

PENENTUAN JENIS DAN OPTIMASI AKTIVATOR KARBON BIJI MATOA SEBAGAI ADSORBEN LOGAM Fe

KIND DETERMINATION AND OPTIMIZATION OF MATOA SEEDS CARBON ACTIVATOR AS Fe METAL ADSORBENT

Arief Yandra Putra^{1*}, Fitri Mairizki², Fitria Novica Sari¹, Riska Salsabila¹, Manja Septi Wulandari¹

¹Pendidikan Kimia, FKIP, Universitas Islam Riau

²Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Islam Riau

*e-mail korespondensi: ariefyandra0811@edu.uir.ac.id

Abstrak

Pencemaran air tanah oleh logam berat seperti besi (Fe) merupakan permasalahan lingkungan yang signifikan karena dapat membahayakan kesehatan manusia. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan jenis dan konsentrasi optimal aktivator kimia pada karbon aktif berbasis biji matoa (*Pometia pinnata*) dalam proses adsorpsi ion Fe(III) dari larutan. Karbonisasi biji matoa dilakukan pada suhu 400 °C, kemudian diaktivasi secara kimia menggunakan H₂SO₄, HCl, dan NaOH, serta diuji efektivitas adsorpsinya menggunakan Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). Hasil menunjukkan bahwa aktivator H₂SO₄ memberikan performa terbaik dengan konsentrasi optimum sebesar 0,75 M, menurunkan konsentrasi Fe dari 9,498 mg/L menjadi 0,161 mg/L dalam waktu 30 menit, dengan efisiensi mencapai 98,9%. Efektivitas maksimum juga tercapai pada dosis karbon sebesar 0,5 gram, yang menandai kondisi jenuh adsorpsi. Dibandingkan dengan adsorbent berbasis biomassa lain seperti kulit pisang dan tongkol jagung, karbon aktif biji matoa menunjukkan kinerja yang lebih unggul, terutama dari segi waktu kontak dan efisiensi penurunan logam. *Novelty* dari penelitian ini terletak pada eksplorasi pemanfaatan biji matoa—yang belum banyak dikaji sebelumnya—sebagai bahan baku karbon aktif yang efektif dan ramah lingkungan untuk aplikasi pengolahan air tercemar logam berat dalam skala industri.

Kata kunci: karbon aktif, biji matoa, aktivator kimia, adsorpsi Fe(III), H₂SO₄,

Abstract

Groundwater contamination by heavy metals such as iron (Fe) poses a serious environmental concern due to its harmful effects on human health. This study aims to determine the optimal type and concentration of chemical activator for activated carbon derived from matoa seeds (*Pometia pinnata*) in the adsorption of Fe(III) ions from aqueous solutions. The matoa seeds were carbonized at 400 °C and chemically activated using H₂SO₄, HCl, and NaOH. The adsorption efficiency was analyzed using Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). The results showed that H₂SO₄ was the most effective activator, with an optimal concentration of 0.75 M, reducing Fe concentration from 9.498 mg/L to 0.161 mg/L within 30 minutes, achieving a removal efficiency of 98.9%. Maximum adsorption capacity was also reached at a carbon dosage of 0.5 grams, indicating saturation. Compared to previous studies utilizing biomass-based adsorbents such as banana peels and corn cobs, matoa seed-based activated carbon demonstrated higher efficiency and faster contact time. The novelty of this research lies in the utilization of matoa seeds—which have not been extensively studied—as a promising and eco-friendly raw material for activated carbon in heavy metal remediation applications at an industrial scale.

Keywords: activated carbon, matoa seed, chemical activator, Fe(III) adsorption, H₂SO₄

PENDAHULUAN

Kegiatan industri, seperti pertambangan, pelapisan logam, dan peleburan sebagai sumber utama yang menghasilkan limbah ke dalam sistem perairan berupa ion logam berat (G. Wang et al., 2018)

