

**PEMANFAATAN KARBON SISA HASIL PEMBENTUKAN KRISTAL LIMBAH
TULANG IKAN TENGGIRI (*SCOMBEROMORUS COMMERSON LACEPEDE*) DAN
IKAN BELIDA (*CHITALA LOPIS*) UNTUK MENGADSORPSI ZAT WARNA SINTETIK
*CONGO RED***

**Pino Ramadani^{1*}, Firnanda Zuni Fransiska¹, Aisyah Adinda Putri¹, Tiara Maharani¹,
Salsabila Dia Syahputri¹, Fitri Nur Rahmadani¹, Wirhanuddin¹, Mukhamad Nurhadi¹**

¹ Jurusan Pendidikan Kimia, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Mulawarman
Jl. Kuaro, Gunung Kelua, Samarinda Ulu, Kota Samarinda, Kalimantan Timur 75119

*Email: pinoramadan345@gmail.com

Abstrak

Upaya pengolahan limbah cair industri hingga kini sebagian besar masih mengandalkan metode konvensional yang sensitif terhadap perubahan lingkungan dan kurang efektif dalam menguraikan zat warna kompleks seperti *Congo Red*. Salah satu metode alternatif yang potensial adalah teknik adsorpsi menggunakan karbon aktif berbasis biomassa, termasuk limbah tulang ikan. Penelitian ini bertujuan mengetahui sifat, karakteristik permukaan, serta mekanisme adsorpsi karbon sisa hasil pembentukan kristal dari limbah tulang ikan tenggiri dan ikan belida dalam mengadsorpsi *Congo Red*. Metode yang digunakan meliputi proses karbonisasi pada suhu 500 °C, diikuti sulfonasi menggunakan H₂SO₄ pekat, serta pengujian adsorpsi dengan memvariasikan ukuran partikel karbon, waktu kontak, dan konsentrasi awal *Congo Red*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karbon limbah tulang ikan efektif dalam menyerap *Congo Red*, dengan persentase penghilangan *Congo Red* yang meningkat seiring bertambahnya waktu kontak dan mencapai kesetimbangan dalam 10 menit dengan efisiensi 99,8%. Ukuran partikel optimum adalah 200 mesh dengan daya jerap maksimum ketika konsentrasi *Congo Red* berada di bawah 600 mg L⁻¹. Analisis isoterm menunjukkan bahwa adsorpsi mengikuti model Langmuir dengan kapasitas maksimum 16.666,6 mg g⁻¹. Sementara itu, data kinetika menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung sesuai model orde kedua semu dengan konstanta laju sebesar 666,6 g mg⁻¹ jam⁻¹ pada suhu 25 °C.

Kata kunci: Adsorpsi, Congo Red, Karbon Aktif, Sulfonasi, Tulang Ikan

Abstract

To date, industrial wastewater treatment efforts have largely relied on conventional methods that are sensitive to environmental changes and less effective in degrading complex dyes such as Congo Red. One promising alternative approach is adsorption using biomass-based activated carbon, including waste derived from fish bones. This study aims to investigate the properties, surface characteristics, and adsorption mechanism of residual carbon obtained from crystal formation processes using waste bones of mackerel and featherback fish for Congo Red removal. The methodology involved carbonization at 500 °C, followed by sulfonation with concentrated H₂SO₄, and adsorption experiments with varying carbon particle size, contact time, and initial Congo Red concentration. The results demonstrate that fish bone waste carbon is highly effective in adsorbing Congo Red, with removal efficiency increasing with contact time and reaching equilibrium within 10 minutes at 99.8%. The optimum particle size was 200 mesh, and the maximum adsorption capacity was observed at Congo Red concentrations below 600 mg L⁻¹. Isotherm analysis revealed that the adsorption process follows the Langmuir model, with a maximum adsorption capacity of 16,666.6 mg g⁻¹. Meanwhile, kinetic data indicated that the adsorption behavior conforms to a pseudo-second-order model, with a rate constant of 666.6 g mg⁻¹ h⁻¹ at 25 °C.

Kata kunci: Adsorpsi, Congo Red, Karbon Aktif, Sulfonasi, Tulang Ikan

1. PENDAHULUAN

Industri tekstil, kertas, plastik, kulit, makanan, percetakan, dan mordan kapas telah diketahui menghasilkan limbah cair yang berpotensi mencemari lingkungan secara serius (Hisbiyah dan Hanifah, 2019). Salah satu kontaminan yang banyak ditemukan dalam

limbah tersebut adalah *Congo Red* (CR), zat warna sintetis anionik yang bersifat toksik, iritan, dan karsinogenik bagi organisme akuatik maupun manusia (Siddiqui dkk., 2023). Struktur kimia *Congo Red* yang stabil membuatnya sulit terdegradasi secara alami sehingga

keberadaannya di lingkungan menjadi masalah yang memerlukan penanganan khusus.

