



Potensi Limbah Ikan sebagai Adsorben untuk Pengolahan Air Limbah: Tinjauan Literatur

Fatima S. Ritonga^{a*}, Mutia Amalia^a, Agnes Br. Manurung^b, Abri A.S. Marbun^a

^aProgram Studi Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia

^bProgram Studi Teknik Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia

*Korespondensi penulis: fatimasari@polmed.ac.id (F.S.Ritonga) Tel.: +62812-6241-1727

Sorotan

- Limbah ikan dapat dimanfaatkan sebagai karbon untuk mengadsorpsi pengotor dalam air limbah
- Temperatur, waktu, dan jenis pengolahan limbah ikan menentukan struktur karbon
- Morfologi karbon menentukan efisiensi adsorpsi pengotor dari air limbah

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 25 Maret 2025
 Direvisi pada 09 April 2025
 Disetujui pada 02 Mei 2025
 Tersedia daring pada 09 Mei 2025

Kata kunci:

karbon, adsorpsi, polutan air

Keywords:

biochar, adsorption, water pollutant

ABSTRAK

Limbah ikan, seperti tulang dan sisik, merupakan biomaterial potensial yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan alternatif untuk remediasi logam berat dalam air tercemar. Pemanfaatan limbah ini melalui proses pirolisis menghasilkan biochar yang memiliki karakteristik fisik dan kimia unggul, seperti luas permukaan tinggi, porositas besar, dan keberadaan gugus fungsi aktif yang memungkinkan proses adsorpsi berlangsung secara efektif. Biochar dari tulang dan sisik ikan terbukti mampu menyerap berbagai logam berat, antara lain timbal (Pb^{2+}), kadmium (Cd^{2+}), dan tembaga (Cu^{2+}), serta mineral berlebih seperti besi (Fe^{3+}) yang umum ditemukan dalam air limbah. Pemanfaatan biochar ini tidak hanya memberikan solusi terhadap pencemaran air, tetapi juga mendukung pengelolaan limbah organik secara berkelanjutan. Potensi penerapannya sangat luas, mulai dari skala rumah tangga hingga industri, karena sifatnya yang ramah lingkungan, efisien, dan ekonomis. Studi ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas dan karakteristik biochar berbasis limbah ikan sebagai material adsorben dalam pengolahan air, serta prospeknya dalam mendukung teknologi ramah lingkungan yang berkelanjutan.

ABSTRACT

Fish waste, particularly bones and scales, holds significant potential as a sustainable and low-cost material for the remediation of heavy metal contamination in water. When processed through pyrolysis, this waste can be transformed into biochar with favorable physicochemical properties, including a high surface area, large pore volume, and the presence of active functional groups that enhance its adsorption capacity. Biochar derived from fish waste has demonstrated effectiveness in removing various heavy metals such as lead (Pb^{2+}),

and copper (Cu^{2+}), as well as excess minerals like iron (Fe^{3+}), commonly found in polluted water sources. The application of fish-based biochar is promising across various treatment scales – from household systems to industrial wastewater management – due to its eco-friendly, efficient, and cost-effective characteristics. This study explores the potential, effectiveness, and adsorption performance of fish waste-derived biochar, emphasizing its role as an environmentally friendly material for water purification technologies and its broader contribution to circular economy initiatives.

1. Pendahuluan

Peningkatan konsumsi ikan menyebabkan besarnya limbah dari ikan tersebut, seperti tulang dan sisiknya. Limbah dari ikan merupakan limbah yang terdegradasi oleh alam secara alami, namun, limbah yang besar jumlahnya menjadi pusat perhatian pemanfaatan kembali limbah tersebut menjadi sesuatu yang lebih bermanfaat. Pemanfaatan limbah pengolahan ikan, yaitu bagian tulang ikannya menjadi bahan yang menarik karena pada jenis ikan besar yang dikonsumsi, tulang ikan menjadi limbah yang cukup besar. Jumlah pengolahan ikan besar seperti tuna, tongkol, atau hiu yang hanya diambil dagingnya, menyebabkan tulang ikan yang besar menjadi limbah organik.