Logam berat diklasifikasikan berdasarkan kepadatannya yang berhubungan dengan tingkat toksisitasnya dan nomor atomnya. (Kriswandana, 2020) Besi adalah varian dari logam berat padat dan beracun yang ditemukan dalam kelompok IVA, terutama berbahaya saat tertelan oleh organisme hidup, terutama

spesies manusia. Sangat penting untuk memahami karakteristik logam berat Fe karena potensinya untuk menimbulkan kerusakan pada saluran pencernaan, yang menyebabkan kematian. (Sagadevan et al., 2021) Paparan logam berat yang berkepanjangan, seperti Fe, dapat menghasilkan konsekuensi kesehatan yang parah, termasuk degenerasi otak dan sirosis hati. Akibatnya, pemahaman komprehensif tentang logam berat Fe, di samping bahaya yang terkait, sangat penting dalam menjaga kesejahteraan manusia. (Agustina et al., 2022)

Karbon aktif yaitu suatu padatan berpori yang mengandung 85-95% senyawa karbon. Selain untuk bahan bakar, karbon dapat digunakan sebagai penyerap. Karbon aktif dapat dihasilkan dari beberapa bahan yang mengandung banyak karbon seperti kayu, serbuk gergajian kayu, kulit biji, sekam padi, tempurung, gambut, bagase, batu bara, lignit dan tulang Binatang.

Aktivasi meningkatkan ukuran pori-pori karbon aktif dan membentuk pori-pori yang saling berikatan, dengan adanya peningkatan volume pori mikro (lebar pori < 2nm) dan luas permukaan internal. (Silaban, 2018) Karbon aktif dengan luas permukaan yang besar dapat digunakan untuk berbagai aplikasi yaitu sebagai penghilang warna, penghilang rasa, penghilang bau dan agen pemurni dalam indsutri makanan. Selain itu juga banyak digunakan dalam proses pemurnian air baik dalam proses produksi air minum maupun dalam penanganan limbah. (Rahmadani & Kurniawati, 2017)

Beberapa penelitian yang melakukan aktivasi karbon aktif dari beberapa jenis tanaman seperti karbon aktif dari arang tempurung kelapa (Silaban, 2018), karbon teraktivasi asam dan basa berbasis mahkota nanas (Rahmadani & Kurniawati, 2017), karbon aktif dari ampas tebu dengan aktivasi kimia (Robbika, 2022), karbon aktif dari limbah kulit kayu (Sufra et al., 2023), karbon aktif dari limbah tongkol jagung (Wahyuni et al., 2023), dan karbon aktif limbah lumpur aktif industri gula (Setiawan et al., 2021).

Matoa (*Pometia pinnata*) termasuk ke dalam keluarga *Sapindaceae*. Matoa biasa dimanfaatkan dalam bidang industri kayu untuk bagian batangnya dan dikonsumsi sebagai makanan serta obat tradisional pada bagian daun, buah, serta bijinya. (Hajar et al., 2021)

Matoa adalah salah satu dari banyak buah tropis yang sangat kaya akan antioksidan. Serbuk kulit buah matoa mengandung senyawa flavonoid, tannin, dan saponin. (Kustomo et al., 2022) Matoa sangat dikenal tetapi tidak banyak informasi tentang khasiatnya sebagai bahan atau zat yang dapat melindungi hati dan darah yang terpapar logam berat. (Trihardhini, 2016) Sejauh ini, tidak banyak hasil penelitian yang mengkaji mengenai kemungkinan biji buah matoa dibuat menjadi karbon aktif dan dimanfaatkan sebagai penyerap logam berat khususnya Fe

METODE PENELITIAN

Waktu Dan Tempat Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental, akan dilakukan pada bulan Agustus sampai bulan November 2024. Pelaksanaan penelitian dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Islam Riau, Analisis logam Fe dengan AAS, di Laboratorium Sentral Universitas Andalas.

Peralatan Dan Bahan

Peralatan dalam penelitian ini : Peralatan gelas, Desikator, Neraca Analitik, pH meter, Blender Rotary Sheker, Oven, Crusher, mortal grinding, AAS Analyst,

Bahan dalam penelitian ini: Biji matoa (*pometia Pinnata*), KOH , NaOH, HCl, Asam Sulfat, Kertas Saring Wachtman No 42, larutan standar Fe(III) 1000 ppm.

