

PENGARUH AKTIVASI TERMAL BENTONIT DAN STUDI KINETIK PADA ADSORPSI METILEN BIRU

Puguh Setyoprato*, Rudy Agustriyanto, Aloisius Yuli Widiyanto, Candra Wijaya

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Surabaya, Jawa Timur 60293

*Penulis korespondensi: puguh@staff.ubaya.ac.id

Abstrak. Berbagai teknologi dikembangkan untuk menghilangkan pencemar zat warna dari aliran limbah cair industri, dan salah satu metode prospektif adalah adsorpsi karena mudah dioperasikan pada skala besar. Banyak pengembangan dilakukan untuk memperoleh adsorben berkapasitas tinggi dengan harga murah. Bentonit merupakan alternatif adsorben yang menjanjikan karena merupakan bahan alam yang melimpah. Penelitian ini melakukan studi adsorpsi metilen biru menggunakan bentonit yang diaktivasi secara termal. Variabel yang divariasikan adalah suhu aktivasi, yaitu 100 °C, 300 °C, 500 °C, 700 °C dan 900 °C. Tujuannya adalah melihat pengaruh suhu aktivasi terhadap efisiensi adsorpsi serta mengidentifikasi tahanan perpindahan massa yang mengendalikan proses adsorpsi melalui pengujian model kinetika difusi intrapartikel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu aktivasi berpengaruh signifikan terhadap efisiensi adsorpsi. Dengan melakukan pengukuran sisa metilen biru yang ada di cairan secara spektrofotometri, diperoleh kapasitas adsorpsi tertinggi 116,7 mg/g, yang dicapai pada bentonit yang diaktivasi pada 500 °C. Aktivasi pada suhu lebih rendah menghasilkan kapasitas yang tidak maksimal karena penghilangan air belum optimal, sedangkan aktivasi pada suhu lebih tinggi menyebabkan pelelehan sebagian komponen bentonit yang menurunkan luas permukaan spesifik. Uji model kinetika difusi intrapartikel membuktikan bahwa laju keseluruhan adsorpsi dikendalikan oleh perpindahan massa melalui difusi molekuler di dalam pori-pori bentonit.

Kata kunci: adsorpsi, bentonit, metilen biru, model kinetika

Abstract. Various technologies have been developed to remove dye contaminants from industrial wastewater, and adsorption is considered one of the most prospective methods because it is easy to operate on a large scale. Extensive efforts have been made to obtain low-cost adsorbents with high adsorption capacity, and bentonite is a promising alternative due to its natural abundance. This study investigates the adsorption of methylene blue using thermally activated bentonite. The variable being varied is the activation temperature, i.e. at 100°C, 300°C, 500°C, 700°C, and 900°C. The objective was to examine the effect of activation temperature on adsorption efficiency and to identify the mass transfer resistance controlling the overall adsorption process by assessing the intraparticle diffusion kinetic model. The results show that activation temperature significantly affects adsorption efficiency. By measuring the remaining methylene blue in the liquid spectrophotometrically, it was found that the highest adsorption capacity was 116.7 mg/g, obtained when bentonite was activated at 500°C. Activation at temperatures lower than 500 °C resulted in suboptimal adsorption due to incomplete water removal, whereas higher activation temperatures caused partial melting of bentonite components, leading to reduced specific surface area. The intraparticle diffusion kinetic analysis demonstrated that the overall adsorption rate is controlled by mass transfer through molecular diffusion within the bentonite pores.

Keywords: adsorption, bentonite, kinetic model, methylene blue

1. Pendahuluan

Polusi yang berasal dari bahan-bahan kimia berbahaya akhir-akhir ini masih tetap mengundang banyak perhatian karena semakin meningkatnya jumlah dan jenisnya seiring dengan perkembangan industri kimia. Urbanisasi, industrialisasi, eksplorasi, dan pertambangan telah mengakibatkan terjadinya pencemaran di air, udara, dan tanah. Polusi lingkungan merupakan salah satu bencana terbesar di dunia karena dampak jangka panjangnya (Gu et al., 2025).

Air merupakan zat terpenting yang menopang kehidupan, bagi semua makhluk hidup. Pemeliharaan fungsi vital tubuh manusia, seperti pernafasan, sirkulasi, ekskresi, dan reproduksi, melibatkan air sebagai zat yang penting dan diperlukan. Selain itu, kegiatan domestik dan industri memerlukan air sebagai zat penting untuk berbagai kegiatan operasional. Meningkatnya kegiatan domestik dan industri yang mencemari persediaan air dan mengurangi ketersediaan air bersih telah menarik perhatian pada pengolahan air sebagai prasyarat untuk mendapatkan air minum yang aman. Pencemaran air permukaan merupakan masalah di seluruh dunia yang sangat memprihatinkan sebagai akibat dari masalah kesehatan dan lingkungan yang terkait dengan pencemaran yang berasal dari polusi pewarna dan penggunaan bahan kimia berbahaya yang berlebihan, yang sebagian besar memusnahkan kehidupan laut dan juga mengancam kesehatan manusia. Baru-baru ini, banyak penelitian telah menunjukkan tingginya kejadian penyakit yang terkait dengan pencemaran air oleh bahan kimia, antara lain metilen biru, kolera, demam tifoid, dan penyakit yang ditularkan melalui air lainnya (Saheed et al., 2024).

Salah satu bahan kimia pencemar yang mendapat perhatian adalah limbah zat warna yang berasal dari industri pewarna, khususnya industri tekstil. Dari jumlah zat warna yang digunakan di industri tekstil, kurang lebih 10-15 % terbuang ke badan air selama proses sehingga mencemari lingkungan dan mengancam kesehatan masyarakat (Garud et al., 2025; Liu et al., 2025). Polutan organik seperti pewarna merupakan salah satu zat kimia yang sangat stabil dan tidak dapat diurai secara biologis (Elhadj-Daouadji et al., 2025). Konsentrasi zat warna di aliran *effluen* limbah industri berkisar 10-250 mg/L untuk level yang rendah, sementara untuk level konsentrasi tinggi bisa lebih dari 1.000 mg/L (Zhang, Zaoui and Sekkal, 2025).