Limbah organik dilirik untuk menjadi pilihan lain sumber bahan bakar terbarukan. Keberadaan bahan bakar fosil yang berada pada titik kritis, mendorong peneliti untuk mencari sumber bahan bakar lainnya, salah satunya limbah dari bahan organik. Industri makanan dari perairan yang menghasilkan limbah pengelolaan ikan menjadi salah satu target penelitian. Minyak ikan mentah yang berasal dari bagian limbah ikan laut dianggap sebagai sumber bahan baku alternatif berbiaya rendah untuk produksi biodiesel [1].

Bahan organik merupakan sumber karbon alami yang didapat dengan membakar bahan organik tersebut pada temperatur tinggi untuk mendapatkan bentuk karbon. Karbon dari bahan organik (biochar) telah menarik perhatian karena sifatnya sebagai adsorben untuk logam berat karena sifat adsorpsinya yang tinggi [2]. Karakterisasi biochar dari tulang hewan yaitu 80 sampai 120 m^2/g merupakan jenis struktur mesoporous [3]. Karbon aktif terdiri dari tiga komponen, yaitu mikrokristal grafit, karbon retikuler bidang tunggal, dan karbon amorf, dengan mikrokristal grafit sebagai bagian utama [4]. Kinerja adsorpsi karbon aktif dipengaruhi oleh struktur fisiknya (pori-pori) serta komposisi kimia pada permukaannya. Selama proses pembuatannya, ikatan kimia pada tepi lembaran aromatik yang terbentuk dalam tahap karbonisasi mengalami pemutusan, menghasilkan atom karbon dengan elektron yang tidak berpasangan [4].

Pembakaran lebih lanjut tulang ikan pada temperatur tinggi juga akan menghasilkan kalsium yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan [5]. Kalsium didapatkan dari hidroksiapatit yang merupakan mineral anorganik yang dapat ditemukan dalam tulang,

termasuk tulang hewan, seperti tulang ikan yang mengandung hidroksiapatit. Contohnya berasal dari tulang sapi dan kambing [6], juga ikan nila [7], tuna [8], mas, dan ikan gurame [9]. Hidroksiapatit (HA) merupakan biomaterial yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi biomedis karena memiliki sifat yang menyerupai tulang alami. Material ini termasuk dalam jenis biokeramik yang tersusun dari kalsium ortofosfat, suatu senyawa yang secara alami terdapat dalam tulang dan gigi [6].

Biochar yang berasal dari limbah, telah mendapat perhatian luas dan diterapkan secara luas dalam berbagai bidang lingkungan karena karakteristiknya yang serbaguna dan potensinya dalam solusi berkelanjutan. Produksinya yang melalui proses dekomposisi termokimia bahan baku dalam kondisi dengan sedikit atau tanpa oksigen. Beberapa metode yang digunakan adalah pirolisis, karbonisasi hidrotermal, gasifikasi, dan torrefaksi. Namun, pirolisis konvensional memiliki sejumlah kelemahan, termasuk waktu proses yang lama, pemanasan yang tidak merata, dan efisiensi energi yang rendah. Metode gelombang mikro merupakan metode baru dalam pembuatan biochar, dimana pemanasan bahan baku karbon menggunakan gelombang mikro yang memungkinkan pemanasan bahan baku secara merata dalam waktu yang lebih singkat [10]. Beberapa literatur yang tersedia fokus pada pemanfaatan dan keefektifan biochar dari limbah tulang ikan dalam menyerap polutan dalam air, seperti penyerapan terhadap logam berat Cd(II) dan Pb(II) [3], logam berat Cu(II) [9], kelebihan mineral besi [11], dan mikroba [12] yang menyebabkan air tidak layak minum. Terdapat beberapa celah penelitian terkait efektivitas produksi biochar melalui pirolisis serta proses aktivasi biochar yang dihasilkan untuk pengolahan air limbah. Studi artikel ini menganalisis efektivitas proses aktivasi biochar yang dihasilkan untuk pengolahan air limbah. Analisis dilakukan dengan meninjau karakteristik biochar yang dihasilkan dengan hasil penyerapan pengotor dalam air yang diolah. Tujuan utama dari tinjauan ini adalah untuk memahami hubungan antara metode produksi, karakteristik biochar yang dihasilkan dan kinerja biochar dalam aplikasi pengolahan air limbah.

