

Pemanfaatan Lumpur dari Instalasi Pengolahan Air Limbah Terpadu Kawasan Industri sebagai Adsorben dalam Penghilangan Metilen Biru

Wa Ode Maryani Asrim*, Radjali Amin, dan Triyono

Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Fakultas Pascasarjana, Institut Teknologi Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia; e-mail: yaniwaode@gmail.com

ABSTRAK

Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Terpadu Kawasan Industri menghasilkan lumpur yang termasuk Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (LB3), tetapi kandungan karbon dalam lumpur berpotensi dimanfaatkan sebagai adsorben. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi karakteristik fisik-kimia dan kinerja adsorpsi adsorben berbasis lumpur IPAL terpadu kawasan industri dalam penyisihan metilen biru (MB) serta mengevaluasi penggunaan media penyaring lumpur berupa *nylon* dan kertas saring dalam pembuatan adsorben. Adsorben dibuat melalui serangkaian persiapan lumpur, pirolisis, dan aktivasi menggunakan larutan KOH. Karakterisasi dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy (SEM)*, *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)*, dan Brunauer-Emmett-Teller (BET). Uji adsorpsi *batch* dilakukan dengan variasi massa adsorben (0,05, 0,1, dan 0,25 g), waktu kontak (5, 10, 20, 30, dan 60 menit), dan konsentrasi awal MB (5, 10, 25, 50, dan 100 ppm). Berdasarkan penelitian, adsorben yang dibuat dengan penyaring *nylon* menunjukkan karakteristik dan kinerja yang lebih baik dibanding kertas saring. Adsorben memiliki porositas dan permukaannya tersusun dari unsur utama C, O, Al, dan Si. Adsorben dengan penyaringan *nylon* memiliki luas permukaan spesifik 127,1 m²/g dengan kandungan karbon sebesar 39,3%, sedangkan adsorben dengan penyaringan kertas saring sebesar 65,5 m²/g dan 15,6%. Kondisi optimum diperoleh dari massa adsorben seberat 0,1 g, waktu kontak selama 30 menit, dan konsentrasi awal MB yaitu 10 ppm yang menghasilkan persentase penyisihan MB sebesar 90,8%. Model Isoterm Langmuir memberikan kecocokan yang lebih tinggi ($R^2 = 0,9989$) dibandingkan Freundlich ($R^2 = 0,9503$), yang menunjukkan kecenderungan adsorpsi monolayer pada permukaan relatif homogen. Hasil ini menunjukkan potensi pemanfaatan lumpur IPAL yang dapat diaplikasikan dalam pengolahan air limbah secara berkelanjutan.

Kata kunci: adsorben, adsorpsi, aktivasi, lumpur IPAL, metilen biru, pirolisis

ABSTRACT

Integrated Industrial Wastewater Treatment Plants (WWTPs) generate sludge classified as hazardous and toxic waste (LB3); however, its carbon content offers potential for use as an adsorbent. This study aimed to evaluate the physicochemical characteristics and adsorption performance of an adsorbent derived from integrated industrial WWTP sludge for methylene blue (MB) removal and to evaluate the use of nylon and filter paper as sludge filtration media. The adsorbent was prepared through sludge preparation, pyrolysis, and KOH activation. Characterization was conducted using Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), and Brunauer-Emmett-Teller (BET) analysis. Batch adsorption experiments were conducted by varying adsorbent mass (0.05, 0.1, and 0.25 g), contact time (5, 10, 20, 30, and 60 min), and initial MB concentration (5, 10, 25, 50, and 100 ppm). The nylon-filtered adsorbent exhibited better characteristics and adsorption performance than the filter-paper-filtered adsorbent. The nylon filtered adsorbent had a specific surface area of 127.1 m²/g and carbon content of 39.3%, compared with 65.5 m²/g and 15.6%, respectively, for the filter paper filtered adsorbent. Optimum conditions were obtained at an adsorbent mass of 0.1 g, contact time of 30 min, and initial MB concentration of 10 ppm, achieving 90.8% MB removal. The Langmuir isotherm showed a better fit ($R^2 = 0.9989$) than the Freundlich model ($R^2 = 0.9503$), indicating a tendency toward monolayer adsorption on a relatively homogeneous surface. These findings demonstrate the potential of industrial WWTP sludge as an alternative adsorbent for sustainable wastewater treatment.

Keywords: adsorbent, adsorption, activation, WWTP sludge, methylene blue, pyrolysis

Citation: Asrim, W. O. M., Amin, R., dan Triyono. (2026). Pemanfaatan Lumpur dari Instalasi Pengolahan Air Limbah Terpadu Kawasan Industri sebagai Adsorben dalam Penghilangan Metilen Biru. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(4), 842-854, doi:10.14710/jil.24.4.842-854

1. PENDAHULUAN

Meningkatnya aktivitas industri dan kapasitas instalasi pengolahan air limbah (IPAL) menyebabkan produksi lumpur IPAL terus meningkat. Lumpur merupakan hasil samping pengolahan air limbah yang memerlukan tindakan, energi, dan biaya yang tinggi dalam pengelolaannya (Zeng et al., 2021). Limbah lumpur mengandung beragam kandungan material dan senyawa seperti polimer ekstraseluler, sel mikroba, mineral serta nutrisi (Setiawan et al., 2021). Kandungan senyawa organik dan anorganik tersebut memberikan potensi bagi lumpur IPAL untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku adsorben dalam penyisihan polutan. Konversi lumpur menjadi bahan adsorben mencakup perlakuan termal dan aktivasi secara kimia (Akhtar et al., 2024). Pemanfaatan tersebut tidak hanya mengurangi jumlah lumpur yang harus dikelola, tetapi juga menghasilkan adsorben bernilai tambah untuk aplikasi pengolahan air limbah.

Dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup mengategorikan limbah lumpur yang dihasilkan dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Terpadu kawasan industri ke dalam limbah bahan berbahaya dan beracun (LB3). Pengelolaan lumpur umumnya melibatkan pihak ketiga sehingga dapat meningkatkan biaya operasional pengelolaan IPAL. Di lain sisi, Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021 tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah dan Bahan Berbahaya dan Beracun dalam pasal 106 menyatakan bahwa pemanfaatan limbah dapat dilakukan sesuai dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Aturan ini mendukung agar industri dapat memanfaatkan limbah B3 yang dihasilkan untuk meminimalkan potensi pencemaran lingkungan dan biaya pengelolaan.

Pengelolaan lumpur secara konvensional umumnya dilakukan melalui *landfill*, insinerator, dan berbagai pemanfaatan yang sesuai peraturan (Ferrentino et al., 2020). Pengolahan dengan cara pembakaran limbah di insinerator dapat mengurangi volume limbah dan menghasilkan energi, tetapi berpotensi menghasilkan senyawa berbahaya serta abu yang memerlukan pengelolaan lebih lanjut. Sementara itu pengelolaan dengan sistem *landfill* memiliki keterbatasan dengan semakin berkurang lahan di perkotaan dan memiliki potensi mengontaminasi tanah dan air tanah jika tidak dilakukan pengelolaan dengan baik. Oleh karena itu, perlu diteliti terkait teknologi pemanfaatan berkelanjutan dalam pengelolaan limbah lumpur. Dua metode yang telah diteliti selama dua dekade terakhir yaitu metode pirolisis dan aktivasi telah banyak digunakan untuk meningkatkan manfaat lumpur (Villamil et al., 2020). Pirolisis dipilih karena mampu mengurangi volume lumpur sekaligus mengonversi fraksi organiknya menjadi biochar yang kaya karbon. Aktivasi kimia menggunakan KOH

selanjutnya meningkatkan pembentukan struktur pori dan luas permukaan spesifik adsorben sehingga kapasitas adsorpsinya menjadi lebih tinggi. Kombinasi pirolisis dan aktivasi KOH dapat menghasilkan adsorben berbasis lumpur dengan karakteristik yang lebih baik (Mian et al., 2023).

Sejumlah penelitian telah menunjukkan potensi lumpur sebagai bahan baku adsorben untuk penyisihan berbagai polutan. Limbah lumpur mengandung bahan organik yang cukup tinggi dan sering diusulkan sebagai alternatif memproduksi karbon aktif melalui proses pirolisis. Hal ini karena limbah lumpur memiliki kandungan bahan organik mencapai 60% berat kering (Matheri et al., 2020). Matheri et al. (2020) mengembangkan adsorben berbasis lumpur melalui proses pirolisis untuk penyisihan Cu, Co, dan Ni, sedangkan Setiawan et al. (2021) menggunakan adsorben berbasis lumpur aktif industri gula untuk penyisihan Cu. Ferrentino et al. (2020) melaporkan pemanfaatan adsorben berbasis lumpur untuk penyisihan zat warna metilen biru (MB), sementara Lestari et al. (2020) mengembangkan adsorben dari lumpur pengolahan air minum untuk penyisihan Pb. Berbagai penelitian menunjukkan adsorpsi logam berat dengan adsorben dari lumpur sangat menjanjikan, ramah lingkungan, dan biaya lebih rendah (Rajakaruna et al., 2023). Menurut Hamad & Idrus (2022), sepanjang tahun 2008 hingga 2021, publikasi yang dilakukan dari penelitian adsorben berbasis lumpur hanya sebanyak 3% dan tertinggi yaitu penelitian adsorben dari limbah pertanian. Namun, penelitian tersebut umumnya berfokus pada optimasi kondisi sintesis, jenis aktivator, atau kondisi adsorpsi, serta masih didominasi penggunaan lumpur IPAL domestik atau lumpur dari industri tertentu, sedangkan penelitian pemanfaatan lumpur IPAL terpadu kawasan industri sebagai bahan baku adsorben masih terbatas baik di Indonesia maupun secara global. Demikian pula dalam tahap persiapan bahan baku, khususnya proses pemisahan padatan lumpur menggunakan media penyaring juga belum banyak dievaluasi. Padahal proses ini penting sebab padatan yang diperoleh pada tahap ini memengaruhi kualitas adsorben yang dihasilkan. Selain itu, evaluasi media penyaring memberikan informasi mengenai tahapan persiapan bahan yang berpotensi diterapkan pada pemanfaatan lumpur menjadi adsorben dalam skala yang lebih besar.