Prosedur Penelitian

Preparasi Biji Matoa

Preparasi adsorben dilakukan Biji Buah Matoa yang dikumpulkan kemudian di cuci sampai bersih dari kotoran, dan kemudian dikering anginkan selama 1-2 minggu. (Fauzia et al., 2021)

Proses Karbonasi

Bahan baku mula-mula dibersihkan dari pengotor secara manual. Setelah itu dipanaskan dengan *furnace* pada suhu 400°C selama 2 jam, kemudian dimasukkan dalam desikator selama 24 jam. (Rahmadani & Kurniawati, 2017) ., Karakterisasi keadaan sebelum dikontakkan/ digunakan dengan FTIR, XRF, SEM-EDX, BET.

Proses Aktivasi Karbon Aktif

Karbon dikeringkan terlebih dahulu dalam oven untuk menghilangkan kadar airnya, kemudian dilakukan proses aktivasi dengan larutan NaOH, HCl dan H₂SO₄ dengan konsentrasi 5M dengan cara merendam selama 24 jam dan disaring. Lalu karbon dilakukan pencucian sampai diperoleh pH netral, kemudian ditentukan gugus fungsi dengan FTIR pada bilangan gelombang 4000,00-400,00 cm (Rahmadani & Kurniawati, 2017).

Rasio perbandingan antara aktivator dengan karbon aktif adalah 1:3 (atau membuat karbon aktif terendam sempurna). Karbon aktif disaring dan dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 6 jam. (Wahyuni et al., 2023) kemudian lakukan analisis karakterisasi menggunakan SEM-EDX untuk melihat permukaan pori dari karbon aktif dan FTIR.

Proses Kontak dengan Logam Fe (variasi aktivator dan Konsentrasi aktivator)

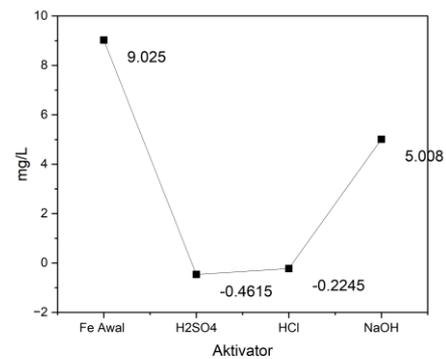
- Karbon aktif yang telah dibuat lalu dikontakkan dengan logam berat Fe 10 ppm dan tentukan penurunan logam Fe yang optimal.
- Setelah didapatkan variasi aktivator yang terbaik dalam menurunkan logam Fe maka lakukan variasi konsentrasi dari aktivator tersebut (0,25 M, 0,5 M, 0,75 M, 1,0 M, 1,25 M, dan 1,5 M) dilakukan 2x pengulangan, untuk mengetahui konsentrasi optimum dalam menurunkan logam Fe. Kemudian lakukan analisis

variasi dosis adsorben serta waktu kontak optimum yang dilakukan dengan 2x pengulangan

Hasil Yang diharapkan adalah didapatkannya jenis aktivator yang terbaik dalam mengaktifasi karbon aktif dari biji matoa dan dapat ditentukan juga konsentrasi aktivator yang terbaik sehingga menjadi landasan penggunaan karbon aktif dalam penelitian selanjutnya

HASIL DAN PEMBAHASAN

Jenis Aktivator



Gambar 1. Perbandingan Jenis Aktivator

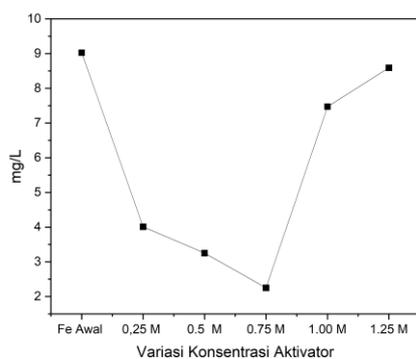
Berdasarkan gambar 1, menunjukkan hubungan antara jenis aktivator (Fe Awal, H₂SO₄, HCl, dan NaOH) dimana Fe Awal memiliki absorbansi tertinggi (9.025 mg/L), menunjukkan bahwa sebelum perlakuan dengan aktivator, sampel memiliki daya serap cahaya yang tinggi. H₂SO₄ dan HCl menurunkan absorbansi secara signifikan, bahkan hingga nilai negatif (-0.4615 mg/L dan -0.2245 mg/L).

