

Optimalisasi Karbon Aktif Berbasis Bonggol Jagung untuk Pengelolaan Limbah Logam Berat Pb dan Mn

Nisya Indriyanti Irawan^{1*}, Reny Afifah¹, Ainun Nadira¹, dan Suparno¹

¹Magister Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan IPA, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia; email: nisyaindriyanti.2024@student.uny.ac.id

ABSTRAK

Pencemaran lingkungan oleh limbah logam berat, seperti timbal (Pb) dan mangan (Mn), merupakan isu krusial yang berdampak signifikan pada ekosistem dan kesehatan manusia. Untuk mengatasi masalah ini, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan pembuatan karbon aktif berbahan dasar bonggol jagung melalui variasi jenis aktivator (asam sulfat, H₂SO₄, dan kalium hidroksida, KOH) dan konsentrasi (1M, 2M, 3M) guna meningkatkan efisiensi adsorpsi Pb dan Mn. Bonggol jagung dikarbonisasi menggunakan metode pembakaran tertutup (teknik *Earth pit-kiln*) dan selanjutnya diaktivasi dengan larutan aktivator tersebut. Karakteristik karbon aktif yang dihasilkan dianalisis berdasarkan kadar air, kadar abu, dan efisiensi adsorpsi menggunakan spektrofotometer serapan atom (SSA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa karbon aktif yang diaktivasi dengan KOH memiliki kadar air lebih rendah dan efisiensi adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan dengan H₂SO₄, terutama untuk Mn yang lebih sulit diadsorpsi. Karbon aktif dengan konsentrasi KOH 2M menunjukkan performa terbaik, mencapai efisiensi adsorpsi Pb sebesar 96,93% dan Mn sebesar 98,41%. Studi ini menyimpulkan bahwa aktivasi basa menggunakan KOH menghasilkan karbon aktif dengan kualitas dan efisiensi adsorpsi yang lebih unggul dibandingkan aktivasi asam menggunakan H₂SO₄ untuk penanganan limbah Pb dan Mn.

Kata kunci: Karbon aktif, Bonggol Jagung, Pb, Mn

ABSTRACT

Environmental pollution by heavy metal waste, such as lead (Pb) and manganese (Mn), is a crucial issue that has a significant impact on ecosystems and human health. To address this problem, this study aims to optimize the production of activated carbon from corn cobs through varying activator types (sulfuric acid, H₂SO₄, and potassium hydroxide, KOH) and concentrations (1M, 2M, 3M) to enhance the adsorption efficiency of Pb and Mn. Corn cobs were carbonized using a closed-burning method (*Earth pit-kiln technique*) and subsequently activated with the activator solutions. The characteristics of the activated carbon produced were analyzed based on moisture content, ash content, and adsorption efficiency using an atomic absorption spectrophotometer (AAS). The results of the study showed that activated carbon activated with KOH had lower moisture content and higher adsorption efficiency compared to H₂SO₄, especially for Mn, which is more difficult to adsorb. Activated carbon with a KOH concentration of 2M showed the best performance, achieving an adsorption efficiency of 96.93% for Pb and 98.41% for Mn. This study concluded that base activation using KOH produces activated carbon with superior quality and adsorption efficiency compared to acid activation using H₂SO₄ for the treatment of Pb and Mn waste.

Keywords: Activated carbon, Corncob, Pb, Mn

Citation: Irawan, N. I., Afifah, R., Nadira, A., dan Suparno. (2025). Optimalisasi Karbon Aktif Berbasis Bonggol Jagung untuk Pengelolaan Limbah Logam Berat Pb dan Mn. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(4), 1029-1036, doi:10.14710/jil.23.4.1029-1036

1. PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan merupakan salah satu faktor utama yang menyebabkan kerusakan alam dan memberikan dampak signifikan terhadap kehidupan makhluk hidup di sekitarnya (Hatina & Winoto, 2020). Contoh salah satu pencemaran lingkungan adalah pembuangan limbah cair dari industri ke lingkungan tanpa melalui proses pengolahan terlebih dahulu. Tindakan ini dapat mencemari air dan tanah (Putri et al., 2020). Sumber utama kontaminasi logam berat

yang berbahaya bagi manusia berasal dari udara dan air yang mencemari tanah. Ketika air yang terkontaminasi logam berat digunakan dalam sektor pertanian atau peternakan, hal ini dapat meracuni tanaman maupun ternak, sehingga menyebabkan akumulasi logam berat pada makhluk hidup tersebut (Widwastuti & Asworo, 2022). Beberapa logam berat yang terdapat pada limbah cair industri diantaranya kromium (Cr), kadmium (Cd), tembaga (Cu), besi (Fe), timbal (Pb), mangan (Mn), dan seng (Zn) (Wijaya et al.,

2020). Timbal (Pb) adalah jenis logam berat dengan tingkat toksisitas yang sangat tinggi bagi makhluk hidup (Andarista et al., 2023). Salah satu logam berat, yaitu timbal dapat menyebabkan keracunan yang akan mempengaruhi berbagai jaringan serta organ pada tubuh. Organ-organ tubuh bisa dijadikan sasaran dari keracunan logam ini yaitu sistem peredaran darah, sistem saraf, sistem reproduksi, sistem endokrin dan juga jantung (Palar, 2004). Mn (II) merupakan ion yang berasal dari logam yang dibutuhkan oleh tubuh manusia namun dalam kuantitas yang sedikit dikarenakan apabila terlalu banyak masuk ke dalam tubuh manusia terlebih lagi berlebihan bisa menyebabkan bahaya bagi tubuh, misalnya neurotoksik, serangan jantung, gangguan pembuluh darah bahkan kanker hati. Gejala yang timbul berupa halusinasi, mudah lupa, kerusakan syaraf, parkinson, emboli paru-paru, bronkitis, dan jika pria terpapar mangan (Mn) dengan jangka waktu lama dapat menyebabkan potensi menjadi impoten (Atikasari et al., 2022). Oleh karena itu, perlunya pengolahan limbah, dikarenakan urgensi dalam menjaga lingkungan.

