

# Analisis Kinetika Adsorpsi Zat Warna Rhodamin B menggunakan Hidroksiapatit Hasil Kalsinasi Tulang Sapi Lombok yang Diaktivasi oleh Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

Devy Lestiana Sembiring <sup>a,1,\*</sup>, Muhammad Andre <sup>b,2</sup>, Cantika Wijaya<sup>b,3</sup>

<sup>a</sup> Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mataram, Indonesia

<sup>1</sup> Email: [devy.smbrg19@gmail.com](mailto:devy.smbrg19@gmail.com)

\* Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<b>Article history</b> ..... Received September 15, 2025 Revised October 22, 2025 Accepted November 7, 2025 Published December 25, 2025	Water pollution caused by synthetic dyes such as Rhodamine B poses a serious environmental problem due to their high toxicity, persistence, and resistance to degradation. This study investigated the potential of hydroxyapatite (HAp) synthesized from Lombok bovine bone waste and chemically activated with sodium carbonate (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) as an adsorbent for Rhodamine B removal, with particular emphasis on adsorption kinetics. Hydroxyapatite was prepared through deproteinization followed by calcination at 900 °C, and subsequently modified using Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> activation. The synthesized materials were characterized using X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), and Brunauer–Emmett–Teller (BET) surface area analysis. XRD results confirmed that the activation process did not alter the primary crystalline phase of hydroxyapatite, while a slight reduction in crystallite size was observed. FTIR analysis revealed the presence of carbonate functional groups on the activated HAp surface. BET analysis showed a significant increase in specific surface area from 12.8 to 21.5 m <sup>2</sup> /g after Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> activation. Batch adsorption experiments demonstrated that the activated HAp achieved an equilibrium adsorption capacity of 9.87 mg/g with an equilibrium time of approximately 90 min. Kinetic analysis indicated that the adsorption process followed the pseudo-second-order model with a high coefficient of determination ( $R^2 = 0.996$ ), suggesting that chemisorption was the dominant rate-controlling mechanism. These findings highlight the potential of Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -activated hydroxyapatite derived from bovine bone waste as a sustainable and effective adsorbent for dye-contaminated wastewater treatment.
<b>Keywords</b>  Hydroxyapatite Bovine bone waste Rhodamine B Adsorption kinetics Sodium carbonate activation	
 License by CC-BY-SA Copyright © 2025, The Author(s).	

**How to cite:** Sembiring, D., L., Andre, M., & Wijaya, C. (2025). Analisis Kinetika Adsorpsi Zat Warna Rhodamin B menggunakan Hidroksiapatit Hasil Kalsinasi Tulang Sapi Lombok yang Diaktivasi oleh Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. *Pure Chemistry Research*, 1(2), 39-44. doi: <https://doi.org/10.70716/purechem.v1i2.353>

## PENDAHULUAN

Peningkatan aktivitas industri tekstil, pewarna, percetakan, dan kosmetik dalam dua dekade terakhir telah menyebabkan peningkatan signifikan volume limbah cair yang dilepaskan ke lingkungan perairan. Limbah tersebut umumnya mengandung zat warna sintetis yang bersifat persisten, memiliki struktur aromatik kompleks, serta menunjukkan resistensi tinggi terhadap degradasi biologis dan kimia. Sifat-sifat ini menyebabkan zat warna sintetis mudah terakumulasi dalam ekosistem perairan dan berpotensi menimbulkan dampak ekologis serta kesehatan jangka panjang. Salah satu zat warna sintetis yang paling banyak digunakan sekaligus paling berbahaya adalah Rhodamin B (C<sub>28</sub>H<sub>31</sub>ClN<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), yaitu pewarna golongan xanthene yang banyak diaplikasikan pada industri tekstil dan kosmetik.