Industri yang menggunakan zat warna dalam jumlah yang sangat besar berpotensi menimbulkan pencemaran yang signifikan terhadap lingkungan disebabkan oleh tingginya volume aliran limbah cair dan komposisi yang kompleks dari aliran tersebut (Batista et al., 2025). Industri tekstil dan pewarna berkontribusi paling besar terhadap pencemaran air dan tanah. Zat warna dan produk turunannya memiliki sifat mutagenik, karsinogenik atau toksik terkait kesehatan manusia dan juga mempunyai potensi mengontaminasi sumber air minum dan bisa masuk ke rantai pangan (Abdulhameed et al., 2025).

Zat warna diklasifikasikan menjadi beberapa kelompok berdasarkan beberapa kategori, yaitu: sifat ionik (kationik dan anionik), sumber (natural dan sintetis), struktur kimia (*azo*, *anthraquinone*, *nitro*, *nitroso*, *indigo* dsb.) dan aplikasinya (reaktif, *disperse*,

asam, basa, dsb.). Umumnya aliran limbah cair industri mengandung berbagai jenis zat warna, seperti metilen biru, *Rhodamine B*, *Congo red*, *metil orange*, *aniline yellow* dsb. Limbah cair mengandung tidak hanya satu jenis zat warna, tetapi juga berbagai jenis zat warna yang memiliki perbedaan pada muatan listrik, struktur molekul, dan sifat-sifat fisik maupun kimianya. Hal ini menyebabkan terbentuknya persenyawaan yang sangat kompleks sehingga pengolahannya menjadi tantangan secara global (Jha et al., 2025). Pewarna yang larut dalam air banyak digunakan dalam pengecatan, tekstil, plastik, pelapisan listrik (*electroplating*), percetakan, dan lain-lain. Namun, penggunaan pewarna yang larut dalam air dalam skala besar tidak hanya menghasilkan banyak air limbah yang berbahaya, tetapi juga menyebabkan efek toksik yang serius. Secara umum, ada tiga jenis pewarna yang larut dalam air, yaitu pewarna kationik, anionik, dan non-ionik. Metilen biru adalah salah satu contoh pewarna yang secara luas menggunakan *fenotiazin* kationik yang larut dalam air (Cao et al., 2024). Oleh karena itu, sebelum dialirkan ke badan air, polutan pewarna harus diolah terlebih dahulu dengan sistem pengolahan yang sangat baik, bijaksana dan efisien agar tidak mengakibatkan kerusakan lingkungan dan menimbulkan dampak buruk terhadap kesehatan manusia.

Berbagai metode pengolahan diterapkan untuk menghilangkan zat warna dari aliran limbah cair. Metode-metode tersebut mencakup koagulasi dan presipitasi, fotodegradasi, oksidasi elektrokimia, degradasi biologis, adsorpsi, filtrasi membran, penukar ion, dsb. Tetapi masing-masing metode mempunyai keterbatasan. Metode biologis sering tidak efektif untuk zat warna yang berasal dari polimer berstruktur kompleks. Di samping itu, banyak zat warna yang tidak bisa didegradasi secara biologis, sehingga metode biologis tidak cocok untuk zat warna tertentu. Salah satu kelemahan adsorpsi adalah kesulitan dalam meregenerasi adsorben setelah adsorben tersebut menyerap kontaminan. Sementara degradasi secara kimia, khususnya yang menggunakan zat kimia oksidatif seperti klorin, adalah metode yang efektif, namun menghasilkan produk samping yang bersifat toksik. Namun demikian, adsorpsi secara umum lebih disukai karena memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan metode-metode lain yang umumnya digunakan. Keunggulan-keunggulan itu mencakup pengoperasian yang sederhana, biaya yang relatif murah, berkelanjutan secara ekonomi maupun lingkungan, dan tidak menghasilkan produk samping yang membahayakan (Lu et al., 2025; Thottathil et al., 2025).

Adsorben adalah kunci teknologi adsorpsi dan penentu efisiensi dan biaya. Oleh karena itu, pencarian dan pengembangan untuk mendapatkan adsorben yang handal telah mendapat perhatian yang luas di kalangan para peneliti. Sejumlah bahan telah diolah menjadi bahan adsorben dan telah diinvestigasi untuk penghilangan zat warna antara lain: kulit pisang, tepung beras, tepung graham, karbon aktif, membran karbon yang dilapisi TiO_2 , chitosan, zeolit, *fly ash* (Hashem et al., 2025). Struktur molekul pewarna secara signifikan memengaruhi perilaku adsorpsinya. Molekul pewarna dengan gugus fungsi yang dapat membentuk ikatan hidrogen, interaksi elektrostatik, atau interaksi kimia lainnya dengan adsorben cenderung memiliki peluang teradsorpsi yang lebih tinggi (Salahshoori et al., 2024).

Pada penghilangan zat warna dengan metode adsorpsi, karbon aktif adalah adsorben konvensional yang paling umum digunakan, terutama karena kemampuannya menghasilkan interaksi hidrofobik untuk menyerap kontaminan anionik. Akan tetapi, karbon aktif adalah pilihan yang mahal untuk aplikasi skala industri, sehingga berbagai bahan yang berasal dari sumber bahan alam, limbah, dan rekayasa berbagai bahan telah diinvestigasi sebagai bahan alternatif. Bahan ini mencakup mineral *clay*, limbah biomassa, biopolimer, *metal oxide-organic framework*. Di antara bahan-bahan ini, mineral *clay* adalah bahan adsorben yang paling populer dan prospektif untuk penghilangan zat warna dari limbah cair karena ketersediaannya di alam melimpah dan keunggulan sifat-sifat adsorptifnya yang adaptif untuk berbagai jenis zat warna. Mineral *clay* mempunyai struktur berupa lapisan-lapisan (*a sheet-like structure*) yang tersusun dari silikat dan aluminat. Karena adanya muatan negatif permanen yang ada di permukaan, natural *clay* memiliki keunggulan dalam mengadsorpsi senyawa kationik melalui mekanisme interaksi ionik dan pertukaran kation (Zhang, Zaoui, and Sekkal, 2025).