2. Metode

Artikel ini dilakukan dengan metode tinjauan pustaka (*article review*) dari berbagai artikel jurnal hasil penelitian yang membahas produksi biochar dari limbah ikan dan penggunaannya sebagai adsorben untuk pengolahan air limbah. Kajian dalam artikel ini mencakup metode sintesis karbon dari limbah ikan, karakterisasi materi karbon yang dihasilkan dengan BET sebagai analisis luas permukaan dan volume pori dan SEM sebagai analisis morfologi permukaan karbon. Selain itu, dilakukan juga pengujian kapasitas atau efisiensi adsorpsi terhadap polutan utama dalam air limbah pada tiap penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengolahan Biochar dari Limbah Tulang Ikan

Biochar merupakan karbon yang diperoleh dari bahan organik, sehingga tujuan utama pengolahannya adalah untuk menghilangkan massa organik untuk menghasilkan suatu karbon amorf. Proses pengolahannya termasuk pembersihan, pengeringan, dan karbonisasi [11]. Beberapa metode karbonisasi untuk mengolah biochar dari limbah organik yaitu:

1. Pirolisis

Pirolisis merupakan salah satu metode pemanasan yang digunakan untuk mengonversi limbah organik menjadi material berkarbon yang berpotensi dimanfaatkan dalam proses pemurnian air limbah. Dalam proses ini, senyawa seperti selulosa dan lemak yang terdapat dalam bahan baku akan terurai secara termal di lingkungan tanpa oksigen. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kandungan karbon dengan menghilangkan unsur non-karbon, seperti oksigen dan hydrogen [13]. Jenis bahan baku, waktu, dan temperatur karbonisasi menjadi penentu sifat biochar yang dihasilkan [14].

Proses pirolisis limbah tulang ikan karper pada temperatur 200°C, 400°C, 600°C, 800°C dalam atmosfer gas nitrogen menghasilkan karbon hitam [15]. Dengan analisis The Brunauer-Emmet-Teller (BET), didapatkan karakteristik karbon dengan temperatur 200°C dan 400°C masing-masing menghasilkan ukuran volume pori 0,007 cm³/g dengan rata-rata diameter pori 4,678 nm dan 15,27 nm. Peningkatan temperatur pirolisis menghasilkan ukuran volume pori dan rata-rata diameter pori yang lebih besar karena terbentuknya kristal pada struktur biochar menjadi hidroksiapatit yang ditunjukkan dengan hasil karakterisasi sampel dengan menggunakan SEM-EDS [15].

2. Gasification

Gasifikasi merupakan proses termokimia yang mengubah biomassa atau bahan organik lainnya menjadi campuran gas yang terdiri dari H₂, CO, CO₂, dan kemungkinan sejumlah kecil hidrokarbon seperti CH₄ [14]. Proses ini dilakukan untuk menghilangkan sisa-sisa bahan organik pada karbon untuk memperbaiki struktur porinya. Arang yang dihasilkan dari gasifikasi ampas anggur tanpa alkohol pada temperatur 1200°C dalam aliran udara memiliki luas permukaan spesifik yang rendah (60 g/m²) [16]. Hal ini menunjukkan bahwa proses gasifikasi sendiri tidaklah cukup untuk membuat karbon yang baik untuk adsorpsi. Gasifikasi bisa dilakukan sebagai proses aktivasi fisika untuk memaksimalkan struktur pori pada karbon yang telah dibuat.