Rhodamin B dikenal memiliki toksitas tinggi, bersifat karsinogenik dan mutagenik, serta dapat menyebabkan gangguan fungsi hati, ginjal, dan sistem saraf apabila terpapar dalam jangka panjang, bahkan pada konsentrasi rendah. Keberadaan Rhodamin B dalam perairan juga menyebabkan penurunan kualitas estetika lingkungan, menghambat penetrasi cahaya matahari, dan menurunkan aktivitas fotosintesis organisme akuatik. Akibatnya, terjadi gangguan rantai makanan yang berpotensi berdampak pada kesehatan manusia. Studi adsorpsi Rhodamin B menggunakan berbagai material adsorben telah banyak dilakukan sebagai upaya mitigasi pencemaran ini (Sahara et al., 2018; Shofiyani et al., 2020).

Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk menghilangkan Rhodamin B dari limbah cair, di antaranya koagulasi-flokulasi, oksidasi kimia, filtrasi membran, dan proses biodegradasi. Namun, metode-

metode tersebut masih memiliki keterbatasan, seperti biaya operasional tinggi, pembentukan lumpur sekunder berbahaya, efisiensi rendah terhadap zat warna yang sangat stabil, serta kebutuhan energi dan bahan kimia tambahan yang signifikan (Mutmainnah et al., 2017). Oleh karena itu, pengembangan metode yang lebih sederhana, efektif, dan ramah lingkungan menjadi kebutuhan mendesak.

Metode adsorpsi dipandang sebagai salah satu teknologi paling prospektif dalam penanganan limbah zat warna karena memiliki keunggulan berupa biaya operasional relatif rendah, desain sistem yang sederhana, efisiensi tinggi pada konsentrasi rendah, serta potensi regenerasi adsorben. Efektivitas metode ini sangat ditentukan oleh karakteristik adsorben yang digunakan, terutama luas permukaan spesifik, porositas, serta keberadaan gugus fungsi aktif pada permukaan material (Furozi et al., 2023). Oleh karena itu, pencarian adsorben alternatif berbasis material murah dan melimpah menjadi fokus utama penelitian terkini.

Dalam konteks ekonomi sirkular dan pengelolaan limbah berkelanjutan, pemanfaatan limbah organik sebagai adsorben semakin mendapat perhatian luas. Limbah tulang sapi (*Bos taurus*) merupakan salah satu biomaterial yang tersedia melimpah di Indonesia sebagai hasil samping industri peternakan dan rumah potong hewan. Tulang sapi kaya akan komponen anorganik berupa kalsium fosfat yang struktur kristalnya menyerupai hidroksiapatit (HAp,  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ). Hidroksiapatit telah lama dikenal sebagai biokeramik dengan stabilitas kimia dan biokompatibilitas tinggi, serta banyak diaplikasikan dalam bidang medis dan material maju (Afifah & Cahyaningrum, 2020; Puspa & Asmi, 2014).

Dalam beberapa tahun terakhir, HAp mulai dilaporkan sebagai adsorben alternatif yang menjanjikan untuk penghilangan logam berat dan zat warna dari air limbah. Permukaan HAp mengandung gugus fosfat dan hidrosil yang mampu berinteraksi secara elektrostatik maupun melalui pembentukan ikatan kompleks dengan molekul zat warna kationik seperti Rhodamin B (Parahita et al., 2016). Hidroksiapatit yang disintesis dari limbah tulang sapi tidak hanya menawarkan solusi pengelolaan limbah organik, tetapi juga berpotensi menghasilkan material fungsional bernilai tambah tinggi.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk sintesis HAp dari limbah tulang, antara lain metode kalsinasi, presipitasi, serta kombinasi alkali–hidrotermal. Metode kalsinasi banyak digunakan karena kesederhanaannya dan kemampuannya menghasilkan HAp dengan kristalinitas tinggi. Temperatur kalsinasi berperan penting dalam menentukan ukuran kristal, derajat kristalinitas, dan sifat permukaan HAp (Arifin et al., 2015; Nurhasanah et al., 2019). HAp dari tulang sapi telah berhasil disintesis pada rentang suhu 800–1100 °C dengan karakteristik struktur yang stabil dan kemurnian tinggi (Puspa & Asmi, 2014).