Logam berat yang terkandung pada limbah cair industri bisa dipisahkan dengan bermacam cara yaitu pengendapan kimia, elektrodeposisi, ekstraksi pelarut, ultrafiltrasi, dan penukar ion (Gadd & White, 1989). Prinsip kerja tersebut memiliki kelemahan, yaitu dapat menghasilkan lumpur buangan yang berbahaya dan berpotensi menghambat kinerja pengontrol serta proses pengeluarannya. Prasad dalam (Andarista et al., 2023). Antara beberapa pilihan dalam memisahkan logam berat, proses adsorpsi dinilai yang paling baik dan juga proses ini dianggap praktis, sehingga lebih sering digunakan. Selain itu, proses ini tidak menimbulkan efek samping berupa racun (Ajeng & Wesen, 2013). Prinsip kerja adsorpsi adalah proses yang melibatkan pemisahan atau penyerapan dari larutan, hal ini dikarenakan perbedaan antar molekul, dengannya membuat molekul menjadi ikatan yang lebih kuat pada permukaan molekul yang lain (Purnamawati, 2023). Material yang sering menjadi adsorben yaitu karbon aktif. Beberapa peneliti sebelumnya yang telah memanfaatkan jenis adsorben dari arang aktif yang dibuat dari berbagai macam bahan yaitu, kelor (Mu'jizat, 2010), kulit kacang tanah (Talunoe et al., 2015), pelepah aren (Esterlita & Herlina, 2015), eceng gondok (Fadhilah et al., 2023), daun nanas (Sibarani et al., 2022), tongkol jagung (Alfiany & Bahri, 2013), ampas tebu (Robbika, 2022), sabut kelapa (Fatimah et al., 2023), kayu ulin (Wibawati et al., 2020), kulit pisang (Maiza et al., 2018).

Bonggol jagung sendiri merupakan limbah pertanian yang melimpah di Indonesia, dengan produksi jagung yang terus meningkat. (Faizah et al., 2022; D. Putri et al., 2023). Bonggol jagung adalah limbah pertanian lignoselulosik yang kaya akan selulosa, hemiselulosa, dan lignin (Suherman et al., 2022). Diketahui bahwa pada basis kering, bonggol jagung memiliki komposisi kimia yang terdiri dari

38,8% selulosa, 44,4% hemiselulosa, dan 11,9% lignin (Putri et al., 2023). Lignin, salah satu komponen utama tumbuhan, berfungsi sebagai bahan pengikat, sedangkan selulosa yang terkandung di dalamnya merupakan senyawa organik penting (Mu'jizat et al., 2023). Komposisi ini menjadikan bonggol jagung sebagai bahan baku yang sangat potensial untuk diolah lebih lanjut. Kandungan lignoselulosa yang tinggi pada bonggol jagung menjadikannya kandidat yang baik untuk menghasilkan karbon aktif dengan struktur pori yang sesuai untuk adsorpsi.

Pemilihan aktivator dalam pembuatan karbon aktif perlu diperhatikan. Hal ini dikarenakan setiap pelarut kimia memiliki tingkat penyerapan yang berbeda-beda (Purnamawati, 2023). Penelitian sebelumnya tentang arang aktif sebagai adsorben logam berat telah menunjukkan beragam efektivitas aktivator kimia. Alfiany & Bahri (2013), misalnya, menemukan bahwa dari aktivator asam seperti HCl, H₂SO₄, dan HNO₃, HCl menunjukkan daya serap terbaik untuk ion logam timbal (Pb). Namun, studi lain oleh Astuti & Maiza (2019) menunjukkan bahwa aktivator H₂SO₄ masih sangat efektif, mencapai daya serap hingga 90% untuk ion logam mangan (Mn). Kontras hasil ini, khususnya efektivitas H₂SO₄ pada logam yang berbeda, memberikan landasan penting.

Berdasarkan temuan-temuan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menguji kembali dan membandingkan efektivitas H₂SO₄ sebagai aktivator dalam pembuatan arang aktif. Selain itu, untuk memperluas pemahaman tentang potensi aktivator, penelitian ini akan membandingkan kinerja H₂SO₄ dengan aktivator basa yang umum digunakan, yaitu kalium hidroksida (KOH). Dengan demikian, penelitian ini secara spesifik akan mengisi celah literatur dengan menyajikan perbandingan komprehensif efektivitas aktivator asam (H₂SO₄) dan aktivator basa (KOH) terhadap daya serap dua jenis logam berat yang berbeda, yaitu timbal (Pb) dan mangan (Mn). Pendekatan komparatif lintas jenis aktivator dan target logam ini belum banyak dieksplorasi secara simultan dalam satu studi.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Alat Dan Bahan

Pada penelitian ini alat yang digunakan yaitu Furnace, kertas saring, spektrofotometer serapan atom (SSA), timbangan analitik, pH meter, peralatan gelas laboratorium standar, ayakan 100 mesh, oven dan desikator. Sementara bahan yang digunakan simulasi Pb (II) 17,76 Ppm dan Mn (II) 12, 55 Ppm, aktivator berupa KOH dan HCl dengan konsentrasi 1M, 2M, dan 3M, bonggol jagung, aquades.

2.2. Persiapan Karbon Aktif

Arang jagung yang sudah dikeringkan, dibakar dengan teknik penimbunan di dalam tanah. Setelah kering, bonggol jagung dibakar menggunakan teknik penimbunan dalam tanah (metode Earth pit-kiln) (Paranita, 2020), di mana bonggol jagung dengan massa total 800 gram ditimbun di dalam tanah yang

telah digali dan kemudian dibakar dengan kurang waktu 3 jam sampai tidak asap yang terlihat pada timbunan. Proses ini memungkinkan karbonisasi berlangsung dengan suhu yang lebih terkendali dan mencegah kontak langsung dengan oksigen, menghasilkan arang dengan kualitas yang lebih baik. Setelah pembakaran, arang jagung yang dihasilkan didinginkan dan dihancurkan menjadi serbuk halus, lalu diayak.

2.3. Kadar Air (SNI No. 06-3730-1995)

Kadar air ditentukan berdasarkan perbedaan berat. Sampel sebanyak 2 gram ditimbang, kemudian dimasukkan ke dalam oven dengan pengaturan suhu 105°C selama 2 jam. Selanjutnya, nilai kadar air dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$Kadar\ Air = \frac{m_a - m_b}{m_a} \times 100\%$$

m_a : massa awal (gram)

m_b : massa akhir (gram)

2.4. Kadar Abu (SNI No. 06-3730-1995)

Sampel sebanyak 3 gram ditimbang, kemudian dimasukkan ke dalam *furnace* dengan pengaturan suhu 600°C selama 2 jam. Selanjutnya, nilai kadar abu dapat dihitung menggunakan persamaan

$$Kadar\ Abu = \left(\frac{Massa\ Abu}{Massa\ Sampel\ Awal} \right) \times 100\%$$