Hal menunjukkan bahwa perlakuan dengan asam menyebabkan perubahan struktural yang mengurangi kemampuan sampel untuk menyerap cahaya, sementara NaOH meningkatkan kembali nilai absorbansi hingga 5.008, yang berarti perlakuan basa dapat meningkatkan kembali daya serap cahaya, meskipun tidak sebesar Fe Awal. Maka dari hasil ini, H₂SO₄ adalah aktivator terbaik dalam menurunkan Fe, karena menghasilkan absorbansi terendah, bahkan negatif. Hal ini menunjukkan bahwa

hampir semua Fe telah dihilangkan dari larutan setelah perlakuan dengan H_2SO_4 .

Hal ini berbanding lurus dengan yang dilakukan oleh al-muttaqi (2019) Aktivasi dengan asam menyebabkan zeolit menjadi lebih hidrofob, sehingga daya adsorpsinya terhadap air berkurang. Sebaliknya, aktivasi dengan basa dapat mempengaruhi rasio Si/Al dalam zeolit, yang berdampak pada sifat adsorpsinya. (Al Muttaqii et al., 2019)

Variasi Konsentrasi Aktivator



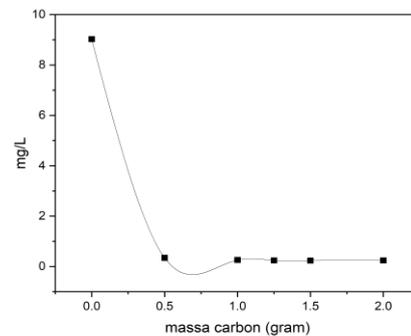
Gambar 2. Variasi Konsentrasi Aktivator

Gambar 2, menunjukkan perbandingan konsentrasi aktivator asam dengan berbagai konsentrasi. Dari grafik dapat dianalisis Konsentrasi 0.75 M adalah yang paling optimal dalam menurunkan Fe karena memberikan absorbansi terendah.

Konsentrasi aktivator yang terlalu rendah (<0.75 M) belum cukup efektif, sementara konsentrasi yang terlalu tinggi (>0.75 M) justru menurunkan efektivitas, hal ini karena efek jenuh atau perubahan sifat material.

Hasil ini juga berbanding lurus dengan penelitian yang dilakukan oleh Chandra Lestari (2015) yang menyatakan bahwa konsentrasi aktivator H_2SO_4 yang optimal untuk menurunkan kadar Fe adalah 0,5 M. Pada konsentrasi ini, efisiensi penurunan Fe mencapai 98,93%. Konsentrasi H_2SO_4 yang lebih tinggi tidak selalu meningkatkan efisiensi penurunan Fe, bahkan dapat menurunkan efektivitasnya. (Asih et al., 2015)

Variasi Massa Karbon



Gambar 3. Variasi Massa Karbon

Grafik pada gambar 3, menunjukkan hubungan antara massa karbon (dalam gram) dengan konsentrasi zat terlarut (mg/L) dalam suatu proses adsorpsi. Terlihat bahwa peningkatan massa karbon secara signifikan menurunkan konsentrasi zat terlarut, dari sekitar 9 mg/L menjadi hampir nol ketika massa karbon mencapai 0,5 gram. Setelah titik ini, penurunan konsentrasi berjalan lambat dan cenderung mendatar, menandakan bahwa sistem telah mencapai kondisi jenuh di mana penambahan karbon lebih lanjut tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi adsorpsi.

Hal ini menunjukkan bahwa karbon bertindak sebagai adsorben yang sangat efektif, di mana jumlah situs aktif meningkat seiring dengan massa karbon, hingga kapasitas adsorpsi maksimum tercapai. Efisiensi penurunan logam Fe sebesar 96.7% . Hal ini menunjukkan bahwa karbon yang digunakan sangat efektif dalam mengadsorpsi logam Fe pada dosis tersebut.

