



Potensi Pemanfaatan Limbah Tulang Ikan Sunu (*Plectropomus Leopardus*): Analisis FTIR dan XRF untuk Karakterisasi Serbuk Material

Sefrilita Risqi Adikaning Rani^{1*}, Ihsan², Asriani³, dan Ananda Anindya Putri⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar

Email: sefrilita.rani@uin-alauddin.ac.id

*Corresponding Author

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi pemanfaatan limbah tulang ikan sunu sebagai sumber material melalui analisis karakterisasi FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) dan XRF (*X-ray Fluorescence*). Hasil analisis FTIR menunjukkan adanya puncak-puncak karakteristik yang mengindikasikan keberadaan gugus fungsional penting seperti hidroksil, fosfat, dan karbonat. Keberadaan kalsium fosfat sebagai komponen utama menandakan potensi serbuk tulang ini dalam aplikasi biomedis, seperti pembuatan implan tulang dan bahan biokeramik. Selain itu, analisis XRF mengungkapkan konsentrasi tinggi kalsium (84.8%) dan fosfor (13.5%), serta oksida lain yang relevan menunjukkan potensi penggunaannya sebagai suplemen nutrisi dan bahan bangunan. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa serbuk tulang ikan sunu memiliki potensi signifikan untuk aplikasi di bidang kesehatan, pangan, dan material komposit, serta mendukung keberlanjutan dalam pengelolaan limbah perikanan.

Kata kunci: Analisis XRF, Biokeramik, Kalsium Fosfat, Karakterisasi FTIR, Limbah Tulang Ikan Sunu, Material Biomedis.

Abstract

This study aims to investigate the potential utilization of fish bone waste from sunu as a material source through characterization analysis using FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) and XRF (X-ray Fluorescence). The results of the FTIR analysis show characteristic peaks indicating the presence of important functional groups such as hydroxyl, phosphate, and carbonate. The presence of calcium phosphate as a major component suggests the potential of this bone powder for biomedical applications, such as the production of bone implants and bioceramic materials. Additionally, the XRF analysis reveals high concentrations of calcium (84.8%) and phosphorus (13.5%), along with other relevant oxides, indicating its potential use as a nutritional supplement and building material. Overall, this study demonstrates that fish bone powder from sunu holds significant potential for applications in the fields of health, food, and composite materials, while also supporting sustainability in fisheries waste management.

Keywords: Bioceramics, Biomedical Materials, Calcium Phosphate, Fish Bone Waste from Sunu, FTIR Characterization, XRF Analysis.

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan meningkatnya kesadaran terhadap pentingnya keberlanjutan lingkungan, pemanfaatan limbah menjadi salah satu fokus utama dalam penelitian material. Limbah tulang ikan melimpah di Indonesia. Khususnya tulang ikan Sunu, adalah salah satu sumber daya yang belum banyak dimanfaatkan secara optimal. Limbah tulang ikan, khususnya tulang ikan sunu, seringkali dianggap sebagai limbah yang tidak memiliki nilai ekonomis dan hanya dibuang. Karena dibuang, limbah ikan ini berpotensi menyebabkan pencemaran lingkungan. Namun, seiring meningkatnya kesadaran terhadap keberlanjutan dan pemanfaatan sumber daya alam, potensi pemanfaatan limbah ini mulai mendapatkan perhatian. Umumnya tulang ikan kaya kandungan kalsium, fosfor, dan kolagen. Kandungan tersebut dapat berpotensi sebagai kandidat bahan yang berharga dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam industri pangan dan sebagai sumber bahan tambahan gizi [1] [2]. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa tulang ikan dapat diproses menjadi serbuk yang memiliki berbagai kegunaan. Kegunaan serbuk tulang ikan antara lain seperti bahan penguat dalam produk pangan atau bahan baku untuk aplikasi farmasi [3]. Pemanfaatan serbuk tulang ikan selain sebagai sumber dalam produk makanan, serbuk tulang ikan ini juga dimanfaatkan dalam industri karena memiliki karakteristik kimia dan fisik tertentu [2] [3]. Meskipun beberapa penelitian telah melakukan observasi tentang penggunaan tulang ikan, masih diperlukan karakterisasi material dengan teknik analisis seperti FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) dan XRF (*X-ray Fluorescence*). Karakterisasi ini dapat digunakan untuk mengevaluasi komposisi dan sifat serbuk tulang khususnya limbah tulang ikan sunu. Masih terbatasnya studi yang secara mendalam dalam mengeksplorasi karakterisasi kimia dan fisika dari serbuk tulang ikan sunu khususnya maka diperlukan teknik analisis modern seperti menggunakan instrumen FTIR dan XRF.

FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) dan XRF (*X-ray Fluorescence*) merupakan teknik analisis yang banyak digunakan untuk mengkarakterisasi komposisi dan sifat struktural dari berbagai material. Kedua metode ini telah terbukti efektif pada berbagai material. Teknik ini berfungsi untuk mengidentifikasi gugus fungsional melalui analisis spektrum getaran. Dimana spektrum getaran dapat memberikan informasi mengenai ikatan molekul yang ada pada sampel. Studi pada mineral tanah liat dan serpihan batu menunjukkan efektivitas FTIR dalam mendeteksi ikatan hidroksil dan silikat (seperti Al-OH dan Si-O) yang menjadi penanda komposisi mineral tertentu [4] [5] [6]. FTIR memiliki keunggulan dalam menganalisis komponen organik dan anorganik tanpa membutuhkan persiapan sampel yang rumit [7]. XRF digunakan untuk menentukan komposisi unsur suatu material dengan mengukur emisi fluoresensinya. Studi pada sampel geologi dan material heterogen menunjukkan kemampuan XRF dalam menghitung konsentrasi unsur seperti silikon, aluminium, dan besi. Dari analisis itu hal penting yang diperoleh yaitu tingkat kemurnian dan potensi aplikasinya di berbagai industri [8] [9] [10]. XRF sangat bermanfaat dalam analisis non-destruktif, memungkinkan penilaian komposisi secara *real-time* dan *in-situ* [4] [11].

Kebutuhan untuk material berkelanjutan semakin mendorong pemanfaatan limbah alami seperti tulang dan cangkang sebagai sumber mineral berharga (misalnya kalsium

fosfat) dan material biokompatibel untuk aplikasi industri. Studi terbaru menyoroti potensi tulang hewan di berbagai sektor. Sehingga analisis yang mendalam untuk menilai kesesuaian komposisi dan sifat struktural material menjadi penting [5]. Walaupun banyak penelitian telah menggunakan FTIR dan XRF untuk karakterisasi material, masih sedikit penelitian yang secara khusus mengeksplorasi karakteristik dan potensi tulang ikan sebagai material fungsional. Terutama, karakterisasi tulang ikan Sunu yang berasal dari perairan Indonesia belum banyak dikaji. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan mengidentifikasi komposisi kimia dan sifat struktural serbuk tulang ikan Sunu melalui analisis FTIR dan XRF. Hasil penelitian ini diharapkan dapat membuka potensi pemanfaatan tulang ikan Sunu sebagai material industri yang memiliki nilai tambah, serta mendukung upaya pengelolaan limbah yang berkelanjutan.