2.5. Proses Adsorpsi

Proses adsorpsi dilakukan dengan mencampurkan 1 gram arang aktif ke dalam 20 ml larutan logam berat, lalu didiamkan selama 10 menit. Proses penyaringan kemudian dilakukan menggunakan kertas saring. Larutan logam berat yang telah diadsorpsi dimasukkan ke dalam botol berukuran 10 ml untuk diuji menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA). Untuk mengetahui nilai efisiensi adsorpsi, dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$Efisiensi\ Adsorpsi = \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100\%$$

C_o : konsentrasi awal zat yang diadsorpsi

C_e : konsentrasi zat setelah proses adsorpsi selesai

2.6. Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan menggunakan uji ANOVA (Analysis of Variance), dengan bantuan perangkat lunak statistik SPSS 26. Uji ANOVA adalah metode statistik inferensial yang digunakan untuk menguji apakah ada perbedaan yang signifikan antara rata-rata dari dua atau lebih kelompok.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Efisiensi adsorpsi timbal (Pb) dan mangan (Mn) oleh karbon aktif bonggol jagung, yang divariasikan berdasarkan jenis dan konsentrasi aktivator (KOH dan H₂SO₄), dirangkum dalam Tabel 1.

Selain efisiensi adsorpsi, karakteristik penting lainnya dari karbon aktif adalah kadar air dan kadar abu. Hasil analisis kadar air dan kadar abu dari karbon

aktif berbasis bonggol jagung dengan berbagai jenis dan konsentrasi aktivator disajikan pada Tabel 2.

Tabel 1. Hasil Analisis SSA

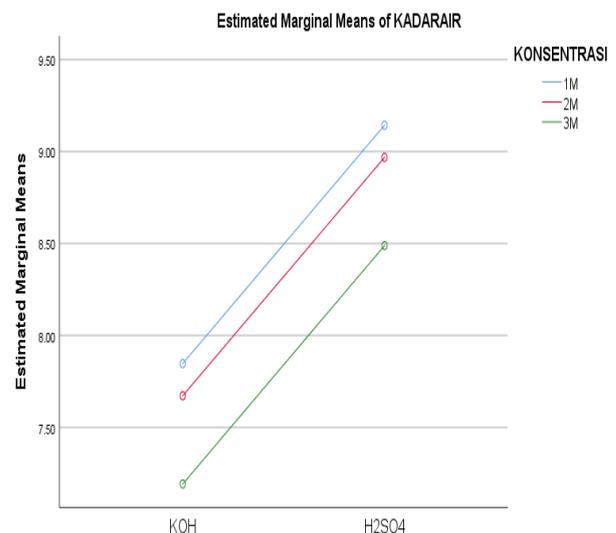
Logam Berat	Aktivator	Konsentrasi	Efisiensi Adsorpsi (%)
Pb	KOH	1M	88,70
Pb	KOH	2M	96,93
Pb	KOH	3M	96,21
Pb	H ₂ SO ₄	1M	96,48
Pb	H ₂ SO ₄	2M	97,44
Pb	H ₂ SO ₄	3M	97,53
Mn	KOH	1M	98,03
Mn	KOH	2M	98,41
Mn	KOH	3M	97,46
Mn	H ₂ SO ₄	1M	25,30
Mn	H ₂ SO ₄	2M	24,55
Mn	H ₂ SO ₄	3M	35,08

Tabel 2. Nilai Kadar Air dan Abu

Aktivator	Konsentrasi	Kadar Abu	Kadar Air
KOH	1M	8,67	8,13
KOH	2M	8,46	7,66
KOH	3M	8,43	6,92
H ₂ SO ₄	1M	9,11	8,86
H ₂ SO ₄	2M	8,97	8,98
H ₂ SO ₄	3M	8,56	8,76

3.1. Analisis Kadar Air

Pada bagian ini, akan disajikan analisis mengenai kadar air pada karbon aktif yang dihasilkan, dengan membandingkan pengaruh jenis dan konsentrasi aktivator yang digunakan. Kadar air merupakan salah satu parameter penting yang menunjukkan kualitas karbon aktif, karena dapat memengaruhi sifat dan efektivitas adsorpsi.



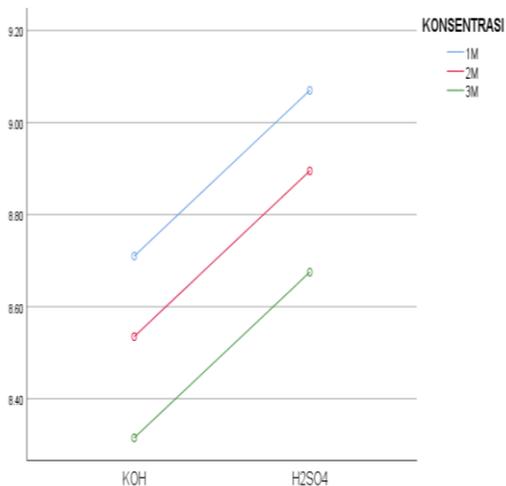
Gambar 1. Nilai Rata-Rata Margin Kadar Air

Berdasarkan grafik hubungan kadar air dengan jenis aktivator dan konsentrasi aktivator didapatkan hasil bahwasanya, dengan adanya kandungan air dalam karbon memiliki kaitan dengan sifat higroskopis pada karbon, yang dimana seringkali karbon aktif sendiri memiliki sifat afinitas yang cukup besar terhadap air (Kosim et al., 2022). Nilai kadar air

terendah terdapat pada KOH 1M, dan dengan menggunakan KOH sebagai aktivator didapatkan hasil untuk kadar air lebih rendah dibandingkan H₂SO₄. Kadar air yang terkandung pada arang aktif yang diaktivasi oleh KOH umumnya lebih rendah karena struktur porinya yang besar memungkinkan penguapan molekul air lebih efektif selama aktivasi (Nandari et al., 2024). Kadar air yang terdapat pada rongga rongga karbon aktif bisa menghalangi pori-pori dan menyebabkan pengaruh pada kualitas karbon aktif itu sendiri. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwasanya karbon aktif yang baik akan memiliki nilai kadar air yang rendah (Imani et al., 2021). Hal ini bisa dibuktikan dengan melihat nilai efisiensi penyerapan, dimana nilai KOH lebih baik dibandingkan dengan H₂SO₄. Menurut SNI No. 06-3730-1995 karbon aktif yang berkualitas memiliki kadar air yang rendah yaitu maksimal 15% untuk karbon aktif berbentuk bubuk. Yang mana semua kadar air dari karbon aktif yang terdapat pada penelitian ini telah memenuhi syarat sesuai dengan SNI, dimana semua kadar air yang diukur di bawah 15%.