3. Pirolisis di Microwave

Pirolisis dengan microwave (gelombang mikro) merupakan teknik yang menggunakan radiasi gelombang mikro untuk mempercepat dekomposisi termal biomassa, menghasilkan produk karbon. Dibandingkan dengan pirolisis konvensional, metode ini memiliki keunggulan

dalam tingkat pemanasan yang lebih cepat, distribusi panas yang lebih merata, serta efisiensi perpindahan panas yang lebih tinggi [10]. Penelitian pirolisis dengan microwave dengan biochar dari limbah sekam padi menunjukkan hasil yang baik dalam adsorpsi posfat dan nitrat dari air limbah [17].

Selain proses pengolahan biochar dari bahan bakunya, terdapat proses modifikasi yang dapat dilakukan untuk meningkatkan nilai pori dan adsorpsi biochar. Biochar memiliki sedikit gugus fungsi serta luas permukaan dan volume pori yang terbatas, setelah melalui proses pirolisis, pori-porinya dapat tersumbat oleh material tar yang terbentuk dari proses pembakaran bahan organik [5,14]. Modifikasi karbon dilakukan untuk mengubah karbon biasa menjadi karbon aktif. Karbon aktif merupakan karbon dengan persentase nilai karbon yang besar dan struktur pori yang lebih baik dibandingkan karbon biasa [18]. Untuk membuat karbon aktif, maka perlu dilakukan aktivasi karbon, salah satunya dengan bahan kimia. Aktivasi biochar murni setelah pirolisis menjadi penting, baik melalui metode fisik maupun kimia, untuk lebih meningkatkan struktur porinya, memperluas luas permukaan spesifiknya, dan memodifikasi gugus fungsional pada permukaannya [19]. Ada tiga jenis aktivasi karbon, yaitu aktivasi kimia, aktivasi fisika, dan gabungan aktivasi kimia dan fisika, diperlukan perlakuan tambahan secara kimia atau fisika untuk meningkatkan karakteristiknya. Perlakuan ini bertujuan untuk memperbaiki luas permukaan spesifik, volume pori, dan struktur pori biochar agar lebih efektif dalam berbagai aplikasi lingkungan.

1. Aktivasi Kimia

Aktivasi kimia dilakukan dengan merendam karbon dalam larutan tertentu untuk kemudian dikeringkan pada temperatur rendah. Aktivasi kimia sering kali lebih disukai karena memungkinkan produksi karbon aktif dengan kandungan karbon yang lebih tinggi menggunakan temperatur pemanasan yang lebih rendah dan waktu reaksi yang lebih cepat [18]. Bahan kimia seperti kalium hidroksida [20], asam fosfat [21], asam sulfat [22], asam nitrat [3], dan bahan kimia lainnya digunakan sebagai agen aktivasi. Karbon yang didapat dari limbah ikan dapat diaktivasi dengan merendam karbon dalam larutan K_2CO_3 untuk meningkatkan luas permukaan dan porositasnya [20]. Volume pori meningkat dari $0.192 \text{ cm}^3/\text{g}$ menjadi $0.3 \text{ cm}^3/\text{g}$ dan luas permukaan spesifik meningkat dari $69,8 \text{ m}^2/\text{g}$ menjadi $206,0 \text{ m}^2/\text{g}$.

2. Aktivasi Fisika

Pada proses aktivasi fisika, biochar diproses melalui gasifikasi terkontrol pada temperatur tinggi dalam lingkungan aktivasi. Gas yang digunakan biasanya adalah gas CO_2 dan uap air [23]. Proses ini menyebabkan perubahan signifikan pada teksturnya, termasuk peningkatan luas permukaan, volume dan distribusi pori, serta modifikasi sifat kimia permukaannya, seperti

komposisi gugus fungsi, tingkat hidrofobisitas, dan polaritas. Selain itu, dilakukan juga aktivasi fisika dengan pemanasan karbon pada *microwave* [24].

