

KARBON AKTIF KULIT SINGKONG (*Manihot utilissima*) UNTUK PENYISIHAN FOSFAT AIR LIMBAH LAUNDRY ARTIFISIAL

MUHAMAD NUR IBNU LUTHFI SAUD^{1*}, M. YOGA AMUKTI¹, RIZA HUDAYARIZKA¹, EKA MASRIFATUS ANIFAH¹

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Kalimantan (ITK), Balikpapan

Email: muhamad.saud@lecturer.itk.ac.id

ABSTRAK

Konsentrasi fosfat yang tinggi pada air limbah laundry perlu diolah karena dapat menyebabkan eutrofikasi. Eutrofikasi di badan air dapat berdampak langsung bagi makhluk hidup. Selain itu, banyaknya pemanfaatan singkong sebagai bahan makanan berpotensi menghasilkan limbah biomassa seperti kulit singkong. Limbah kulit singkong mengandung karbon dan selulosa yang baik untuk dijadikan karbon aktif. Salah satu metode yang efektif, efisien, dan murah untuk menurunkan konsentrasi fosfat adalah adsorpsi menggunakan karbon aktif. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh dosis dan waktu kontak untuk menurunkan fosfat dalam air limbah laundry artificial serta menentukan kinetika adsorpsi yang terjadi. Penelitian dilakukan secara batch menggunakan variasi dosis adsorben 2-10 gr/L dan waktu kontak 15-120 menit dengan kecepatan pengadukan 110 RPM. Karbon aktif dihasilkan melalui proses karbonisasi kulit singkong dan aktivasi dengan NaOH 0,3 N. Hasil penyisihan optimum sebesar 8% didapatkan pada dosis adsorben 4 gr/L dengan waktu kontak 60 menit. Kinetika adsorpsi yang didapatkan termasuk model Orde Dua Semu.

Kata kunci: Adsorpsi, Fosfat, Karbon Aktif, Kulit Singkong, Limbah Laundry.

ABSTRACT

High phosphate concentrations in laundry wastewater should be treated because it can cause eutrophication. Eutrophication in water bodies can have a direct impact on living things. On the other hand, the massive utilization of cassava as a food is potentially to produce biomass waste in the form of cassava peel. Cassava peel waste contains carbon and cellulose which are suitable as raw material for activated carbon. The effective, efficient, and inexpensive method to reduce phosphate concentration is adsorption using activated carbon. This study aims to analyze the effect of dose and contact time to reduce phosphate in artificial laundry wastewater and determine the adsorption kinetics that occur. The study was conducted in batches using variations in adsorbent doses of 2-10 gr/L and contact times of 15-120 minutes with a stirring speed of 110 RPM. Activated carbon is produced through the carbonization process of cassava peel and activation with 0.3 N NaOH. The optimum removal result of 8% was obtained at an adsorbent dose of 4 gr/L with a contact time of 60 minutes. The adsorption kinetics obtained include the Pseudo Second Order model.

Keywords: Adsorption, Activated Carbon, Cassava Peel, Laundry Wastewater, Phosphate

1. PENDAHULUAN

Deterjen merupakan sabun pembersih yang digunakan pada usaha *laundry*. Deterjen akan terlarut ke dalam sisa air cucian dan terbuang bersama air limbah *laundry*. Komposisi deterjen yakni surfaktan 20-30%, fosfat 70-80%, serta bahan aditif seperti pewangi 2-8% (Suharto dkk., 2020; Apriyani, 2018). Penelitian Netoa dkk. (2021) mendapatkan bahwa konsentrasi fosfat di air limbah *laundry* mencapai 15-29 mg/L, dimana melebihi baku mutu sebanyak 5 mg/L (Peraturan Daerah DIY, 2016). Konsentrasi fosfat melebihi 5 mg/L di badan air menyebabkan eutrofikasi, karena fosfat merupakan sumber nutrisi bagi fitoplankton (Hakim, 2016). Tingginya nutrisi dalam air mengakibatkan pertumbuhan fitoplankton dan alga yang sangat cepat. Alga dan fitoplankton juga memanfaatkan oksigen terlarut, sehingga biota air dapat kekurangan oksigen dan perlahan mengalami kematian (Garmini dan Zairinayati, 2022). Selain itu, busa di permukaan air karena limbah *laundry* juga dapat menghambat masuknya cahaya dan oksigen ke badan air yang mempengaruhi bau dan warna (Purnama dan Purnama, 2015).

Air limbah *laundry* dengan konsentrasi fosfat yang tinggi perlu diolah untuk mencegah pencemaran di badan air. Penyisihan fosfat dapat dilakukan secara adsorpsi, koagulasi-flokulasi, presipitasi kimia, maupun biologis. Efisiensi metode adsorpsi tergolong rendah (40-75%), namun metode ini mudah diterapkan, murah, cepat, ramah lingkungan, serta menghasilkan sedikit lumpur sebagai sisa pengolahan (Indah dkk., 2022). Mekanisme adsorpsi yakni polutan akan terserap pada permukaan adsorben yang digunakan. Karbon aktif memiliki efektivitas yang tinggi untuk menyerap fosfat karena memiliki ukuran pori-pori mencapai 90% dan porositas 500-1500 m²/gr (Fadarina dkk., 2021).

Karbon aktif dapat dihasilkan dengan memanfaatkan serabut kelapa, tempurung kelapa, daun nanas, kulit singkong, hingga arang pembakaran kayu (Abin-Bazaine dkk., 2022). Kulit singkong termasuk bahan yang dapat digunakan untuk membuat karbon aktif, karena mengandung unsur karbon (C) 59,31%; oksigen (O) 28,74%; air (H₂O) 11,4%; hidrogen (H) 9,78%; nitrogen (N) 2,06%, dan sulfur (S) 0,11% (Nakoe dkk., 2024). Selain itu, tanaman singkong sering dimanfaatkan sebagai campuran makanan oleh masyarakat Indonesia sehingga akan berbanding lurus dengan kulit singkong sebagai limbah. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa adsorben menggunakan kulit singkong mampu menyisihkan logam berat (Pb, Cu, Fe, Mn, Ni, dan Zn) dengan efisiensi mencapai 98% (Li dkk., 2019; Fadarina dkk., 2021; Netoa dkk., 2021). Selain itu, pemanfaatan biomassa kulit singkong dapat membantu mengurangi jumlah sampah organik yang tercipta.