Upaya pengolahan limbah cair industri sebagian besar masih menggunakan metode konvensional yang sensitif terhadap faktor lingkungan, seperti cahaya dan pH, serta kurang efektif dalam mengurai zat warna kompleks (Adesanmi *dkk.*, 2022). Berbagai teknologi, mulai dari pengolahan biologis, kimia, hingga fisik, telah dikembangkan untuk menghilangkan zat warna sintetis (Donkadokula *dkk.*, 2020). Namun, di antara berbagai metode tersebut, adsorpsi menjadi pilihan yang paling banyak diminati karena efisiensi yang tinggi, proses yang sederhana, serta kemampuan menghilangkan zat warna pada konsentrasi rendah. Meskipun demikian, penggunaan karbon aktif sebagai adsorben komersial masih terkendala oleh tingginya biaya produksi (Zhou *dkk.*, 2019). Sehingga bahan baku alternatif berbasis biomassa menjadi fokus penelitian beberapa tahun terakhir.

Berbagai biomassa telah dimanfaatkan sebagai adsorben, seperti kulit kacang mete yang mampu menghasilkan karbon aktif berbiaya rendah untuk mengadsorpsi metilen biru (Thang *dkk.*, 2021). Tulang ikan tuna juga dilaporkan dapat menghasilkan hidroksiapatit untuk adsorpsi *Congo Red*, meski efektivitasnya optimal hanya pada konsentrasi rendah (Peng *dkk.*, 2017). Selain itu, arang mesopori dari tulang hewan telah digunakan untuk mengadsorpsi zat warna tertentu, namun kapasitas adsorpsinya masih terbatas (Fatimah dan Azinuddin, 2022). Walaupun berbagai penelitian telah menunjukkan potensi biomassa hewani, sebagian besar fokusnya masih pada limbah pembentukan kristal dari tumbuhan atau hewan darat, bukan hasil pembentukan kristal dari tulang ikan atau hewan laut. Cela penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah pembentukan kristal tulang ikan sebagai sumber karbon aktif masih jarang dieksplorasi.

Kalimantan, dengan sumber daya ikan yang melimpah seperti ikan tenggiri (*Scomberomorus Guttatus*) dan ikan belida (*Chitala Lopis*), menghasilkan limbah tulang dalam jumlah besar sebagai sisa pengolahan produk pangan seperti amplang dan pempek. Tulang ikan sebenarnya mengandung senyawa anorganik seperti kalsium fosfat, hidroksiapatit, dan karbon yang berpotensi dikonversi menjadi material berpori melalui proses karbonisasi

(Kusumawardani *dkk.*, 2019). Hidroksiapatit yang diperoleh dari tulang ikan memiliki stabilitas struktur, gugus fungsi permukaan, serta porositas yang mendukung proses adsorpsi (Aziz *dkk.*, 2024). Hal ini mendorong pemanfaatannya sebagai adsorben dapat memberikan nilai tambah sekaligus mengurangi limbah organik.

Melalui komposisi mineralnya, limbah tulang ikan dapat dimodifikasi menjadi karbon aktif yang ekonomis dan ramah lingkungan (Rashed *dkk.*, 2024). Namun, pemahaman mengenai karakteristik dan mekanisme adsorpsi karbon sisa hasil pembentukan kristal (*Crystal Formation Residue*) dari tulang ikan masih terbatas. Selain itu, belum terdapat penelitian yang secara khusus menggabungkan penggunaan karbon residu dari dua spesies ikan berbeda sebagai satu jenis adsorben untuk meningkatkan keragaman komponen mineral dan potensi gugus fungsi aktifnya. Kondisi ini memperkuat celah penelitian yang memanfaatkan kedua jenis limbah tulang ikan tersebut secara bersama sebagai sumber adsorben alternatif.

Untuk menjawab celah tersebut, penelitian ini memanfaatkan karbon sisa hasil pembentukan kristal dari tulang ikan tenggiri dan belida yang sebelumnya telah diteliti oleh (Kusumawardani *dkk.*, 2019). Adsorben diproduksi melalui dua tahap aktivasi, yaitu aktivasi termal (karbonisasi) pada suhu 500°C selama dua jam untuk menghasilkan struktur karbon yang stabil, serta aktivasi kimia menggunakan asam sulfat pekat untuk meningkatkan jumlah gugus fungsi oksigen dan hidrofilisitas permukaan melalui proses sulfonasi (Hamad *dkk.*, 2023). Prosedur aktivasi ini diharapkan menghasilkan adsorben dengan kemampuan penyerapan yang lebih baik terhadap *Congo red*.

Berdasarkan latar belakang tersebut penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sifat, karakteristik permukaan, serta mekanisme adsorpsi karbon sisa hasil pembentukan kristal limbah tulang ikan tenggiri dan ikan belida dalam mengadsorpsi zat warna sintetis *Congo Red*. Analisis performa adsorpsi dilakukan secara sistematis menggunakan model isoterm dan kinetika (*Langmuir* dan *Freundlich*) untuk mengidentifikasi pola interaksi, kapasitas maksimum, serta kecenderungan mekanisme

adsorpsi pada permukaan karbon yang terbentuk.