3.2. Analisis Kadar Abu

Bagian ini akan menyajikan analisis mengenai kadar abu pada karbon aktif yang dihasilkan, mengeksplorasi bagaimana jenis dan konsentrasi aktivator memengaruhi nilai kadar abu. Kadar abu merupakan salah satu parameter kualitas penting untuk karbon aktif, karena kandungan mineral anorganik ini dapat memengaruhi luas permukaan dan efisiensi adsorpsi.



Gambar 2. Nilai Rata-Rata Margin Kadar Abu

Pada Gambar 2 (Nilai Rata-Rata Margin Kadar Abu), hubungan antara kadar abu dengan jenis dan konsentrasi aktivator dapat terlihat. Dalam proses pembakaran, garam mineral halus akan terbentuk dan dapat menyumbat pori-pori karbon aktif, sehingga meningkatkan kadar abu. Kandungan abu ini umumnya terdiri dari berbagai unsur seperti kalsium, kalium, magnesium, dan natrium (Aryani, 2019). Hasil terbaik terdapat pada aktivator KOH dengan 1032

konsentrasi 1M. Pada karbon aktif, usahakan kadar abu serendah mungkin, karena kadar abu yang lebih tinggi akan menurunkan kemampuan karbon aktif untuk adsorpsi (Lestari et al., 2024). Menurut SNI No. 06-3730-1995 karbon aktif yang berkualitas memiliki kadar abu yang rendah yaitu maksimal 10% untuk karbon aktif berbentuk bubuk. Yang mana semua kadar abu dari karbon aktif dengan semua perlakuan pada penelitian ini telah memenuhi syarat sesuai dengan SNI, dimana semua kadar abu yang diukur di bawah 10%.

3.3. Analisis Ragam Efisiensi Adsorpsi

Bagian ini menyajikan hasil analisis ragam (ANOVA) yang dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh jenis logam berat, jenis aktivator, dan interaksi keduanya terhadap efisiensi adsorpsi karbon aktif. Analisis ragam ini krusial untuk menentukan faktor-faktor mana yang memberikan pengaruh signifikan terhadap efektivitas adsorpsi.

Analisis ragam (ANOVA) dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh jenis logam berat, jenis aktivator, konsentrasi aktivator, serta interaksi antar variabel terhadap efisiensi adsorpsi karbon aktif. Dalam analisis ini, beberapa hipotesis nol (H₀) dirumuskan. Pertama, H₀ menyatakan bahwa tidak ada perbedaan signifikan dalam rata-rata efisiensi adsorpsi antara jenis logam berat timbal (Pb) dan mangan (Mn). Kedua, H₀ berhipotesis bahwa tidak ada perbedaan signifikan dalam rata-rata efisiensi adsorpsi antara jenis aktivator KOH dan H₂SO₄. Ketiga, H₀ mengasumsikan tidak ada perbedaan signifikan dalam rata-rata efisiensi adsorpsi antar variasi konsentrasi aktivator (1M, 2M, 3M). Lebih lanjut, H₀ juga dirumuskan untuk interaksi antar variabel: tidak ada interaksi signifikan antara jenis logam berat dan jenis aktivator, tidak ada interaksi signifikan antara jenis logam berat dan konsentrasi aktivator, serta tidak ada interaksi signifikan antara konsentrasi aktivator dan jenis aktivator terhadap efisiensi adsorpsi.

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: HASIL

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	10520.241 ^a	9	1168.916	64.724	.015	.997
Intercept	75550.413	1	75550.413	4183.329	.000	1.000
LOGAMBERAT	3150.693	1	3150.693	174.458	.006	.989
KONSENTRASI	39.464	2	19.732	1.093	.478	.522
AKTIVATOR	3312.603	1	3312.603	183.423	.005	.989
LOGAMBERAT * KONSENTRASI	16.327	2	8.164	.452	.689	.311
KONSENTRASI * AKTIVATOR	19.733	2	9.867	.546	.647	.353
LOGAMBERAT * AKTIVATOR	3981.429	1	3981.429	220.457	.005	.991
Error	36.120	2	18.060			
Total	86106.773	12				
Corrected Total	10556.360	11				

a. R Squared = .997 (Adjusted R Squared = .981)

Gambar 3. Hasil Analisis Ragam

Berdasarkan Gambar 3 (Hasil Analisis Ragam), hasil menunjukkan bahwa nilai signifikansi (Sig.) untuk faktor logam berat (Sig. = 0.006) dan aktivator (Sig. = 0.005) lebih kecil dari 0.05. Hal ini mengindikasikan bahwa hipotesis nol ditolak untuk kedua faktor tersebut, yang berarti terdapat

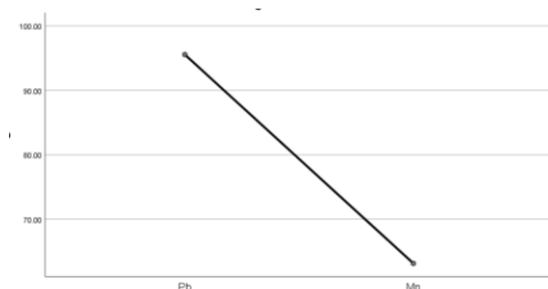
perbedaan signifikan dalam efisiensi adsorpsi berdasarkan jenis logam berat dan jenis aktivator. Selain itu, interaksi antara logam berat dan aktivator juga menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0.005, yang berarti hipotesis nol untuk interaksi ini juga ditolak, menunjukkan adanya interaksi signifikan antara kedua faktor tersebut terhadap efisiensi adsorpsi.

Apabila meninjau nilai *Partial Eta Squared*, terlihat *effect size* yang cukup besar untuk logam berat (0.989), aktivator (0.989), dan interaksi logam berat * aktivator (0.991). Ini mengindikasikan bahwa variabel-variabel independen tersebut memiliki pengaruh yang sangat kuat terhadap hasil efisiensi adsorpsi.

Sebaliknya, nilai signifikansi untuk konsentrasi (Sig. = 0.478), interaksi logam berat * konsentrasi (Sig. = 0.689), dan interaksi konsentrasi * aktivator (Sig. = 0.647) semuanya lebih besar dari 0.05. Ini berarti hipotesis nol diterima untuk faktor konsentrasi dan kedua interaksi yang melibatkan konsentrasi, menunjukkan bahwa tidak ada pengaruh signifikan secara statistik dari konsentrasi aktivator, baik secara mandiri maupun dalam interaksinya dengan variabel lain, terhadap efisiensi adsorpsi. Untuk melihat lebih lanjut mengenai rata-rata yang diestimasi dari variabel dependen dalam analisis ini, khususnya dalam konteks ANOVA, grafik *Estimated Marginal Means* telah disediakan.