Aktivasi kimia dapat meningkatkan luas permukaan dan pori-pori karbon aktif, sehingga dapat mempengaruhi efektivitas adsorpsi. Sebagai contoh, penyisihan fosfat dapat mencapai 0,26 mg/g dengan aktivator HCl dan mencapai 0,49 mg/g dengan aktivator KOH (Sailah dkk., 2020). Selain itu, aktivator lainnya seperti NaOH mampu menyisihkan Fe hingga 0,47 mg/L dan Mn 0,15 mg/L (Garmini dan Zairinayati, 2022). Pemanfaatan kulit singkong dalam pengolahan air masih jarang dilakukan, karena membutuhkan pengolahan tambahan. Melalui penelitian ini diharapkan menambah nilai manfaat dari kulit singkong dengan menganalisis kemampuan kulit singkong sebagai adsorben untuk adsorpsi fosfat dalam air limbah *laundry*. Penentuan efektivitas karbon aktif kulit singkong juga didukung dengan menguji luas permukaan dan gugus fungsi adsorben serta menentukan kinetika adsorpsi yang terjadi.

2. METODE

2.1 Pembuatan Adsorben

Adsorben atau karbon aktif dibuat dari kulit singkong. Kulit singkong diambil dari UMKM yang memproduksi makanan ringan di KM. 12 Balikpapan. Pertama, lapisan dalam kulit singkong dipisahkan dari lapisan luar yang tipis dan berwarna coklat. Lapisan dalam kulit singkong dicacah kasar, kemudian dicuci menggunakan air bersih. Selanjutnya, kulit singkong dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105°C selama 24 jam. Setelah kering, kulit singkong dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan ukuran 100 mesh. Serbuk kulit singkong diuapkan menggunakan *water bath* hingga asap putih hilang. Setelah asap putih hilang, selanjutnya dilakukan karbonisasi kulit singkong menggunakan *furnace* pada suhu 350°C selama 60 menit. Karbon kulit singkong kemudian diaktivasi melalui perendaman dengan larutan NaOH (Supelco, 99%) 0,3 N selama 24 jam. Setelah 24 jam, karbon kulit singkong teraktivasi dan dibilas menggunakan aquades dengan merendam sebanyak 3 (tiga) kali pada wadah yang berbeda-beda. Selanjutnya dikeringkan menggunakan oven pada suhu 110°C selama 2 jam. Karbon aktif kulit singkong siap digunakan.

2.2 Karakterisasi Adsorben

Gugus fungsi dari adsorben dianalisis melalui pengujian Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR, Perkin Elmer Spectrum BX) pada bilangan gelombang 400-4000 cm⁻¹. Analisis Brunauer–Emmett–Teller (BET, NOVA, 4200E) dilakukan untuk menganalisis luas permukaan, ukuran, dan volume pori dari adsorben yang digunakan.

2.3 Penelitian Adsorpsi

Penelitian adsorpsi dilakukan secara *batch* menggunakan limbah *laundry* artifical. Kecepatan pengadukan 110 RPM dan volume air limbah *laundry* artifisial yang digunakan adalah 100 mL. Limbah *laundry* artifical dibuat menggunakan KH₂PO₄ (Superlco, 99%) dan pH 8 dengan menambahkan NaOH (Supelco, 99%). Penelitian pendahuluan dimulai dengan pengujian pengaruh konsentrasi awal fosfat limbah *laundry* artifisial terhadap efisiensi penyisihan fosfat. Variasi fosfat pada uji pendahuluan adalah 5, 10, 15, dan 20 mg/L dan pengujian dilakukan dengan waktu kontak 60 menit dan dosis adsorben 6 g/L.

Penelitian adsorpsi dilakukan secara *batch* dengan variabel waktu kontak dan dosis adsorben. Variasi waktu kontak adalah 15, 30, 60, 90, dan 120 menit. Variasi dosis adsorben adalah 2, 4, 6, 8, dan 10 gr/L. Konsentrasi fosfat awal yang digunakan adalah konsentrasi awal yang didapatkan dari penelitian pendahuluan. Dosis karbon aktif dimasukkan ke dalam limbah *laundry* artifical, kemudian diaduk menggunakan *orbital shaker* sesuai waktu kontak dengan kecepatan 110 RPM. Setelah proses pengadukan selesai, pH akhir diukur serta adsorben dan filtrat dipisahkan menggunakan kertas saring Whatman ukuran 2,5 µm. Konsentrasi fosfat filtrat diukur sesuai prosedur Standar Nasional Indonesia atau SNI (SNI 6989.31-2005, 2005).