3.2. Pengaplikasian Biochar Limbah Tulang Ikan untuk Pengolahan Air Limbah

Air merupakan kebutuhan utama bagi manusia. Manusia memanfaatkan air untuk minum, membersihkan diri dan peralatan, dan menjaga keseimbangan tubuh dengan lingkungan [25]. Hewan dan tumbuhan juga membutuhkan air sebagai sumber kehidupan. Penurunan kualitas air, baik itu air tanah maupun air di permukaan terjadi karena peningkatan polutan yang bercampur dengan air, baik dari siklus air, maupun karena pembuangan limbah dan sampah ke air. Peningkatan jumlah limbah yang dihasilkan semakin signifikan akibat berbagai faktor, seperti perkembangan industri, pertumbuhan penduduk yang cepat, dan perubahan pola konsumsi air [26]. Air limbah berlebih sering kali dibuang langsung atau melalui proses pengolahan yang tidak optimal ke perairan permukaan, yang pada akhirnya menyebabkan penurunan kualitas air. Banyak polutan yang dapat dianggap sebagai pengotor air, seperti logam berat, minyak, sampah organik, plastik, pewarna tekstil, deterjen, dan mikroba. Bahkan mineral yang biasa ada dalam air minum seperti besi, kalsium, magnesium, jika kadarnya terlalu banyak dapat menjadi pencemar yang membuat air tak layak pakai [27].

Logam berat seperti Pb(II), Cd(II), Cu(II), dan Cr sering ditemukan pada sumber mata air yang dikonsumsi warga karena daerah sumber mata air tersebut dekat dengan pabrik atau aliran sungainya terkena limbah pabrik. Bahkan logam biasa seperti besi dan kalsium yang secara alami ada dalam air, jika terlalu banyak maka juga akan berbahaya untuk dikonsumsi [11]. Limbah industri, emisi gas buang, dan pembuangan limbah padat menyebabkan pencemaran logam berat yang serius di ekosistem perairan. Karena itu beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengolah air limbah tersebut dengan pemanfaatan limbah organik menjadi adsorben logam berat. Beberapa penelitian seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 1 menunjukkan bahwa biochar memiliki kemampuan yang baik dalam menyerap bahan anorganik seperti logam berat dari limbah air. Biochar dapat menjadi bahan yang efektif untuk penyerapan logam berat karena keberadaan gugus fungsi di permukaannya, seperti gugus fenolik, hidroksil, dan karboksil, serta karena struktur porinya dan luas permukaannya yang besar [14].

Tabel 1. Hasil efisiensi adsorpsi logam pada air tercemar dengan biochar yang diolah dengan berbagai kondisi