3.4. Pengaruh Logam Berat terhadap Efisiensi Adsorpsi

Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi secara spesifik bagaimana jenis logam berat (Timbal/Pb dan Mangan/Mn) memengaruhi efisiensi adsorpsi pada karbon aktif yang telah dibuat. Efisiensi adsorpsi merupakan indikator kunci efektivitas adsorben dalam menarik dan mengikat polutan dari larutan. Untuk mendapatkan gambaran yang lebih akurat mengenai pengaruh masing-masing logam, kami menggunakan analisis rata-rata marginal (*Estimated Marginal Means/EMMs*). Pendekatan ini memungkinkan perbandingan pengaruh logam berat secara terpisah dari potensi pengaruh variabel lain dalam model statistik, seperti jenis aktivator, sehingga kita dapat melihat efek murni dari jenis logam itu sendiri terhadap kapasitas adsorpsi.

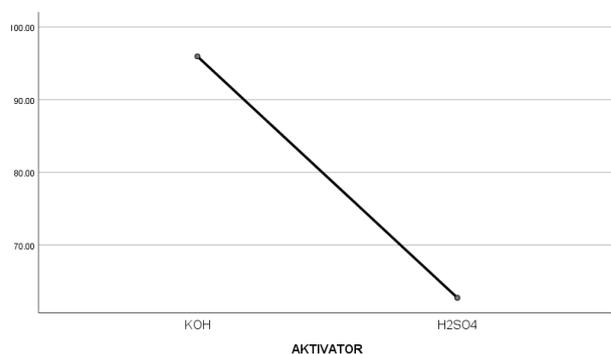


Gambar 4. Nilai Rata-Rata Margin pengaruh Logam Berat terhadap Efisiensi Adsorpsi

Gambar 4 merepresentasikan nilai rata rata marginal dalam kedua logam berat, dapat dilihat bahwasanya rata rata marginal Pb lebih tinggi dibandingkan Mn hal ini bisa dilihat melalui tabel data. Rata rata marginal Pb (II) disekitar 95, dan Mn (II) disekitar 65, maka dapat disimpulkan bahwa karbon aktif lebih efektif menyerap Pb (II) daripada Mn (II). Hal ini dikarenakan Mn (II) lebih sulit diadsorpsi dibandingkan logam berat lainnya. Mn (II) memiliki konstanta stabilitas kompleks terendah dibandingkan logam lain sesuai *Irving-Williams Series*. Hal ini berarti interaksi Mn (II) dengan gugus aktif seperti $-NH_2$ atau $-OH$ pada kitosan tidak sekuat logam lain seperti Cu (II) atau Ni (II) (Weißpflog et al., 2020). Berdasarkan penelitian lainnya yang dilakukan oleh (Mahmudah et al., 2017) penurunan Dalam penelitian adsorpsi ion Mn^{2+} menggunakan nanopartikel magnetik (MFe_2O_4), ditemukan bahwa kemampuan adsorpsi Mn^{2+} lebih rendah dibandingkan dengan logam berat lain Cu^{2+} . Faktor yang memengaruhi adalah interaksi ion Mn^{2+} dengan gugus aktif pada permukaan nanopartikel yang lebih lemah dibandingkan logam lain, sehingga menurunkan efisiensi adsorpsi. Studi pada karbon aktif berbasis batang eceng gondok juga menunjukkan bahwa adsorpsi Mn (II) memerlukan optimasi khusus, seperti pada pH yang lebih tinggi untuk meningkatkan efisiensi. Meski kapasitas adsorpsi cukup baik, Mn (II) lebih sulit diikat secara kimiawi dibandingkan ion Fe (III), yang lebih reaktif dengan gugus fungsional pada karbon aktif (Riyanto et al., 2021).

3.5. Pengaruh Aktivator Terhadap Efisiensi Adsorpsi

Pada bagian ini, analisis akan difokuskan pada pengaruh jenis aktivator (KOH dan H_2SO_4) serta konsentrasinya terhadap efisiensi adsorpsi karbon aktif. Pengujian ini penting untuk memahami bagaimana pemilihan aktivator memengaruhi efisiensi penyerapan logam berat oleh karbon aktif.



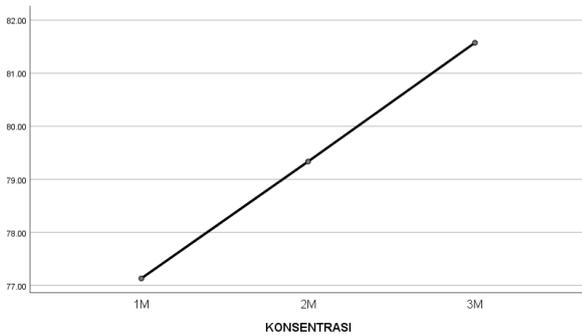
Gambar 5. Nilai Rata-Rata Margin pengaruh Aktivator terhadap Efisiensi Adsorpsi

Gambar 5 (Nilai Rata-Rata Margin pengaruh Aktivator terhadap Efisiensi Adsorpsi) menunjukkan bahwa KOH memberikan efisiensi penyerapan yang lebih baik dibandingkan H_2SO_4 , dengan perbedaan rata-rata margin yang cukup signifikan. Apabila

meninjau kembali Tabel 1, terlihat bahwa daya serap KOH dan H₂SO₄ pada logam Pb tidak terlalu jauh berbeda, namun pada logam Mn terdapat perbedaan yang signifikan. Hal ini dikarenakan logam Mn (II) lebih sulit untuk diadsorpsi. Selain itu, aktivasi dengan H₂SO₄ cenderung menghasilkan karbon aktif dengan mikropori yang lebih kecil dibandingkan aktivator basa seperti KOH. Luas permukaan arang aktif yang menggunakan KOH sebagai aktivator juga lebih besar dibandingkan H₂SO₄, meskipun H₂SO₄ menghasilkan struktur yang lebih teratur, namun kapasitas adsorpsinya lebih rendah karena volume total pori yang lebih kecil. (Kiefbasa et al., 2022; Wu et al., 2011).

3.6. Pengaruh Konsentrasi terhadap Efisiensi Adsorpsi

Bagian ini akan mengulas pengaruh variasi konsentrasi aktivator terhadap efisiensi adsorpsi karbon aktif yang dihasilkan. Analisis ini bertujuan untuk melihat apakah perubahan konsentrasi aktivator memberikan dampak yang signifikan terhadap kemampuan adsorpsi karbon aktif.