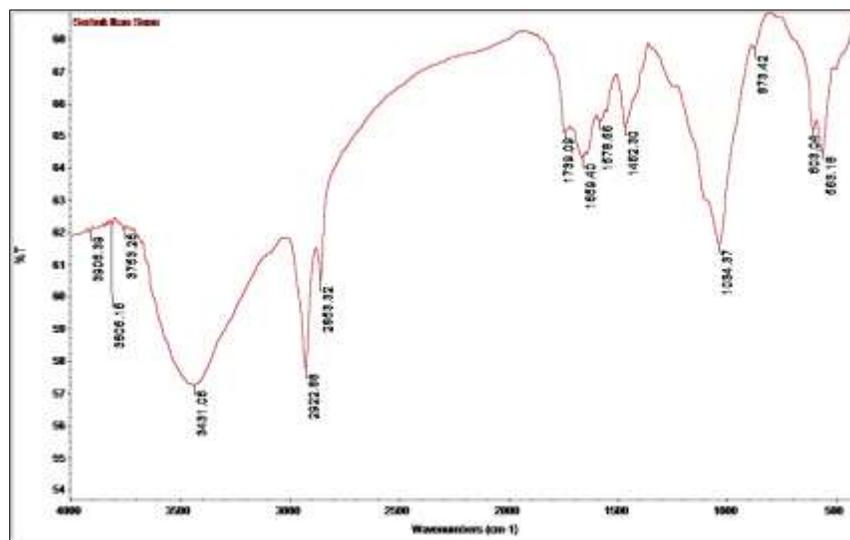
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan pengumpulan sampel limbah tulang ikan Sunu, yang diperoleh dari pasar ikan lokal atau hasil olahan perikanan. Tulang yang dikumpulkan dipastikan bersih dari jaringan daging atau kontaminan lainnya, dengan total berat sekitar 5–10 kg. Setelah pengumpulan, langkah pertama dalam persiapan sampel adalah pembersihan. Tulang ikan dicuci dengan air bersih untuk menghilangkan kotoran, kemudian direndam dalam larutan garam selama satu jam untuk memastikan kebersihan yang optimal. Setelah itu, tulang ikan dikeringkan dengan metode dijemur di bawah sinar matahari dan menggunakan oven pada suhu rendah (sekitar 60°C) hingga tidak ada kelembapan yang tersisa. Selanjutnya, tulang kering digiling menggunakan mesin penggiling untuk menghasilkan serbuk halus dengan ukuran partikel tidak lebih dari 75 mikron. Serbuk yang dihasilkan kemudian diayak dengan ayakan 100 mesh untuk memastikan ukuran partikel yang seragam.

Setelah persiapan serbuk, tahap berikutnya adalah analisis FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*). Untuk ini, serbuk tulang dicampur dengan Potassium Bromide (KBr) dalam rasio 1:100 dan dipress menjadi pellet menggunakan alat press pellet. Pellet yang dihasilkan harus homogen dan transparan untuk memastikan analisis yang baik. Pengukuran spektrum FTIR dilakukan pada rentang gelombang 4000–400 cm^{-1} untuk mendeteksi gugus fungsionalnya. Setelah analisis FTIR, serbuk tulang juga dianalisis menggunakan XRF (*X-ray Fluorescence*). Serbuk tulang dianalisis menggunakan XRF bertujuan untuk mengidentifikasi konsentrasi unsur yang terkandung dalam serbuk tulang serta kandungan oksidanya. Data dari kedua analisis, FTIR dan XRF, kemudian dianalisis secara sistematis. Spektrum FTIR diinterpretasikan untuk mengidentifikasi puncak-puncak yang menunjukkan gugus fungsional tertentu dan membandingkannya dengan literatur yang ada. Sementara itu, data dari XRF digunakan untuk menghitung konsentrasi unsur dalam serbuk tulang dan dibandingkan dengan nilai-nilai standar. Dengan mengikuti metode ini, diharapkan penelitian dapat memberikan wawasan yang mendalam tentang karakteristik serbuk tulang ikan Sunu dan potensi pemanfaatannya dalam berbagai aplikasi industri.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini mengungkapkan karakteristik material pada limbah tulang ikan Sunu melalui analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Dari analisis FTIR (gambar 1), spektrum yang diperoleh menunjukkan adanya puncak-puncak karakteristik yang mengindikasikan keberadaan gugus fungsional dari serbuk tulang ikan Sunu