Jenis Bahan Baku	Pengolahan Biochar	SAA (m ² /g)	Volume Pori (cm ³ /g)	SEM	Polutan Air	Efisiensi Adsorpsi Biochar	Ref
Limbah tulang ikan Grass Carp	Pirolisis pada 500°C di atmosfer N ₂ , dengan laju pemanasan 1°C/menit, 3°C/menit, dan 5°C/menit selama 1 jam	150	-	Morfologi menjadi lebih berpori setelah pirolisis	Pb (II)	Adsorpsi Pb sebesar 961,130 mg/g pada temperatur air 45 °C	[2]
Limbah tulang ikan	Aktivasi kimia (NaOH, HNO ₃ , H ₂ O ₂ , etanol), dan kalsinasi pada 873K selama 1 jam tanpa proses karbonisasi	99,8	0,25	Morfologi permukaan menjadi lebih berongga dan berpori	Cd (II), Pb (II)	Adsorpsi Pb hingga 99,74% dan Cd hingga 99,35% pada kondisi optimal	[3]
Limbah tulang ikan tuna sirip kuning	Pirolisis pada temperatur 300-500°C selama 1 jam	300°C: 107.2, 400°C: 127.8, 500°C: 134.73	0,15 - 0,23	Struktur pori lebih heterogen saat temperatur meningkat	Fe dalam air sumur	Adsorpsi Fe ³⁺ sebesar 90% pada temperatur 400°C	[11]
Limbah tulang ikan	Pirolisis pada temperatur 200°C, 400°C, 600°C dan 800°C selama 1 jam	200°C : 4.159, 400°C : 1.651, 600°C : 2.855, 800°C : 2.472	0.004 - 0.014	Porositas meningkat sesuai kenaikan temperatur pirolisis	Cd	Kapasitas adsorpsi meningkat hingga 135.1% pada temperatur 600°C	[15]
Limbah tulang ikan	Pirolisis pada temperatur 750°C selama 2 jam dengan aliran gas N ₂ , aktivasi dengan K ₂ CO ₃ (1:3) pada 750°C selama 90 menit	69,8 menjadi 206,0 setelah diaktivasi	0,003 menjadi 0,3 setelah aktivasi	Struktur berpori setelah pirolisis menjadi lebih berpori setelah diaktivasi kimia	Emulsi minyak	Adsorpsi minyak sebesar 90,1%	[20]
Limbah sisik ikan	Pemanasan dalam atmosfer inert gas N ₂ pada temperatur 10°C/min	-	-	-	Cd ²⁺ , Cr ³⁺ , Ni ²⁺ dari air lindi	Efisiensi adsorpsi Cd: 99,80% - 99,98%, Cr: 99,71% - 99,84% dan Ni: 99,30% - 99,55%	[28]
Limbah tulang ikan Belida	Pirolisis dengan temperatur 500°C selama 1 jam	162,9	0.315	Struktur pori meningkat saat tulang ikan dipanaskan	Fe ³⁺	Adsorpsi Fe ³⁺ sebesar 95%	[29]

Pada Tabel 1 dapat dilihat bahwa luas permukaan karbon yang dihasilkan, mempengaruhi proses adsorpsi dan jenis pengotor apa yang bisa diadsorpsi. Untuk ion besi, luas permukaan 140-160 m²/g dengan waktu pirolisis 1 jam pada temperatur 400-500°C. Sedangkan untuk adsorpsi logam berat seperti Kadmium dan Timbal, karbon yang telah diaktivasi lebih efisien dengan luas permukaan yang tidak terlalu besar, namun tidak ada pengotor di permukaan

karbon, sehingga bisa menyerap logam berat dengan ukuran lebih kecil. Selain dapat mengadsorpsi ion logam, karbon dari limbah tulang ikan dan sirip ikan dapat digunakan untuk mengadsorpsi emulsi minyak pada air limbah dengan efisiensi yang baik.

4. Kesimpulan

Pemanfaatan limbah ikan sebagai bahan baku adsorben logam berat menawarkan solusi inovatif dalam pengelolaan limbah industri. Biochar tulang ikan menunjukkan potensi besar dalam adsorpsi logam berat. Dari review ini didapatkan bahwa peran biochar sebagai adsorben polutan dalam air limbah dipengaruhi oleh struktur pori dan gugus fungsinya. Sifat fisika dan kimia biochar bergantung pada proses pembuatan karbon, sumber bahan karbon, dan modifikasi karbon. Limbah tulang ikan menunjukkan hasil yang baik untuk adsorpsi logam besi dan logam berat lain berdasarkan penelitian yang telah dilakukan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengembangkan teknologi ini agar dapat diimplementasikan secara luas dalam skala industri.