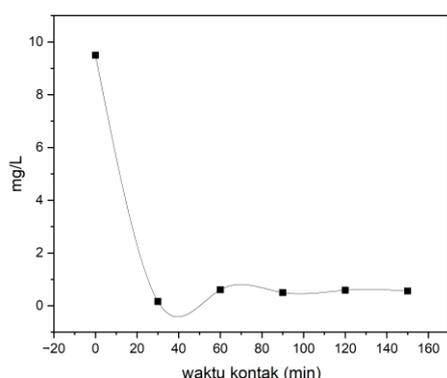
Penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Jemal et al. (2023) di yang menggunakan karbon aktif dari *Rumex abyssinicus* untuk mengadsorpsi metilen biru dan memperoleh efisiensi hampir 99,9% pada dosis karbon 0,6 g/L, dengan kesesuaian yang sangat baik terhadap model Freundlich ($R^2 = 0,99$). (Fito et al., 2023). Penelitian berikutnya oleh

Singh dkk. (2025) dari menunjukkan bahwa karbon dari daun *Copper pod tree* dengan aktivasi H_3PO_4 memiliki luas permukaan tinggi dan sangat efektif untuk mengadsorpsi tetrasiklin dengan kapasitas maksimum sebesar 103 mg/g, dengan kesesuaian terbaik terhadap model Langmuir ($R^2 = 0,9952$) (link artikel). Semua studi ini menunjukkan bahwa efisiensi tinggi (>95%) dapat dicapai pada dosis karbon yang relatif rendah (<1 g/L), dengan kecenderungan adsorpsi mengikuti model Langmuir dan terjadinya titik jenuh pada dosis tertentu (Singh et al., 2025).

Studi berikutnya oleh wang dkk (2023–2024) menggunakan limbah cangkang buah untuk adsorpsi metilen biru dan ofloxacin, mencapai efisiensi hingga 99,9% dengan dosis sangat rendah serta fit model Langmuir yang kuat. (J. Wang et al., 2022)

Berdasarkan hal tersebut penelitian ini tetap menunjukkan bahwa karbon yang digunakan cukup efektif dan memiliki potensi untuk ditingkatkan lagi melalui rekayasa permukaan atau aktivasi kimia agar dapat mencapai kapasitas maksimum dan efisiensi yang lebih tinggi dengan dosis yang lebih rendah.

Variasi Waktu Kontak



Berdasarkan grafik diatas, hubungan antara waktu kontak dan konsentrasi Fe^{3+} , terlihat bahwa waktu optimum terjadi pada menit ke-30 dengan konsentrasi Fe^{3+} yang bersisa sebesar 0,161 mg/L dari nilai awal 9,498 mg/L, yang mencerminkan efisiensi penurunan logam berat mencapai 98,9%. Setelah waktu tersebut, konsentrasi justru

mengalami sedikit peningkatan hingga stabil dikisaran 0,4–0,6 mg/L, yang mengindikasikan bahwa reaksi telah mencapai kesetimbangan atau adanya desorpsi kembali. Efisiensi tinggi pada waktu singkat ini menunjukkan performa yang kompetitif. Penelitian yang dilakukan oleh Hamid et al. (2022) menggunakan karbon aktif dari kulit pisang yang diaktivasi dengan NaOH untuk mengadsorpsi ion Pb^{2+} , menghasilkan efisiensi 97,9% dalam waktu 60 menit. Meskipun efisiensinya hampir mendekati, tetapi dalam penelitian yang dilakukan tersebut memerlukan waktu dua kali lebih lama dibanding karbon yang digunakan dalam penelitian ini. (Hamid et al., 2022).

Penelitian lain oleh Hany et al (2024) menunjukkan perbandingan dengan teknologi degradasi organik menunjukkan keunggulan waktu proses yang mengembangkan sistem aktivasi persulfat termal pada $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ untuk mineralisasi antibiotik sulfonamida (SMZ/ATZ), namun memerlukan waktu 120 menit untuk mencapai efisiensi TOC hanya sekitar 62,5%, menandakan bahwa degradasi senyawa organik kompleks memerlukan waktu reaksi yang lebih panjang dan efisiensi lebih rendah (Abd et al., 2024).

Berdasarkan analisis tersebut, grafik ini memberikan efisiensi tinggi (~98,9%), waktu kontak singkat (30 menit), dan kemungkinan biaya rendah (jika menggunakan aktivator konvensional), sehingga dapat dikategorikan sebagai pendekatan yang efisien, ekonomis, dan aplikatif untuk reduksi logam berat seperti Fe (III) dan Pb(II) di lingkungan air.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat diambil Kesimpulan yaitu :

1. Aktivator terbaik adalah asam sulfat (H_2SO_4), yang secara signifikan menurunkan konsentrasi Fe dalam larutan.
2. Konsentrasi optimal H_2SO_4 sebagai aktivator adalah 0,75 M, yang memberikan efisiensi penurunan Fe

hingga 98,9% hanya dalam waktu 30 menit.