Gambar 1 Hasil FTIR serbuk ikan sunu

Berdasarkan gambar 1 hasil spektrum FTIR dari serbuk tulang ikan Sunu dapat diidentifikasi beberapa gugus fungsional utama yang terbentuk. Puncak pada bilangan gelombang 3906.19 cm^{-1} dan 3606.16 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus hidroksil (OH) yang mungkin berasal dari molekul air atau kelembaban yang terikat dalam struktur mineral tulang. Selain itu, puncak pada 3431.06 cm^{-1} memperlihatkan ikatan OH yang lebih kuat, yang kemungkinan besar berasal dari air terikat atau gugus hidroksil dalam senyawa fosfat. Pada bilangan gelombang 2928.48 cm^{-1} , terlihat adanya peregangan C-H alifatik, yang mengindikasikan keberadaan senyawa organik dalam sampel. Sementara itu, pita pada 1799.05 cm^{-1} dan 1689.40 cm^{-1} berada dalam rentang karbonil (C=O), yang umumnya terdapat pada gugus karbonat atau asam amino yang mungkin tersisa dari struktur organik tulang. Spektrum juga menunjukkan puncak pada 1673.66 cm^{-1} dan 1462.30 cm^{-1} , yang mengindikasikan adanya ikatan karbonil (C=O) atau amida (NH). Ikatan itu umum ditemukan dalam protein atau senyawa organik pada tulang. Puncak khas untuk gugus fosfat (PO_4^{3-}) terdeteksi pada 1034.37 cm^{-1} . Puncak ini menunjukkan keberadaan kalsium fosfat yang merupakan senyawa utama dalam struktur tulang. Keberadaan gugus fosfat (PO_4^{3-}) merupakan komponen utama dari hidroksiapatit [12]. Senyawa ini juga sering digunakan dalam aplikasi biomedis dan pertanian. Kalsium fosfat yang terdapat dalam serbuk tulang ikan Sunu berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber kalsium dalam produk makanan dan suplemen nutrisi. Selain itu serbuk ikan Sunu juga berpotensi untuk pengembangan material untuk perbaikan jaringan tulang, sebagaimana dikemukakan oleh Y Mu dkk. (2018). Y Mu

dkk. juga mempelajari tentang penggunaan hidroksiapatit dalam stabilisasi logam berat dan sebagai material bangunan [2]

Selain itu, pita pada 873.42 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus karbonat (CO_3^{2-}), yang juga sering terdapat dalam mineral tulang. Karbonat yang terintegrasi dalam struktur hidroksiapatit (HA) berfungsi sebagai substituen untuk fosfat (PO_4^{3-}). Karbonat ini dapat memengaruhi sifat kristalin dari material. Dalam serbuk tulang ikan, karbonat berperan penting dalam memberikan stabilitas struktural dan memperbaiki sifat bioaktif dari bahan tersebut. Menurut Boutinguiza et al. (2011), karbonat yang terdapat dalam hidroksiapatit biologis menunjukkan bahwa material ini dapat lebih responsif terhadap lingkungan biologis dibandingkan dengan hidroksiapatit sintetik [12]. Keberadaan karbonat juga meningkatkan kinerja mekanik dan bioaktivitas material, yang sangat diinginkan untuk aplikasi sebagai pengganti tulang. Pada bilangan gelombang 690.92 cm^{-1} dan 663.15 cm^{-1} , terlihat deformasi luar bidang C-H. Hal ini mungkin berasal dari struktur aromatik dalam senyawa organik atau mineral yang terdapat dalam tulang. Secara keseluruhan, spektrum FTIR ini mengindikasikan adanya senyawa utama seperti kalsium fosfat dan karbonat yang merupakan komponen struktural penting dalam tulang ikan. Selain itu, adanya puncak hidroksil dan karbonil juga menunjukkan keberadaan senyawa organik atau residu protein dalam sampel. Hal ini dapat memperkuat potensi pemanfaatan tulang ikan Sunu sebagai sumber bahan mineral berharga. Puncak yang terbentuk ini menegaskan bahwa tulang ikan Sunu memiliki komposisi mineral yang signifikan, terutama senyawa kalsium fosfat. Dimana kalsium fosfat ini umum digunakan dalam berbagai aplikasi industri seperti biokeramik dan material kesehatan. Hasil ini sejalan dengan literatur yang menunjukkan bahwa tulang hewan merupakan sumber utama senyawa fosfat dan kalsium yang dapat dimanfaatkan dalam pembuatan bahan biomaterial [4] [8] [12]. Adanya gugus fosfat menunjukkan potensi besar dari limbah tulang ikan Sunu untuk digunakan sebagai bahan biokompatibel.