2. MATERIAL DAN METODE

2.1 Material

Tulang ikan yang digunakan, didapat dari limbah produsen amplang dan pempek di Samarinda. Asam Sulfat (H_2SO_4) 98% yang digunakan dipasok dari Merck. *Congo Red* yang digunakan juga dipasok dari Merck.

2.2 Proses Karbonisasi

Pembuatan karbon dari tulang ikan dilakukan dengan mengacu pada prosedur penelitian sebelumnya (Kusumawardani dkk., 2019). Tulang ikan belida dan tenggiri yang diperoleh terlebih dahulu dibersihkan dari sisa daging dan kotoran yang masih menempel. Setelah itu, tulang dijemur selama tujuh hari hingga mencapai kondisi kering. Tulang yang telah dijemur kemudian dikeringkan lebih lanjut melalui proses pengovenan pada suhu 110 °C selama dua jam. Tahap berikutnya adalah penghalusan tulang menggunakan blender hingga diperoleh serbuk berukuran lebih kecil. Serbuk tulang yang telah dihaluskan

2.4 Uji Adsorpsi

selanjutnya mengalami proses karbonisasi melalui pentanuran menggunakan furnace pada suhu 500 °C selama dua jam. Setelah proses karbonisasi selesai, sampel yang telah menjadi karbon dihancurkan kembali menggunakan lumpang dan alu untuk memperoleh tekstur yang lebih homogen. Karbon hasil penghalusan kemudian dicampurkan dan diayak menggunakan ukuran 50 mesh, 100 mesh, dan 200 mesh untuk memperoleh fraksi ukuran partikel yang seragam sesuai kebutuhan analisis.

2.3 Proses Sulfonasi

Karbon hasil preparasi dari tulang ikan disulfonasi menggunakan 5 mL H_2SO_4 pekat untuk setiap gram karbon. Campuran tersebut diaduk pada suhu kamar selama 6 jam. Setelah proses sulfonasi selesai, karbon dicuci dengan air suling hingga mencapai pH netral, kemudian dibiarkan selama satu bulan. Selanjutnya, karbon sisa pembentukan kristal dikeringkan pada suhu 110 °C selama 2 jam. Karbon tersulfonasi yang diperoleh diberi label FBS-500 sebagaimana yang ditampilkan pada Tabel 1.

(5 menit, 10 menit, 20 menit, 30 menit, 50

Tabel 1. Kode dan perlakuan pada sampel

Sample	Tipe Perlakuan	Waktu Sulfonasi (jam)	Temperatur Karbonisasi (°C)	Waktu Karbonisasi (jam)
FBS-500	Sulfonasi	6	500	2

Uji kemampuan adsorpsi karbon dilakukan dengan menggunakan *Congo Red*. Sampel (0,0625 g) dicampurkan dengan 25 mL larutan *Congo Red* ($C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$ 100 mg. L^{-1}). Percobaan dilakukan pada ukuran partikel yang berbeda, yaitu 0-99 mesh, 100-199 mesh dan 200 mesh selama 2 jam dengan suhu ruang. Setelah dilakukan uji adsorpsi, adsorben dipisahkan dari filtrat dengan teknik sentrifugasi dengan kecepatan 300 rpm. Kemudian, filtrat dianalisis zat warnanya dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis (498 nm) dengan mengamati perubahan absorbansi larutan. Efek konsentrasi awal adsorbat dilakukan dengan memvariasikan konsentrasi adsorbat (100 ppm, 200 ppm, 300 ppm, 400 ppm, 500 ppm, 600 ppm, 800 ppm, dan 1000 ppm) dengan waktu kontak 2 jam. Efek waktu kontak adsorbat dengan adsorben dilakukan dengan memvariasikan waktu kontak

menit, 60 menit dan 120 menit).

Kapasitas adsorpsi (q_e) dinyatakan sebagai zat warna yang teradsorpsi per gram adsorben ($mg\ g^{-1}$) dan efisiensi adsorpsi (%) adsorben dihitung menggunakan persamaan (1) dan (2).

$$qe = \frac{(C_i - C_f) \cdot V}{W} \quad (1)$$

$$Adsorption\ efficiency\ (%) = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100\% \quad (2)$$

C_i adalah konsentrasi awal zat warna ($mg\cdot L^{-1}$), C_f adalah konsentrasi zat warna setelah waktu adsorpsi t , V adalah volume larutan zat warna (mL), dan W adalah berat adsorben (g). Di mana C_i adalah konsentrasi awal zat warna ($mg\cdot L^{-1}$), C_f adalah konsentrasi zat warna setelah waktu adsorpsi t , V adalah volume larutan zat warna (mL), dan W adalah berat adsorben (g). Perbedaan antara C_i dan C_f digunakan untuk menentukan jumlah zat warna