Salah satu media yang umum digunakan dalam pemisahan lumpur yaitu penyaring berbahan *nylon*. Bahan tersebut memiliki berbagai keunggulan, seperti ketahanan terhadap korosi, kemampuan meredam getaran, ukuran pori yang seragam, serta ekonomis dalam penggunaannya. Keunggulan lain yaitu tahan hingga suhu 150°C, serta memiliki kekuatan dan fleksibilitas yang tinggi (Sutherland, 2008). Pemilihan media penyaring merupakan salah satu faktor penting dalam pemisahan padat-cair lumpur karena karakteristik media, termasuk struktur dan permeabilitasnya, dapat memengaruhi

proses filtrasi, pembentukan *filter cake*, dan tingkat kekeringan lumpur (Vorobiev, 2024). Perbedaan media penyaring, terutama ukuran dan struktur pori, dapat menyebabkan perbedaan kemampuan retensi partikel selama proses filtrasi. Partikel yang berukuran lebih besar dari pori media cenderung tertahan pada permukaan dan membentuk *filter cake*, sedangkan partikel yang lebih kecil dapat masuk ke struktur media atau lolos bersama filtrat. Selain itu, distribusi pori dan struktur serat media penyaring turut memengaruhi mekanisme penyumbatan pori (*pore blocking*) dan pembentukan lapisan padatan sehingga menghasilkan karakteristik *filter cake* yang berbeda (Tarifa & Santos, 2024). Dengan demikian, penggunaan media penyaring yang berbeda, termasuk media berbahan *nylon* berpotensi menghasilkan karakteristik padatan lumpur yang berbeda. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan lumpur IPAL terpadu kawasan industri yang berstatus LB3 sebagai bahan baku pembuatan adsorben dan evaluasi media penyaring lumpur dalam tahap persiapan lumpur terhadap karakteristik fisik-kimia adsorben dan efektivitas penyisihan metilen biru (MB).

Salah satu polutan dalam air limbah yang mendapat perhatian khusus dalam penghilangannya yaitu zat warna. Penggunaan pewarna dalam industri dapat menyebabkan permasalahan pencemaran yang serius. Beberapa industri yang menggunakan pewarna meliputi industri pembuatan zat warna, makanan, kosmetik, *printing*, dan kulit. Selama proses produksinya, diperkirakan sekitar 15% zat warna dilepaskan sebagai limbah cair. Metilen biru (MB) merupakan zat pewarna dalam industri tekstil. MB diketahui bersifat *toxic*, mengandung bahan organik tinggi, kelarutan yang tinggi, dan sulit terdegradasi di lingkungan (Zeng et al., 2021). Pelepasan limbah yang mengandung MB ke lingkungan dapat menurunkan kualitas badan air dan mengganggu ekosistem perairan.

Dengan berbagai permasalahan yang dipaparkan, penelitian ini bertujuan mengevaluasi karakteristik fisik-kimia dan kinerja adsorpsi adsorben berbasis lumpur IPAL terpadu kawasan industri dalam penyisihan metilen biru (MB) serta mengevaluasi penggunaan media penyaring lumpur yang berbeda, yaitu *nylon* dan kertas saring. Media penyaring lumpur berbahan *nylon* berpotensi menghasilkan adsorben dengan karakteristik dan kinerja adsorpsinya yang lebih baik. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan adsorben dari limbah lumpur sekaligus mendukung pengelolaan limbah lumpur IPAL yang lebih berkelanjutan.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi Barnstead Thermolyne 1400 *furnace*, Memmert *oven*, VIS HACH d3900 spektrofotometer, cuvet, Thermo Scientific *stirrer*, *magnetic stirrer*,

neraca analitik Sartorius, Rotofix 32A *centrifuge*, desikator, perlengkapan corong buncher dengan pompa vakum, *beaker glass* 250 ml, cawan mortar, ayakan 150 mesh, kertas saring whatman 91, *nylon fabric filter* 400 mesh, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dengan instrument Jeol JSM-IT510LV, dan *Brunauer-Emmett-Teller* (BET) dengan instrument Quantachrome Nova 1200E. Penelitian ini menggunakan bahan utama berupa lumpur yang diambil dari unit *clarifier*/pengendapan akhir di IPAL Terpadu Kawasan Industri PT. Surabaya Industrial Estate Rungkut (SIER). Bahan yang lain yaitu KOH padat, HCl 37%, metilen biru (MB), dan aquades.

2.2. Persiapan Lumpur

Sebanyak 1 (satu) liter lumpur disaring dengan perlengkapan corong buncher dan pompa vakum. Pada penelitian ini menggunakan variasi metode penyaringan lumpur yang berbeda yaitu penyaringan berbahan *nylon* dan kertas saring. Lumpur kemudian dikeringkan dengan pemanasan *oven* pada suhu 103,5-105,5°C selama 24 jam hingga berat konstan. Kemudian lumpur didinginkan dalam desikator. Lumpur kering dihaluskan dengan cawan mortar dan disaring dengan saringan 150 mesh. Lumpur diletakkan dalam wadah kedap untuk digunakan pada proses selanjutnya.

2.3. Pirolisis Lumpur dan Aktivasi dengan KOH

Sampel sebanyak 10 gram dipirolisis dalam *furnace* pada suhu 400°C (Chen et al., 2020) selama 30 menit. Setelah itu sampel didinginkan dalam desikator selama 30 menit. Proses aktivasi lumpur melalui aktivasi kimia menggunakan KOH. Karbon dimasukkan dalam *beaker glass* 250 ml dan ditambahkan larutan KOH 1 M (perbandingan 1:4 w/v). Karbon diaktivasi selama 24 jam pada suhu ruang. Setelah proses aktivasi, karbon disaring dan dicuci dengan aquadest dan HCl 0,1 M. Pencucian dengan HCl bertujuan untuk menetralkan karbon, menghilangkan material organik, menaikkan luas permukaan, dan mengurangi abu. Pencucian dilakukan hingga pH netral (Almahbashi et al., 2021).

Karbon dikeringkan dalam *oven* pada suhu 103,5-105,5°C selama 4 jam hingga berat konstan. Karbon aktif yang telah kering disimpan dalam wadah kedap udara untuk digunakan sebagai adsorben pada proses penelitian selanjutnya.

2.4. Karakterisasi Adsorben

Sampel adsorben dengan metode penyaringan lumpur berbeda *nylon* dan kertas saring masing-masing dilakukan pengujian SEM-EDS untuk melihat morfologi permukaan karbon dan unsur dalam adsorben, serta uji BET untuk menentukan luas permukaan adsorben yang dihasilkan.

2.5. Adsorpsi Metilen Biru (MB)

Adsorben yang telah dihasilkan selanjutnya diuji efektivitas adsorpsinya terhadap MB. Penentuan panjang gelombang maksimum (λ_{max}) MB dilakukan

menggunakan spektrofotometer UV-Vis melalui pemindaian panjang gelombang sehingga diperoleh λ_{max} sebesar 664 nm. Sebelum pengujian adsorpsi, dibuat kurva kalibrasi standar MB pada panjang gelombang maksimum. Proses adsorpsi dilakukan secara *batch* dengan suhu ruang dengan mengontakkan adsorben dengan larutan MB disertai pengadukan, dengan pH dibiarkan alami/tanpa kontrol. Uji adsorpsi dalam penelitian ini dilakukan dengan tiga kali pengulangan dengan standar deviasi kurang dari 5%. Variasi massa adsorben yang digunakan yaitu 0,05, 0,10, dan 0,25 g, sedangkan variasi konsentrasi larutan MB yaitu 5, 10, 25, 50, dan 100 ppm dalam volume 100 ml. Proses adsorpsi dilakukan dengan variasi waktu kontak yaitu 5, 10, 20, 30, dan 60 menit. Selanjutnya, adsorben dan larutan dipisahkan dengan *centrifuge* dengan putaran 3000 rpm selama 5 menit. Larutan (*supernatant*) hasil *centrifuge* dimasukkan ke dalam cuvet dan diukur konsentrasinya dengan *spektrofotometer* untuk mengetahui persen *removal* dan kapasitas adsorpsi. Konsentrasi MB diukur dengan UV-Vis HACH d3900 spektrofotometer pada panjang gelombang maksimum.