3. Dosis karbon aktif optimal adalah 0,5 gram, di mana adsorpsi mencapai titik jenuh dan efisiensi maksimum.
4. Waktu kontak terbaik adalah 30 menit, setelah itu tidak terjadi peningkatan efisiensi yang signifikan bahkan terjadi kecenderungan desorpsi.
5. Karbon aktif dari biji matoa menunjukkan kinerja lebih unggul dibandingkan adsorben biomassa lain (seperti kulit pisang dan tongkol jagung), dari segi waktu, efisiensi, dan kemampuan adsorpsi.
6. Keunikan (novelty) penelitian ini adalah penggunaan biji matoa, yang belum banyak diteliti sebelumnya, sebagai bahan baku karbon aktif ramah lingkungan untuk remedia logam berat di air limbah.

DAFTAR RUJUKAN

- A., Hamid, A., Rahmawati, Z., Abdullah, M., Purbaningtyas, T. E., Rohmah, F., Dayi, I., Madura, P. N., Negeri, P., & Islam, U. (2022). The Influence of NaOH Activator Concentration on the Synthesis of Activated Carbon from Banana Peel for Pb(II) Adsorption. *23(03)*, 158–166.
- Abd, H., Mahanna, H., El, M., & Mahmoud, H. (2024). Photo - thermal activation of persulfate for the efficient degradation of synthetic and real industrial wastewaters: System optimization and cost estimation. *Environmental Science and Pollution Research*, 24153–24162. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32728-w>
- Agustina, T. E., Habiburrahman, M., Amalia, F., Arita, S., Faizal, M., Novia, & Gayatri, R. (2022). Reduction of Copper, Iron, and Lead Content in Laboratory Wastewater Using Zinc Oxide Photocatalyst under Solar Irradiation. *Journal of Ecological Engineering*, 23(10), 107–115. <https://doi.org/10.12911/22998993/152341>
- Al Muttaqii, M., Birawidha, D. C., Isnugroho, K., Yamin, M., Hendronursito, Y., Istiqomah, A. D., & Dewangga, D. P. (2019). Pengaruh Aktivasi secara Kimia menggunakan Larutan Asam dan Basa terhadap Karakteristik Zeolit Alam. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 13(2), 266. <https://doi.org/10.26578/jrti.v13i2.5577>
- Asih, C. L., Sudarno, & Hadiwidodo, M. (2015). Pengaruh Ukuran Media Adsorben Dan Konsentrasi Aktivator Naoh Terhadap Efektivitas Penurunan Logam Berat Besi (Fe), Seng (Zn) Dan Warna Limbah Cair Industri Galvanis Menggunakan Arang Sekam Padi Chandra Lestari Asih *, Sudarno *, Mochtar Hadiwidodo *. *Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro*, 1–9.
- Fauzia, S., Aziz, H., Dahlan, D., & Zein, R. (2021). Modelling for removal of cr(vi) and pb(ii) using sago bark (metroxyton sago) by fixed-bed column method. *Egyptian Journal of Chemistry*, 64(8), 3981–3989. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2020.20172.2212>
- Fito, J., Abewaa, M., Mengistu, A., Angassa, K., Ambaye, A. D., Moyo, W., & Nkambule, T. (2023). Adsorption of methylene blue from textile industrial wastewater using activated carbon developed from Rumex abyssinicus plant. *Scientific Reports*, 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32341-w>
- Hajar, S., Rahmah, W., Maharani Putri, E., Septian Ressaydy, S., Hamzah, H., Kalimantan Timur, M., & Ir Juanda