Hasil pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) (tabel 1 dan 2) pada serbuk tulang ikan Sunu menunjukkan komposisi kimia yang kaya dengan unsur dan Oksida. Unsur dan Oksida yang terbentuk memiliki potensi besar untuk berbagai aplikasi industri. Dalam analisis ini, beberapa unsur utama teridentifikasi dengan persentase yang signifikan, memberikan indikasi jelas tentang potensi material ini. Salah satu unsur yang paling dominan dalam serbuk tulang ikan Sunu adalah kalsium (Ca), dengan konsentrasi mencapai 84.8%. Kalsium merupakan elemen penting yang berperan dalam kesehatan tulang dan sangat diperlukan dalam pembuatan suplemen kalsium untuk makanan dan produk farmasi. Penelitian oleh Xia et al. (2021) menunjukkan bahwa kalsium fosfat yang diekstrak dari limbah tulang ikan memiliki potensi sebagai sumber kalsium yang efisien dalam industri pangan. Keberadaan kalsium dalam serbuk tulang ini memberikan peluang untuk dikembangkan sebagai bahan baku suplemen gizi [13]. Selain kalsium, fosfor (P) juga terdeteksi dalam jumlah yang cukup tinggi, yaitu 13.5%. Fosfor penting untuk berbagai reaksi biokimia dalam tubuh, serta mendukung pertumbuhan dan pemeliharaan tulang yang sehat. Kombinasi antara kalsium dan fosfor menjadikan serbuk tulang ikan Sunu sebagai sumber kalsium fosfat yang berpotensi dalam aplikasi biomedis dan gizi. Material ini dapat digunakan dalam pembuatan bahan biokeramik, seperti hidroksiapatit, yang sangat berguna dalam implan tulang dan

perbaikan jaringan. Hani et al. (2020) menekankan bahwa bahan biokeramik yang kaya akan kalsium dan fosfor menunjukkan bioaktivitas tinggi sehingga dapat mendukung regenerasi tulang[14].

Tabel 1. Hasil karaterisasi XRF serbuk tulang ikan Sunu ditinjau dari unsurnya

No.	Jenis Uji (Unsur)	Pembacaan 1 (%)	Pembacaan 2 (%)	Rata-Rata (%)
1	Al	0.4	0.4	0.4
2	P	13.5	13.5	13.5
3	S	0.2	0.2	0.2
4	Ca	84.8	84.8	84.8
5	Fe	0.053	0.062	0.058
6	Cu	0.04	0.05	0.045
7	Zn	0.52	0.58	0.55
8	Sr	0.718	0.714	0.716
9	Mo	0.09	0.1	0.095
10	Re	0.06	0.05	0.055

Tabel 2. Hasil karaterisasi XRF serbuk tulang ikan Sunu ditinjau dari oksidanya

No.	Jenis Uji (Oksida)	Pembacaan 1 (%)	Pembacaan 2 (%)	Rata-Rata (%)
1	Al ₂ O ₃	0.4	-	0.4
2	P ₂ O ₅	23.9	23.8	23.85
3	SO ₃	0.3	-	0.3
4	K ₂ O	0.18	-	0.18
5	CaO	74.5	74.8	74.65
6	MnO	0.039	-	0.039
7	Fe ₂ O ₃	0.11	-	0.11
8	CuO	0.03	-	0.03
9	ZnO	0.57	-	0.57
10	SrO	0.427	-	0.427

Analisis menggunakan XRF juga dapat mengidentifikasi Oksida penting lainnya (tabel 2). Oksida yang teridentifikasi dalam sampel serbuk tulang ikan sunu seperti Al₂O₃, P₂O₅, dan CaO mempunyai berbagai potensi aplikasi misal seperti pembuatan *Hidroksiapatite* (Hap). Beberapa potensi penggunaan serbuk tulang ikan Sunu dengan kandungan Oksida tersebut bermanfaat dalam pembuatan keramik biomedis dan bahan bangunan. Oksida ini berkontribusi pada peningkatan sifat mekanik dan stabilitas dari material yang dihasilkan. Misalnya, penelitian yang dilakukan oleh Mu et al. (2017) menunjukkan bahwa bahan-bahan

yang mengandung Oksida alumina dapat meningkatkan sifat mekanik dari material komposit[2]. Dengan demikian, pemanfaatan limbah tulang ikan sunu tidak hanya memberikan nilai tambah secara ekonomi, tetapi juga membantu mengurangi dampak limbah dari industri perikanan.