Persentase penyisihan MB oleh Saner et al. (2022) dihitung melalui persamaan 1 dan kapasitas adsorpsi adsorben (q_e) oleh Chen et al. (2020) dihitung melalui persamaan 2 berikut.

$$\text{Penyisihan (\%)} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

$$q_e \text{ (mg/g)} = (C_0 - C_e) \times \frac{V}{W} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

C_0 : Konsentrasi awal pewarna MB (mg/L)

C_e : Konsentrasi equilibrium dalam larutan (mg/L)

V : Volume larutan (L)

W : Massa adsorben yang digunakan (g)

2.6. Isoterm Adsorpsi Adsorben

Mekanisme penyisihan MB oleh adsorben dianalisis dengan model persamaan isoterm adsorpsi Langmuir oleh Rathi & Kumar (2021) pada persamaan 3 dan Freundlich oleh (Ehiomogue et al., 2021) pada persamaan 4 sebagai berikut.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{(q_m K_L)} + \frac{C_e}{q_m} \dots\dots\dots (3)$$

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

C_e : Konsentrasi adsorbat saat *equilibrium* (mg/L)

q_e : Kapasitas adsorpsi saat *equilibrium* (mg/g)

q_m, q_{max} : Kuantitas molekul yang teradsorpsi pada permukaan adsorben pada waktu tertentu dan kapasitas adsorpsi maksimum (mg/g)

K_L : Konstanta adsorpsi Langmuir (L/mg)

K_F : Konstanta Freundlich atau kapasitas adsorpsi maksimum (L/mg)

n : Nilai yang menggambarkan heterogenitas permukaan dan distribusi energi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakterisasi Fisik-Kimia Adsorben

3.1.1. Morfologi Permukaan Adsorben melalui *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Adsorben yang dihasilkan melalui proses pirolisis dan aktivasi kimia terlihat pada Gambar 1. Selanjutnya, adsorben dilakukan pengujian SEM yang bertujuan untuk mengetahui morfologi adsorben yang dihasilkan. Morfologi adsorben dengan struktur berpori akan berperan dalam adsorpsi kontaminan dalam air limbah (Chen et al., 2020). Gambar 2 merupakan hasil analisis SEM adsorben dari lumpur dengan penyaring *nylon* dan kertas saring. Berdasarkan analisis SEM tersebut, adsorben yang dihasilkan dari dua media penyaring lumpur tersebut keduanya menunjukkan permukaan adsorben yang bertekstur bergelombang, tidak teratur, dan memiliki porositas yang ditandai dengan munculnya pori-pori yang tampak pada permukaan adsorben. Hasil penelitian ini serupa dengan beberapa penelitian yang telah dilakukan. Penelitian oleh Setiawan et al. (2021) mendapatkan jika adsorben yang dibuat dari limbah lumpur aktif industri gula melalui pirolisis dan aktivasi kimia memiliki morfologi permukaan tidak teratur namun berpori.

Pembentukan pori lebih terlihat jelas diamati pada adsorben dengan penyaringan *nylon*. Adsorben tersebut memperlihatkan permukaan yang lebih berkembang dengan distribusi rongga yang lebih terlihat. Kondisi ini mengindikasikan terbentuknya struktur permukaan yang lebih terbuka dan lebih banyak area yang dapat diakses oleh molekul adsorbat. Sebaliknya, adsorben hasil penyaringan kertas saring menunjukkan struktur permukaan yang relatif lebih padat dengan rongga permukaan yang lebih terbatas.



Gambar 1. Adsorben yang Dihasilkan melalui Pirolisis dan Aktivasi KOH dengan Media Penyaring Lumpur Berbahan *Nylon* (kiri) dan Kertas Saring (kanan)

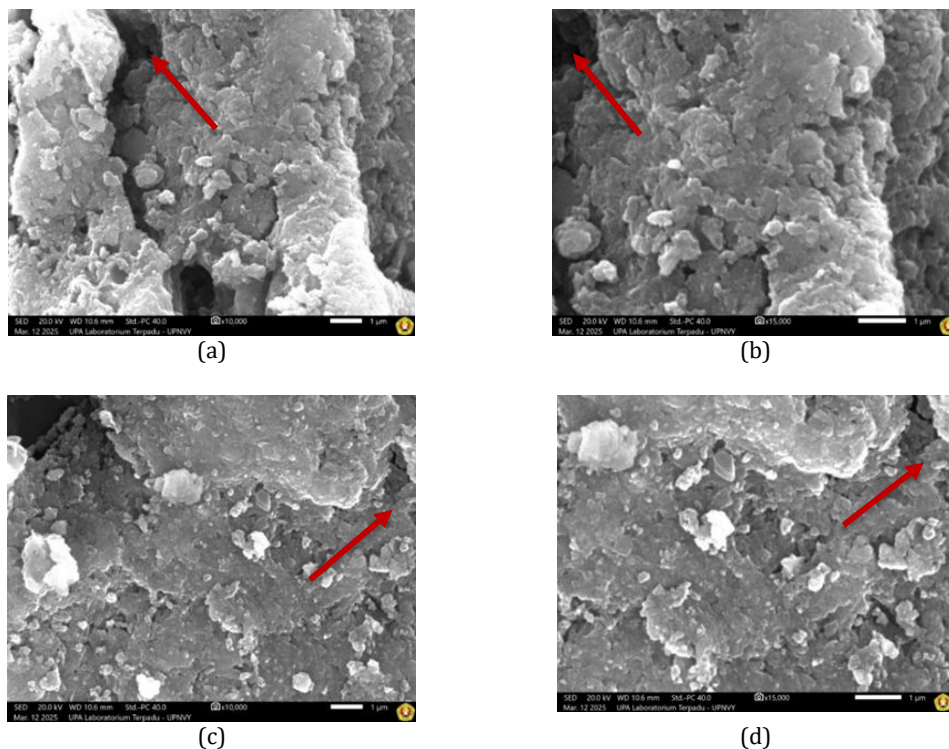
Porositas yang terbentuk ini juga berkaitan pada peningkatan luas permukaan karbon. Hasil analisis Brunauer-Emmett-Teller (BET) menunjukkan adsorben hasil penyaringan *nylon* memiliki luas permukaan sebesar 127,1 m²/g, sedangkan adsorben hasil penyaringan kertas saring hanya mencapai 65,5

m^2/g . Hasil ini menunjukkan bahwa struktur permukaan yang lebih berkembang dan berongga pada pengamatan SEM berkaitan dengan tersedianya area permukaan yang lebih besar yang dapat diakses oleh molekul adsorbat sehingga akan meningkatkan kinerja adsorpsi. Meskipun SEM dan BET mengukur karakteristik yang berbeda, SEM memberikan informasi morfologi permukaan secara visual, sedangkan BET memberikan ukuran kuantitatif luas permukaan spesifik. Kecenderungan kedua hasil tersebut menunjukkan hubungan yang konsisten antara perkembangan struktur permukaan dan peningkatan luas permukaan adsorben. Dalam proses pirolisis lumpur IPAL, penguapan material organik akan mendukung pembentukan pori karbon sehingga meningkatkan luas permukaan karbon (Ahmad et al., 2021). Adsorben berbasis lumpur IPAL dari proses pirolisis dan aktivasi kimia membentuk morfologi bergelombang dan berporositas. Pembentukan porositas akan memperbesar luas permukaan karbon. Pembentukan porositas disebabkan reaksi aktivator kimia KOH dengan material karbon lumpur sehingga membentuk pori dan meningkatkan diameter dan volume pori adsorben yang dihasilkan. (Almahbashi et al., 2021)

Pemilihan KOH dalam penelitian ini sebagai aktivator kimia dalam pembuatan adsorben terbukti sangat efektif dalam peningkatan luas permukaan BET dan porositas (Tu et al., 2021). Oumabady et al. (2021) dalam penelitiannya menemukan proses pirolisis menghasilkan karbon dengan pori

berstruktur mikropori. Proses yang dilanjutkan dengan aktivasi kimia KOH akan menghasilkan adsorben dengan porositas dan pori berbentuk bulat. Proses aktivasi kimia KOH akan menghasilkan pembentukan pori dan karbon yang lebih bersih. Dalam penelitian ini, suhu pirolisis dijaga pada 400°C . Pada kondisi ini ukuran partikel yang dihasilkan kurang dari $1\ \mu\text{m}$ dan partikel mempunyai struktur pori lebih banyak dibandingkan dengan lumpur yang dipirolisis pada suhu lainnya (Chen et al., 2020). Menurut Zhao et al. (2021), suhu pirolisis yang tepat dapat menambah jumlah gugus fungsional pada permukaan dan memperbaiki struktur pori, namun jika suhu pirolisis sangat tinggi dapat menyebabkan struktur pori rusak dan menurunkan jumlah gugus fungsional pada permukaan.

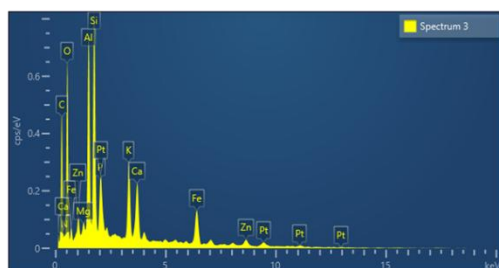
Lumpur memiliki kadar abu yang cukup tinggi, namun dengan aktivasi kimia seperti aktivasi dengan KOH dapat terbentuk mikropori melalui pengikisan atom karbon dipermukaannya. Aktivator KOH membentuk ukuran pori dengan rentang 1-4 nm. Proses dua langkah melalui pirolisis diikuti aktivasi merupakan metode yang efisien untuk menghasilkan struktur mikropori yang melimpah adsorben dari lumpur (Mian et al., 2023). Struktur berpori tersebut dapat meningkatkan daya serap adsorben terhadap berbagai jenis polutan, seperti logam berat dan senyawa organik sehingga menjadikannya efisien digunakan dalam pengolahan air limbah (Sharma et al., 2024).



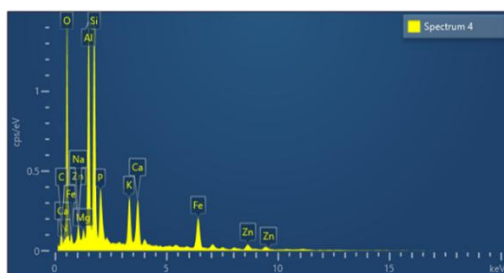
Gambar 2. Morfologi Permukaan Adsorben Hasil Penyaringan Nylon pada Pembesaran 10.000x (a), Pembesaran 15.000x (b), Penyaringan Kertas Saring pada Pembesaran 10.000x (c), Pembesaran 15.000x (d). Adsorben dari Hasil Penyaringan Nylon Menunjukkan Struktur Permukaan yang Lebih Berkembang dan Berongga Dibandingkan Adsorben Hasil Penyaringan Kertas Saring

3.1.2. Komposisi Unsur Adsorben melalui *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS)

Karakterisasi kimia adsorben berupa komposisi unsur permukaan adsorben dilakukan untuk melihat komposisi yang dihasilkan. Pengujian EDS adsorben termuat dalam Gambar 3 dan 4.