Kontribusi Penulis

F.S. Ritonga: Menyusun draf awal, meninjau dan menyunting naskah, investigasi, mengumpulkan data, merancang konsep dan metodologi, memvisualiasi. **M. Amalia, A. Manurung, & A.S.S. Marbun:** Meninjau dan menyunting naskah, serta memvalidasi.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan, baik dalam aspek finansial maupun hubungan pribadi, yang dapat mempengaruhi interpretasi atau hasil penelitian dalam artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] K. K. Jaiswal *et al.*, "Biodiesel Production from Discarded Fish Waste for Sustainable Clean Energy Development," *J. Chem. Pharm. Sci.*, pp. 113–114, 2014.
- [2] W. Wang *et al.*, "Facile Pyrolysis of Fishbone Charcoal with Remarkable Adsorption Performance Towards Aqueous Pb (II)," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 5, pp. 4621–4629, 2017, doi: 10.1016/j.jece.2017.08.052.
- [3] M. N. Rashed *et al.*, "Efficiency of Chemically Activated Raw and Calcined Waste Fish Bone for Adsorption of Cd (II) and Pb (II) from Polluted Water," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 14, no. 24, pp. 31703–31720, 2023, doi: 10.1007/s13399-023-04885-4.
- [4] C. Jiang *et al.*, "Study on Application of Activated Carbon in Water Treatment," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 237, no. 2, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/237/2/022049.
- [5] Aryani and P. H. Riyadi, "Characterization of Charcoal from Kerandang (*Channa pleurophthalma* Bleeker) Fish Fins Waste as a Source of Hydroxyapatite," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 750, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/750/1/012033.
- [6] C. Alvarado *et al.*, "Preparation and Characterization of Hydroxyapatite Obtained from Bovine Bones," *Proc. LACCEI Int. Multi-conference Eng. Educ. Technol.*, pp. 1–6, 2023, doi: 10.18687/laccei2023.1.1.590.
- [7] G. Lokapusputa dan M. Hayati, "Pemanfaatan Limbah Ikan Nila sebagai Fishbone Hydroxyapatite pada Proses Adsorpsi Logam Berat Krom pada Limbah Cair," vol. 1, no. 1,