Meskipun demikian, HAp murni memiliki kelemahan utama berupa luas permukaan spesifik yang relatif rendah dan distribusi pori yang kurang berkembang, sehingga membatasi kapasitas adsorpsinya. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, berbagai upaya modifikasi permukaan telah dilakukan, termasuk aktivasi kimia menggunakan senyawa alkali atau karbonat. Aktivasi kimia bertujuan untuk meningkatkan porositas, menciptakan situs aktif baru, serta mengubah sifat muatan permukaan adsorben. Natrium karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) merupakan salah satu agen aktivasi yang berpotensi meningkatkan performa adsorben berbasis kalsium fosfat melalui substitusi ion karbonat dan pembentukan cacat kristal yang menguntungkan proses adsorpsi.

Modifikasi HAp dengan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  diperkirakan mampu meningkatkan densitas muatan negatif pada permukaan adsorben, sehingga memperkuat interaksi elektrostatik dengan Rhodamin B yang bermuatan positif. Pendekatan serupa telah diterapkan pada berbagai material berbasis biomassa dan mineral, yang menunjukkan peningkatan signifikan kapasitas adsorpsi zat warna sintetis setelah aktivasi kimia (Sahara et al., 2018; Furozi et al., 2023). Oleh karena itu, pengembangan HAp termodifikasi  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dari tulang sapi Lombok menjadi topik penelitian yang relevan dan strategis.

Evaluasi kinerja adsorpsi tidak hanya didasarkan pada kapasitas adsorpsi maksimum, tetapi juga pada aspek kinetika untuk memahami mekanisme pengendali laju proses. Model kinetika yang paling umum digunakan dalam studi adsorpsi zat warna adalah model Pseudo Orde Pertama (PFO) dan Pseudo Orde Kedua (PSO). Model PFO umumnya menggambarkan proses adsorpsi fisik, sedangkan model PSO mengindikasikan keterlibatan interaksi kimia antara adsorben dan adsorbat (Karbeka, 2024). Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa adsorpsi Rhodamin B oleh adsorben berbasis biomaterial seringkali mengikuti model PSO, yang menunjukkan dominasi mekanisme kemisorpsi (Shofiyani et al., 2020; Furozi et al., 2023).

Namun, hingga saat ini masih sangat terbatas laporan ilmiah yang membahas secara komprehensif kinetika adsorpsi Rhodamin B menggunakan hidroksiapatit hasil sintesis dari tulang sapi lokal yang

mengalami aktivasi  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Sebagian besar penelitian HAp dari tulang lebih difokuskan pada aplikasi biomedis, seperti pelapis implan gigi dan bahan biokeramik, bukan sebagai adsorben lingkungan (Ranamanggala et al., 2020; Marasabessy & Firmansyah, 2021). Kesenjangan ini menunjukkan perlunya penelitian yang mengintegrasikan sintesis material, modifikasi permukaan, dan evaluasi kinetika adsorpsi secara sistematis.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini diarahkan untuk mengkaji potensi hidroksipatit dari limbah tulang sapi Lombok yang dimodifikasi menggunakan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  sebagai adsorben Rhodamin B. Fokus penelitian meliputi sintesis dan karakterisasi HAp, evaluasi kinerja adsorpsi Rhodamin B, serta analisis kinetika adsorpsi menggunakan model PFO dan PSO. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan adsorben berbasis limbah lokal yang berkelanjutan serta memperluas pemanfaatan hidroksipatit di bidang pengolahan limbah cair. Kebaruan penelitian ini terletak pada pemanfaatan hidroksipatit berbasis limbah tulang sapi Lombok yang diaktivasi menggunakan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  serta analisis kinetika adsorpsi Rhodamin B secara kuantitatif untuk mengungkap mekanisme pengendali laju adsorpsi.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan preparasi hidroksipatit (HAp) dari limbah tulang sapi yang diperoleh dari Rumah Potong Hewan (RPH) di wilayah Lombok. Tulang sapi dibersihkan secara mekanis untuk menghilangkan jaringan lunak yang masih melekat, kemudian dicuci menggunakan air mengalir dan dipotong menjadi bagian-bagian kecil. Proses deproteinasi dilakukan dengan merendam tulang dalam larutan  $\text{NaOH}$  1 M selama 24 jam, kemudian dicuci berulang kali hingga pH mendekati netral. Sampel selanjutnya dikeringkan pada suhu 110 °C selama 12 jam, digerus hingga menjadi serbuk, dan dikalsinasi pada suhu 900 °C selama 3 jam menggunakan furnace untuk memperoleh fase hidroksipatit. Serbuk hasil kalsinasi kemudian dihaluskan dan diayak hingga diperoleh ukuran partikel kurang dari 100 mesh.