Hasil pengujian XRF yang menunjukkan kekayaan kalsium dan fosfor dalam serbuk tulang ikan sunu konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan potensi pemanfaatan limbah tulang ikan dalam berbagai bidang. Penelitian oleh Savlak et al. (2020) mempelajari tentang pemanfaatan kalsium fosfat dari tulang ikan dalam pembuatan bahan biokeramik. Hasil yang ditunjukkan menjanjikan dalam hal biokompatibilitas dan bioaktivitasnya [15]. Hal ini memperkuat argumen bahwa pengolahan limbah tulang menjadi produk bernilai tinggi dapat memberikan kontribusi positif terhadap keberlanjutan di sektor industri. Secara keseluruhan, analisis hasil pengujian XRF menunjukkan bahwa serbuk tulang ikan sunu memiliki potensi signifikan untuk digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk di bidang biomedis, pembuatan suplemen, dan bahan bangunan. Dengan keberadaan unsur dan oksida penting, serbuk ini tidak hanya dapat membantu mengurangi limbah, tetapi juga dapat dikembangkan sebagai sumber bahan dasar yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi proses pengolahan dan aplikasi praktis dari serbuk tulang ikan Sunu dalam industri.

Dari analisis karakterisasi FTIR dan XRF menunjukkan bahwa serbuk tulang ikan Sunu memiliki potensi yang signifikan sebagai material multifungsi dalam berbagai aplikasi industri. Hasil FTIR mengindikasikan keberadaan gugus fungsional penting, seperti fosfat dan karbonat, yang mendukung sifat biokompatibilitas dan bioaktivitas material. Sehingga serbuk tulang ikan Sunu ini dapat menjadi kandidat ideal untuk bahan biokeramik dan implan tulang. Selain itu, analisis XRF mengungkapkan kandungan Kalsium dan Fosfor yang tinggi, serta oksida-oksida lain yang relevan. Hal ini juga mendukung bahwa serbuk tulang ikan Sunu ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber kalsium dalam suplemen nutrisi dan sebagai bahan penguat dalam pembuatan keramik. Secara keseluruhan, potensi pemanfaatan serbuk tulang ikan Sunu dalam bidang kesehatan, pangan, dan material komposit memberikan peluang besar untuk pengembangan produk yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

4. SIMPULAN

Simpulan penelitian ini menunjukkan bahwa serbuk tulang ikan Sunu memiliki karakteristik material yang kaya unsur dan gugus fungsional yang berpotensi besar untuk berbagai aplikasi industri. Analisis menggunakan FTIR mengidentifikasi beberapa gugus fungsional utama, termasuk gugus hidroksil, fosfat, dan karbonat, yang mendukung sifat biokompatibilitas dan bioaktivitas material. Keberadaan Kalsium Fosfat dan Karbonat dalam serbuk ini menunjukkan potensi signifikan untuk digunakan dalam pembuatan bahan biokeramik dan implan tulang dan aplikasi kesehatan lainnya. Selain itu, pengujian XRF mengungkapkan kandungan Kalsium yang tinggi (84.8%) dan Fosfor (13.5%), yang mengindikasikan bahwa serbuk tulang ikan Sunu adalah sumber yang kaya dengan mineral penting untuk suplemen nutrisi dan produk pangan. Unsur dan Oksida yang terdeteksi, seperti Al_2O_3 dan P_2O_5 , menunjukkan bahwa serbuk ini juga dapat dimanfaatkan dalam pembuatan