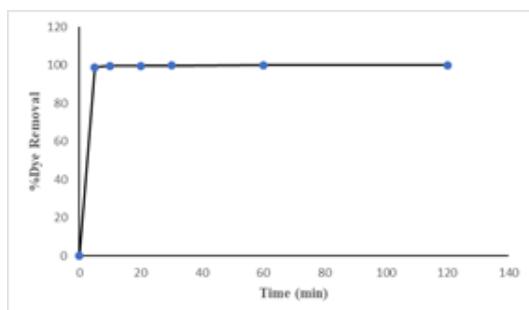
yang berhasil terserap pada permukaan adsorben. Nilai-nilai ini kemudian menjadi dasar perhitungan kapasitas adsorpsi sehingga efektivitas proses dapat dievaluasi secara kuantitatif.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh Waktu Kontak karbon FBS-500 Terhadap Penyerapan Congo Red

Pengaruh waktu kontak karbon FBS-500 dengan *Congo Red* ditunjukkan pada Gambar 1. grafik tersebut menunjukkan bahwa kesetimbangan waktu kontak dicapai dalam waktu 10 menit. Persentase penghilangan zat warna *Congo Red* meningkat seiring bertambahnya waktu kontak. Karbon FBS-500 menunjukkan kemampuan penyerapan *Congo Red* yang sangat cepat pada lima menit pertama, dengan persentase penyerapan mencapai 98,8%.

Setelah itu terjadi peningkatan hingga mencapai kondisi setimbang pada menit ke-10 dengan persentase 99,5%. Pada menit ke-20, jumlah zat warna yang terserap meningkat menjadi 99,56%, kemudian mencapai 99,7% pada menit ke-30. Pada menit ke-60 dan 120, persentase penyerapan karbon tetap stabil pada angka 99,8%. Temuan ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak antara karbon dan larutan *Congo Red*, semakin besar jumlah zat warna yang terserap sehingga persentase penghilangan warna semakin tinggi.



Gambar 1. Pengaruh waktu kontak karbon FBS-500 terhadap persentase (%) penyerapan zat warna *Congo Red* (CR: 100 mg. L⁻¹ berat adsorben: 62,5 mg, pada suhu 25°C)

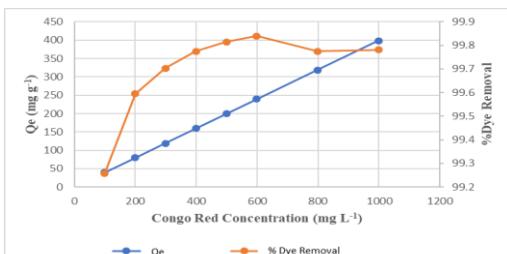
Fenomena tersebut dipengaruhi oleh karakteristik fisik permukaan karbon yang didominasi pori-pori mesopori (Kusumawardani dkk., 2019). Struktur mesopori memungkinkan difusi molekul *Congo red* berlangsung lebih efektif, sehingga

meningkatkan jumlah zat warna yang mampu mencapai permukaan aktif karbon. Selain itu, keberadaan gugus fungsi seperti $-S=O$, $-COOH$, $-OH$, dan $-SO_3H$ berperan sebagai situs aktif yang memperkuat interaksi antara karbon FBS-500 dan molekul *Congo Red*, sehingga meningkatkan efisiensi proses adsorpsi.

3.2 Pengaruh Konsentrasi Awal *Congo Red* Terhadap Daya Penyerapan FBS-500

Pengaruh konsentrasi awal *Congo Red* terhadap kemampuan penyerapan FBS-500 ditunjukkan pada Gambar 2. Kuantitas zat warna yang teradsorpsi meningkat dari 39,67 menjadi 398,36 mg. g⁻¹ ketika konsentrasi awal meningkat dari 100 menjadi 1000 mg. L⁻¹. Namun, persentase penyisihan zat warna menurun dari 99,83 menjadi 99,77 %. Seperti yang dapat dilihat, efisiensi dari FBS-500 turun ketika konsentrasi *Congo Red* melebihi 600 mg. L⁻¹. Pada konsentrasi zat warna di bawah 600 mg. L⁻¹, jumlah situs aktif di permukaan FBS-500 masih cukup untuk adsorpsi molekul zat warna. Namun, pada konsentrasi awal yang tinggi, jumlah zat warna yang teradsorpsi per satuan berat adsorben (q_t) juga tinggi. Proses adsorpsi pada konsentrasi zat warna yang rendah, nilai persentase (%) penyisihan zat warna berlawanan dengan nilai kapasitas penyisihan zat warna (q_e , mg. g⁻¹).