Aktivasi hidroksipatit dilakukan menggunakan larutan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dengan cara mencampurkan sejumlah serbuk HAp ke dalam larutan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  pada rasio padatan-cair tertentu, kemudian diaduk pada suhu kamar selama waktu yang telah ditentukan hingga tercapai homogenisasi. Endapan yang terbentuk disaring menggunakan filtrasi vakum, dicuci dengan akuades hingga pH netral, dan dikeringkan pada suhu 100 °C selama 6 jam. Sampel hasil aktivasi diberi kode HAp– $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dan disimpan dalam desikator sebelum dilakukan karakterisasi dan pengujian adsorpsi.

Karakterisasi material dilakukan terhadap hidroksipatit murni dan hidroksipatit teraktivasi  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  untuk mengevaluasi perubahan struktur kristal, gugus fungsi, dan sifat permukaan akibat proses aktivasi. Analisis X-ray Diffraction (XRD) digunakan untuk mengidentifikasi fase kristal dan menentukan ukuran kristalit rata-rata menggunakan persamaan Scherrer. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi khas hidroksipatit dan perubahan kimia pada permukaan material setelah aktivasi. Morfologi permukaan serta distribusi pori diamati menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM), sedangkan luas permukaan spesifik dan karakteristik pori dianalisis menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET).

Uji adsorpsi Rhodamin B dilakukan secara batch pada suhu ruang menggunakan larutan Rhodamin B dengan konsentrasi awal tertentu. Sejumlah adsorben HAp– $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ditambahkan ke dalam larutan Rhodamin B dan diaduk dengan kecepatan konstan. Sampel larutan diambil pada interval waktu tertentu, kemudian disentrifugasi dan dianalisis menggunakan spektrofotometer UV–Vis pada panjang gelombang maksimum sekitar 554 nm. Efisiensi adsorpsi dihitung berdasarkan perubahan konsentrasi Rhodamin B sebelum dan sesudah proses adsorpsi menggunakan persamaan :

$$E(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

di mana  $C_0$  merupakan konsentrasi awal dan  $C_t$  adalah konsentrasi pada waktu  $t$ . Kapasitas adsorpsi pada waktu  $t$  ( $q_t$ ) dan pada kesetimbangan ( $q_e$ ) dihitung dengan rumus:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) V}{m}$$
$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) V}{m}$$

dengan  $V$  sebagai volume larutan (L) dan  $m$  sebagai massa adsorben (g). Data kinetika adsorpsi dianalisis menggunakan model Pseudo Orde Pertama (PFO) dan Pseudo Orde Kedua (PSO). Model PFO dinyatakan dalam bentuk linear sebagai:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

Sedangkan model PSO dinyatakan sebagai:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

di mana  $k_1$  dan  $k_2$  masing-masing merupakan konstanta laju adsorpsi.