Efisiensi penyisihan konsentrasi fosfat dan kapasitas proses adsorpsi dihitung berdasarkan persamaan (1) dan (2).

$$\text{Efisiensi penyisihan fosfat (\%)} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Kapasitas adsorpsi (q)} = \frac{C_0 - C_1}{M} \times V \quad (2)$$

Data adsorpsi yang didapatkan kemudian dimodelkan menggunakan kinetika adsorpsi. Kinetika adsorpsi bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu kontak terhadap kinerja adsorben. Model dari kinetika adsorpsi yang digunakan adalah orde pertama semu dan orde kedua semu. Persamaan (3) – (6) digunakan untuk memodelkan kinetika adsorpsi

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (3)$$

$$\text{Log } (q_e - q_t) = \text{Log } q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (4)$$

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (5)$$

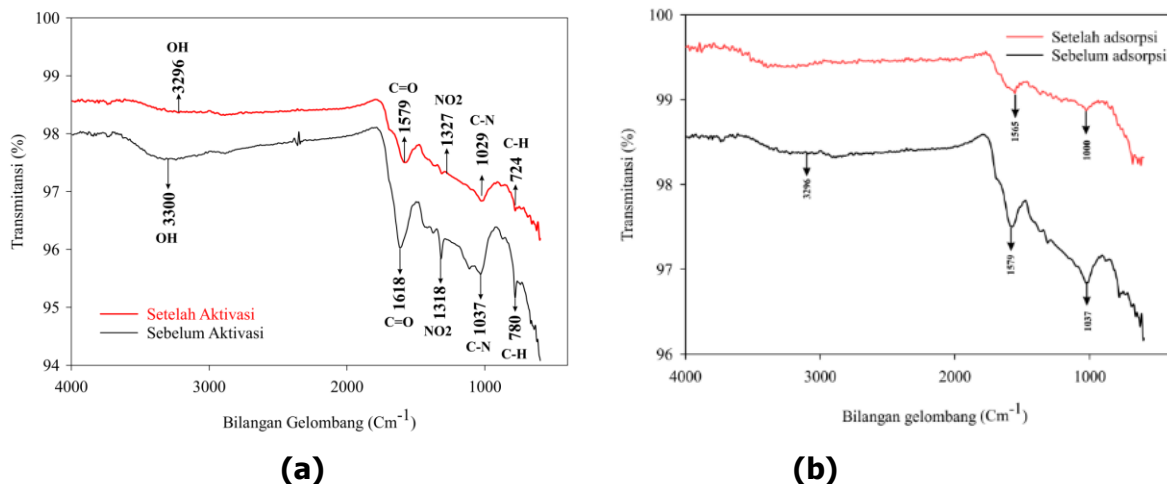
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (6)$$

Dimana q adalah kapasitas adsorpsi (mg/g), M = massa adsorben (g), V = volume larutan (mL), C_0 = konsentrasi awal (mg/L), C = konsentrasi akhir (mg/L), k_1 = Konstanta laju kinetik orde satu semu atau orde dua semu, q_e = jumlah adsorbat terserap saat setimbang (mg/g), q_t = jumlah zat terlarut saat waktu t (mg/g), dan t = waktu (menit).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Karbon Aktif Kulit Singkong

Hasil pengujian spektra FTIR dari karbon aktif kulit singkong sebelum dan sesudah aktivasi, serta setelah adsorpsi dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Spektra IR Karbon Aktif Kulit Singkong (a) Sebelum dan Sesudah Aktivasi dan (b) Setelah Adsorpsi

Pada Gambar 2 (a), gugus fungsi O-H ditemukan pada bilangan gelombang 3300 cm^{-1} untuk adsorben sebelum aktivasi. Vibrasi ulur O-H dari fenol, karboksil, dan ikatan hidrogen menunjukkan bahwa karbon kulit singkong memiliki kandungan air, lignin, dan selulosa (Park dkk., 2021). Pada bilangan 1618 cm^{-1} terdapat gugus fungsi C=O yang berupa unsur karbon pada adsorben kulit singkong. Kemudian, pada bilangan gelombang 1318 cm^{-1} terlihat adanya gugus fungsi NO_2 sebagai zat pengotor. Kehadiran gugus ini mengindikasikan bahwa proses karbonisasi tidak berlangsung optimal (Fadarina dkk., 2021). Selanjutnya, pada

bilangan gelombang 1037 cm^{-1} ditemukan gugus fungsi C-N. Pada bilangan gelombang 780 cm^{-1} ditemukan gugus fungsi C-H aromatik yang mengindikasikan bahwa karbon aktif kulit singkong mengandung alkena (Fadarina dkk., 2021). Keseluruhan gugus yang ditemukan tergolong gugus fungsi yang mengandung senyawa organik dan hemiselulosa, dimana baik untuk mengikat senyawa pengotor di air (Adelagun dkk., 2021; Photiou dkk., 2021).

Sesudah aktivasi kimia, beberapa gugus fungsi mengalami pergeseran bilangan gelombang. Gugus fungsi O-H bergeser dari bilangan gelombang 3300 cm^{-1} menjadi 3296 cm^{-1} . Pergeseran tersebut akibat H_2O , lignin, dan selulosa yang terdegradasi oleh aktivator. Gugus fungsi NO_2 juga sedikit bergeser dari gelombang 1318 cm^{-1} menjadi 1327 cm^{-1} dan puncak gugus fungsi mengalami penurunan. Secara umum, pergeseran dan penurunan puncak serapan menjelaskan bahwa aktivator cukup mempengaruhi proses adsorpsi. Aktivator tersebut berdampak pada keberadaan unsur pengotor (Fadarina dkk., 2021).

Hasil spektra IR setelah proses adsorpsi karbon aktif kulit singkong pada Gambar 2 (b) menunjukkan beberapa gugus fungsi menghilang. Sebelum adsorpsi, gugus hidroksil O-H ditemukan pada bilangan gelombang 3296 cm^{-1} , namun setelah adsorpsi gugus tersebut hilang. Hal serupa juga terjadi pada gugus fungsi C=O dan C-N. Saat proses adsorpsi, gugus fungsi memiliki peran mengikat senyawa pengotor karena adanya ikatan elektron antara adsorbat dan gugus fungsi (Adelagun dkk., 2021). Hilangnya beberapa gugus tersebut juga disebabkan oleh proses penguraian sehingga fosfat menggantikan keberadaan gugus O-H (Li dkk., 2019).

Hasil analisis BET dari karbon aktif kulit singkong sebelum dan sesudah aktivasi, serta sesudah adsorpsi dapat dilihat pada Tabel 1.