Fenomena ini terjadi karena pada konsentrasi rendah, jumlah FBS-500 yang digunakan sama, sehingga persentase penyisihan zat warna menjadi sangat tinggi (~100%) karena hampir semua zat warna pada konsentrasi tersebut terserap sepenuhnya. Di sisi lain, jumlah penyisihan zat warna (q_t) menjadi rendah karena pada konsentrasi yang rendah, jumlah zat warna yang teradsorpsi (mg. g⁻¹) juga sedikit dengan jumlah FBS-500 yang sama. Seiring dengan meningkatnya konsentrasi awal zat warna, persentase penyisihan zat warna menjadi rendah karena peningkatan konsentrasi zat warna yang teradsorpsi menjadi kecil bahkan konstan. Sedangkan jumlah zat warna yang teradsorpsi per satuan berat adsorben (q_t) selalu mengalami kenaikan hingga nilainya konstan seiring dengan kenaikan konsentrasi awal zat warna (Kusumawardani dkk., 2019).

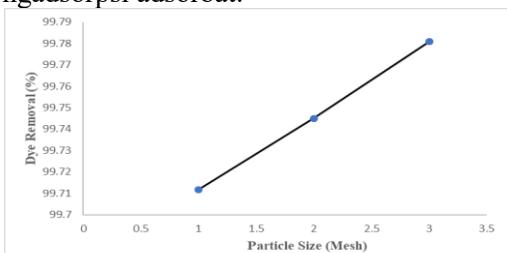


Gambar 2. Pengaruh konsentrasi awal *Congo Red* terhadap Daya Penyerapan FBS-500 (Q_e) dan persentase (%) penghilangan zat warna *Congo Red* (CR: 100 mg. L⁻¹ berat adsorben: 62,5 mg, pada suhu 25°C)

3.3 Pengaruh Ukuran Partikel FBS-500 Terhadap Penyerapan *Congo Red*

Pengaruh ukuran partikel FBS-500 dengan adsorbat *Congo Red* ditunjukkan pada Gambar 3. Hasil ini menunjukkan bahwa penyerapan optimum adsorbat *Congo Red* tercapai pada ukuran partikel FBS-500 berukuran 200 mesh. Persentase penghilangan zat warna *Congo Red* meningkat seiring bertambah kecilnya ukuran partikel FBS-500. Adsorben FBS-500 dengan cepat menyerap zat warna *Congo Red* pada ukuran partikel 0-99 mesh dengan persentase 99,71%. Setelah itu ukuran partikel diperkecil hingga 100-198 mesh dan diperoleh persentase penyerapan zat warna sebesar 99,74%.

Selanjutnya pada ukuran 200 mesh persen terserapnya adalah 99,78%. Dari hasil ini maka diperoleh hasil semakin kecil ukuran partikel semakin banyak partikel adsorbat yang terserap. Fenomena ini terjadi karena semakin kecil ukuran partikel maka semakin luas permukaannya sehingga semakin banyak ruang dan pori dari adsorben FBS-500 untuk mengadsorpsi adsorbat.

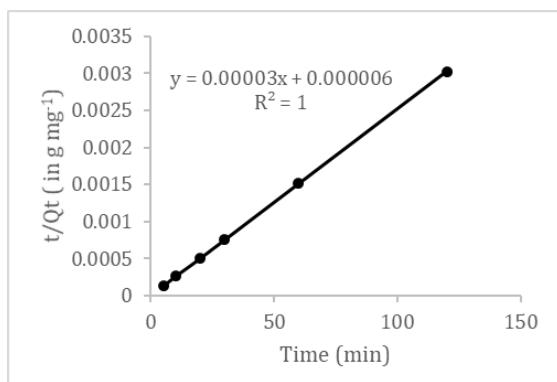


Gambar 3. Pengaruh ukuran partikel FBS-500 terhadap persentase (%) penyerapan zat warna *Congo Red* (CR: 100 mg. L⁻¹ berat adsorben: 62,5 mg, Waktu 2 Jam, pada suhu 25°C)

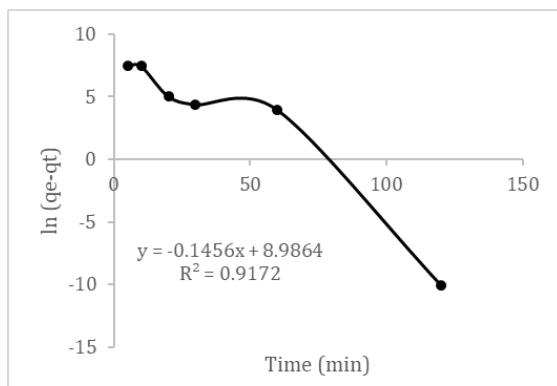
3.4 Studi Kinetika Kesetimbangan Adsorpsi FBS-500 terhadap *Congo Red*

Plot kinetika orde satu semu dan orde dua semu dari FBS-500 sebagai adsorben pewarna

Congo Red ditunjukkan pada Gambar 4 dan 5. Berdasarkan Gambar 4 dan 5 diperoleh nilai konstanta laju (k), kesetimbangan serapan yang dihitung ($q_{e, \text{cal}}$) ditentukan oleh kemiringan dan intersep plot. Model orde satu semu menggambarkan proses adsorpsi yang dikendalikan terutama oleh perpindahan massa dari larutan menuju permukaan adsorben pada tahap awal kontak.