Gambar 3. Analisis EDS Adsorben Penyaringan Nylon



Gambar 4. Analisis EDS Adsorben Penyaringan Kertas Saring

Hasil pengujian EDS yang menerangkan komposisi unsur pada permukaan adsorben termuat dalam Tabel 1. Pengujian EDS menunjukkan jika permukaan adsorben terdiri dari berbagai unsur seperti C, N, O, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Fe, dan Zn. Unsur dengan komposisi terbanyak yaitu unsur C, O, Al, dan Si. Hasil ini mengindikasikan jika permukaan adsorben dari lumpur yang dihasilkan mengandung karbon yang cukup tinggi.

Unsur karbon ini yang memiliki peranan dominan dalam proses adsorpsi berbagai kontaminan. Proses pirolisis akan menghasilkan pembentukan unsur C tinggi dan *fixed carbon* adsorben (Jellali et al., 2022). Peningkatan persentase unsur karbon murni (*fixed carbon*) sekaligus mulai membentuk kerangka karbon yang berpori yang akan berkontribusi pada peningkatan nilai luas permukaan adsorben. Keberadaan unsur Al dan Si juga dapat mempengaruhi efektivitas penyerapan karbon. Berdasarkan hasil pengamatan Lestari et al. (2020), adsorben yang dihasilkan dari lumpur pengolahan air minum memiliki unsur dominan Al dan Si dalam bentuk senyawa oksida Al_2O_3 dan SiO_2 . Kedua senyawa tersebut berperan utama dalam proses penyerapan logam berat. Hasil penelitian ini juga sejalan dengan *review* oleh Salmariza (2020).

Umumnya limbah lumpur terdiri dari unsur utama seperti C, O, Si, dan Ca dalam bentuk oksida dan kandungannya mengalami penurunan selama proses pirolisis dan pencucian karbon/adsorben.

Berdasarkan hasil penelitian ini, adsorben yang dihasilkan dengan penyaringan lumpur menggunakan bahan *nylon* menghasilkan karbon aktif dengan unsur C yang lebih besar yaitu 39,3% bila dibandingkan dari penyaringan kertas saring yaitu 15,6%. Adsorben yang dihasilkan dengan penyaringan bahan *nylon* juga memiliki jumlah *impurities* berupa logam dengan jumlah yang lebih sedikit komposisi Fe dan Zn berturut-turut yaitu 4,9 dan 1,9%. Sedangkan, adsorben yang dihasilkan dengan penyaringan kertas saring memiliki jumlah *impurities* yang lebih banyak dengan komposisi Fe dan Zn berturut-turut yaitu 6,4% dan 2,3%.

Hasil pengujian juga menunjukkan jika unsur kimia penyusun adsorben dengan penyaringan bahan *nylon* dan kertas saring terdiri dari unsur yang serupa. Penggunaan media penyaring yang berbeda tidak menghasilkan perbedaan yang mendasar pada jenis unsur yang terdeteksi, tetapi menghasilkan perbedaan pada komposisi unsur penyusun adsorben. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa jenis media penyaring dapat memengaruhi karakteristik padatan lumpur (*filter cake*) yang tertahan dan selanjutnya memengaruhi komposisi unsur adsorben setelah proses pirolisis dan aktivasi. Perbedaan media penyaring, terutama ukuran dan struktur pori, dapat menyebabkan perbedaan kemampuan retensi partikel selama proses filtrasi. Partikel yang berukuran lebih besar dari pori media cenderung tertahan di permukaan dan membentuk *filter cake*, sedangkan partikel yang lebih kecil dapat masuk ke struktur media atau lolos bersama filtrat. Selain itu, distribusi pori dan struktur serat media penyaring turut memengaruhi mekanisme penyumbatan pori (*pore blocking*) dan pembentukan lapisan padatan yang menghasilkan karakteristik *filter cake* yang berbeda (Tarifa & Santos, 2024).

Penyaringan lumpur IPAL dengan berbahan *nylon* memiliki berbagai keunggulan yaitu tahan terhadap abrasi dengan sangat baik, pemisahan lumpur (*cake*) yang sangat baik, menyaring partikel lebih kecil, kekuatan tarik yang tinggi, cocok untuk pemisahan dalam kondisi basa, dan mampu bekerja efektif pada suhu yang tinggi (Zerin & Dutta, 2018). Selain itu, *nylon* dapat diaplikasikan pada berbagai larutan *aqueous* dan asam yang terlarut, petrokimia, dan pelarut organik (Sutherland, 2008). Hal ini yang membuat penyaringan lumpur IPAL dengan *nylon* pada pembuatan adsorben lebih baik dan lebih efektif.

Tabel 1. Komposisi Unsur Adsorben Lumpur IPAL berdasarkan Analisis EDS. Adsorben dengan Penyaringan Nylon Menunjukkan Kandungan Karbon Lebih Tinggi Dibandingkan Adsorben Kertas Saring

Bahan	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Fe	Zn
	% massa											
Nylon	39,3	0	33,4	0	0,4	6,1	6,5	1,3	3,5	2,9	4,9	1,9
Kertas Saring	15,6	0,6	44,2	0,8	0,6	10,3	10,5	2,2	3,1	3,5	6,4	2,3

Komposisi unsur permukaan adsorben dari hasil analisis EDS serupa dengan beberapa penelitian lainnya, seperti penelitian Jellali et al. (2022), memperoleh adsorben dari lumpur IPAL industri melalui proses pirolisis dan aktivasi kimia KOH. Terdapat kesamaan penemuan beberapa unsur adsorben seperti O, Al, Si, P, K, Ca, Fe. Penelitian tersebut melaporkan bahwa lumpur IPAL industri memiliki unsur oksigen dan karbon yang tinggi. Unsur Besi (Fe) juga ditemukan, bersamaan dengan keberadaan logam alkali seperti Al, Ca, dan Mg.

Zeng et al. (2021) juga meneliti pembuatan adsorben magnetik melalui proses pirolisis campuran lumpur IPAL dan lumpur besi. Menurut hasil penelitian tersebut adsorben mengandung beragam unsur seperti N, C, H, Fe, Si, Na, K, Mg, Ca, dan P. Penelitian ini dan penelitian oleh Zeng et al. (2021) memiliki kesamaan penemuan beberapa unsur adsorben seperti N, C, Fe, Si, Na, K, Mg, Ca, dan P. Akan tetapi, pada penelitian ini diperoleh kandungan unsur C yang lebih besar yaitu 39,3% dibandingkan dengan penelitian Zeng et al. (2021) dengan C yaitu 18,9%.

3.1.3. Luas Permukaan Melalui Metode Brunauer-Emmett-Teller (BET)

Hasil pengujian BET menghasilkan nilai luas permukaan adsorben yang ditampilkan dalam Tabel 2. Pengujian BET menunjukkan adsorben yang dihasilkan dengan penyaringan lumpur menggunakan media penyaring *nylon* memiliki nilai luas permukaan spesifik yaitu 127,1 m²/g, sedangkan adsorben media penyaring kertas saring memiliki nilai luas permukaan spesifik yaitu 65,5 m²/g.

Tabel 2. Luas Permukaan Adsorben berdasarkan Analisis BET. Adsorben Nylon Memiliki Luas Permukaan Spesifik Lebih Tinggi dibandingkan Adsorben Kertas Saring

Penyaring	Luas permukaan adsorben (m ² /g)
Nylon	127,1
Kertas Saring	65,5

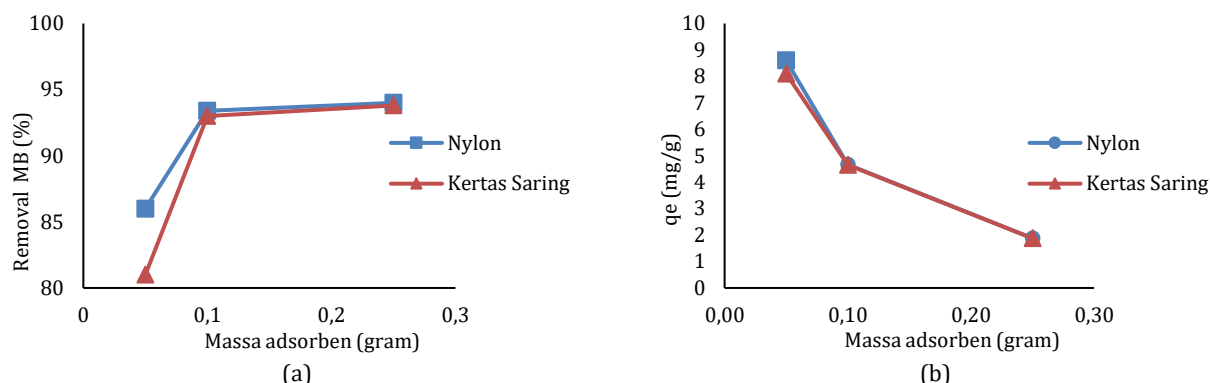
Luas permukaan adsorben dapat dipengaruhi oleh berbagai hal. Menurut Matheri et al. (2020),

kenaikan suhu pirolisis dapat meningkatkan kenaikan luas permukaan adsorben yang dihasilkan. Atomisasi adsorben meningkat sejalan dengan peningkatan suhu pirolisis sehingga terbentuk mikropori dan mesopori yang dapat meningkatkan luas permukaan. Pengujian SEM sebelumnya menunjukkan pembentukan porositas yang lebih baik pada adsorben dari penyaringan *nylon*, sehingga diperoleh luas permukaan lebih yang lebih besar. Selain itu, parameter lain yang berpengaruh dalam luas permukaan BET yaitu karakteristik lumpur, proses pembuatan, kecepatan pemanasan, dan waktu reaksi.