Bentonit adalah mineral *clay* yang tersedia secara natural di alam dalam jumlah yang sangat besar, sangat potensial digunakan sebagai adsorben karena mempunyai struktur yang berpori, memiliki kestabilan kimia, mekanik dan termal, luas permukaan spesifik yang sangat besar dan kapasitas pertukaran kation yang juga sangat besar (El Abbadi et al., 2025; Hui et al., 2025). Bentonit adalah adsorben *phyllosilicate*, *clay* yang tidak murni dan umumnya mengandung *montmorillonite* (Kausar et al., 2018). Struktur dasar dari *montmorillonite* terdiri dari silika (*tetrahedron*) and alumina (*octahedron*). Molekul zat warna kationik di adsorb pada spasi antar lapisan (*the interlayer spacing*) pada partikel bentonit dengan mekanisme pertukaran kation (Cui and Chen, 2023; Yeo et al., 2025).

Pada penelitian ini dilakukan studi adsorpsi metilen biru dengan menggunakan bentonit yang diaktivasi secara termal. Bentonit dipilih sebagai bahan adsorben karena ketersediaannya di alam berlimpah dengan harga yang relatif murah. Aktivasi dilakukan secara termal karena sangat jarang ada penelitian yang melakukan observasi tentang hal ini. Banyak penelitian hanya membandingkan hasil adsorpsi pada bentonit sebelum dan sesudah aktivasi, tetapi sepanjang yang diketahui penulis belum ada yang meneliti hubungan suhu aktivasi terhadap kinerja adsorpsi dan apakah ada suhu optimum aktivasi terhadap bentonit. Padahal, kenaikan suhu dapat menyebabkan perubahan bertahap pada: air teradsorpsi, air antarlapis, luas permukaan spesifik, volume pori, jarak antarlapis *montmorillonite*, gugus fungsi permukaan, kapasitas tukar kation (*cation exchange capacity*), dan akhirnya situs aktif adsorpsi. Tujuan penelitian adalah untuk menginvestigasi pengaruh suhu aktivasi terhadap kinerja bentonit dalam mengadsorpsi zat warna metilen biru.

Studi kinetika juga dilakukan untuk menginvestigasi tahap yang menjadi penentu kecepatan adsorpsi secara keseluruhan dengan cara melakukan uji kesesuaian model kinetika difusi intrapartikel. Model kinetika *intraparticle diffusion* (Weber–Morris) digunakan untuk mengevaluasi tahap pengendali dalam proses adsorpsi, khususnya untuk mengetahui apakah perpindahan adsorbat dari larutan menuju permukaan dan ke dalam pori-pori adsorben dikendalikan oleh difusi di dalam partikel. Di samping itu dari model

Puguh Setyopratomo, Rudy Agustriyanto, Aloisius Yuli Widiyanto, Candra Wijaya
puguh@staff.ubaya.ac.id: Pengaruh Aktivasi Termal Bentonit Dan Studi Kinetik Pada Adsorpsi Metilen Biru
kinetika *intraparticle diffusion* akan didapatkan nilai koefisien difusi yang menunjukkan seberapa cepat tahap difusi *intraparticle* berlangsung.

2. Bahan dan Metode

2.1. Bahan

Bentonit komersial diperoleh dari P.T. Brataco Surabaya. Zat warna metilen biru diperoleh dari *Sigma-Aldrich*.

2.2. Aktivasi Bentonit

Bentonit dicuci dengan akuades sampai air bekas pencucian jernih, untuk memisahkan pengotor yang ada di dalamnya. Bentonit yang telah dicuci dikeringkan di dalam oven selama 1 jam pada suhu 100 °C. Selanjutnya, bentonit ditumbuk dan diayak untuk mendapatkan fraksi berukuran 140/200 mesh. Bentonit dengan ukuran 140/200 mesh tersebut diaktivasi secara termal di dalam furnace Vulcan D-550 dengan suhu aktivasi divariasikan pada 100, 300, 500, 700, dan 900 °C selama 5 jam.

2.3. Eksperimen Adsorpsi

Adsorpsi dilakukan secara *batch* dalam gelas kimia 500 ml yang dilengkapi dengan pengaduk magnetik. Cairan yang digunakan adalah larutan metilen biru sebanyak 250 ml dengan konsentrasi awal 200 ppm dengan massa bentonit 250 mg. Pengadukan dilakukan pada kecepatan putar 80 rpm secara terus-menerus. Konsentrasi metilen biru diukur dengan mengambil sampel setiap selang waktu tertentu dan dianalisis menggunakan metode spektrofotometri memakai spektrofotometer UV-Vis Genesys 150 Thermo Scientific. Eksperimen dihentikan sampai konsentrasi metilen biru di cairan dianggap mencapai kesetimbangan.

Efisiensi removal penghilangan metilen biru dihitung mengikuti formula berikut (Grouli et al., 2024):

$$Efisiensi\ Removal = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100\% \quad (1)$$

Di mana C_o (mg/L) adalah konsentrasi awal metilen biru dan C_e (mg/L) adalah konsentrasi metilen biru pada saat kesetimbangan.

Adapun kapasitas adsorpsi q_t (mg/g) adalah besaran yang menyatakan massa metilen biru yang teradsorpsi per satuan massa bentonit dan dihitung mengikuti formula berikut (Zhao et al., 2024):

$$q_t = \left(\frac{C_o - C}{m} \right) \times V \quad (2)$$

Di mana C (mg/L) adalah konsentrasi metilen biru di cairan, m (g) adalah massa bentonit yang digunakan, dan V (L) adalah volume larutan metilen biru yang digunakan.