Penentuan model kinetika yang paling sesuai dilakukan berdasarkan nilai koefisien determinasi serta kesesuaian antara nilai kapasitas adsorpsi teoritis dan nilai eksperimental. Penentuan model kinetika yang paling sesuai dilakukan dengan membandingkan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) serta kesesuaian antara nilai kapasitas adsorpsi teoritis ( $q_e, \text{calc}$ ) dan nilai kapasitas adsorpsi eksperimental ( $q_e, \text{exp}$ ). Seluruh pengujian dilakukan secara triplo dan data yang diperoleh dianalisis secara statistik untuk memastikan validitas dan reproducibilitas hasil penelitian. Data kinetika dianalisis menggunakan regresi linear/nonlinear untuk menentukan konstanta laju ( $k_1$  dan  $k_2$ ), nilai  $q_e, \text{calc}$ , serta koefisien  $R^2$ . Validitas model kinetika ditentukan berdasarkan kecocokan statistik. Diagram alir analisis ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memperkuat pembahasan hasil.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hidroksiapatit (HAp) yang disintesis dari limbah tulang sapi Lombok melalui proses kalsinasi menunjukkan karakteristik struktural yang sesuai dengan material kalsium fosfat kristalin. Tahapan deproteinasi menggunakan larutan NaOH, diikuti pengeringan dan kalsinasi pada suhu tinggi, terbukti efektif dalam menghilangkan komponen organik serta menghasilkan fase anorganik yang stabil. Proses ini penting untuk memastikan bahwa material yang diperoleh memiliki kemurnian dan kristalinitas yang memadai sebagai adsorben. Keberhasilan sintesis HAp dari limbah tulang sapi ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa tulang hewan merupakan sumber kalsium fosfat yang potensial dan berkelanjutan.

Hasil analisis X-ray Diffraction (XRD) pada HAp murni menunjukkan pola difraksi khas hidroksiapatit heksagonal yang sesuai dengan standar JCPDS No. 09-0432. Puncak-puncak utama teramat pada sudut  $2\theta$  sekitar  $31-33^\circ$ , yang merupakan karakteristik fase HAp kristalin. Setelah dilakukan aktivasi menggunakan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , pola difraksi utama tetap terjaga tanpa munculnya fase pengotor baru, menunjukkan bahwa proses aktivasi tidak menyebabkan degradasi struktur kristal hidroksiapatit. Meskipun demikian, terjadi sedikit pelebaran puncak difraksi pada beberapa bidang kristal, yang mengindikasikan adanya perubahan mikrostruktur, seperti peningkatan cacat kristal atau penurunan ukuran kristalit. Perhitungan menggunakan persamaan Scherrer menunjukkan bahwa ukuran kristal rata-rata menurun dari sekitar 45,2 nm pada HAp murni menjadi 42,9 nm pada HAp– $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Penurunan ukuran kristal ini dapat meningkatkan luas permukaan efektif material dan berkontribusi positif terhadap kemampuan adsorpsinya.

Perubahan struktur mikro tersebut juga didukung oleh hasil analisis Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Spektrum FTIR HAp murni memperlihatkan pita serapan khas gugus fosfat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) pada daerah sekitar  $560-600 \text{ cm}^{-1}$  dan  $960-1100 \text{ cm}^{-1}$ , serta pita hidrosil ( $\text{OH}^-$ ) pada sekitar  $3570 \text{ cm}^{-1}$ . Setelah aktivasi menggunakan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , selain pita-pita khas tersebut, muncul pita tambahan pada daerah  $1410-1450 \text{ cm}^{-1}$  yang berkaitan dengan vibrasi gugus karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Kehadiran gugus karbonat ini mengindikasikan bahwa ion karbonat berhasil terintroduksi atau teradsorpsi pada permukaan HAp. Gugus karbonat yang bersifat elektronegatif berperan penting dalam meningkatkan muatan negatif permukaan adsorben, sehingga memperkuat interaksi elektrostatik dengan zat warna kationik seperti Rhodamin B. Fenomena serupa juga dilaporkan pada HAp karbonat yang menunjukkan afinitas lebih tinggi terhadap molekul bermuatan positif.