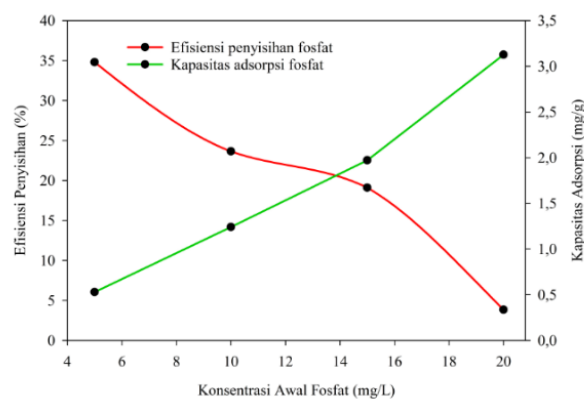
Tabel 1. Luas Permukaan serta Volume Pori Karbon Aktif Kulit Singkong Sebelum dan Setelah Aktivasi

Sampel	Luas Permukaan (m^2/g)	Total Volume Pori (cc/g)	Diameter Pori (nm)
Sebelum Aktivasi	0,00001	0,000185	3,77
Setelah Aktivasi	0,346	0,00164	9,48

Aktivasi kimia berpengaruh pada luas permukaan dan volume pori. Sebelum aktivasi, luas permukaan adsorben adalah $0,00001\text{ m}^2/\text{g}$. Setelah diaktivasi meningkat jadi $0,346\text{ m}^2/\text{g}$. Nilai tersebut masih di bawah luas permukaan karbon aktif komersial sebesar $500\text{-}1500\text{ m}^2/\text{g}$ sehingga perlu adanya penyesuaian aktivator (Suprabawati dkk., 2018). Peningkatan luas permukaan adsorben disebabkan oleh hilangnya unsur pengotor seperti zat mineral organik dan tar sisa karbonisasi di permukaan karbon aktif kulit singkong (Li dkk., 2019). Nilai awal volume dan diameter pori karbon aktif kulit singkong adalah $0,000185\text{ cc/g}$ dan $3,77\text{ nm}$, kemudian setelah aktivasi menjadi $0,00164\text{ cc/g}$ dan $9,48\text{ nm}$. Bertambahnya ukuran volume dan diameter pori karbon aktif tersebut akibat teresap senyawa aktivator ke dalam karbon aktif. Peresapan tersebut lalu membuka ruang pada pori-pori sehingga ukuran volume dan diameter pori meningkat. Berdasarkan klasifikasi, karbon aktif kulit singkong yang dihasilkan termasuk material mesopori karena memiliki diameter pada rentang $2 - 50\text{ nm}$ (Apriyani, 2018).

3.2 Pengaruh Konsentrasi Awal Fosfat terhadap Efisiensi Penyisihan dan Kapasitas Adsorpsi

Gambar 3 menunjukkan pengaruh konsentrasi awal fosfat terhadap efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi. Dari gambar 3 dapat disimpulkan bahwa efisiensi penyisihan berbanding terbalik dengan konsentrasi awal fosfat. Penyisihan sebesar 34% didapatkan saat konsentrasi fosfat 5 mg/L. Ketika konsentrasi meningkat menjadi 20 mg/L, penyisihan hanya sebesar 3%. Kondisi tersebut diakibatkan oleh proses desorpsi, dimana jumlah *active site* tidak sebanding dengan konsentrasi fosfat di larutan, sehingga karbon lebih cepat jenuh (Photiou dkk., 2021). Kapasitas adsorpsi fosfat berbanding lurus terhadap konsentrasi awal fosfat. Konsentrasi awal yang meningkat dari 5 mg/L menjadi 20 mg/L menaikkan kapasitas adsorpsi dari 0,6 mg/g menjadi 3,4 mg/L. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh peningkatan *driving force* karbon aktif (Adelagun dkk., 2021). *Driving force* pada konsentrasi tinggi dapat mengatasi resistensi perpindahan massa antara adsorbat dan adsorben sehingga memudahkan adsorben menangkap adsorbat (Garmini dan Zairinayati, 2022). Semakin tinggi konsentrasi fosfat, maka semakin banyak *active site* adsorben yang dibutuhkan (Mei dkk., 2020). Konsentrasi fosfat 10 mg/L menunjukkan efisiensi penyisihan tertinggi kedua dan telah melebihi baku mutu, sehingga nilai tersebut digunakan pada penelitian ini.