2.3. Model Kinetika Difusi Intrapartikel

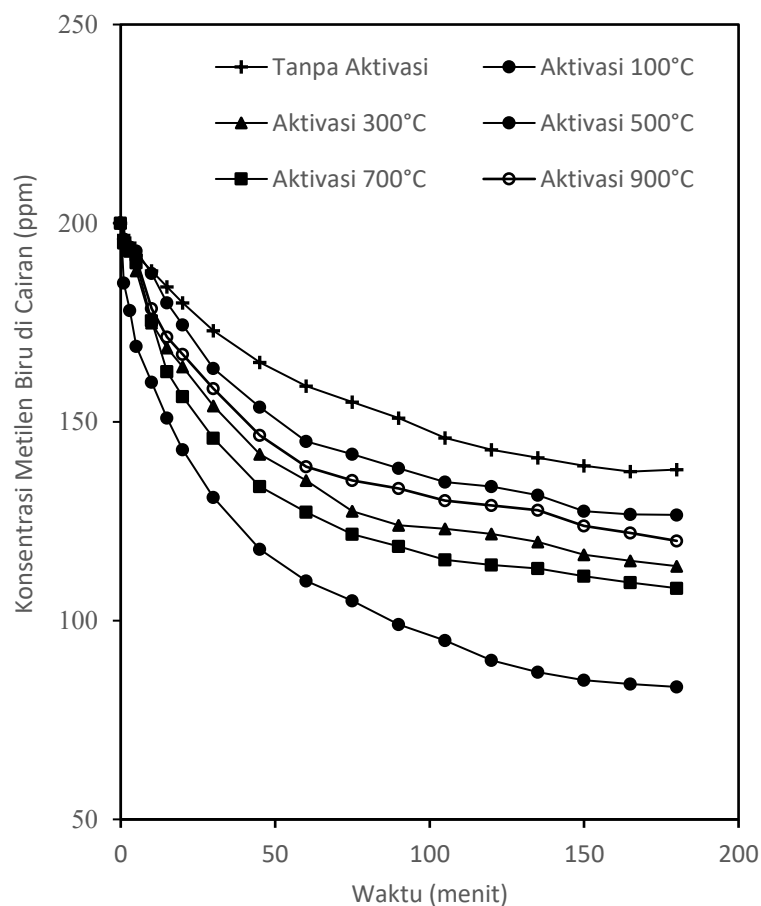
Model kinetika adsorpsi dikembangkan untuk mengobservasi laju adsorpsi dan lebih lanjut untuk menginvestigasi mekanisme yang terjadi selama proses adsorpsi. Model kinetika difusi intrapartikel dikembangkan untuk mengeksplorasi sejauh mana difusi molekul solute di dalam partikel adsorben memegang peran di dalam keseluruhan proses adsorpsi. Pengetahuan dan informasi tentang mekanisme proses adsorpsi sangat diperlukan dalam rangka pengembangan material adsorben dan optimasi proses adsorpsi secara keseluruhan. Model kinetika *difusi intrapartikel* dirumuskan dalam model kinetik Weber dan Morris berikut (Vuono et al., 2017; Rajabi, Mahanpoor and Moradi, 2019):

$$q_t = k_i t^{0,5} + C \quad (3)$$

Dalam persamaan tersebut, q_t (mg/g) adalah massa solut yang teradsorpsi pada adsorben per satuan massa adsorben pada waktu t , t (menit) adalah waktu adsorpsi, k_i (mg/g·menit^{0,5}) adalah konstanta kecepatan intrapartikel dan C (mg/g) merepresentasikan ketebalan *boundary layer* (Miyah et al., 2018). Jika plot q_t linier terhadap $t^{0,5}$, maka difusi intrapartikel merupakan tahap pengendali proses adsorpsi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Penurunan Konsentrasi Metilen Biru Di Cairan



Gambar 1. Penurunan Konsentrasi Metilen Biru di Cairan terhadap Waktu Adsorpsi

Pengaruh aktivasi termal bentonit terhadap kemampuan penghilangan metilen biru dapat dilihat dari penurunan konsentrasi metilen biru di cairan dari waktu ke waktu selama proses adsorpsi yang disajikan pada Gambar 1. Adsorpsi dilakukan secara *batch* dengan konsentrasi awal metilen biru sebesar 200 ppm dan mencapai kondisi kesetimbangan setelah adsorpsi berlangsung selama 180 menit.

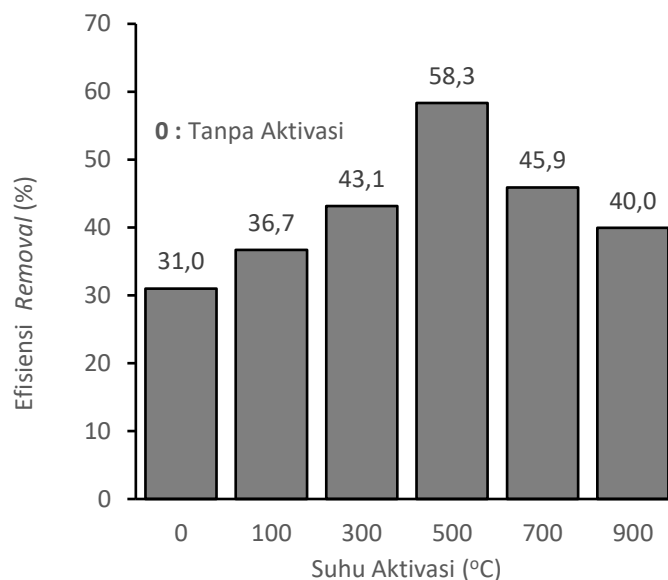
Dari gambar tersebut terlihat bahwa aktivasi termal yang dikenakan pada bentonit berpengaruh pada kinerja bentonit tersebut dalam penghilangan metilen biru dari cairan. Hal ini ditunjukkan oleh konsentrasi kesetimbangan yang berbeda-beda untuk bentonit yang mengalami aktivasi termal pada suhu yang berbeda.

Data penurunan konsentrasi metilen biru di cairan menunjukkan bahwa adsorpsi yang menggunakan bentonit yang diaktivasi secara termal menghasilkan konsentrasi kesetimbangan metilen biru di cairan yang lebih rendah dibandingkan dengan adsorpsi yang menggunakan bentonit yang tidak diaktivasi secara termal. Hal ini ditunjukkan oleh tahap aktivasi termal pada bentonit, yang diketahui dapat meningkatkan kemampuan bentonit dalam menghilangkan metilen biru dari cairan melalui adsorpsi. Konsentrasi metilen biru terendah dicapai pada adsorpsi yang menggunakan bentonit yang diaktivasi pada suhu 500 °C, yaitu sebesar 83 ppm, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.

Sehingga pada penelitian ini 500 °C adalah merupakan suhu aktivasi optimum terhadap bentonit. Dari Gambar 1 juga ditunjukkan bahwa aktivasi pada suhu yang lebih rendah maupun pada suhu yang lebih tinggi menghasilkan kemampuan adsorpsi yang lebih rendah dibandingkan aktivasi pada suhu 500 °C.

