berdasarkan studi kinetika dengan model Langmuir dan Freundlich, proses adsorpsi Fe, Mn, dan TSS mengikuti isoterm Freundlich, yang menunjukkan mekanisme fisika melalui pelekatan adsorbat pada permukaan adsorben. Heterogenitas pori karbon aktif dan zeolit memicu terbentuknya lapisan multilayer oleh adsorbat pada permukaan adsorben.

5. Daftar Pustaka

- Erawati, E., & Fernando, A. (2018). Pengaruh Jenis Aktivator dan Ukuran Karbon Aktif terhadap Pembuatan Adsorbent dari Serbik Gergaji Kayu Sengon (Paraserianthes Falcataria). *Jurnal Integrasi Proses*, 7(2), 58. <https://doi.org/10.36055/jip.v7i2.3808>
- Hasan, A. (2002). Metode Penelitian Tugas Akhir. Surabaya: Rineka Cipta.
- Hidayat, L. (2017). Pengolahan Lingkungan Areal Tambang Batubara. *Jurnal Adhum*, VII(1), 44–52.

- Imani, A., Sukwika, T., & Febrina, L. (2021). Karbon Aktif Ampas Tebu sebagai Adsorben Penurun Kadar Besi dan Mangan Limbah Air Asam Tambang. *Jurnal Teknologi*, 13(1), 33–42. <https://dx.doi.org/10.24853/jurtek.13.1.33-42>
- Kosim, M. E., Siskayanti, R., Prambudi, D., & Rusanti, W. D. (2022). Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Karbon Aktif dari Kulit Singkong dengan Karbon Aktif Komersil terhadap Logam Tembaga dalam Limbah Cair Elektroplating. *Jurnal Redoks*, 7(1), 36–47. <https://doi.org/10.31851/redoks.v7i1.6637>
- Kusdarini, E., Budianto, A., & Ghafarunnisa, D. (2017). Produksi Karbon Aktif Dari Batubara Bituminus Dengan Aktivasi Tunggal H₃Po₄, Kombinasi H₃Po₄-Nh₄Hco₃, Dan Termal. *Reaktor*, 17(2), 74–80. <https://doi.org/10.14710/reaktor.17.2.74-80>
- Maysharoh, S., Faryuni, I. D., & Sampurno, J. (2018). Karakterisasi Pola Distribusi Pori Karbon Aktif Tandan Kosong Kelapa Sawit Teraktivasi H₃PO₄ Berbasis Geometri Fraktal. *Prisma Fisika*, 6(1), 44. <https://doi.org/10.26418/pf.v6i1.23592>
- Metcalf, L., Eddy, H. P., & Tchobanoglou, G. (2004). *Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse* (Vol. 4). New York: McGraw-Hill.
- Muhammad, A.G., Oktasari, A. (2019). Arang Aktif Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Adsorben Logam Berat Merkuri (Hg). In *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi*, 2(1), 1–14.
- Murati, F., Iashania, Y., Firdayanti, N., Melinda, S., Yakub Reba, I., Jurusan, D., Teknik Pertambangan, P., Palangka Raya, U., Jurusan, M., & Palangka Raya Korespondensi, U. (2024). Pengelolaan Dan Pengendalian Air Asam Tambang Pada Kegiatan Pertambangan Batubara (Management and Control of Acid Mine Water in Coal Mining Activities). *Jurnal Teknologi Pertambangan (JTP)*, 24(1), 44–51.
- Oktorina, S. (2018). Kebijakan Reklamasi Dan Revegetasi Lahan Bekas Tambang (Studi Kasus Tambang Batubara Indonesia). *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*, 4(1), 16–20. <https://doi.org/10.29080/alard.v4i1.411>
- Paramita A. dkk. (2018). Efektifitas Pemanfaatan Fly Ash Batubara Sebagai Adsorben Dalam Menetralisir Air Asam Tambang Pada Settling Pond Penambangan Banko PT. Bukit Asam (Persero), Tbk. *Jurnal Mineral, Energi Dan Lingkungan*, 2(1), 1–11. <http://jurnal.upnyk.ac.id/>
- Putra, B. E., Helwani, Z., & Fatra, W. (2013). *Optimasi Proses Karbonisasi Tandan Kosong Sawit Menggunakan Response Surface Methodology*. 2–6.
- Rahman, A., Febria Putri, W., & Darnas, Y. (2021). Pemanfaatan Arang Aktif Kulit Jengkol (*Pithecellobium lobatum*) sebagai Adsorben dalam Menyisihkan Kadar COD dan TSS pada Limbah Cair Tahu. *Lingkar : Journal of Environmental Engineering*, 2(1), 29–47. <https://doi.org/10.22373/ljee.v2i1.1871>
- Utami, Shinta Elystia, Y. A. (2017). *Adsorpsi Zat Warna Rhodamin B Menggunakan Karbon Aktif Dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (Elaeis Guneensis Jacq)*. 11(1), 92–105.
- Viena, V., Bahagia, B., & Afrizal, Z. (2019). Produksi Karbon Aktif dari Cangkang Sawit dan Aplikasinya Pada Penyerapan Zat Besi, Mangan Dan ph Air Sumur. *Jurnal Serambi Engineering*, 5(1), 875–882. <https://doi.org/10.32672/jse.v5i1.1660>
- Wahyudin, I., Widodo, S., & Nurwaskito, A. (2018). Analisis Penanganan Air Asam Tambang Batubara. *Jurnal Geomine*, 6(2), 85–89. <https://doi.org/10.33536/jg.v6i2.214>
- Wijayanti, I. E., & Kurniawati, E. A. (2019). Studi Kinetika Adsorpsi Isoterm Persamaan Langmuir dan Freundlich pada Abu Gosok sebagai Adsorben. *EduChemia (Jurnal Kimia Dan Pendidikan)*, 4(2), 175. <https://doi.org/10.30870/educhemia.v4i2.6119>
- Yulianti, R., Suliestyah, S., Tuheteru, E. J., Palit, C., & Yomaki, C. C. (2024). Studi Isotermal Adsorpsi Karbon Aktif Batubara dengan Aktivasi Asam Pospat terhadap Logam Fe dan Mn dalam Air Asam Tambang. *Jurnal Penelitian Dan Karya Ilmiah Lembaga Penelitian Universitas Trisakti*, 9, 276–286. <https://doi.org/10.25105/pdk.v9i1.18804>
- Yuliastuti, R., & Dwicahyono, H. (2018). Penggunaan Karbon Aktif Yang Teraktivasi Asam Phosphat Pada Limbah Cair Industri Krisotil. *Jurnal Teknologi Proses Dan Inovasi Industri*, 3(1), 23–26. <https://doi.org/10.36048/jtpii.v3i1.3974>