Dalam penelitian ini pirolisis berlangsung pada suhu 400°C. Menurut Jha et al. (2023), proses pirolisis pada suhu 300-500 °C sering disebut sebagai *slow pyrolysis* yang berlangsung dalam beberapa menit hingga hari. Pirolisis pada rentang suhu tersebut dinilai paling efisien karena mampu menghasilkan bioarang dalam jumlah tertinggi, sementara pembentukan produk gas (biogas) dan cair (*bio-oil*) relatif lebih rendah. Nilai luas permukaan BET yang tinggi menunjukkan adsorben memiliki kelimpahan situs adsorpsi dan kapasitas yang tinggi. Perbedaan luas permukaan tersebut selanjutnya menunjukkan keterkaitan dengan kinerja adsorpsi metilen biru (MB). Perbedaan ini sejalan dengan kecenderungan kinerja adsorpsi, dimana adsorben *nylon* menunjukkan kemampuan penghilangan MB dan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan adsorben kertas saring. Luas permukaan yang lebih besar menyediakan area kontak yang lebih luas dan memungkinkan lebih banyak molekul MB berinteraksi dengan permukaan serta memasuki struktur pori adsorben. Dalam penelitian ini didapatkan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi pada adsorben dengan penyaringan *nylon* dibanding kertas saring. Kapasitas adsorpsi *nylon* yaitu 34,5 mg/g, sedangkan kapasitas adsorpsi adsorben penyaringan kertas saring yaitu 31,5 mg/g. Perbandingan BET adsorben dari lumpur IPAL penelitian ini dengan beberapa penelitian yang terdahulu yang telah dilakukan ada dalam Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Luas Permukaan Adsorben yang Dihasilkan dalam Penelitian dan Beberapa Adsorben Penelitian Terdahulu

Jenis Adsorben	Proses Sintesis	Luas Permukaan BET (m ² /g)	Pustaka
Adsorben dari lumpur IPAL Terpadu SIER	Pirolisis dan aktivasi kimia KOH	127,1	Penelitian ini
Adsorben dari lumpur pengolahan air di Parit Buntar, Malaysia	Pirolisis	88,7	Ahmad et al. (2021)
Adsorben dari lumpur pengolahan air limbah domestik di Trento Utara, Italia	Karbonisasi suhu rendah (HTC) dan aktivasi KOH	31	Ferrentino et al. (2020)
Adsorben dari lumpur pengolahan air limbah industri di Oman	Pirolisis dan aktivasi kimia KOH	157	Jellali et al. (2022)
Adsorben dari lumpur pengolahan air limbah perkotaan Pantai Utara, Yunani	Pirolisis	20,2	Regkouzas & Diamadopoulos (2019)



Gambar 5. Pengaruh Massa Adsorben dalam Penyisihan (*Removal*) MB (a) dan Pengaruh Massa Adsorben terhadap Kapasitas Adsorpsi Adsorben (b)

3.2. Studi Adsorpsi Adsorben

3.2.1. Pengaruh Massa Adsorben terhadap Persentase Penyisihan (*Removal*) dan Kapasitas Adsorben

Massa adsorben yang semakin besar akan meningkatkan jumlah partikel dan luas permukaannya sehingga dapat meningkatkan nilai efisiensi adsorpsi (Khari et al., 2021). Pengaruh massa adsorben terhadap persentase penyisihan (*removal*) metilen biru (MB) terlihat pada Gambar 5. Hasil penelitian menunjukkan jika semakin banyak massa adsorben yang ditambahkan dalam proses adsorpsi, maka semakin tinggi persentase penyisihan (*removal*) MB oleh adsorben. Dengan massa adsorben yang cukup kecil yaitu 0,05 g telah diperoleh penyisihan MB sebanyak 86% dengan adsorben yang dihasilkan penyaringan *nylon* dan 81% dengan adsorben yang dihasilkan penyaringan kertas saring. Ketika massa adsorben yang ditambahkan dalam larutan MB sebanyak 0,1 g, persentase penyisihan meningkat yaitu 93,4% dengan adsorben yang dihasilkan penyaringan *nylon* dan 93% dengan adsorben yang dihasilkan penyaringan kertas saring. Pada penambahan massa adsorben lebih tinggi yaitu 0,25 g persentase penyisihan MB dapat dikatakan telah mencapai penyisihan konstan.

Hal ini sejalan dengan penelitian Jellali et al. (2022) yang menyatakan semakin bertambah dosis adsorben lumpur IPAL industri, maka persentase penyisihan MB akan semakin tinggi, namun dosis tertentu penyisihan MB telah mencapai persentase penyisihan konstan. Peningkatan persentase penyisihan seiring bertambahnya dengan massa adsorben disebabkan semakin meningkatnya jumlah situs penyerap aktif adsorben yang dapat bereaksi dengan molekul-molekul MB.

Pemilihan massa adsorben yang lebih kecil yang dapat menghasilkan persentase penyisihan MB yang tinggi merupakan pilihan yang tepat (Jellali et al., 2022). Menurut Lestari et al. (2020), ketika menambahkan adsorben pada kondisi optimum, penyerapan adsorbat tidak tampak signifikan. Hal ini terjadi sebab seluruh adsorbat telah terjerap,

sehingga penambahan jumlah adsorben lebih lanjut tidak berpengaruh signifikan dalam proses adsorpsi. Berdasarkan hal tersebut massa adsorben optimum yang dipilih untuk penelitian ini yaitu 0,1 g.

Pengaruh massa adsorben terhadap kapasitas adsorben dalam adsorpsi MB dapat terlihat pada Gambar 5. Hasil penelitian menunjukkan semakin tinggi massa adsorben yang digunakan akan menurunkan kapasitas adsorpsi. Kapasitas adsorpsi menurun dari 8,6 ke 1,88 mg/g adsorben yang dihasilkan penyaringan *nylon*. Kapasitas adsorpsi menurun dari 8,1 ke 1,87 mg/g adsorben yang dihasilkan penyaringan kertas saring. Temuan yang serupa juga ditemukan oleh Lestari et al. (2020), Jellali et al. (2022), dan (Khari et al., 2021) yang menyatakan peningkatan dosis adsorben dapat menyebabkan penurunan kapasitas adsorpsi sedangkan persentase penyisihan meningkat.

3.2.2. Pengaruh Waktu Kontak Adsorpsi terhadap Persentase Penyisihan (*Removal*) dan Kapasitas Adsorpsi Adsorben

Pengaruh waktu kontak adsorpsi terhadap persentase penyisihan MB dapat terlihat pada Gambar 6.

Hasil penelitian menunjukkan semakin lama waktu kontak yang digunakan akan meningkatkan persentase penyisihan MB oleh adsorben. Dalam penelitian adsorpsi yang diamati, proses adsorpsi MB oleh adsorben berlangsung cepat pada waktu kontak awal 5 menit. Hal ini disebabkan kelimpahan situs aktif yang dimiliki di permukaan adsorben. Persentase penyisihan MB yang diperoleh pada waktu kontak 5 menit yaitu sebanyak 85,2% dengan adsorben yang dihasilkan penyaringan *nylon* dan 86% dengan adsorben yang dihasilkan penyaringan kertas saring. Proses adsorpsi dengan waktu kontak 10 menit meningkatkan persentase penyisihan mencapai 89,4% dan 91,4% untuk adsorben yang dihasilkan penyaringan *nylon* dan kertas saring. Pada percobaan adsorpsi dengan waktu kontak 30 menit, persentase penyisihan MB mencapai 93,4% dan 93% untuk adsorben yang dihasilkan penyaringan *nylon* dan kertas saring. Pada waktu kontak yang lebih

lama yaitu 60 menit, persentase penyisihan MB tidak menunjukkan peningkatan penyisihan yang signifikan. Temuan ini juga didukung oleh penelitian oleh Saner et al. (2022) yang menyatakan semakin lama waktu kontak, maka persentase penyisihan MB oleh adsorben lumpur IPAL akan meningkat. Pada waktu kontak yang lebih lama akan menurunkan atau tidak memberikan peningkatan signifikan (*plateau*) pada proses tersebut. Semakin panjang waktu kontak, maka proses difusi dan penempelan molekul adsorbat berlangsung lebih optimal, namun pada kondisi jenuh mengakibatkan penurunan kapasitas penyerapan (Khari et al., 2021).