Gambar 6. Nilai Rata-Rata Margin pengaruh Konsentrasi terhadap Efisiensi Adsorpsi

Untuk konsentrasi, Gambar 6 (Nilai Rata-Rata Margin pengaruh Konsentrasi terhadap Efisiensi Adsorpsi) menunjukkan adanya indikasi peningkatan efisiensi adsorpsi seiring dengan peningkatan konsentrasi aktivator. Meskipun demikian, perbedaan nilai rata-rata margin untuk setiap konsentrasi tidak terlalu signifikan, yang dikuatkan oleh hasil analisis ANOVA yang menyatakan menerima H₀, artinya tidak ada perbedaan yang signifikan secara statistik. Demikian pula, interaksi konsentrasi aktivator dengan variabel lainnya menunjukkan nilai signifikansi lebih besar dari 0,05, sehingga disimpulkan tidak ada pengaruh antara konsentrasi aktivator yang berkaitan dengan variabel lain, terhadap efisiensi adsorpsi. Hal ini sejalan dengan observasi pada Tabel 1, yang menunjukkan tidak adanya perbedaan signifikan antara konsentrasi aktivator dengan daya serapnya. Fenomena serupa juga ditemukan dalam beberapa penelitian lain. Pertama oleh Oko et al. (2021) dimana terdapat peningkatan daya serap pada konsentrasi 0,5 M dan 1 M, namun pada konsentrasi 3 M terjadi penurunan daya serapnya, hal ini dikarenakan konsentrasi yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan pori karbon yang

terbentuk menjadi rusak. Selanjutnya penelitian oleh Meilianti (2020), terdapat 5 konsentrasi aktivator dengan variasi, 4.5% 5.0% 5.5% 6.0 % 6.5%, daya serap tertinggi terdapat pada konsentrasi sebesar 6.0 %. Hal ini terjadi karena pori-pori pada permukaan karbon aktif masih mengandung sisa zat aktivator yang tidak larut sempurna saat pencucian, atau masih ada zat yang menempel dan tidak menguap sepenuhnya selama proses karbonisasi. Untuk interaksi antara konsentrasi dengan variabel aktivator dan logam berat, dengan nilai signifikan yang lebih besar dari 0.5, hal ini dikarenakan pengaruh dari konsentrasi aktivator yang tidak signifikan terhadap daya serap.

Walaupun demikian melihat Gambar 6 adanya indikasi peningkatan daya serap seiring bertambahnya konsentrasi. Memberikan Konsentrasi yang tinggi pada pembuatan arang aktif, akan dihasilkan bentuk rongga pori yang banyak, sehingga akan menyerap logam berat dengan baik (Nurfitri et al., 2019; M. Putri et al., 2020) Hal ini sesuai juga dengan penelitian yang dilakukan oleh (Lestari et al., 2024) dimana daya serap tertinggi terdapat pada arang aktif dengan konsentrasi 1034ctivator 2M dan terendah 0,5 M, dan menyimpulkan bahwasanya Konsentrasi 1034ctivator mempengaruhi kemampuan daya serap karbon aktif.

Perbandingan hasil penelitian ini dengan penelitian sebelumnya, disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan dengan Penelitian Lain

Peneliti	Aktivator	Logam berat	Efisiensi adsorpsi	Efisiensi Adsorpsi (temuan)
(Nurfitri et al., 2019)	KOH	Pb	86,30	96,93
(Busyairi et al., 2019)	KOH	Mn	92,91	98,41
(Rohmah et al., 2024)	H ₂ SO ₄	Pb	76,51	97,53
(Marwanto et al., 2024)	H ₂ SO ₄	Mn	35,90	35,08