Pada aktivasi termal bahan-bahan mineral umumnya terjadi proses dehidrasi dan dehidroksilasi pada rentang suhu 50 °C – 800 °C, dan merupakan salah metode yang digunakan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi bahan adsorben. Dengan menggunakan teknik termogravimetri, telah diidentifikasi beberapa tahap yang terjadi selama aktivasi termal, yaitu: terlepasnya kandungan air higroskopis dan zeolitik pada suhu di bawah 200 °C, penghilangan air terikat (*bound water*) pada suhu antara 250– 450 °C, dan terlepasnya air terikat yang lebih kuat ikatannya yang dikenal sebagai *coordinated water* dan *hydroxyl groups* pada rentang suhu 450 – 850 °C. Aktivasi termal pada suhu yang tinggi bisa menyebabkan sebagian komponen mineral meleleh, dan fenomena ini akan mengurangi volume pori yang akibatnya akan menurunkan luas permukaan spesifik bahan yang diaktivasi termal (Mu and Wang, 2016).

Pada penelitian ini aktivasi termal bentonit pada suhu di bawah 500 °C menghasilkan kapasitas adsorpsi yang tidak maksimum, hal ini kemungkinan karena pelepasan kandungan air belum maksimal, adapun aktivasi di atas suhu 500 °C kemungkinan akan terjadi pelelehan sebagian komponen mineral bentonit yang mengakibatkan luas permukaan spesifiknya menurun. Dengan demikian suhu aktivasi memainkan peran yang sangat penting dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi bahan adsorben terhadap molekul solut.



Gambar 2. Efisiensi *Removal* Metilen Biru terhadap Suhu Aktivasi

Tabel 1. Kapasitas Adsorpsi Bentonit (mg/g)

Suhu aktivasi (°C)	Kapasitas adsorpsi,q (mg/g)
STP (tanpa aktivasi)	62,0
100	73,4
300	86,3
500	116,7
700	91,8
900	79,9

Aktivasi termal merupakan salah satu metode untuk meningkatkan kinerja adsorben dengan memberikan perlakuan panas pada material pada suhu dan atmosfer tertentu. Peningkatan kapasitas adsorpsi setelah aktivasi termal pada dasarnya terjadi karena perubahan struktur pori, peningkatan luas permukaan spesifik, penghilangan pengotor/komponen volatil, serta perubahan sifat kimia permukaan.

Adsorben sebelum diaktivasi umumnya masih mengandung berbagai komponen yang dapat menghambat proses adsorpsi, misalnya: air yang terikat secara fisik maupun kimia; senyawa organik volatil; zat ekstraktif; residu prekursor; senyawa yang menutup mulut pori; gugus permukaan yang belum berada dalam kondisi optimal untuk berinteraksi dengan adsorbat. Akibatnya, sebagian permukaan internal adsorben belum dapat diakses oleh molekul adsorbat. Dengan kata lain, luas permukaan yang benar-benar tersedia untuk adsorpsi (*accessible surface area*) dapat jauh lebih kecil daripada luas permukaan potensial material tersebut. Dengan aktivasi thermal komponen-komponen penghambat tersebut akan dihilangkan atau terkondisikan sehingga kapasitas adsorpsi adsorben akan meningkat.

3.2. Efisiensi Removal

Kinerja suatu adsorben dalam mengadsorpsi komponen tertentu bisa juga dinyatakan sebagai efisiensi *removal*. Efisiensi *removal* bentonit yang tidak teraktivasi dan yang teraktivasi secara termal disajikan pada Gambar 2. Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa efisiensi *removal* terhadap metilen biru tertinggi sebesar 58,3% dan dicapai pada bentonit yang diaktivasi pada suhu 500°C. Hasil ini menunjukkan bahwa suhu aktivasi bentonit mempengaruhi efisiensi *removal* metilen biru dari cairan. Efisiensi *removal* metilen biru menggunakan bentonit sebesar 58,3% ini dapat dikategorikan cukup baik, tetapi masih berada pada tingkat rendah-menengah. Efisiensi *removal* zat warna sangat dipengaruhi variable eksperimen diantaranya konsentrasi zat warna dan dosis adsorben.

3.3. Kapasitas Adsorpsi

Kapasitas adsorpsi juga merupakan cara yang lazim digunakan untuk mengukur kinerja adsorben dalam mengadsorpsi solut. Kapasitas adsorpsi terhadap metilen biru pada saat kesetimbangan, untuk bentonit yang tidak teraktivasi dan yang teraktivasi, disajikan pada Tabel 1. Bentonit yang diaktivasi pada suhu 500 °C memiliki kapasitas adsorpsi terhadap metilen biru tertinggi sebesar 116,7 mg/g. Kapasitas adsorpsi yang dicapai pada penelitian ini sedikit lebih tinggi dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Yildirim dan Acay (Yildirim and Acay, 2025) yang melakukan studi adsorpsi metilen biru pada bahan berbasis bentonit dan menghasilkan kapasitas adsorpsi sebesar 92.05 mg/g.

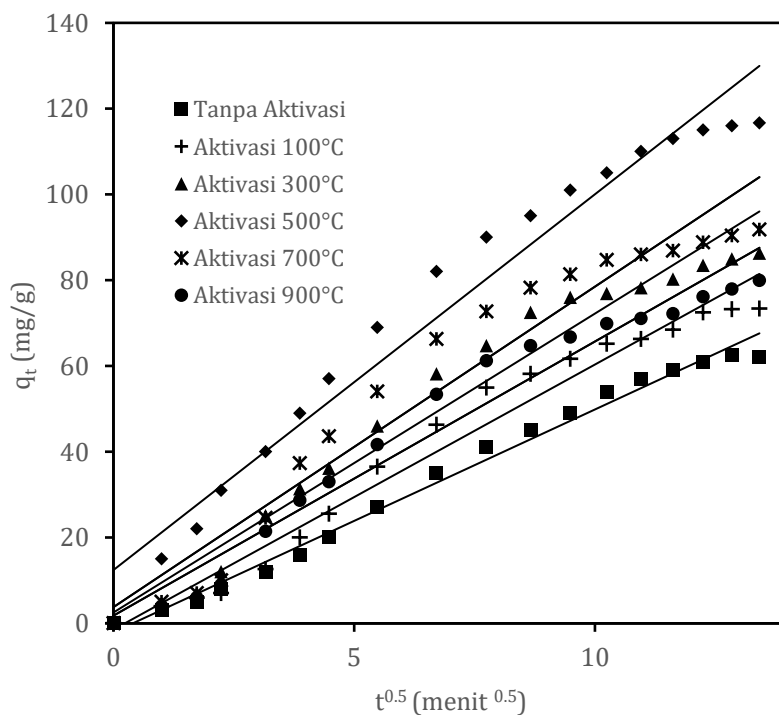
3.4. Uji Model Kinetika Difusi Intrapartikel