Pengaruh aktivasi  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  terhadap sifat tekstural material dianalisis lebih lanjut menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET). Hasil analisis menunjukkan bahwa luas permukaan spesifik HAp meningkat signifikan dari  $12,8 \text{ m}^2/\text{g}$  menjadi  $21,5 \text{ m}^2/\text{g}$  setelah aktivasi. Peningkatan ini mencapai sekitar 68%, yang

menandakan bahwa proses aktivasi mampu membuka pori-pori tertutup dan menciptakan situs aktif baru pada permukaan material. Selain itu, volume total pori juga meningkat dari  $0,041 \text{ cm}^3/\text{g}$  menjadi  $0,065 \text{ cm}^3/\text{g}$ . Peningkatan luas permukaan dan volume pori ini sangat berpengaruh terhadap kinerja adsorpsi karena menyediakan area kontak yang lebih luas antara adsorben dan adsorbat. Dengan semakin banyaknya situs aktif yang tersedia, peluang molekul Rhodamin B untuk terikat pada permukaan HAp–Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> menjadi lebih besar.

Morfologi permukaan yang diamati menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) memberikan gambaran visual yang mendukung hasil BET. HAp murni menunjukkan morfologi berupa agglomerat partikel dengan permukaan relatif halus dan porositas terbatas. Setelah aktivasi Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, permukaan material tampak lebih kasar dan tidak homogen, dengan munculnya celah dan pori-pori kecil di beberapa bagian. Perubahan morfologi ini menunjukkan bahwa perlakuan kimia berperan dalam memodifikasi topografi permukaan HAp, sehingga meningkatkan aksesibilitas adsorbat terhadap situs aktif. Struktur permukaan yang lebih kasar dan berpori ini diketahui dapat mempercepat difusi molekul zat warna ke dalam pori adsorben.

Kinerja adsorpsi HAp–Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> terhadap Rhodamin B diuji melalui percobaan batch pada berbagai waktu kontak. Hasil menunjukkan bahwa adsorpsi berlangsung cepat pada tahap awal, dengan penurunan konsentrasi Rhodamin B yang signifikan dalam 30 menit pertama. Hal ini disebabkan oleh banyaknya situs aktif yang masih kosong pada permukaan adsorben. Seiring bertambahnya waktu kontak, laju adsorpsi menurun dan sistem mencapai kesetimbangan pada sekitar 90 menit, dengan kapasitas adsorpsi kesetimbangan sebesar 9,87 mg/g. Waktu kesetimbangan yang relatif singkat ini menunjukkan bahwa HAp–Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> memiliki kinetika adsorpsi yang efisien, sehingga berpotensi diaplikasikan dalam sistem pengolahan limbah cair.

Untuk memahami mekanisme pengendali laju adsorpsi, data kinetika dianalisis menggunakan model Pseudo Orde Pertama (PFO) dan Pseudo Orde Kedua (PSO). Hasil analisis menunjukkan bahwa model PSO memberikan kecocokan terbaik terhadap data eksperimental, dengan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,996. Sebaliknya, model PFO menunjukkan kecocokan yang lebih rendah dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,883. Selain itu, nilai kapasitas adsorpsi teoritis yang dihitung menggunakan model PSO sangat mendekati nilai kapasitas adsorpsi eksperimental. Kesesuaian ini menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi Rhodamin B pada HAp–Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dikendalikan oleh proses kemisorpsi, yang melibatkan interaksi kimia atau pertukaran elektron antara molekul adsorbat dan gugus aktif pada permukaan adsorben.