Secara keseluruhan, perbandingan ini menunjukkan bahwa adsorben yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki efisiensi adsorpsi yang sangat tinggi dan kompetitif, bahkan unggul secara signifikan dibandingkan dengan beberapa penelitian sebelumnya, terutama untuk penghilangan timbal (Pb). Peningkatan substansial dalam efisiensi adsorpsi Pb menyoroti efektivitas KOH dan H₂SO₄ dalam menciptakan situs aktif dan struktur pori yang optimal pada adsorben untuk penjerapan Pb. Meskipun untuk Mn, efisiensi yang dicapai relatif sebanding dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan H₂SO₄, keberhasilan utama terletak pada performa yang baik dalam adsorpsi Pb. Temuan ini menegaskan potensi adsorben yang dihasilkan dalam penelitian ini sebagai alternatif yang sangat efektif untuk aplikasi pengolahan limbah yang mengandung logam berat, khususnya timbal, dan menunjukkan langkah maju dalam pengembangan material adsorben yang efisien.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data, karbon aktif berbasis bonggol jagung yang diaktivasi dengan KOH menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan H₂SO₄ dalam hal efisiensi adsorpsi logam berat timbal (Pb) dan mangan (Mn). Aktivasi menggunakan KOH menghasilkan karbon aktif dengan struktur pori yang lebih besar, kadar air yang lebih rendah, dan efisiensi adsorpsi yang lebih tinggi. Secara spesifik, konsentrasi KOH 2M memberikan hasil terbaik dengan efisiensi adsorpsi Pb sebesar 96,93% dan Mn sebesar 98,41%. Sebaliknya, aktivasi dengan H₂SO₄ cenderung menghasilkan karbon aktif dengan mikropori yang lebih kecil, sehingga kurang efektif untuk menyerap Mn. Meskipun seluruh sampel memenuhi standar kadar air dan kadar abu sesuai SNI, kadar abu terendah ditemukan pada karbon aktif yang diaktivasi dengan KOH. Dengan demikian, penggunaan KOH sebagai aktivator dalam pembuatan karbon aktif berbasis bonggol jagung lebih direkomendasikan untuk aplikasi pengolahan limbah cair industri, terutama yang mengandung logam berat.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajeng, A. B., & Wesen, P. (2013). Penyisihan Logam Berat Timbal (Pb) Dengan Proses Fitoremediasi. *Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 5(2).
- Alfiany, H., & Bahri, S. (2013). Kajian Penggunaan Arang Aktif Tongkol Jagung sebagai Adsorben Logam Pb dengan Beberapa Aktivator Asam. *Jurnal Natural Science*, 2(3).
- Andarista, F. F., Huda, M. M., & Dewati, R. (2023). Adsorpsi Logam Timbal Pada Limbah Cair Artifisial Menggunakan Arang Aktif Eceng Gondok. *Jurnal Teknik Kimia*, 18(1). https://doi.org/10.33005/jurnal_tekkim.v18i1.4122
- Aryani, F. (2019). Aplikasi Metode Aktivasi Fisika dan Aktivasi Kimia pada Pembuatan Arang Aktif dari Tempurung Kelapa (*Cocos nucifera* L). *Indonesian Journal of Laboratory*, 1(2). <https://doi.org/10.22146/ijl.v1i2.44743>
- Astuti, A., & Maiza, R. K. (2019). Pengaruh Aktivator H₂SO₄ terhadap Pori Karbon Aktif dan Aplikasinya sebagai Absorber Logam Berat. *JURNAL ILMU FISIKA / UNIVERSITAS ANDALAS*, 11(1). <https://doi.org/10.25077/jif.11.1.30-36.2019>
- Atikasari, Y., Sari, D. P., Mukaromah, A. H., & Wardoyo, F. A. (2022). Perbandingan Efektivitas Penggunaan Serbuk Biji Kelor/TiO₂ dan Arang Aktif Biji Kelor/TiO₂ terhadap Penurunan Kadar Mn (II) dalam Air. *Prosiding Seminas Nasional UNIMUS*, 5.
- Busyairi, M., Firlina, F., Sarwono, E., & Saryadi, S. (2019). Pemanfaatan Serbuk Kayu Meranti Menjadi Karbon Aktif Untuk Penurunan Kadar Besi (Fe), Mangan (Mn) Dan Kondisi Ph Pada Air Asam Tambang. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 11(2). <https://doi.org/10.20885/jstl.vol11.iss2.art1>
- Esterlita, M. O., & Herlina, N. (2015). Pengaruh Penambahan Aktivator ZnCl₂, KOH, Dan H₃PO₄ Dalam Pembuatan Karbon Aktif Dari Pelepeh Aren (*Arenga Pinnata*). *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(1). <https://doi.org/10.32734/jtk.v4i1.1460>
- Fadhilah, N. F., Wibowo, E. B. T., Astuti, D. H., & Billah, M. (2023). Pemanfaatan Eceng Gondok sebagai Adsorben dengan Perlakuan Awal untuk Menurunkan Kadar Logam Berat Cu. *Chempro*, 2(1). <https://doi.org/10.33005/chempro.v2i01.68>
- Faizah, M., Rizky, A., Zamroni, A., & Khasan, U. (2022). Pembuatan Briket sebagai Salah Satu Upaya Pemanfaatan Limbah Pertanian Bonggol Jagung di Desa Tampingmojo. *Jumat Pertanian: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 3(2). <https://doi.org/10.32764/abdimasper.v3i2.2863>
- Fatimah, S., Arnelli, A., & Astuti, Y. (2023). Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Sabut Kelapa dengan Aktivator H₂SO₄ dan NaOH sebagai Adsorben Kation Fe dan Cu dalam Limbah Cair Batik Kebumen. *Greensphere: Journal of Environmental Chemistry*, 3(1). <https://doi.org/10.14710/giec.2023.16300>
- Gadd, G. M., & White, C. (1989). Removal of thorium from simulated acid process streams by fungal biomass. *Biotechnology and Bioengineering*, 33(5). <https://doi.org/10.1002/bit.260330512>
- Hatina, S., & Winoto, E. (2020). Pemanfaatan Karbon Aktif Dari Serbuk Kayu Merbau Dan Tongkol Jagung Sebagai Adsorben Untuk Pengolahan Limbah Cair AAS. *Jurnal Redoks*, 5(1). <https://doi.org/10.31851/redoks.v5i1.4027>
- 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).
- Kiełbasa, K., Bayar, S., Varol, E. A., Sreńscek-Nazzal, J., Bosacka, M., Miądlicki, P., Serafin, J., Wróbel, R. J., & Michalkiewicz, B. (2022). Carbon Dioxide Adsorption over Activated Carbons Produced from Molasses Using H₂SO₄, H₃PO₄, HCl, NaOH, and KOH as Activating Agents. *Molecules*, 27(21). <https://doi.org/10.3390/molecules27217467>
- 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>
- Lestari, J., Nurlaila, R., Fibarzi, W. U., & Aktif, K. (2024). Pengaruh Konsentrasi Aktivator HCl Dan Ukuran Partikel Terhadap Kemampuan Daya Serap Karbon Aktif Dari Ampas Bubuk Kopi. 4(Agustus), 596–605.
- Mahmudah, D., Sakinah, N., & Suharyadi, E. (2017). Adsorpsi Logam Tembaga (Cu), Mangan (Mn) dan Nikel (Ni) dalam Artificial Limbah Cair dengan Menggunakan Nanopartikel Magnetit (Fe₃O₄). *INDONESIAN JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 4(02). <https://doi.org/10.13057/ijap.v4i02.4974>
- Maiza, R. K., Hasan, M., Fadly, M., & Astuti, A. (2018). Sintesis Karbon Aktif dari Kulit Pisang untuk Pemurnian Air Tambang Emas di Sungai Batang Palangki Kabupaten Sijunjung dari Logam Berat. *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 15(1). <https://doi.org/10.12962/j24604682.v15i1.3815>
- Marwanto, A., Mulyati, S., & Adeko Poltekkes Kemenkes Bengkulu, R. (2024). Efektivitas Media Karbon Aktif Kulit Durian Terhadap Perubahan Parameter Ph, Fe Dan Mn Air Sumur Gali Effectiveness of Durian Skin Activated Carbon Media on Changes in Ph, Fe and Mn Parameters of Dug Well Water. *Journal of Nursing and Public Health*, 12(1).