Efisiensi dan efektifitas proses adsorpsi diukur dengan mengevaluasi kinetika proses adsorpsi molekul solute ke permukaan adsorben untuk menentukan waktu *overall* yang dibutuhkan untuk proses tersebut sehingga bisa diterapkan untuk perancangan proses adsorpsi skala industri (Wakkel, Khiari and Zagrouba, 2019).

Sejauh menyangkut model difusi adsorpsi, beberapa solusi dapat ditemukan tergantung pada asumsi yang diberlakukan. Salah satu asumsi yang sering digunakan adalah membagi proses perpindahan molekul solut dari bulk cairan ke pusat aktif yang ada di permukaan adsorben menjadi tiga tahap proses perpindahan yang berlangsung secara seri, yaitu: tahap (1) perpindahan solut dari bulk cairan ke permukaan eksternal adsorben; tahap (2) difusi molekuler solut melalui pori-pori adsorben dari permukaan eksternal adsorben ke pusat aktif yang ada di permukaan pori yang dikenal dengan istilah difusi intrapartikel (*intraparticle diffusion*) dan; tahap (3) adsorpsi permukaan berupa pembentukan ikatan antara molekul solute dan pusat aktif di permukaan adsorben di dalam pori. Karena ketiga tahap tersebut berlangsung secara seri, maka laju keseluruhan akan dikendalikan oleh salah satu tahap yang lajunya paling lambat. Jika konsentrasi adsorbat yang sangat rendah tetap berada dalam larutan, difusi intrapartikel secara bertahap mulai melambat. Secara umum, proses adsorpsi dalam wadah *batch* yang diaduk dengan baik memastikan bahwa resistansi eksternal dapat diabaikan. Jadi, karena keseimbangan antara adsorbat di permukaan padatan adsorben dan zat terlarut dalam cairan di dalam pori-pori yang bersifat instan, maka hanya laju difusi intrapartikel yang mengontrol laju difusi secara keseluruhan (Silva et al., 2021).

Click or tap here to enter text. Pada penelitian ini dilakukan uji terhadap model kinetika difusi intrapartikel, dengan membandingkan nilai koefisien korelasi (R^2) hasil regresi, untuk melihat tahap mana yang mengontrol proses adsorpsi secara keseluruhan, apakah difusi eksternal dari cairan ke permukaan eksternal partikel ataukah difusi molekuler di dalam pori-pori adsorben.

Regresi linier q_t terhadap $t^{0.5}$ disajikan pada Gambar 3. dan nilai parameter model kinetika difusi intrapartikel disajikan pada Tabel 2. Nilai koefisien korelasi (R^2) yang tinggi membuktikan bahwa adsorpsi metilen biru pada bentonit mengikuti model kinetika difusi intrapartikel. Ini artinya tahanan difusi molekuler metilen biru di dalam pori-pori bentonit jauh lebih besar dari tahanan difusi dari cairan ke permukaan eksternal bentonit, yang menunjukkan bahwa difusi di dalam pori adalah tahap yang lambat, dan difusi di bulk cairan maupun mekanisme reaksi permukaan berlangsung cepat (Nayak and Pal, 2019). Regresi yang linier dan cenderung melalui titik *origin* tersebut menunjukkan bahwa ketebalan *boundary layer* pada fasa cair sangat tipis dan praktis keseluruhan proses adsorpsi dikontrol oleh difusi intrapartikel saja (Magdy and Altaher, 2018). Difusi intrapartikel disebut sebagai tahap pengendali laju apabila kecepatan adsorpsi terutama dibatasi oleh lambatnya adsorbat bergerak dari permukaan adsorben masuk ke dalam pori-porinya, yang didukung oleh hasil analisis model *Weber–Morris*, terutama linearitas yang kuat yang ditunjukkan oleh nilai koefisien korelasi (R^2) dari plot terhadap model kinetika *intraparticle diffusion* yang mendekati 1.



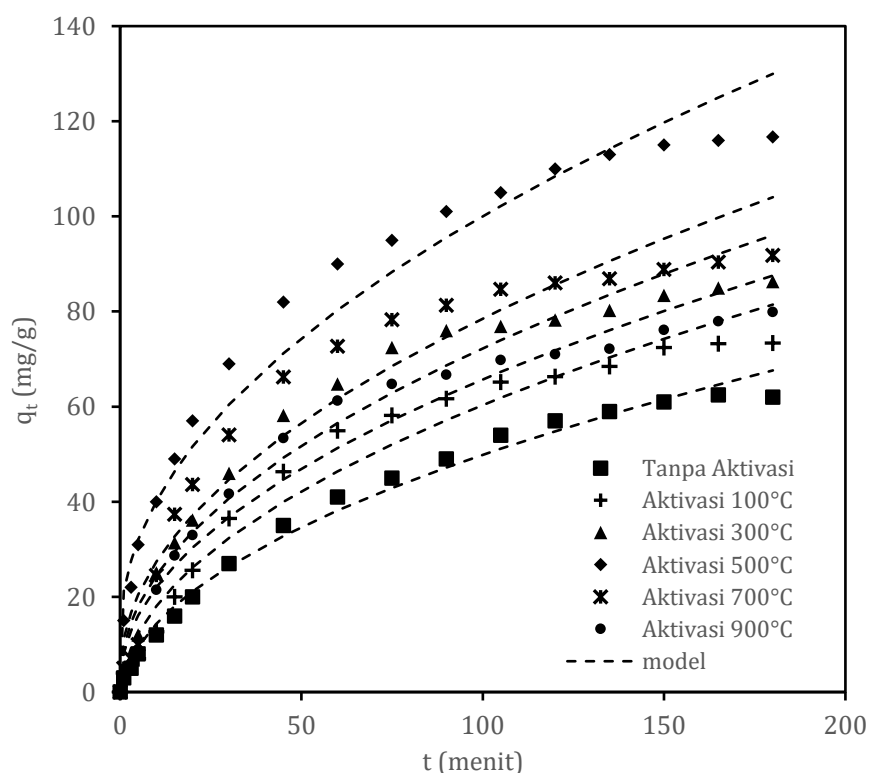
Gambar 3. Plot Regresi Linier q_t terhadap $t^{0.5}$