Gambar 4. Plot linear kinetika adsorpsi orde dua semu untuk penyerapan *Congo Red* oleh karbon FBS-500.



Gambar 5. Plot linear kinetika adsorpsi orde satu semu untuk penyerapan *Congo Red* oleh karbon FBS-500

Model ini berasumsi bahwa laju adsorpsi sebanding dengan selisih antara kapasitas kesetimbangan dan kapasitas adsorpsi pada waktu tertentu. Tujuan penggunaan model ini adalah untuk menilai apakah mekanisme adsorpsi berlangsung melalui proses fisik (*physisorption*) yang dominan pada fase awal serta mengevaluasi kecocokan kinetika terhadap sistem adsorpsi yang bersifat cepat (Sangoremi, 2025). Nilai koefisien korelasi (R^2) untuk orde satu semu FBS-500 sebesar 0,9502 lebih rendah dibandingkan dengan nilai orde dua semu kedua adsorben sebesar 1,000 yang terlihat lebih akurat.

Fenomena ini sejalan dengan hasil penelitian Ho dan McKay (1999), yang menyimpulkan bahwa persamaan orde pertama Lagergren tidak mampu menggambarkan keseluruhan rentang waktu kontak dan umumnya hanya sesuai untuk tahap awal adsorpsi pada berbagai sistem.

Berdasarkan hal ini maka hasil penelitian ini menunjukkan bahwa adsorpsi *Congo Red* pada adsorben FBS-500 tidak mengikuti kinetika orde satu semu. Nilai konstanta laju (k), adsorpsi kesetimbangan dihitung (q_e , cal), adsorpsi kesetimbangan percobaan (q_e , exp) dan koefisien korelasi (R^2) tercantum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Parameter kinetik model orde pertama semu dan orde kedua semu untuk adsorpsi pewarna *congo red* dari FBS-500

Adsorbenn Tulang Ikan	Orde Dua Semu				Orde Satu Semu			
	Qe cal (mg g ⁻¹)	Qe exp (mg g ⁻¹)	k ₁ (g mg ⁻¹ . min ⁻¹)	R ²	Qe cal (mg g ⁻¹)	Qe exp (mg g ⁻¹)	k ₁ (g mg ⁻¹ . min ⁻¹)	R ²
FBS-500	33333.3	39675.7	666.6	1.000	9691.7	39675.7	0.1456	0.9172

Berdasarkan Tabel 2, nilai konstanta laju (k), adsorpsi kesetimbangan yang dihitung (q_e , cal), adsorpsi kesetimbangan eksperimental (q_e , exp) dan koefisien korelasi (R^2) untuk orde dua semu dari FBS-500 menunjukkan nilai sebagai berikut; 666.6 g.mg⁻¹.menit⁻¹, 1.000, 33333.3 mg.g⁻¹, 39675.7mg.g⁻¹. Model orde dua semu menjelaskan bahwa proses adsorpsi terjadi karena adanya interaksi kimia (*chemisorption*) pada permukaan karbon. Penggunaan model ini bertujuan memperoleh prediksi kapasitas adsorpsi kesetimbangan yang lebih akurat, menilai kecocokan interaksi antara molekul adsorbat dan gugus fungsi permukaan karbon (Afandy dan Sawali, 2024).

Dapat dilihat bahwa koefisien korelasi untuk model orde dua semu untuk FBS-500 sangat tinggi ($R^2 \sim 1,000$) dan perbedaan dalam kapasitas adsorpsi kesetimbangan yang dihitung, q_e , cal dengan kapasitas adsorpsi kesetimbangan eksperimental, q_e , exp untuk kedua adsorben pada orde dua semu lebih rendah dibandingkan dengan orde satu semu. Oleh karena itu, adsorpsi zat warna *Congo Red* pada karbon FBS-500 mengikuti kinetika orde dua semu.

Isoterm adsorpsi FBS-500 dianalisis menggunakan persamaan *Langmuir* dan *Freundlich*. Model adsorpsi *Langmuir* menggambarkan bahwa adsorpsi maksimum sesuai dengan satu lapis zat terlarut (*monolayer adsorption*) yang terbentuk pada permukaan adsorben.

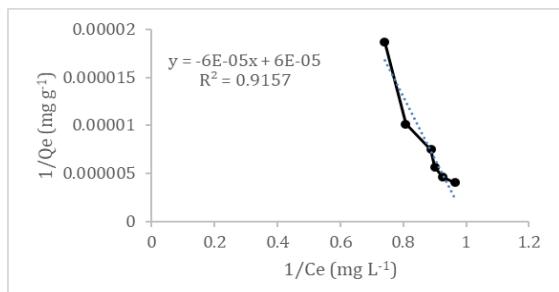
Sedangkan, model adsorpsi *Freundlich* merupakan isoterm yang berhubungan dengan sistem heterogen dan berlangsung pada sistem *multilayer* (Assegaf dkk., 2023). Adsorpsi isoterm *Freundlich* menunjukkan korelasi antara jumlah zat yang diadsorpsi dengan konsentrasi zat yang terdapat dalam larutan, hal ini dinyatakan dengan persamaan (6), (7), (8).