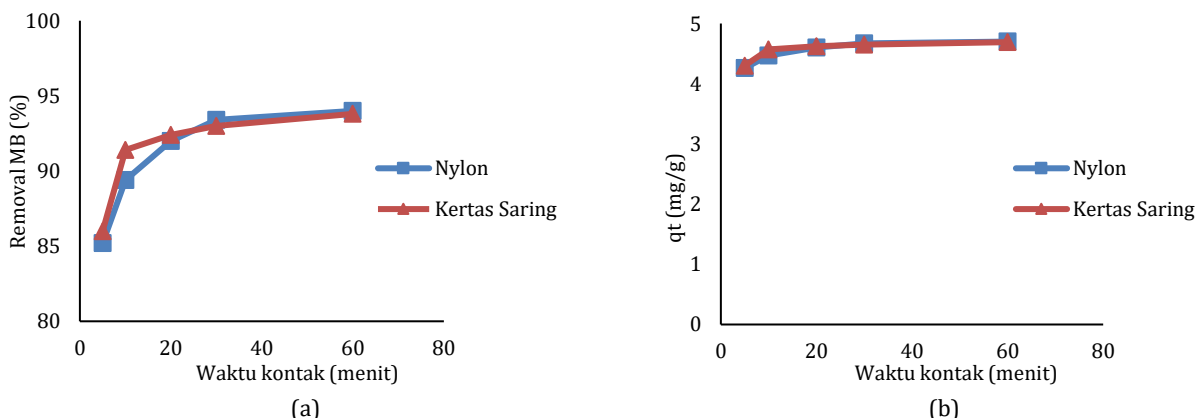
Pengaruh waktu kontak adsorpsi terhadap kapasitas adsorpsi adsorben terlihat pada Gambar 6. Hasil penelitian menunjukkan semakin lama waktu kontak yang digunakan, maka kapasitas adsorpsi adsorben semakin tinggi. Pengamatan yang sama dijumpai dalam penelitian oleh Saner et al. (2022), Chen et al., (2020), dan Jellali et al. (2022). Menurut Saner et al. (2022), saat mencapai waktu kontak sangat cepat diawal proses adsorpsi, akan terjadi penurunan kecepatan adsorpsi hingga mencapai kesetimbangan (*equilibrium*). Dalam penelitian yang dilakukan, proses adsorpsi terjadi sangat cepat pada waktu kontak awal yaitu selama 5 menit dan kondisi kesetimbangan adsorpsi tercapai dengan waktu kontak adsorpsi yaitu 30 menit. Hasil serupa diamati dalam penelitian yang dilakukan oleh Jiang et al. (2021). Penelitian tersebut melaporkan adsorpsi oleh adsorben dari lumpur berlangsung dengan cepat pada waktu kontak 5 menit di awal. Beberapa studi lainnya melaporkan, proses adsorpsi berlangsung cepat pada 10 menit awal (Saner et al., 2022), 20 menit di awal (Jellali et al., 2022), dan 240 menit awal (Chen et al., 2020). Berdasarkan hal tersebut, dapat disimpulkan adsorben dari lumpur IPAL dalam penelitian ini mempunyai kecepatan adsorpsi yang cukup baik jika dibandingkan dengan beberapa penelitian sebelumnya. Kecepatan adsorpsi yang baik dapat disebabkan oleh peningkatan karakteristik fisik dan kimia yaitu struktur dan gugus fungsi permukaan adsorben melalui aktivasi KOH (Jellali et al., 2022) dan ukuran partikel adsorben lebih kecil

yang berkontribusi dalam banyaknya situs aktif (Agoe et al., 2024).

Adsorpsi MB berlangsung sangat cepat di awal waktu kontak disebabkan oleh adanya gaya pendorong kuat sehingga mempercepat perpindahan zat warna MB ke permukaan adsorben. Selain itu, kelimpahan area permukaan dan situs aktif yang belum terisi. Namun, bertambahnya waktu kontak menurunkan jumlah area terbuka dan situs aktif akibat permukaan adsorben mulai jenuh (Soliman et al., 2023). Waktu kontak adsorpsi optimum yang digunakan untuk pengamatan lebih lanjut yaitu 30 menit.

3.2.3. Pengaruh Konsentrasi Awal MB terhadap Persentase Penyisihan (*Removal*) dan Kapasitas Adsorpsi

Pengaruh konsentrasi awal MB berkaitan dengan banyaknya molekul MB dalam larutan dan jumlah situs aktif dipermukaan adsorben (Soltani et al., 2021). Pengaruh konsentrasi awal MB terhadap persentase penyisihan MB dapat terlihat pada Gambar 7. Hasil penelitian menunjukkan semakin tinggi konsentrasi awal MB dalam proses adsorpsi, maka akan menurunkan persentase penyisihan (*removal*) MB oleh adsorben. Persentase penyisihan (*removal*) MB oleh adsorben penyaringan *nylon* pada konsentrasi 5, 10, 25, 50, dan 100 ppm berturut-turut yaitu 93,4, 90,8, 79,68, 59,36, dan 34,5%. Sedangkan, persentase penyisihan (*removal*) MB oleh adsorben penyaringan kertas saring pada konsentrasi 5, 10, 25, 50, dan 100 ppm berturut-turut yaitu 93, 88,1, 70,72, 50,24, dan 31,5%. Dalam proses adsorpsi yang terjadi, pada konsentrasi 5 dan 10 ppm, larutan hampir terlihat tidak berwarna (bening). Dengan massa adsorben yang relatif kecil yaitu 0,1 g telah mampu menghilangkan warna MB dan menghasilkan persentase penyisihan MB yang tinggi dalam larutan. Penemuan yang sama oleh Chen et al. (2020), konsentrasi awal MB yang semakin tinggi akan meningkatkan kapasitas adsorpsi, namun akan menurunkan persentase penyisihannya (*removal*).



Gambar 6. Pengaruh Waktu Kontak Adsorpsi dalam Penyisihan (*Removal*) MB (a) dan Pengaruh Waktu Kontak Adsorpsi Terhadap Kapasitas Adsorpsi Adsorben (b)

Menurut beberapa penelitian lainnya, dengan meningkatnya adsorbat, efisiensi penyerapan akan berkurang. Hal ini disebabkan kemampuan adsorben dalam menyerap adsorbat telah maksimum yang ditandai dengan penurunan efisiensi penyerapan pada konsentrasi lebih tinggi yang disebabkan oleh tidak sebanding antara jumlah ion adsorbat dengan jumlah situs adsorben yang ada yang menyebabkan adsorben mencapai titik jenuhnya sehingga efisiensi penyerapan adsorben berkurang. Jika jumlah situs aktif lebih banyak dibandingkan ion adsorbat, maka kapasitas penyerapan adsorben akan meningkat. Dalam kondisi tertentu kapasitas penyerapan menunjukkan konstan bahkan menurun karena adsorben mencapai kejenuhan (Lestari et al., 2020).

Penelitian ini juga menunjukkan semakin tinggi konsentrasi awal MB dalam proses adsorpsi, maka akan meningkatkan kapasitas adsorpsi adsorben. Kapasitas adsorpsi adsorben penyaringan *nylon* pada konsentrasi 5, 10, 25, 50, dan 100 ppm berturut-turut yaitu 4,67; 9,08; 19,92; 29,68; dan 34,5 mg/g. Sedangkan, Kapasitas adsorpsi adsorben penyaringan kertas saring pada konsentrasi 5, 10, 25, 50, dan 100 ppm berturut-turut yaitu 4,65; 8,81; 17,68; 25,12; 31,5 mg/g. Berdasarkan pengamatan adsorpsi yang dilakukan pada konsentrasi 50 ppm ke 100 ppm, selisih peningkatan kapasitas adsorpsi telah mengalami penurunan yang mengindikasikan adsorben telah hampir mencapai kejenuhannya.

Kondisi optimum ditentukan dengan mempertimbangkan persentase penyisihan (*removal*) penggunaan adsorben. Pada variasi waktu kontak, *removal* meningkat pada tahap awal dan mencapai kondisi optimum pada 30 menit. Pada variasi massa adsorben, 0,1 g dipilih sebagai kondisi optimum karena telah mampu memberikan

penyisihan MB yang tinggi dengan penggunaan adsorben yang relatif efisien. Untuk variasi konsentrasi awal MB, peningkatan konsentrasi menyebabkan penurunan persentase *removal*. Meskipun tingkat *removal* tertinggi diperoleh pada 5 ppm yaitu 93,4 %, namun konsentrasi 10 ppm dipilih sebagai kondisi optimum karena masih menghasilkan tingkat *removal* yang cukup tinggi, yaitu 90,8% pada adsorben dengan penyaring *nylon* dan 88,1% pada adsorben dengan penyaring kertas saring, pada konsentrasi MB yang lebih besar. Kondisi optimum studi adsorpsi termuat dalam Tabel 4.

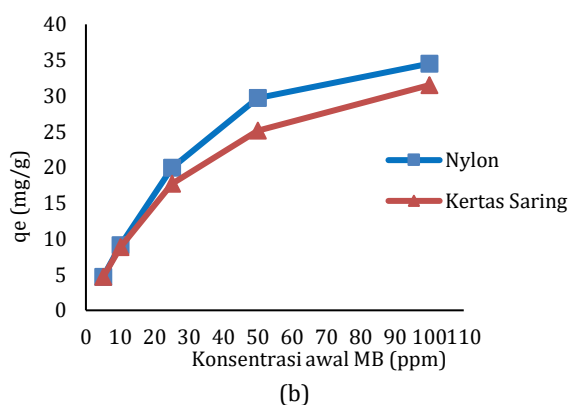
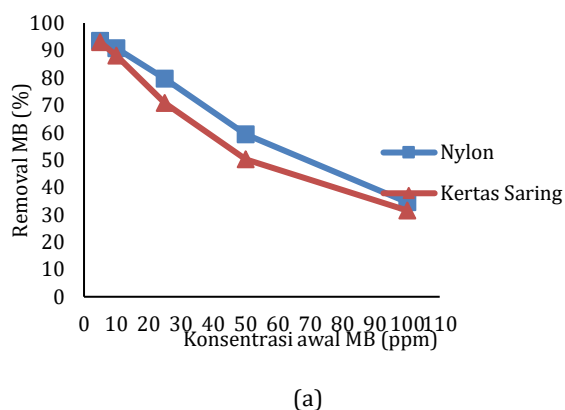
Tabel 4. Kondisi Optimum dari Studi Adsorpsi Menggunakan Adsorben dengan Penyaringan *Nylon*

Variabel	Kondisi Optimum	Persentase Penyisihan MB (<i>Removal</i>)
Massa adsorben	0,1 g	90,8%
Waktu kontak	30 menit	
Konsentrasi awal MB	10 ppm	

3.2.4. Isoterm Adsorpsi

Analisis isoterm adsorpsi dapat menggambarkan sistem adsorpsi dan interaksi adsorben dan adsorbat. Dua model yang biasa digunakan dalam analisis yaitu Isoterm Langmuir dan Isoterm Freundlich (Soltani et al., 2021). Analisis isoterm adsorpsi bertujuan untuk mempelajari molekul kationik MB terdistribusi pada permukaan adsorben.