- pp. 379–388, 2012.
- [8] M. S. Kang *et al.*, “Spontaneous Osteogenic Differentiation of Human Mesenchymal Stem Cells by Tuna-Bone-Derived Hydroxyapatite Composites with Green Tea Polyphenol-Reduced Graphene Oxide,” *Cells*, vol. 12, no. 11, pp. 1–12, 2023, doi: 10.3390/cells12111448.
 - [9] R. F. Diba *et al.*, “Adsorpsi Ion Logam Tembaga(II) dalam Air Dengan Serbuk Tulang Ikan Gurame (*Osphronemus gourami Lac*),” *al-Kimiya*, vol. 4, no. 2, pp. 105–112, 2019, doi: 10.15575/ak.v4i2.5091.
 - [10] S. Y. Foong *et al.*, “Enhancing Wastewater Treatment with Engineered Biochar from Microwave-Assisted Approach - A Comprehensive Review,” *Environ. Technol. Innov.*, vol. 36, pp. 103835, 2024, doi: 10.1016/j.eti.2024.103835.
 - [11] F. S. Ritonga *et al.*, “Synthesis of Carbon from Yellowfin Tuna Fishbone to Remove Iron (Fe) Metal in Well Water from Bandar Setia,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2376, no. 1, 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2376/1/012001.
 - [12] E. S. Soliman *et al.*, “Nile Tilapia Bones as Eco-Friendly Alternative in Water Treatment and Enhancing Performance and Immunity in Broiler Chickens,” *Open Vet. J.*, vol. 12, no. 6, pp. 1000–1017, 2022, doi: 10.5455/OVJ.2022.v12.i6.29.
 - [13] M. A. Islam *et al.*, “A Thermogravimetric Analysis of The Combustion Kinetics of Karanja (*Pongamia pinnata*) Fruit Hulls Char,” *Bioresour. Technol.*, vol. 200, pp. 335–341, 2016, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2015.09.057.
 - [14] G. Enaime *et al.*, “Biochar for Wastewater Treatment—Conversion Technologies and Applications,” *Apl. Sci.*, vol. 10, no. 10, 2020, doi: 10.3390/app10103492.
 - [15] N. Pei *et al.*, “Adsorption Properties of Fishbone and Fishbone-Derived Biochar for Cadmium in Aqueous Solution,” *Agronomy*, vol. 14, no. 11, 2024, doi: 10.3390/agronomy14112717.
 - [16] J. J. Hernández *et al.*, “Characterisation of Residual Char from Biomass Gasification: Effect of The Gasifier Operating Conditions,” *J. Clean. Prod.*, vol. 138, pp. 83–93, 2016, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.05.120.
 - [17] N. Shukla *et al.*, “Biochar from Microwave Pyrolysis of Rice Husk for Tertiary Wastewater Treatment and Soil Nourishment,” *J. Clean. Prod.*, vol. 235, pp. 1073–1079, 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.07.042.
 - [18] D. Ozdemir *et al.*, “Production of Activated Carbon from the Waste Paper by Chemical Activation Method,” *Int. Adv. Res. Eng. J.*, vol. 7, no. 1, pp. 52–61, 2023, doi: 10.35860/iarej.1222591.
 - [19] C. Shi *et al.*, “Efficient Heating of Activated Carbon in Microwave Field,” *C-Journal Carbon Res.*, vol. 9, no. 2, 2023, doi: 10.3390/c9020048.
 - [20] Y. Wang *et al.*, “Facile Preparation of Charcoal Nanomaterial from Fishery Waste with Remarkable Adsorption Ability,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 8, pp. 1–14, 2019, doi: 10.3390/ma12081318.
 - [21] K. M. Ali and J. Mater, “Synthesis of Activated Carbon by Chemical Activation of Apricot Stone with Adsorption Kinetics,” *J. Mater. Environ. Sci*, vol. 12, no. 6, pp. 887–898, 2021, doi: 10.1080/19443994.2013.789404.
 - [22] R. Y. M. Siregar *et al.*, “Manufacture of Bagasse Activated Carbon using H₂SO₄ Activator,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2733, no. 1, 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2733/1/012023.
 - [23] K. Udyani *et al.*, “Pembuatan Karbon Aktif dari Arang Bakau menggunakan Gabungan Aktivasi Kimia dan Fisika dengan Microwave,” *J. IPTEK*, vol. 23, no. 1, pp. 39–46, 2019, doi: 10.31284/j.ipitek.2019.v23i1.479.
 - [24] S. Y. Foong *et al.*, “Production of Biochar for Potential Catalytic and Energy Applications via Microwave Vacuum Pyrolysis Conversion of *Cassava* Stem,” *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 3, pp. 728–733, 2020, doi: 10.1016/j.mset.2020.08.002.
 - [25] M. Akbaba and B. Kurt, “Importance of Water in terms of Health,” *Turkish J. Occup. / Environ. Med. Saf.*, vol. 2, no. 2, pp. 71–63, 2015.

- [26] M. K. Gobana *et al.*, "Surface Water Pollution Source Identification and Quantification: Literature Review," *Am. J. Water Sci. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 50–57, 2023, doi: 10.11648/j.ajwse.20230903.11.
- [27] R. Kumar, "Potential Health Impacts of Hard Water," *Int. J. Prev. Med.*, vol. 4, no. 8, pp. 866–875, 2013, doi: 10.22214/ijraset.2024.60622.
- [28] A. B. Duwiejuah *et al.*, "Adsorption of Heavy Metals from Landfill Leachate using Fish Scale Biochar," *West African J. Apl. Ecol.*, vol. 32, no. 2, pp. 1–9, 2024.
- [29] M. Nurhadi *et al.*, "Utilization of Fish Bone as Adsorbent of Fe³⁺ Ion by Controllable Removal of its Carbonaceous Component," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1022, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1022/1/012031.