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q_{max}} + \frac{1}{Q_{max}^b} \quad (6)$$

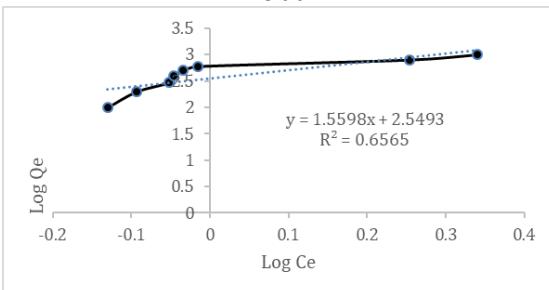
$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (7)$$

$$\log q_e = \log K_F + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \quad (8)$$

Ce dan qe adalah konsentrasi zat warna sisa (mg.L⁻¹) dan jumlah zat warna yang teradsorpsi pada adsorben dalam kesetimbangan (mg.g⁻¹). Qmax adalah jumlah maksimum zat warna per satuan berat adsorben dan b adalah konstanta kesetimbangan adsorpsi *Langmuir* yang berhubungan dengan afinitas antara adsorben dan ion zat warna. Di sisi lain, Kf adalah pengukuran kapasitas adsorpsi dan n adalah kecenderungan adsorpsi. Jika nilai n > 1, maka hal tersebut mencirikan kondisi adsorpsi yang baik.



Gambar 6. Persamaan isoterm *Langmuir* FBS-500



Gambar 7. Persamaan isoterm *Freundlich* FBS-500

Gambar 6 dan 7 menunjukkan isoterm adsorpsi *Langmuir* dan *Freundlich*. Berdasarkan koefisien korelasi, FBS-500 cocok dengan isotherm *Langmuir* dari pada isoterm *Freundlich*. Ditunjukkan nilai R^2 adalah 0,6565 (isoterm *Freundlich*) dan 0,9157 (isoterm *Langmuir*). Nilai koefisien korelasi R^2 yang lebih besar, menunjukkan kecenderungan isoterm dari adsorben (Assegaf dkk., 2023). Nilai tersebut menunjukkan FBS-500 cenderung mengikuti isotherm *Langmuir* dengan nilai kapasitas adsorpsi maksimum adalah 16666,6 mg g⁻¹ seperti yang ditampilkan pada Tabel 2. Hal ini menunjukkan bahwa penghilangan zat warna terjadi dalam adsorben membentuk satu lapisan (*monolayer*) pada permukaan FBS-500 melalui pengikatan kimia.

4. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, karbon produk samping pembuatan katalis dari tulang ikan terbukti memiliki kemampuan yang baik dalam menyerap zat warna *Congo Red*. Hasil uji waktu kontak menunjukkan bahwa persentase penghilangan *Congo Red* meningkat seiring bertambahnya waktu adsorpsi dan mencapai kesetimbangan dalam waktu 10 menit dengan efisiensi penyerapan sebesar 99,8%. Hasil uji ukuran partikel menunjukkan bahwa karbon berukuran 200 mesh memberikan kinerja terbaik. Hasil uji daya penyerapan karbon terhadap konsentrasi *Congo Red* menunjukkan bahwa daya jerap maksimum terjadi ketika

konsentrasi *Congo Red* di bawah 600 mg L⁻¹. Hal ini didukung dengan sifat adsorpsi *Congo Red* pada adsorben FBS-500 mengikuti isoterm *Langmuir* sehingga bersifat *multilayer* (memiliki banyak lapisan) dengan kapasitas adsorpsi maksimum 16666,6 mg. g⁻¹. Data kinetik untuk *Congo Red* sesuai dengan model orde kedua semu dengan konstanta laju yang dihitung sebesar 666,6 g. mg⁻¹. jam⁻¹ pada suhu 25 °C. Secara keseluruhan, karbon FBS-500 terbukti sebagai adsorben biomassa yang efektif, cepat bekerja, dan berpotensi tinggi untuk diterapkan sebagai alternatif berkelanjutan dalam penanganan limbah zat warna sintetis, khususnya *Congo Red*.