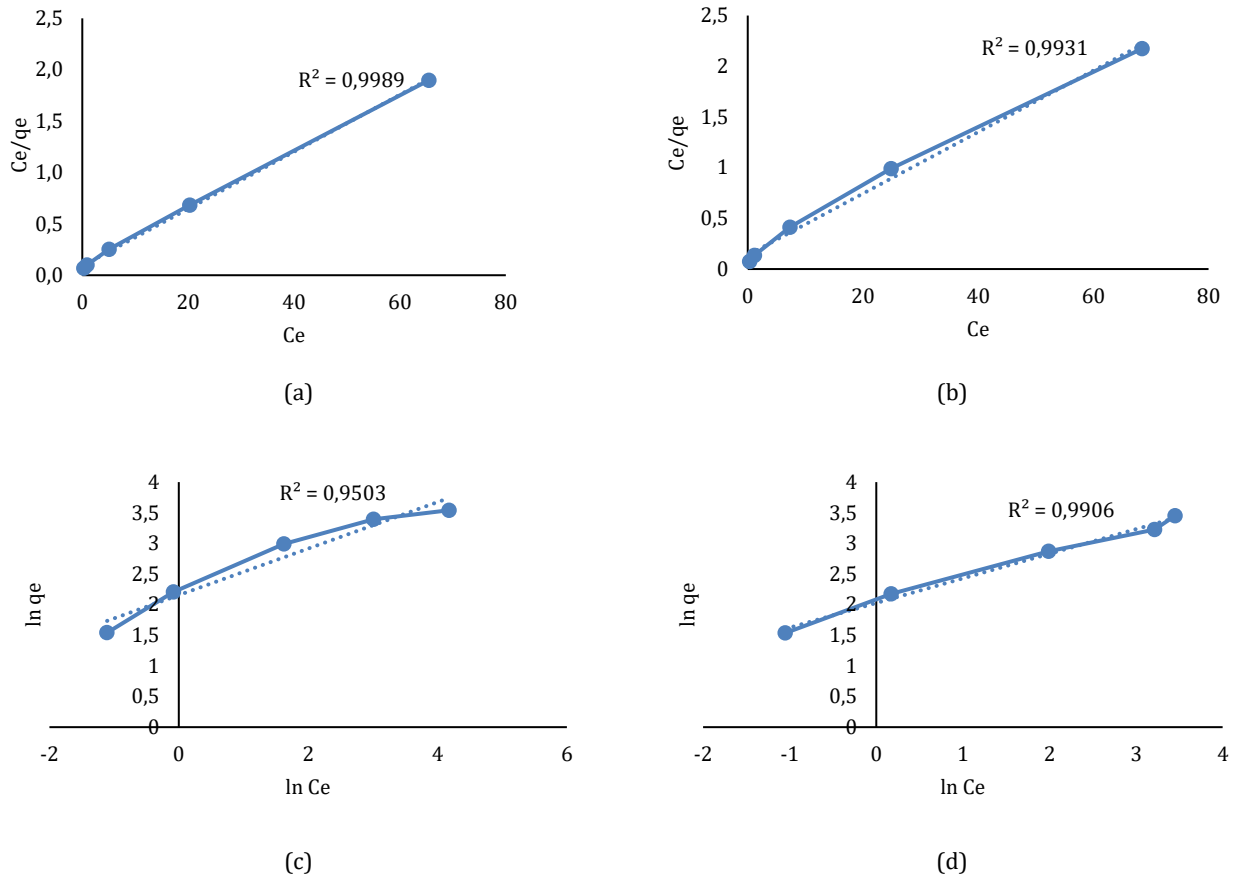
Gambar 8 menunjukkan grafik linear Isoterm Langmuir dan Isoterm Freundlich berdasarkan data adsorpsi MB. Tabel 5 menunjukkan nilai konstanta dan koefisien korelasi (R^2) yang berhubungan dengan persamaan isoterm penelitian ini dan beberapa penelitian terdahulu terkait adsorben.



Gambar 7. Pengaruh Konsentrasi Awal MB dalam Penyisihan (*Removal*) MB (a) dan Pengaruh Konsentrasi Awal MB terhadap Kapasitas Adsorpsi Adsorben (b)

Tabel 5. Perbandingan Parameter Langmuir dan Freundlich dalam Penelitian Ini dan Penelitian Terdahulu

Model Isoterm	Parameter	Penelitian ini		Referensi		
		<i>Nylon</i>	Kertas Saring	Chen et al. (2020)	Zeng et al. (2021)	Jellali et al. (2022)
Langmuir	q_m (mg/g)	35,97	33	184,9	47,44	65,9
	K_L (L/mg)	0,31	0,22	0,19	0,24	0,52
	R^2	0,9989	0,9931	0,999	0,9749	0,951
Freundlich	K_F (L/mg)	8,63	7,59	69,9	9,32	26,4
	N	2,64	2,49	5,45	4,81	3,48
	R^2	0,9503	0,9906	0,815	0,9666	0,901



Gambar 8. Plot Linear Isoterm Langmuir Penyaringan Nylon (a), Plot Linear Isoterm Langmuir Penyaringan Kertas Saring (b) Plot Linear Isoterm Freundlich Penyaringan Nylon (c), dan Plot Linear Isoterm Freundlich Penyaringan Kertas Saring (d)

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, nilai R^2 Isoterm Langmuir untuk kedua adsorben yang dihasilkan dengan penyaringan *nylon* dan kertas saring lebih besar dari 0,99 ($R^2 \geq 0,99$). Pemilihan model kecenderungan dengan melihat nilai koefisien relasi (R^2) yang paling mendekati nilai 1 (Setiawan et al., 2021). Model Langmuir proses adsorpsi dengan adsorben yang dihasilkan dari penyaringan *nylon* menunjukkan R^2 lebih tinggi yaitu 0,9989 dan penyaringan kertas saring menunjukkan R^2 yaitu 0,9931. Berdasarkan nilai R^2 tertinggi yang diperoleh dalam penelitian, model Isoterm Langmuir lebih cocok menjelaskan proses adsorpsi MB ke adsorben jika dibandingkan dengan Isoterm Freundlich. Hal ini menyatakan jika proses adsorpsi MB ke permukaan adsorben cenderung membentuk lapisan tunggal (monolayer) pada situs adsorpsi yang relatif seragam hingga mencapai kondisi jenuh, temuan ini sejalan dengan beberapa penelitian sebelumnya oleh Khoshbouy et al. (2019), Chen et al. (2020), dan Jellali et al. (2022). Jellali et al. (2022) menyatakan jika lumpur yang diaktivasi dengan KOH menghasilkan struktur mikropori yang homogen dan seragam sehingga adsorbat cenderung menempati situs permukaan membentuk lapisan monolayer.

Berdasarkan pemodelan isoterm Langmuir terhadap data kesetimbangan adsorpsi, diperoleh nilai q_{max} sebesar 35,97 mg/g untuk adsorben dengan penyaring *nylon* dan 33,00 mg/g untuk

adsorben dengan penyaring kertas saring. Nilai q_{max} menunjukkan kapasitas adsorpsi maksimum teoritis adsorben terhadap MB pada kondisi jenuh.

4. KESIMPULAN

Lumpur Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) terpadu kawasan industri SIER dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku adsorben melalui proses pirolisis dan aktivasi kimia. Penggunaan media penyaring *nylon* menghasilkan adsorben dengan kualitas yang lebih baik yang ditunjukkan oleh kandungan karbon sebesar 39,3% dan luas permukaan BET sebesar 127,1 m²/g. Adsorben mampu menyisihkan metilen biru (MB) secara efektif pada kondisi optimum dengan massa adsorben 0,1 g, waktu kontak 30 menit, dan konsentrasi awal MB 10 ppm, dengan persentase penyisihan mencapai 90,8%. Adsorben berbasis lumpur IPAL berpotensi diterapkan pada skala industri sebagai material alternatif pengolahan air limbah untuk menyisihkan berbagai polutan sekaligus mendukung pemanfaatan lumpur sebagai sumber daya. Meskipun demikian, beberapa keterbatasan penelitian ini meliputi: tidak dilakukan pengujian distribusi ukuran pori adsorben, tidak menganalisis uji kinetika adsorpsi, tidak menguji kemampuan regenerasi adsorben, serta memungkinkan terjadi variabilitas lumpur IPAL yang dipengaruhi oleh jenis air limbah yang diolah. Pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan melalui