Tabel 2. Nilai Parameter Model Kinetika Difusi Intrapartikel

Parameter	Suhu Aktivasi (°C)
-----------	--------------------

	Tanpa Aktivasi	100	300	500	700	900
k_i	5,19	6,18	6,97	8,76	7,47	6,39
C	-2,08	-1,46	2,53	12,43	3,78	1,79
R^2	0,99	0,97	0,96	0,97	0,94	0,96

Plot q_t terhadap waktu adsorpsi t untuk data percobaan dan untuk model kinetika difusi intrapartikel disajikan pada Gambar 4. Plot ini mengkonfirmasi kesesuaian model kinetika difusi intrapartikel untuk sistem adsorpsi metilen biru pada bentonit. Kecepatan difusi intrapartikel ditunjukkan oleh kemiringan (*gradient*) plot tersebut, yang dapat dilihat pada saat awal adsorpsi kecepatan difusi sangat tinggi, selanjutnya menurun seiring dengan meningkatnya waktu adsorpsi.



Gambar 4. Plot q_t terhadap t untuk Data Percobaan dan Model Difusi Intrapartikel

4. Kesimpulan

Aktivasi termal terhadap bentonit telah terbukti mampu meningkatkan kemampuan bentonit dalam mengadsorpsi zat warna metilen biru. Dalam penelitian ini diperoleh suhu optimum aktivasi termal bentonit adalah 500 °C, yang menghasilkan bentonit dengan kapasitas adsorpsi terhadap metilen biru sebesar 116, 7 mg/g Studi kinetika menunjukkan bahwa model kinetika *intraparticle diffusion* sesuai untuk sistem adsorpsi metilen biru pada bentonit yang diaktivasi secara thermal.

Referensi

- El Abbadi, S., El Moustansiri, H., Douma, M., Bouazizi, A., Baidou, M., Elgamouz, A. and Tijani, N., 2025. Effective elimination of Congo red dye from tannery wastewater using Fe-pillared bentonite: Synthesis, adsorption isotherm, kinetics, and optimization via Box-Behnken design. *Microporous and Mesoporous Materials*, 392, p.113641. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2025.113641>.
- Abdulhameed, A.S., Abdullah, S., Al-Masud, A.A., Al Omari, R.H., Abualhaija, M. and Algburi, S., 2025. Production of sustainable adsorbent of crosslinked chitosan-oxalate and modified mango (*Mangifera indica* L.) seed for highly efficient adsorption of crystal violet dye: Water treatment and biomass valorization. *Biomass and Bioenergy*, 199, p.107889. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107889>.
- Batista, W.V.F. do C., da Cunha, R., Oliveira, W.L. de, Cruz, T. dos S. da, Gorgulho, H. de F., Ferreira, R.A. dos R., Pereira, M.C. and Mesquita, J.P., 2025. Improved dye adsorption and photodegradation using mesoporous carbon modified with titania and magnetic nanoparticles. *Results in Surfaces and Interfaces*, 19, p.100532. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2025.100532>.
- Cao, R., Zhang, E., Liu, Y., Li, A. and Zhang, W., 2024. Block copolymer nanoparticles doping polyacrylonitrile membranes for efficient adsorption of water-soluble dyes from water. *Chemical Engineering Journal*, 501, p.157712. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.157712>.
- Cui, Q. and Chen, B., 2023. Review of polymer-amended bentonite: Categories, mechanism, modification processes and application in barriers for isolating contaminants. *Applied Clay Science*, 235, p.106869. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.106869>.
- Elhadj-Daouadji, B., Zaoui, F., Zorgani, M.A., Abubakar, S., Siddig, L.A., Abdelhamid, A.S., Bhardwaj, M., Hachemaoui, M., Guezoul, M., Kumar, A., Bounaceur, B., Lebsir, F. and Saleh, N., 2025. Efficient removal of asphaltene and organic dyes using hybrid magnetic Nanomaterials: Adsorption selectivity and comparative study. *Fuel*, 381(PA), p.133284. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133284>.
- Garud, H.B., Patil, P.H., Jadhav, S.A., Patil, P.S., Kalantre, V.A. and Burungale, S.H., 2025. Effective removal of dyes from their mixture in solution by waste-derived microadsorbents: Physicochemical characterization and adsorption removal studies. *Next Research*, 2(2), p.100235. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100235>.
- Grouli, A., Chraka, A., Bachra, Y., Elkouali, M., Chtita, S. and Berrada, M., 2024. An investigation of the adsorption of Congo red dye on two naturally occurring adsorbents Hydroxyapatite and Bentonite: An Experimental Analysis, DFT calculations, and Monte Carlo simulation. *Heliyon*, 10(21), p.e39884. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39884>.