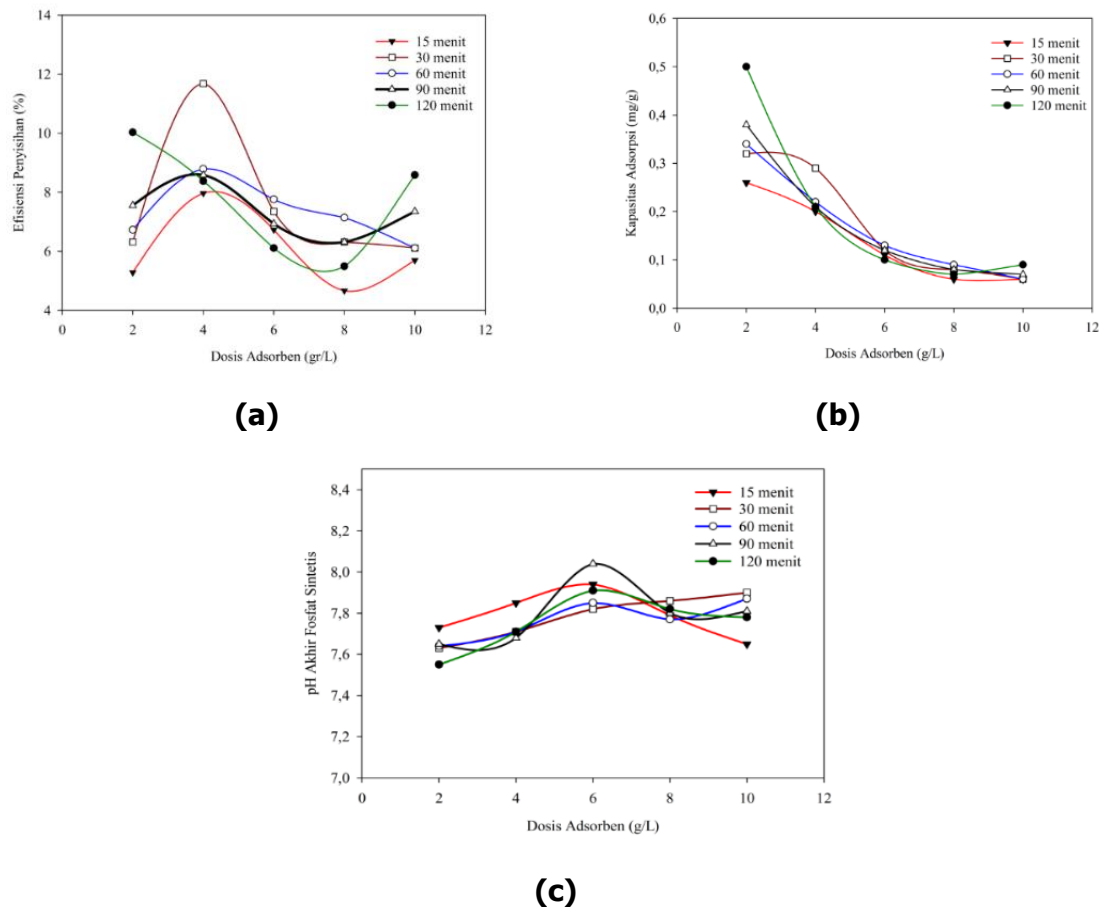


Gambar 3. Grafik Konsentrasi Awal Fosfat

3.3 Pengaruh Dosis Karbon Aktif

Dosis karbon aktif yang ditambahkan dapat berpengaruh terhadap efisiensi penyisihan fosfat, kapasitas adsorpsi, dan nilai pH. Pengaruh tersebut dapat dilihat pada Gambar 4. Peningkatan dosis adsorben berpengaruh fluktuatif terhadap efisiensi penyisihan fosfat. Pada Gambar 4 (a), dosis 2-4 gr/L mengalami peningkatan efisiensi dari 5% menjadi 8,8%. Peningkatan tersebut disebabkan oleh *active site* dan luas permukaan karbon aktif yang bertambah (Photiou dkk., 2021). Sebaliknya, rentang dosis 6-8 gr/L mengalami penurunan nilai efisiensi. Penurunan dapat disebabkan oleh berkurangnya *active site* karena jenuh sehingga fosfat terlepas (Indah dkk., 2022). Ketika dosis adsorben 10 gr/L, didapatkan efisiensi penyisihan kembali meningkat sebesar 6%. Hal tersebut disebabkan karena senyawa fosfat yang telah mengalami desorpsi, teradsorpsi kembali pada adsorben dikarenakan masih adanya *site active* pada adsorben (Trinh dkk., 2020). Dosis optimum karbon aktif untuk penyisihan fosfat adalah 4 gr/L dengan efisiensi penyisihan di rentang 7,2-8%. Pada penelitian ini didapatkan efisiensi yang rendah akibat karbon aktif kulit singkong tidak mampu mengadsorpsi fosfat. Ketidakkampuan karbon aktif mengadsorpsi fosfat disebabkan penggunaan konsentrasi aktivator saat proses aktivasi yang rendah hanya 0,3 N

sehingga pori-pori dan luas permukaan adsorben tidak terbuka secara optimal (Sailah dkk., 2020). Hal tersebut dibuktikan dengan hasil uji BET berupa nilai luas permukaan ($0,346 \text{ m}^2/\text{g}$) dan volume pori ($0,00164 \text{ cc/g}$) yang kecil.



Gambar 4. Pengaruh Dosis Karbon Aktif Terhadap (a) Efisiensi Penyisihan Fosfat, (b) Kapasitas Adsorpsi, dan (c) Nilai pH