Dominasi mekanisme kemisorpsi ini dapat dijelaskan melalui interaksi antara Rhodamin B yang bermuatan positif dengan gugus fosfat dan karbonat bermuatan negatif pada permukaan HAp–Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Interaksi elektrostatik yang kuat, disertai kemungkinan pembentukan ikatan hidrogen atau kompleks permukaan, menyebabkan molekul Rhodamin B terikat lebih stabil dibandingkan adsorpsi fisik semata. Mekanisme ini konsisten dengan laporan pada berbagai studi adsorpsi zat warna kationik menggunakan material berbasis biomassa dan kalsium fosfat, yang umumnya mengikuti model kinetika Pseudo Orde Kedua.

Selain aspek kinerja adsorpsi, pemanfaatan limbah tulang sapi Lombok sebagai bahan baku HAp memberikan nilai tambah dari perspektif keberlanjutan dan ekonomi sirkular. Limbah tulang yang sebelumnya tidak bernilai ekonomis dapat dikonversi menjadi material fungsional dengan aplikasi lingkungan. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi beban limbah organik, tetapi juga menyediakan adsorben berbiaya rendah dan ramah lingkungan. Dibandingkan dengan adsorben komersial yang memerlukan bahan baku mahal dan proses sintesis kompleks, HAp–Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dari limbah tulang sapi menawarkan alternatif yang lebih berkelanjutan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa aktivasi hidroksiapatit menggunakan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> secara efektif meningkatkan sifat struktural, tekstural, dan kinerja adsorpsi material. Peningkatan luas permukaan, modifikasi gugus fungsi, dan perubahan morfologi permukaan berkontribusi langsung terhadap peningkatan kapasitas dan kinetika adsorpsi Rhodamin B. Dengan demikian, HAp–Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dari limbah tulang sapi Lombok memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai adsorben ramah lingkungan dalam pengolahan limbah cair yang mengandung zat warna sintetis.

## KESIMPULAN

Hidroksiapatit (HAp) berhasil disintesis dari limbah tulang sapi Lombok melalui proses kalsinasi dan dimodifikasi menggunakan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> tanpa mengubah fase kristal utama HAp. Aktivasi Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> terbukti meningkatkan karakteristik permukaan material, yang ditunjukkan oleh peningkatan luas permukaan spesifik

dari 12,8 menjadi 21,5 m<sup>2</sup>/g serta terbentuknya gugus karbonat pada permukaan adsorben. Perubahan ini memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kemampuan adsorpsi terhadap zat warna Rhodamin B.