Asrim, W. O. M., Amin, R., dan Triyono. (2026). Pemanfaatan Lumpur dari Instalasi Pengolahan Air Limbah Terpadu Kawasan Industri sebagai Adsorben dalam Penghilangan Metilen Biru. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(4), 842-854, doi:10.14710/jil.24.4.842-854

pengujian ukuran pori adsorben, analisis kinetika adsorpsi, uji regenerasi, dan uji adsorpsi terhadap berbagai polutan seperti logam berat serta penerapan adsorben lumpur IPAL pada sistem kolom atau aliran kontinu untuk mengevaluasi kinerja dan kelayakannya pada kondisi yang mendekati aplikasi industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Agoe, A. K., Pouloupoulos, S. G., Sarbassov, Y., & Shah, D. (2024). Investigation of Sewage Sludge-Derived Biochar for Enhanced Pollutant Adsorption: Effect of Particle Size and Alkali Treatment. *Energies*, 17(18). <https://doi.org/10.3390/en17184554>
- Ahmad, M. A., Yusop, M. F. M., Awang, S., Yahaya, N. K. E. M., Rasyid, M. A., & Hassan, H. (2021). Carbonization of sludge biomass of water treatment plant using continuous screw type conveyor pyrolyzer for methylene blue removal. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 765(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/765/1/012112>
- Akhtar, M. S., Ali, S., & Zaman, W. (2024). Innovative Adsorbents for Pollutant Removal: Exploring the Latest Research and Applications. In *Molecules* (Vol. 29, Number 18). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/molecules29184317>
- Almahbashi, N. M. Y., Kutty, S. R. M., Ayoub, M., Noor, A., Salihi, I. U., Al-Nini, A., Jagaba, A. H., Aldhawi, B. N. S., & Ghaleb, A. A. S. (2021). Optimization of Preparation Conditions of Sewage sludge based Activated Carbon. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1175–1182. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.026>
- Chen, W., Guo, Y., Mi, X., Yu, Y., & Li, G. (2020). Enhanced adsorptive removal of methylene blue by low-temperature biochar derived from municipal activated sludge. *Desalination and Water Treatment*, 188, 257–265. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25452>
- Ehiomogue, P., Ahuchaogu, I., & Ahaneku, I. E. (2021). Review of Adsorption Isotherm Models. *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*, 87–96.
- Ferrentino, R., Ceccato, R., Marchetti, V., Andreottola, G., & Fiori, L. (2020). Sewage sludge hydrochar: An option for removal of methylene blue from wastewater. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/app10103445>
- Hamad, H. N., & Idrus, S. (2022). Recent Developments in the Application of Bio-Waste-Derived Adsorbents for the Removal of Methylene Blue from Wastewater: A Review. In *Polymers* (Vol. 14, Number 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym14040783>
- Jellali, S., Azzaz, A. A., Al-Harrasi, M., Charabi, Y., Al-Sabahi, J. N., Al-Raeesi, A., Usman, M., Al Nasiri, N., Al-Abri, M., & Jeguirim, M. (2022). Conversion of Industrial Sludge into Activated Biochar for Effective Cationic Dye Removal: Characterization and Adsorption Properties Assessment. *Water (Switzerland)*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/w14142206>
- Jha, S., Gaur, R., Shahabuddin, S., & Tyagi, I. (2023). Biochar as Sustainable Alternative and Green Adsorbent for the Remediation of Noxious Pollutants: A Comprehensive Review. In *Toxics* (Vol. 11, Number 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/toxics11020117>
- Jiang, R., Yu, G., Ndagijimana, P., Wang, Y., You, F., Xing, Z., & Wang, Y. (2021). Effective adsorption of Direct Red 23 by sludge biochar-based adsorbent: adsorption kinetics, thermodynamics and mechanisms study. *Water Science and Technology*, 83(10), 2224–2236. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.126>
- Khari, R. M., Prihatini, N. S., Apriani, & Pramaningsih, V. (2021). Penurunan Konsentrasi Warna Limbah Cair Sasirangan Menggunakan Adsorben Limbah Padat Lumpur-Aktif Teraktivasi Industri Karet. *Jukung Jurnal Teknik Lingkungan*, 7(1), 74–83. <https://doi.org/10.20527/jukung.v7i1.10822>
- Khoshbouy, R., Takahashi, F., & Yoshikawa, K. (2019). Preparation of high surface area sludge-based activated hydrochar via hydrothermal carbonization and application in the removal of basic dye. *Environmental Research*, 175, 457–467. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.04.002>
- Lestari, I., Mahraja, M., Farid, F., Gusti, D. R., & Permana, E. (2020). Penyerapan Ion Pb(II) Menggunakan Adsorben dari Limbah Padat Lumpur Aktif Pengolahan Air Minum. *Chemistry Progress*, 13(2), 68–76. <https://doi.org/10.35799/cp.13.2.2020.31391>
- Matheri, A. N., Eloko, N. S., Ntuli, F., & Ngila, J. C. (2020). Influence of pyrolyzed sludge use as an adsorbent in removal of selected trace metals from wastewater treatment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.cscce.2020.100018>
- Mian, M. M., Ao, W., & Deng, S. (2023). Sludge-based biochar adsorbent: pore tuning mechanisms, challenges, and role in carbon sequestration. In *Biochar* (Vol. 5, Number 1). Springer. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00288-w>
- Oumabady, S., Selvaraj, P. S., Kamaludeen, S. P. B., Ettiyagounder, P., Suganya, K., & Piriya, S. (2021). Application of sludge-derived KOH-activated hydrochar in the adsorptive removal of orthophosphate. *RSC Advances*, 11(12), 6535–6543. <https://doi.org/10.1039/d0ra10943f>
- Rajakaruna, R. M. A. S. D., Sewwandi, B. G. N., Najim, M. M. M., Baig, M. B., Alotaibi, B. A., & Traore, A. (2023). Sustainable Approaches for Wastewater Treatment: An Analysis of Sludge-Based Materials for Heavy Metal Removal from Wastewater by Adsorption. *Sustainability (Switzerland)*, 15(20). <https://doi.org/10.3390/su152014937>
- Rathi, B. S., & Kumar, P. S. (2021). Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater. *Environmental Pollution*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116995>
- Regkouzas, P., & Diamadopoulos, E. (2019). Adsorption of selected organic micro-pollutants on sewage sludge biochar. *Chemosphere*, 224, 840–851. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.165>
- Salmariza, S. (2020). Pemanfaatan limbah lumpur aktif (LLA) sebagai adsorben untuk meminimalisir zat pencemar dalam air dan air limbah: Sebuah Ulasan. *Jurnal Litbang Industri*, 10(2), 147–154. <https://doi.org/10.24960/jli.v10i2.6640.147-154>
- Saner, A., Carvalho, P. N., Catalano, J., & Anastasakis, K. (2022). Renewable adsorbents from the solid residue of sewage sludge hydrothermal liquefaction for wastewater treatment. *Science of the Total*

- Environment, 838.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156418>
- Setiawan, A., Bawafi, M. I. A., Ramadani, T. A., & Santiasih, I. (2021). Sintesis Karbon Aktif Limbah Lumpur Aktif Industri Gula sebagai Adsorben Limbah Logam Berat Cu(II). *TEKNIK*, 42(1), 316–324.
<https://doi.org/10.14710/teknik.v42i3.36031>
- Sharma, A. K., Ghodke, P. K., & Chen, W. H. (2024). Progress in green adsorbent technologies from sewage sludge for wastewater remediation and carbon capture: A sustainable approach towards clean environment. In *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* (Vol. 46). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100883>
- Soliman, M. F., Rashed, M. N., & Ahmd, A. A. (2023). Chemical Activation of Sludge from Drinking Water Treatment Plant for Adsorption of Methylene Blue Dye. *Water, Air, and Soil Pollution*, 234(4).
<https://doi.org/10.1007/s11270-023-06216-9>
- Soltani, A., Faramarzi, M., & Parsa, S. A. M. (2021). A review on adsorbent parameters for removal of dye products from industrial wastewater. In *Water Quality Research Journal* (Vol. 56, Number 4, pp. 181–193). IWA Publishing.
<https://doi.org/10.2166/wqrj.2021.023>
- Sutherland, K. (2008). *Filters and Filtration Handbook, Fifth Edition*. Elsevier.
- Tarifa, J. M., & Santos, A. dos. (2024). Discrete pore and particle size distributions during pore blocking and cake filtration. *Research, Society and Development*, 13(1), e3213144702. <https://doi.org/10.33448/rsd-v13i1.44702>
- Tu, W., Liu, Y., Xie, Z., Chen, M., Ma, L., Du, G., & Zhu, M. (2021). A novel activation-hydrochar via hydrothermal carbonization and KOH activation of sewage sludge and coconut shell for biomass wastes: Preparation, characterization and adsorption properties. *Journal of Colloid and Interface Science*, 593, 390–407.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.02.133>
- Villamil, J. A., Diaz, E., de la Rubia, M. A., & Mohedano, A. F. (2020). Potential use of waste activated sludge hydrothermally treated as a renewable fuel or activated carbon precursor. *Molecules*, 25(15).
<https://doi.org/10.3390/molecules25153534>
- Vorobiev, E. (2024). Analytical and numerical modelling of the effect of filter medium resistance on the mechanical dewatering of wastes and industrial filter cakes. *Chemical Engineering Research and Design*, 201, 108–119.
- Zeng, H., Qi, W., Zhai, L., Wang, F., Zhang, J., & Li, D. (2021). Preparation and characterization of sludge-based magnetic biochar by pyrolysis for methylene blue removal. *Nanomaterials*, 11(10).
<https://doi.org/10.3390/nano11102473>
- Zerin, I., & Dutta, E. (2018). A Review Article on Application of Filter Cloth. *International Journal of Clothing Science*, 5(1), 1–6.
<https://doi.org/10.5923/j.clothing.20180501.01>
- Zhao, F., Shan, R., Li, W., Zhang, Y., Yuan, H., & Chen, Y. (2021). Synthesis, Characterization, and Dye Removal of ZnCl₂-Modified Biochar Derived from Pulp and Paper Sludge. *ACS Omega*, 6(50), 34712–34723. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05142>