- No, J. (2021). Potensi Ekstrak Buah Matoa (*Pometia Pinnata*) Sebagai Sumber Antioksidan: Literatur Review Potential of Matoa Fruit Extract (*Pometia Pinnata*) As Antioxidant Source. *Jfsp*, 7(1), 2579–4558.
- Kriswandana, F. (2020). Journal of Global Pharma Technology The Effectiveness of Reduction of Weight Metal Contents of Pb , and Hg in Water Electro-coagulation Methodfile:///E:/4.MEY/5. KANTOR/4. TUGAS TAMBAHAN DOSEN/p win/9.pdf. *Journal of Global Pharma Technology*, 12(09), 306–313. <http://www.jgpt.co.in/index.php/jgpt/article/download/3776/2900>
- Kustomo, K., Faza, N. L. Z., & Haarstrick, A. (2022). Adsorption of Cd (II) into Activated Charcoal from Matoa Fruit Peel. *Walisongo Journal of Chemistry*, 5(1), 83–93. <https://doi.org/10.21580/wjc.v5i1.11755>
- Rahmadani, N., & Kurniawati, P. (2017). Sintesis dan Karakterisasi Karbon Teraktivasi Asam dan Basa Berbasis Mahkota Nanas. *Prosiding Seminar Nasional Kimia Dan Pembelajarannya 2017*, November, 154–161.
- Robbika, F. (2022). Synthesis Active Carbon From Sugarcane Bass With Chemical Activation. *Berkala Penelitian Teknologi Kulit, Sepatu, Dan Produk Kulit Politeknik Atk Yogyakarta*, 21, 24–33.
- Sagadevan, S., Anita Lett, J., Vennila, S., Varun Prasath, P., Saravanan Kaliaraj, G., Fatimah, I., Léonard, E., Mohammad, F., Al-Lohedan, H. A., Alshahateet, S. F., & Lee, C. T. (2021). Photocatalytic activity and antibacterial efficacy of titanium dioxide nanoparticles mediated by *Myristica fragrans* seed extract. *Chemical Physics Letters*, 771(January). <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.138527>
- Setiawan, A., Bawafi, M. I. A., Ramadani, T. A., & Santiasih, I. (2021). Sintesis Karbon Aktif Limbah Lumpur Aktif Industri Gula sebagai Adsorben Limbah Logam Berat Cu(II). *Teknik*, 42(1), 316–324. <https://doi.org/10.14710/teknik.v42i3.36031>
- Silaban, D. P. (2018). Karbon Aktif Dari Arang Tempurung Kelapa Limbah Mesin Boiler Sebagai Bahan Penyerap Logam Cd, Cu dan Pb. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 29(2), 119. <https://doi.org/10.28959/jdpi.v29i2.4005>
- Singh, H. O., Murugesan, G., & Selvaraj, R. (2025). Sustainable activated carbon from copper pod tree leaves for efficient tetracycline removal and regeneration. 1–17.
- Sufra, R., Adriansyah, E., & Wati, L. A. (2023). Karbon aktif dari limbah kulit kayu sebagai penyerap logam Mangan (Mn) pada Leachate. *Hexatech: Jurnal Ilmiah Teknik*, 2(1), 13–16. <https://doi.org/10.55904/hexatech.v2i1.673>
- Trihardhini, R. (2016). Pemanfaatan Daun Matoa (*Pometia Pinnata*) Sebagai Adsorben Logam Timbal (Pb) Dalam Air Menggunakan Aktivator Asam Sitrat (C6H8O7). *Doctoral Dissertation, UII*, 5–20.
- Wahyuni, D., Harmawanda, S., Nurhanisa, M., Hasanuddin, H., Zulfian, Z., & Nurhasanah, N. (2023). Efektivitas Karbon Aktif dari Limbah Tongkol Jagung (*Zea mays*) dengan Variasi Aktivator Asam Klorida dalam

Penyerapan Logam Besi pada Air Gambut. *Jurnal Fisika*, 13(1), 10–19. <https://doi.org/10.15294/jf.v13i1.42778>

Wang, G., Zhang, S., Yao, P., Chen, Y., Xu, X., Li, T., & Gong, G. (2018). Removal of Pb(II) from aqueous solutions by *Phytolacca americana* L. biomass as a low cost biosorbent. *Arabian Journal of Chemistry*, 11(1), 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.06.011>

Wang, J., Wang, R., Ma, J., & Sun, Y. (2022). Study on the Application of Shell-Activated Carbon for the Adsorption of Dyes and Antibiotics.