keramik dan material bangunan. Kandungan tersebut dapat meningkatkan stabilitas dan sifat mekanik material. Secara keseluruhan, serbuk tulang ikan Sunu memiliki potensi besar untuk diterapkan dalam berbagai bidang, termasuk biomedis, pangan, dan material komposit. Dengan memanfaatkan limbah ini, tidak hanya dapat mengurangi dampak lingkungan dari industri perikanan, tetapi juga dapat mengembangkan produk yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi proses pengolahan dan aplikasi dari serbuk tulang ikan Sunu dalam industri, serta untuk mengoptimalkan potensi penggunaannya secara efektif.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. A. Maktoof, R. J. Elherarlla, and S. Ethaib, "Identifying the nutritional composition of fish waste, bones, scales, and fins," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 871, no. 1, p. 012013, Jun. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/871/1/012013.
- [2] Y. Mu, A. Saffarzadeh, and T. Shimaoka, "Utilization of waste natural fishbone for heavy metal stabilization in municipal solid waste incineration fly ash," *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 3111–3118, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.099.
- [3] A. N. Asikin, I. Kusumaningrum, and T. Hidayat, "Effect of knife-fish bone powder addition on characteristics of starch and seaweed kerupuk as calcium and crude fiber sources," *Curr Res Nutr Food Sci*, vol. 7, no. 2, pp. 584–599, Aug. 2019, doi: 10.12944/CRNFSJ.7.2.27.
- [4] F. Rosi, A. Burnstock, K. J. Van Den Berg, C. Miliani, B. G. Brunetti, and A. Sgamellotti, "A non-invasive XRF study supported by multivariate statistical analysis and reflectance FTIR to assess the composition of modern painting materials," *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 71, no. 5, pp. 1655–1662, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.saa.2008.06.011.
- [5] P. S. Nayak and B. K. Singh, "Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR," *Bull Mater Sci*, vol. 30, no. 3, pp. 235–238, Jun. 2007, doi: 10.1007/s12034-007-0042-5.
- [6] G. Jozanikohan and M. N. Abarghooei, "The Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis for the clay mineralogy studies in a clastic reservoir," *J Petrol Explor Prod Technol*, vol. 12, no. 8, pp. 2093–2106, Aug. 2022, doi: 10.1007/s13202-021-01449-y.
- [7] Ş. Yalçın and İ. H. Mutlu, "Structural Characterization of Some Table Salt Samples by XRD, ICP, FTIR and XRF Techniques," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 121, no. 1, pp. 50–52, Jan. 2012, doi: 10.12693/APhysPolA.121.50.
- [8] N. Meftah and M. S. Mahboub, "Spectroscopic Characterizations of Sand Dunes Minerals of El-Oued (Northeast Algerian Sahara) by FTIR, XRF and XRD Analyses," *Silicon*, vol. 12, no. 1, pp. 147–153, Jan. 2020, doi: 10.1007/s12633-019-00109-5.
- [9] B. Hazra *et al.*, "FTIR, XRF, XRD and SEM characteristics of Permian shales, India," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 32, pp. 239–255, May 2016, doi: 10.1016/j.jngse.2016.03.098.

- [10] R. Dewi, H. Agusnar, Z. Alfian, and Tamrin, “Characterization of technical kaolin using XRF, SEM, XRD, FTIR and its potentials as industrial raw materials,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1116, p. 042010, Dec. 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1116/4/042010.
- [11] J. Thuriot-Roukos, M. Bennis, E. Heuson, P. Roussel, F. Dumeignil, and S. Paul, “Design of a multi-well plate for high-throughput characterization of heterogeneous catalysts by XRD, FT-IR, Raman and XRF spectroscopies,” *RSC Adv.*, vol. 8, no. 71, pp. 40912–40920, 2018, doi: 10.1039/C8RA08216B.
- [12] M. Boutinguiza, J. Pou, R. Comesaña, F. Lusquiños, A. De Carlos, and B. León, “Biological hydroxyapatite obtained from fish bones,” *Materials Science and Engineering: C*, vol. 32, no. 3, pp. 478–486, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.msec.2011.11.021.
- [13] J. Xia *et al.*, “Enhanced Thermal Conductivity of Polymer Composite by Adding Fishbone-like Silicon Carbide,” *Nanomaterials*, vol. 11, no. 11, p. 2891, Oct. 2021, doi: 10.3390/nano11112891.
- [14] F. Hani, A. Firouzi, M. R. Islam, and M. G. Sumdani, “Mechanical and thermal properties of FISHBONE-BASED epoxy composites: The effects of thermal treatment,” *Polymer Composites*, vol. 42, no. 3, pp. 1224–1234, Mar. 2021, doi: 10.1002/pc.25895.
- [15] N. Savlak, Ö. Çağındı, G. Erk, B. Öktem, and E. Köse, “Treatment Method Affects Color, Chemical, and Mineral Composition of Seabream (*Sparus aurata*) Fish Bone Powder from by-Products of Fish Fillet,” *Journal of Aquatic Food Product Technology*, vol. 29, no. 6, pp. 592–602, Jul. 2020, doi: 10.1080/10498850.2020.1775742.