DAFTAR PUSTAKA

- Adesanmi, B. M., Hung, Y. T., Paul, H. H., and Huhnke. (2022), Comparison of Dye Wastewater Treatment Methods : A Review, *GSC Advanced Research and Reviews*, 10(2), pp. 126–137. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2022.10.2.0054>.
- Afandy, M. A. and Sawali, F. D. I. S. (2024), Adsorpsi Kromium Heksavalen Pada Larutan Aqueous Menggunakan Arang Kayu Teraktivasi Asam: Studi Isotherm Dan Kinetika Adsorption of Chromium Hexavalent in Aqueous Solutions Using Acid-Activated Wood Charcoal: Isotherm and Kinetics Study,, *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia*, 8(1), pp. 1–14. <https://doi.org/10.32493/jitk.v8i1.3535>.
- Assegaf, M. H., Rosyani, R. and Alamsyah, Z. (2023), Studi Isotherm Langmuir dan Freundlich pada Adsorpsi Logam Berat Fe (II) Menggunakan Abu POFA Teraktivasi, *Jurnal Pembangunan Berkelanjutan*, 6(2), pp. 69–79. <https://doi.org/10.22437/jpb.v6i2.31063>
- Aziz, H. A., Mardziah, C. M., Natasha, A. N., and Alexander, C. H. C. (2024), Characterizations of Fish Bone-Based Hydroxyapatite: Effect of Different Calcination Temperatures, *AIP Conference Proceedings*, 8(4), pp. 1–9. <https://doi.org/10.1063/5.0229184>.
- Donkadokula, N. Y., Kola, A. K., Naz, I., and Saroj, D. (2020), A Review on Advanced Physico-Chemical and Biological Textile Dye Wastewater Treatment Techniques', *Reviews in*

- Environmental Science and Bio Technology*, 19(3), pp. 543–560.
<https://doi.org/10.1007/s11157-020-09543-z>.
- Fatimah, S. and Azinuddin, Y.R. (2022), The Adsorption Performance and Characterization of Activated Charcoal of Bone Char Against Acid Orange, *Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia*, 7(3), pp. 303–313.
<https://doi.org/10.20961/jkpk.v7i3.66556>.
- Hamad, K. I., Humadi, J. I., Abdulkareem, H. A., AlSalhi, S., and Farhan, O. I. (2023), Efficient Immobilization of Acids into Activated Carbon for High Durability and Continuous Desulfurization of Diesel Fuel, *Energy Science and Engineering*, 11(2), pp. 3662–3679.
<https://doi.org/10.1002/ese3.1545>.
- Hisbiyah, A.Y. and Hanifah, I.K.S. (2019), Komposit Karbon Aktif dari Eceng Gondok dengan TiO₂ untuk Degradasi Fotokatalitik Zat Warna Tekstil Congo Red, *BRILIANT Jurnal Riset dan Konseptual*, 4(1), pp. 5–15.
<https://doi.org/10.28926;briliant.v3i3.256>.
- Ho, Y.S. and McKay, G. (1999), Pseudo Second Order Model for Sorption Processes, *Process Biochemistry*, 34(2), pp. 451–465.
[https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5).
- Kusumawardani, R., Nurhadi, M., Wirhanuddin, W., Gunawan, R., and Nur, H. (2019), Carbon-Containing Hydroxyapatite Obtained from Fish Bone as Low-cost Mesoporous Material for Methylene Blue Adsorption, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 14(3), pp. 660–671.
<https://doi.org/10.9767/bcrec.14.3.5365.660-671>.
- Peng, Q., Yu, F., Huang, B., and Huang, Y. (2017), Carbon-Containing Bone Hydroxyapatite Obtained from Tuna Fish Bone with High Adsorption Performance for Congo Red, *Royal Society of Chemistry*, 7(4), pp. 26968–26973.
<https://doi.org/10.1039/c6ra27055g>.
- Rashed, M. N., Gad, A. A. E. and Fathy, N. M. (2024), Efficiency of Chemically Activated Raw and Calcined Waste Fish Bone for Adsorption of Cd (II) and Pb (II) from Polluted Water, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(24), pp. 31703–31720.
<https://doi.org/10.1007/s13399-023-04885-4>.
- Sangoremi, A. A. (2025), Adsorption Kinetic Models and Their Applications: A Critical Review, *International Journal of Research and Scientific Inovation*, 7(23), pp. 245–258.
<https://doi.org/10.51244/IJRSI>.
- Siddiqui, S. I., Allehyani, E. S., Alharbi, S. A., Hasan, Z., Abomuti, M. A., Rajor, H. K., and Oh, S. (2023), Investigation of Congo Red Toxicity towards Different Living Organisms: A Review, *Processes*, 11(8), pp. 1–12.
<https://doi.org/10.3390/pr11030807>.
- Thang, N. H., Khang, D. S., Hai, T. D., Nga, D. T., and Tuan, P. D. (2021), Methylene Blue Adsorption Mechanism of Activated Carbon Synthesised from Cashew Nut Shells, *Royal Society of Chemistry*, 11(3), pp. 26563–26570.
<https://doi.org/10.1039/d1ra04672a>.
- Zhou, Y., Lu, J., Zhou, Yi., and Zondi, L. (2019), Recent Advances for Dyes Removal Using Novel Adsorbents: A Review, *Environmental Pollution*, 252(3), pp. 352–356.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.072>.