- Puguh Setyopratomo, Rudy Agustriyanto, Aloisiyus Yuli Widiyanto, Candra Wijaya
puguh@staff.ubaya.ac.id: Pengaruh Aktivasi Termal Bentonit Dan Studi Kinetik Pada Adsorpsi Metilen Biru
- Gu, C., Zhou, Y., Wu, B., Zhang, T., Dai, J. and Zhang, N., 2025. Quinoline hydrazide based organogelator for selective adsorption of anionic /cationic dyes by pH adjustment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 718, p.136902. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.136902>.
- Hashem, M.A., Bithi, E.J., Ahmed, N., Islam, S. and Miem, M.M., 2025. Dye adsorption from tannery wastewater on Tamarindus indica seed adsorbent. *Water-Energy Nexus*, 8, pp.45–54. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2025.03.003>.
- Hui, Y., Huan, Q., Hu, Y., Liu, Z., Lai, J., Wang, S., Cao, X., Wang, Z., Guo, Y. and Song, M., 2025. Permeability and adsorption mechanisms of surfactant and polymer modified bentonite in Pb(II) and Cr(VI) contaminated groundwater. *Separation and Purification Technology*, 366. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132774>.
- Jha, S., Gaur, R., Shahabuddin, S., Tyagi, I., Giri, J. and Kanan, M., 2025. Utilizing low-cost mausambi peel-derived adsorbents for the effective treatment of complex industrial dye mixture in wastewater: Unravelling the adsorption mechanism. *Cleaner Engineering and Technology*, 26, p.100951. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100951>.
- Kausar, A., Iqbal, M., Javed, A., Aftab, K., Nazli, Z. i. H., Bhatti, H.N. and Nouren, S., 2018. Dyes adsorption using clay and modified clay: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 256, pp.395–407. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.034>.
- Liu, J., Zhu, H., Qiang, Z., Zhao, Q., Que, C., Liu, C., Li, M., Cao, J., Wang, J. and Yang, X., 2025. Adsorption of cationic organic dyes from aqueous solutions by sulfonated covalent organic frameworks: Characterization and mechanistic explanations. *Separation and Purification Technology*, 364(P2), p.132466. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132466>.
- Lu, Y., Wu, Q., Meng, X., Zhang, H., Wang, X., Dong, Y., Xu, Y. and Zhang, J., 2025. Highly efficient and rapid adsorption of dyes by hollow mesoporous carbon spheres. *Separation and Purification Technology*, 365, p.132746. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132746>.
- Magdy, Y.H. and Altaher, H., 2018. Kinetic analysis of the adsorption of dyes from high strength wastewater on cement kiln dust. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), pp.834–841. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.009>.
- Miyah, Y., Lahrichi, A., Idrissi, M., Khalil, A. and Zerrouq, F., 2018. Adsorption of methylene blue dye from aqueous solutions onto walnut shells powder: Equilibrium and kinetic studies. *Surfaces and Interfaces*, 11, pp.74–81. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2018.03.006>.
- Mu, B. and Wang, A., 2016. Adsorption of dyes onto palygorskite and its composites: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), pp.1274–1294. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.01.036>.

- Nayak, A.K. and Pal, A., 2019. Development and validation of an adsorption kinetic model at solid-liquid interface using normalized Gudermannian function. *Journal of Molecular Liquids*, 276, pp.67–77. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.11.089>.
- Rajabi, M., Mahanpoor, K. and Moradi, O., 2019. Preparation of PMMA/GO and PMMA/GO-Fe₃O₄ nanocomposites for malachite green dye adsorption: Kinetic and thermodynamic studies. *Composites Part B: Engineering*, 167, pp.544–555. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.030>.
- Saheed, I.O., Zairuddin, N.I., Nizar, S.A., Hanafiah, M.A.K.M., Latip, A.F.A. and Suah, F.B.M., 2024. Adsorption potential of CuO-embedded chitosan bead for the removal of acid blue 25 dye. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(12), p.103125. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.103125>.
- Salahshoori, I., Wang, Q., Nobre, M.A.L., Mohammadi, A.H., Dawi, E.A. and Khonakdar, H.A., 2024. Molecular simulation-based insights into dye pollutant adsorption: A perspective review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 333, p.103281. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103281>.
- Silva, L.M.S., Muñoz-Peña, M.J., Domínguez-Vargas, J.R., González, T. and Cuerda-Correa, E.M., 2021. Kinetic and equilibrium adsorption parameters estimation based on a heterogeneous intraparticle diffusion model. *Surfaces and Interfaces*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100791>.
- Thottathil, S., Puttaiahgowda, Y.M., Selvaraj, R., Elambalassery, J.G., Vinayagam, R. and Varadavenkatesan, T., 2025. Experimental and DFT studies of Congo red and AB 113 dyes removal by adsorption and disinfection using novel triazine-based porous organic polymer. *Journal of Molecular Liquids*, 429. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.127628>.
- Vuono, D., Catizzzone, E., Aloise, A., Policicchio, A., Agostino, R.G., Migliori, M. and Giordano, G., 2017. Modelling of adsorption of textile dyes over multi-walled carbon nanotubes: Equilibrium and kinetic. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 25(4), pp.523–532. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2016.10.021>.
- Wakkel, M., Khiari, B. and Zagrouba, F., 2019. Textile wastewater treatment by agro-industrial waste: Equilibrium modelling, thermodynamics and mass transfer mechanisms of cationic dyes adsorption onto low-cost lignocellulosic adsorbent. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 96, pp.439–452. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.12.014>.
- Yeo, J.Y.J., Bergaoui, M., Nakhli, A., Khaerudini, D.S., Soetaredjo, F.E., Ismadji, S., Sunarso, J., Al-Hada, N.M., Al-Asbahi, B.A. and Khalfauoui, M., 2025. Exploring interface interactions in antibiotics adsorption on bentonite-alginate composite: Insights from advanced simulations and adsorption isotherms modeling. *Surfaces and Interfaces*, 60, p.106038. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106038>.

Puguh Setyopratomo, Rudy Agustriyanto, Aloisiyus Yuli Widiyanto, Candra Wijaya
puguh@staff.ubaya.ac.id: Pengaruh Aktivasi Termal Bentonit Dan Studi Kinetik Pada Adsorpsi Metilen Biru

Yildirim, A. and Acay, H., 2025. Methylene blue and malachite green dyes adsorption onto russula delica/bentonite/tripolyphosphate. *Heliyon*, 11(1), p.e41250. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41250>.

Zhang, L.L., Zaoui, A. and Sekkal, W., 2025. Ability and adsorption processes of anionic dye by polymer and surfactant-based organoclays. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 151, pp.251-263. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2025.03.051>.

Zhao, X., Yang, M., Shi, Y., Sun, L., Zheng, H., Wu, M., Gao, G., Ma, T. and Li, G., 2024. Multifunctional bacterial cellulose-bentonite@polyethylenimine composite membranes for enhanced water treatment: Sustainable dyes and metal ions adsorption and antibacterial properties. *Journal of Hazardous Materials*, 477, p.135267. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135267>.