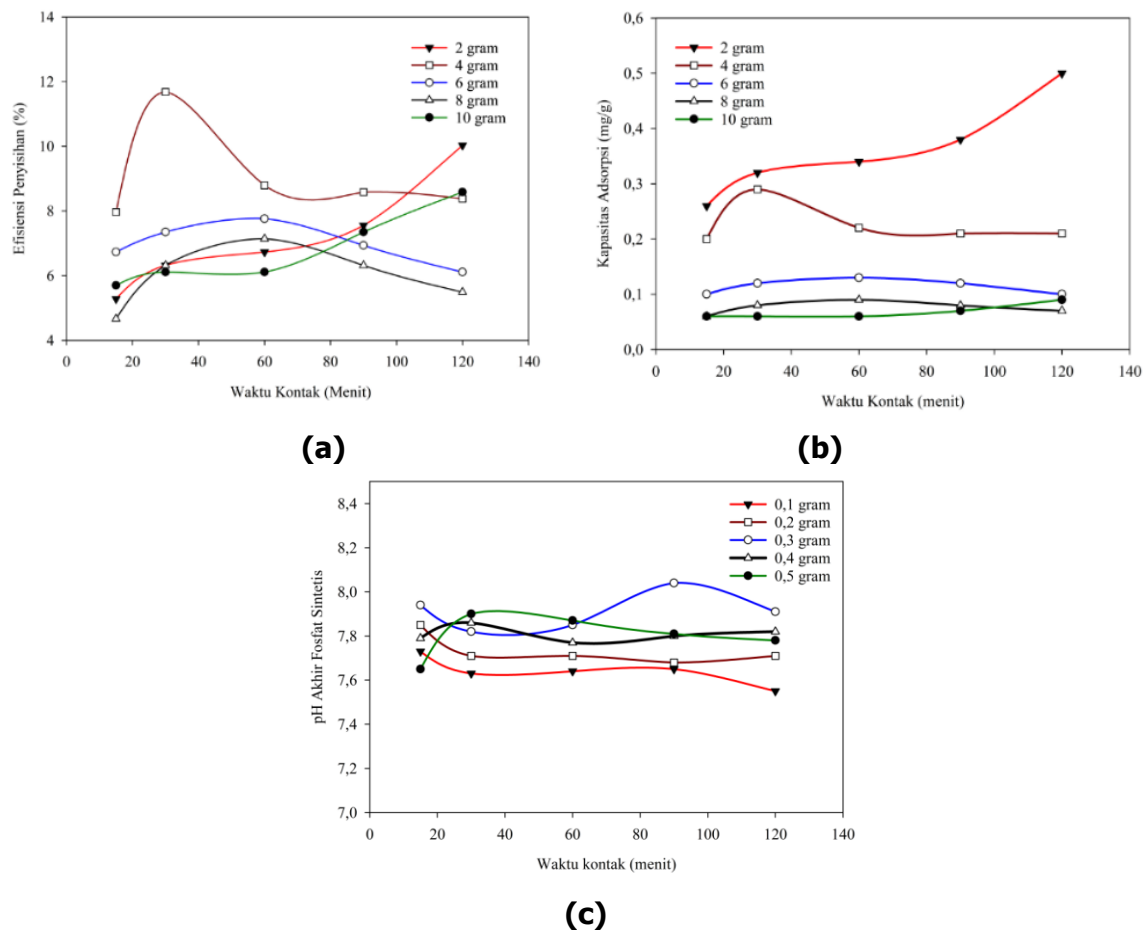
Peningkatan dosis menyebabkan kapasitas adsorpsi mengalami penurunan. Pada Gambar 3 (b), nilai optimum sebesar $0,5 \text{ mg/g}$ didapatkan pada dosis adsorben 2 gr/L . Penurunan kapasitas adsorpsi dapat disebabkan oleh penumpukan adsorben saat penambahan dosis sehingga terjadi tumpang tindih antar adsorben dan menghalangi adsorbat menempel pada permukaan *site active* adsorben (Alongamo dkk., 2021). Semakin banyak dosis adsorben dapat membentuk gumpalan adsorben dan mempengaruhi total luasan situs aktif untuk menjerat adsorbat (Fadarina dkk., 2021).

Penambahan dosis adsorben berbanding lurus terhadap pH. Peningkatan pH dapat dihubungkan dengan derajat ionisasi dan tegangan permukaan antara adsorben dengan adsorbat (Zha dkk., 2018). Nilai pH awal larutan diatur pada pH 8, kemudian saat ditambahkan dosis adsorben hingga 2 g/L mempengaruhi penurunan menjadi 7,5. Hal ini disebabkan saat penambahan dosis karbon aktif, terjadi pelepasan ion $\text{H}^{(+)}$ dan mengakibatkan permukaan adsorben memiliki muatan negatif sehingga karbon aktif

terdeprotonisasi atau kurang optimal dalam mengadsorpsi fosfat (Park dkk, 2021; Xu dkk., 2018; Zha dkk., 2018; Zhong dkk., 2019). Hal tersebut juga dapat dibuktikan dengan efisiensi penyisihan fosfat yang hanya 8%. Pada penambahan dosis 2 – 6 g/L terjadi kenaikan nilai pH dari 7,5 menjadi 7,9. Peningkatan pH terhadap penambahan dosis adsorben dapat disebabkan oleh meningkatnya ion hidroksida atau OH^- . Peningkatan ion hidroksida terjadi karena karbon aktif kulit singkong yang teraktivasi basa mengandung ion OH^- dan berkontak dengan fosfat yang juga memiliki muatan yang sama. Muatan yang sama menyebabkan tolak-menolak antara ion OH^- dan meningkatkan pH larutan (Zhong dkk., 2019). Pengujian statistik menggunakan metode Kruskal-Wallis mendapatkan bahwa dosis adsorben berpengaruh signifikan terhadap proses adsorpsi fosfat karena nilai $p\text{-value} < 0,05$.

3.4 Pengaruh Waktu Kontak

Pengaruh waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan fosfat, kapasitas adsorpsi, dan nilai pH dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Pengaruh Waktu Kontak Terhadap (a) Efisiensi Penyisihan Fosfat, (b) Kapasitas Adsorpsi, dan (c) Nilai pH

Gambar 5 (a) menampilkan pengaruh waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan fosfat. Pada rentang waktu 20-60 menit, didapatkan efisiensi penyisihan fosfat optimum pada 11%. Ketika waktu kontak terus ditingkatkan hingga 100 menit, efisiensi penyisihan pada masing-masing dosis mengalami penurunan hingga 5,5%. Menurut Indah dkk (2022), penurunan dipengaruhi oleh titik jenuh adsorben sehingga penyerapan fosfat mengalami desorpsi. Pada dosis 4; 6; dan 8 gram, semakin lama waktu kontak yang mendekati 120 menit akan

mempengaruhi efisiensi penyisihan yang semakin menurun. Sebaliknya, pada dosis 2 dan 10 gram terus mengalami peningkatan. Peningkatan tersebut dapat mencapai dua kali dari 5,2%, yakni sebesar 10,2%. Peningkatan efisiensi penyisihan fosfat berjalan lambat karena karbon aktif belum menemukan titik jenuhnya pada rentang waktu kontak yang ditentukan, sehingga membutuhkan waktu lebih lama hingga karbon aktif dapat menyerap fosfat secara optimal dan mencapai titik jenuh (Fadarina dkk., 2021). Waktu kontak optimum pada penelitian ini adalah pada menit ke-60.