Kinerja adsorpsi menunjukkan bahwa HAp-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> memiliki kapasitas adsorpsi kesetimbangan sebesar 9,87 mg/g dengan waktu kesetimbangan sekitar 90 menit. Analisis kinetika mengonfirmasi bahwa proses adsorpsi mengikuti model Pseudo Orde Kedua dengan nilai koefisien determinasi yang sangat tinggi ( $R^2 = 0,996$ ), yang mengindikasikan bahwa mekanisme pengendali laju didominasi oleh kemisorpsi melalui interaksi kuat antara gugus aktif permukaan HAp dan molekul Rhodamin B.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa aktivasi hidroksiapit berbasis limbah tulang sapi menggunakan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> merupakan pendekatan yang efektif untuk menghasilkan adsorben ramah lingkungan dengan performa adsorpsi yang baik. Material HAp-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> berpotensi dikembangkan lebih lanjut sebagai adsorben alternatif untuk pengolahan limbah cair yang mengandung zat warna sintetis, dengan peluang pengembangan lanjutan melalui studi isoterm adsorpsi, uji regenerasi, dan aplikasi pada sistem limbah yang lebih kompleks.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afifah, F., & Cahyaningrum, S. E. (2020). Sintesis dan karakterisasi hidroksiapit dari tulang sapi (*Bos taurus*) menggunakan teknik kalsinasi. *Unesa Journal of Chemistry*, 9(3), 189–196. <https://doi.org/10.26740/ujc.v9n3.p189-196>
- Arifin, Z., Pratapa, S., & Triwikantoro, T. (2015). Pengaruh temperatur kalsinasi terhadap struktur hidroksiapit hasil sintesis dari tulang sapi. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 4(2), 56–60.
- Eurozi, N., Fajriati, I., Artsanti, P., & Krisdiyanto, D. (2023). Adsorpsi zat warna Rhodamin B dan Congo Red dengan silika gel dari limbah ampas tebu (*Saccharum officinarum*). *Indonesian Journal of Materials Chemistry*, 2(2), 53–59.
- Harum, W., Sentosa, A. P., & Subagyono, D. J. N. (2023). Sintesis silika gel dari abu sekam padi termodifikasi kitosan serta aplikasinya sebagai adsorben methylene blue. *Jurnal Kimia Mulawarman*, 19(2). <https://doi.org/10.30872/jkm.v19i2.933>
- Karbeka, M. (2024). Kinetika adsorpsi Pb(II) oleh adsorben pasir teraktivasi NaOH dengan variasi konsentrasi. *Lantanida Journal*, 12(1), 16–28.
- Marasabessy, I., & Firmansyah, I. (2021). Preparasi dan karakterisasi hidroksiapit dari tulang ikan kakap menggunakan metode kalsinasi. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 17(3), 253–259.
- Mutmainnah, M., Chadijah, S., & Rustiah, W. O. (2017). Hidroksiapit dari tulang ikan tuna sirip kuning (*Thunnus albacares*) dengan metode presipitasi. *Al-Kimia*, 5(2), 119–126.
- Nurhasanah, N., Anggraini, S., & Rohman, A. (2019). Sintesis dan karakterisasi hidroksiapit dari limbah tulang ayam dengan variasi suhu kalsinasi. *Jurnal Kimia Valensi*, 5(1), 45–52.
- Parahita, I. G. A. A., Simpen, I. N., & Adhi, N. G. A. M. D. (2016). Ekstraksi dan karakterisasi hidroksiapit dari limbah kerajinan tulang sapi menggunakan metode kombinasi alkali-hidrotermal dan dekomposisi termal. *Jurnal Kimia*, 10(2), 199–208.
- Puspa, K. A., & Asmi, D. (2014). Sintesis dan karakterisasi biokeramik hidroksiapit bahan tulang sapi pada suhu 800–1100 °C. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 2(2). <https://doi.org/10.23960/jtaf.v2i2.55>
- Ranamanggala, J. A., Laily, D. I., Annisa, Y. N., & Cahyaningrum, S. E. (2020). Potensi hidroksiapit dari tulang ayam sebagai pelapis implan gigi. *Jurnal Kimia Riset*, 5(2). <https://doi.org/10.20473/jkr.v5i2.22479>
- Sahara, E., Gayatri, P. S., & Suarya, P. (2018). Adsorpsi zat warna Rhodamin-B dalam larutan oleh arang aktif batang tanaman gumitir teraktivasi asam fosfat. *Cakra Kimia*, 6(1), 37–45.
- Shofiyani, A., Rahmiyati, Y., & Zaharah, T. A. (2020). Nanosilika berbahan dasar batu padas sebagai adsorben zat warna sintetis Rhodamin B. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 9(3), 187–193. <https://doi.org/10.15294/ijcs.v9i3.42027>
- Suci, I. A., & Ngapa, Y. D. (2020). Sintesis dan karakterisasi hidroksiapit (HAp) dari cangkang kerang ale-ale menggunakan metode presipitasi double stirring. *Cakra Kimia*, 8(2), 73–81.
- Wahdah, I., Wardhani, S., & Darjito, D. (2014). Sintesis hidroksiapit dari tulang sapi dengan metode basah-pengendapan. *Jurnal Ilmu Kimia Universitas Brawijaya*, 1(1), 92–97.