- Meilianti, M. (2020). Pembuatan Karbon Aktif Dari Arang Tongkol Jagung Dengan Variasi Konsentrasi Aktivator Natrium Karbonat (Na_2CO_3). *Jurnal Distilasi*, 5(1). <https://doi.org/10.32502/jd.v5i1.3025>
- Mu'jizat. (2010). Pembuatan dan karakterisasi karbon aktif dari biji kelor (*Moringa oleifera*. Lamk) dengan NaCl sebagai bahan pengaktif. *International Journal of Heritage Studies*, 16(1).
- Mu'jizat, P., Dunggio, S., Sakir, S., & Zohrahayaty, Z. (2023). Pengembangan Usaha Briket Dari Tongkol Jagung di Desa Butu Kecamatan Tilong Kabila Kabupaten Bonebolango Provinsi Gorontalo. *Empiris Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat*, 1(1). <https://doi.org/10.59713/ejppm.v1i1.662>
- Nandari, W. W., Zabrina, N., & Sitta, M. P. (2024). Pengaruh Jenis dan Konsentrasi Aktivator Pada Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa. *Jurnal Kimia Dan Rekayasa*, 4(2), 71-77.
- Nurfitriani, N., Febriyantiningrum, K., Utomo, W. P., Nugraheni, Z. V., Pangastuti, D. D., Maulida, H., & Ariyanti, F. N. (2019). Pengaruh Konsentrasi Aktivator Kalium Hidroksida (KOH) pada Karbon Aktif dan Waktu Kontak Terhadap Daya Adsorpsi Logam Pb dalam Sampel Air Kawasan Mangrove Wonorejo, Surabaya. *Akta Kimia Indonesia*, 4(1). <https://doi.org/10.12962/j25493736.v4i1.5071>
- Oko, S., Mustafa, Kurniawan, A., & Palulun, E. S. B. (2021). Pengaruh Suhu dan Konsentrasi Aktivator HCl terhadap Karakteristik Karbon Aktif dari Ampas Kopi. *Metana: Media Komunikasi Rekayasa Proses Dan Teknologi Tepat Guna*, 17(1).
- Palar, H. (2004). Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Paranita, D. (2020). Kombinasi Campuran Pelepeh Kelapa Sawit Dan Kulit Kacang Tanah Sebagai Bahan Baku Pembuatan Biobriket. *Jurnal Al Ulum: LPPM Universitas Al Washlyyah Medan*, 8(2).
- Purnamawati, N. (2023). Uji Kualitas Sintesis Karbon Aktif Dari Pelepeh Aren Teraktivasi Asam Fosfat. *Journal of Research and Education Chemistry*, 5(2). [https://doi.org/10.25299/jrec.2023.vol5\(2\).15225](https://doi.org/10.25299/jrec.2023.vol5(2).15225)
- Putri, D., Khoirunnisa, S., & Widiyanto, A. (2023). Peningkatan Keterampilan Warga Desa Purwojiwo dalam Pembuatan Bahan Bakar Briket Sebagai Upaya Pemanfaatan Limbah Pertanian Bonggol Jagung. *Jurnal Bina Desa*, 5(1). <https://doi.org/10.15294/jbd.v5i1.41496>
- Putri, M., Awitdrus, A., & Manullang, R. K. (2020). Penyerapan Logam Berat Pb Dan Cu Menggunakan Karbon Aktif Berbasis Mahkota Nanas Dengan Variasi Konsentrasi Kalium Hidroksida. *Komunikasi Fisika Indonesia*, 17(1). <https://doi.org/10.31258/jkfi.17.1.30-34>
- Riyanto, C. A., Raharjianti, B. M., & Aminu, N. R. (2021). Studi Kinetika dan Isoterm Adsorpsi Ion Fe (III) dan Mn (II) pada Karbon Aktif Batang Eceng Gondok. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 15(1). <https://doi.org/10.26578/jrti.v15i1.6633>
- Robbika, F. (2022). Sintesis Karbon Aktif Dari Ampas Tebu Dengan Aktivasi Kimia Menggunakan Koh Sebagai Adsorben Logam Berat Cr-VI. *Berkala Penelitian Teknologi Kulit, Sepatu, Dan Produk Kulit*, 21(1). <https://doi.org/10.58533/bptkspk.v21i1.157>
- Rohmah, D., Khuzaimah, S., & Alimah, G. N. (2024). Study of Coal Combustion Waste Utilization: Coal Fly Ash for Adsorption of Pb(II), Cd(II), BOD and COD in Donan River Water Samples. *Rekayasa Bahan Alam Dan Energi Berkelanjutan*, 8(2), 50-56. <https://doi.org/10.21776/ub.rbaet.2024.008.02.01>
- Sibarani, S. T., Widarti, B. N., & Meicahayanti, I. (2022). Pengaruh Suhu Dan Jenis Aktivator Pada Karbon Aktif Limbah Daun Nanas Terhadap Kadar Besi (Fe) Dan Mangan (Mn) Air Sumur. *Jurnal Teknologi Lingkungan UNMUL*, 6(2). <https://doi.org/10.30872/jtlunmul.v6i2.9490>
- Suherman, M., Hidayanti, N. S., Utami, L. N., Firdaus, F. R., & Rabbani, M. H. A. (2022). Pemanfaatan Olahan Limbah Bonggol Jagung sebagai Salah Satu Solusi Peningkatan Perekonomian di Desa Tambaksari. *Jurnal Kreativitas Pengabdian Kepada Masyarakat (PKM)*, 5(12). <https://doi.org/10.33024/jkpm.v5i12.7971>
- Talunoe, O., Nurhaeni, N., & Mirzan, Moh. (2015). Pemanfaatan Arang Aktif Kulit Kacang Tanah Sebagai Adsorben Besi (Fe) Pada Air Sumur Di Desa Pendolo, Kec.Pamona Selatan, Kab. Poso. *KOVALEN*, 1(1). <https://doi.org/10.22487/j24775398.2015.v1.i1.5096>
- Weißpflog, J., Gündel, A., Vehlow, D., Steinbach, C., Müller, M., Boldt, R., Schwarz, S., & Schwarz, D. (2020). Solubility and selectivity effects of the anion on the adsorption of different heavy metal ions onto chitosan. *Molecules*, 25(11). <https://doi.org/10.3390/molecules25112482>
- Wibawati, A., Mahmud, M., & Abdi, C. (2020). Pembuatan Dan Karakterisasi Karbon Aktif Dari Serbuk Arang Kayu Ulin dengan Aktivasi Koh dan Aplikasinya Untuk Menurunkan Krom pada Limbah Cair Sasirangan. *Jernih: Jurnal Tugas Akhir Mahasiswa*, 1(1). <https://doi.org/10.20527/jernih.v1i1.570>
- Widwastuti, H., & Asworo, R. Y. (2022). Komparasi Daya Adsorpsi Silika Dari Abu Sekam Padi dan Ampas Tebu Terhadap Adsorpsi Pb²⁺. *Journal Syifa Sciences and Clinical Research*, 4(1). <https://doi.org/10.37311/jsscr.v4i2.14910>
- Wijaya, I. K., Farra Yulia, Y., & Udyani, K. (2020). Pemanfaatan Daun Teh Sebagai Biosorben Logam Berat Dalam Air Limbah (Review). *JURNAL ENVIROTEK*, 12(2). <https://doi.org/10.33005/envirotek.v12i2.55>
- Wu, F. C., Wu, P. H., Tseng, R. L., & Juang, R. S. (2011). Preparation of novel activated carbons from H₂SO₄-Pretreated corncob hulls with KOH activation for quick adsorption of dye and 4-chlorophenol. *Journal of Environmental Management*, 92(3). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.003>