Pengaruh variasi waktu kontak terhadap kapasitas adsorpsi dapat dilihat pada Gambar 5 (b). Pada dosis 2 dan 4 gram dengan waktu kontak 20-60 menit, kapasitas adsorpsi mengalami peningkatan yang cepat dari 0,2 menjadi 0,32 mg/g. Pada dosis 2 gram juga menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi secara signifikan mencapai 0,5 mg/g, karena *active site* semakin luas dan rendahnya tumpang-tindih antar adsorben (Park dkk., 2021). Sebaliknya, pada dosis 6 dan 8 gram peningkatan berjalan lambat. Peningkatan yang lambat dipengaruhi oleh deprotonisasi sehingga membutuhkan waktu lebih lama untuk adsorpsi (Zhong dkk., 2019). Selanjutnya, pada dosis 10 gram terjadi penurunan kapasitas adsorpsi akibat pengaruh tingkat kejenuhan, kurangnya *active site*, serta desorpsi adsorpsi. Kapasitas adsorpsi pada rentang waktu 60-120 menit dengan dosis 4-10 gram terlihat konstan sebesar 0,1 mg/g. Meningkatkan waktu kontak tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap perubahan pH pada Gambar 5 (c). Fenomena ini terjadi pada seluruh variasi dosis adsorben yang digunakan. Walau terlihat fluktuatif, namun nilai pH dari seluruh variasi dosis adsorben masih berada dalam rentang 7,6-7,9. Pengujian statistik menggunakan metode Kruskal-Wallis mendapatkan bahwa waktu kontak tidak berpengaruh signifikan terhadap proses adsorpsi karena nilai *p-value* > 0,05.

3.5 Kinetika Adsorpsi

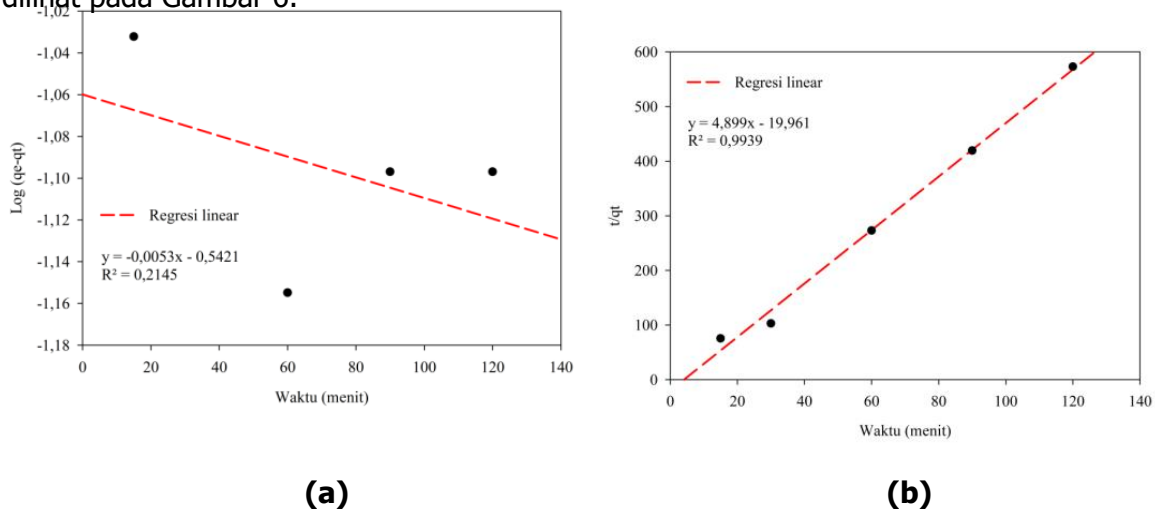
Laju reaksi adsorpsi fosfat dapat ditentukan melalui kinetika adsorpsi. Grafik model kinetika adsorpsi orde satu semu dan orde dua semu ditunjukkan pada Gambar 6 dan koefisien kinetika pada Tabel 2.

Tabel 2. Koefisien Korelasi Model Kinetika Adsorpsi

Orde Satu Semu	
R^2	0,1968
q_e (mg/g)	0,087
K_1	2,4408
Orde Dua Semu	
R^2	0,9939
$q_e \text{ exp}$ (mg/g)	0,29
q_e (mg/g)	0,2041
K_2 (g/mg menit)	1,2024

Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai R^2 adalah 0,99 sehingga kinetika adsorpsi yang terjadi adalah orde dua semu. Pada orde tersebut menunjukkan bahwa adsorpsi terjadi secara kimia atau *chemisorption* akibat pertukaran elektron antara adsorben dan adsorbat (Mei dkk.,

2020). Konstanta laju reaksi (K_2) pada orde dua semua adalah $1,2024 \times 10^{-3}$ g/mg menit. Nilai konstanta laju reaksi yang semakin kecil mengindikasikan bahwa laju reaksi akan semakin cepat (Li dkk., 2019). Penetapan model kinetika adsorpsi orde dua semua juga didukung dengan nilai kapasitas adsorpsi (q_e) sebesar 0,20 mg/g dimana mendekati nilai pengujian kapasitas adsorpsi ($q_e \text{ exp}$) sebesar 0,29 mg/g. Korelasi model kinetika adsorpsi juga dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Linear Kinetika Adsorpsi (a) Orde Satu Semu; (b) Orde Dua Semu

4. KESIMPULAN

Aktivasi kimia dengan NaOH mampu menurunkan pengotor pada karbon aktif kulit singkong, tetapi luas permukaan karbon aktif hanya $0,346 \text{ m}^2/\text{g}$. Dosis adsorben karbon aktif kulit singkong memiliki pengaruh signifikan untuk menurunkan kadar fosfat daripada variabel waktu kontak. Dosis adsorben optimum sebesar 4 gr/L mampu menyisihkan fosfat sebanyak 8%, sedangkan waktu kontak optimum pada menit ke-60 hanya 7,5-7,8%. Kinetika adsorpsi yang didapatkan termasuk ke dalam model orde dua semua, sehingga laju reaksi adsorpsi terjadi secara kimia atau *chemisorption*. Bentuk pengembangan untuk meningkatkan kemampuan karbon aktif kulit singkong dapat dilakukan dengan meningkatkan konsentrasi NaOH (proses aktivasi) pada rentang 2-4 M.

DAFTAR PUSTAKA

- Abin-Bazaine, A., Campos Trujillo, A. and Olmos-Marquez, M. (2022). Adsorption isotherms: enlightenment of the phenomenon of adsorption. London: Intechopen Press.
- Adelagun, R. O. A. (2021). Kinetics of phosphate adsorption by ca/cr layered double hydroxide. Africa: Environmental Science and Technology, 15(2), pp. 109–116.
- Alongamo, B. A. A. (2021). Activated carbon from the peelings of cassava tubers (manihot esculenta) for the removal of nickel(ii) ions from aqueous solution. Chemistry, 2021, pp. 110-124.
- Apriyani, N. (2018). Industri batik: kandungan limbah cair dan metode pengolahannya. Palangkaraya: Media Ilmiah Teknik Lingkungan, Universitas Muhammadiyah

- Palangkaraya, 3(1), pp. 21–29.
- Fadarina, Sari, I. P. dan Harahap, H. R. (2021). Pengolahan air buangan limbah laundry menggunakan bottom ash sebagai media adsorpsi. Palembang: Jurnal Kinetika, Politeknik Negeri Sriwijaya, 12(02), pp. 21–28.
- Garmini, R. dan Zairinayati (2022). Penurunan kadar fosfat limbah cair usaha laundry dengan karbon aktif sekam padi. Palembang: Jurnal Delima Harapan, 01 (02), pp. 71–76.
- Hakim, L. (2016). Pengolahan limbah laundry dengan menggunakan tanaman kenaf (*hibiscus cannabinus* L.). Repository ITS, pp. 1–77.
- Indah, S., Helard, D. dan Lathifatu Zahrah, S. (2022). Penyisihan fosfat dari air limbah artifisial laundry memanfaatkan kulit jagung sebagai adsorben. Jurnal Litbang Industri, 12(1), pp. 33–46.
- Li, C., Yu, Y., Li, Q., Zhong, H. (2019). Kinetics and equilibrium studies of phosphate removal from aqueous solution by calcium silicate hydrate synthesized from electrolytic manganese residue. Adsorption Science and Technology, 37 (7–8), pp. 547–565.
- Mei, Y., Zhu, X., Gao, L., Zhou, H. (2020). Phosphorus adsorption/desorption kinetics of bioretention. Thermal Science, 24(04), pp. 2401–2410.
- Nakoe, M. R., Ahmad, Z. F. dan Arsad, N. (2024). Pemanfaatan limbah kulit singkong sebagai adsorben alami untuk mengurangi kadar besi (Fe) pada air sumur. 1(3), pp. 48–53.
- Netoa, C., Costa, W., Sousa, E., Faria, L. (2021). Phosphorus adsorption in aqueous medium using biocarbon from cassava agricultural residue (*Manihot esculenta*), Conference paper EBA13.
- Park, J. H., Hwang, S., Lee, S., Lee, J. (2021). Sorption behavior of phosphate by fly ash discharged from biomass thermal power plant. Applied Biological Chemistry, 64(1), pp. 64–73.
- Peraturan Daerah DIY (2016). Peraturan daerah daerah istimewa Yogyakarta tentang baku mutu air limbah. Daerah Istimewa Yogyakarta.
- Photiou, P., Koutsokeras, L., Constantinides, G., Koutinas, M., Vyrides, I. (2021). Phosphate removal from synthetic and real wastewater using thermally treated seagrass residues of *Posidonia oceanica*. Cleaner Production, 278 (1), pp. 12–29.
- Purnama, I. G. H. dan Purnama, S. G. (2015). Pengolahan air limbah binatu (laundry) dengan menggunakan metode lahan basah buatan (horizontal sub surface flow constructed wetlands). Surface & Coatings Technology, 15(01), pp. 1–64.
- Republik Indonesia. 2005. Standar Nasional Indonesia Tentang Cara Uji Kadar Fosfat dengan Spektrofotometer Secara Asam Askorbat. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Sailah, I., Mulyaningsih, F., Ismayana, A., Puspaningrum, T. (2020). Kinerja karbon aktif dari kulit singkong dalam menurunkan konsentrasi fosfat pada air limbah laundry. Bogor: Teknologi Industri Pertanian, 30(2), pp. 180–189.
- Suharto, B., Anugroho, F. dan Putri, F. K. (2020). Degradation phosphate level of laundry wastewater using column adsorption with granular activated carbon (GAC) media. Sumberdaya Alam dan Lingkungan, 7(1), pp. 36–46.
- Suprabawati, A., Holiyah, N. W., Jasmansyah (2018). Kulit singkong (*manihot esculenta* crantz) sebagai karbon aktif dengan berbagai langkah pembuatan untuk adsorpsi ion logam timbal (Pb^{2+}) dalam air. Kartika Kimia, 1(1), pp. 21–28.
- Trinh, V. T., Nguyen, T., Van, H., Phuong, H. (2020). Phosphate adsorption by silver nanoparticles-loaded activated carbon derived from tea residue. Scientific Reports, 10(1), pp. 1–14.
- Xu, G., Zhang, Z. and Deng, L. (2018). Adsorption behaviors and removal efficiencies of inorganic, polymeric and organic phosphates from aqueous solution on biochar derived from sewage sludge of chemically enhanced primary treatment process.

- Water, 10(7). pp. 36-44.
- Zha, Z., Ren, Y., Wang, S., Qian, Z. (2018). Phosphate adsorption onto thermally dehydrated aluminate cement granules. RSC advances, 8(34), pp. 19326–19334.
- Zhong, Z., Yu, G., Mo, W., Zhang, C. (2019). Enhanced phosphate sequestration by Fe(III) modified biochar derived from coconut shell. RSC Advances, 9(18), pp. 10425–10436.