

STUDI EFFISIENSI PENGHILANGAN WARNA PADA ADSORPSI ZAT WARNA ACID BLUE 29 PADA CARBON NANOTUBES TERAKTIVASI

STUDY OF COLOR REMOVAL EFFICIENCY IN THE ADSORPTION OF ACID BLUE 29 DYE ON ACTIVATED CARBON NANOTUBES

Puguh Setyoprato^{1*}, Nurfa Anisa², Rudy Agustriyanto¹

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Surabaya

Jl. Raya Kalirungkut, Surabaya, 60292, Indonesia

²Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Wisnuwardhana

Jl. Danau Sentani 99, Malang, 65199, Indonesia

*Email: puguh@staff.ubaya.ac.id

Abstrak

Activated carbon nanotubes memiliki potensi yang besar sebagai adsorben zat warna. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efisiensi penghilangan warna dan kapasitas adsorpsi *activated carbon nanotubes* terhadap zat warna *acid blue 29*. Lebih jauh akan dilakukan uji model kinetika difusi intrapartikel. Eksperimen dilakukan secara *batch* dengan bervariasi rasio massa *activated carbon nanotubes* terhadap volume larutan zat warna *acid blue 29*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi rasio massa *activated carbon nanotubes* terhadap cairan, semakin tinggi efisiensi penghilangan warnanya. Sementara itu, semakin rendah rasio massa *activated carbon nanotubes* terhadap volume cairan, semakin tinggi kapasitas adsorpsi *activated carbon nanotubes*. Uji model kinetika difusi intrapartikel menunjukkan bahwa tahap difusi molekuler solut di dalam pori-pori *activated carbon nanotubes* merupakan tahap pengendali keseluruhan proses adsorpsi.

Kata kunci acid blue 29, adsorpsi, carbon nanotubes, efisiensi penghilangan, model kinetik

Abstract

Activated carbon nanotubes have great potential as an dyes adsorbent. This study aims to determine the removal efficiency and adsorption capacity of *activated carbon nanotubes* against *acid blue 29* dye. Furthermore, an intraparticle diffusion kinetics model assessment will be carried out. Experiments were carried out in batches by varying the mass ratio of *activated carbon nanotubes* to the *acid blue 29* dye solution volume. The results showed that the higher the mass ratio of *activated carbon nanotubes* to the liquid, the higher the removal efficiency. It was also found that the lower the mass ratio of *activated carbon nanotubes* to the liquid volume, the higher the adsorption capacity of *activated carbon nanotubes*. The intra-particle diffusion kinetics model test showed that the molecular diffusion stage of the solute within the pores of the *activated carbon nanotubes* is the controlling stage of the entire adsorption process.

Keywords acid blue 29, adsorption, carbon nanotubes, kinetic model, removal efficiency

Pendahuluan

Populasi penduduk di Indonesia meningkat cukup pesat setiap tahunnya. Populasi yang semakin meningkat ini membuat industri-industri juga berkembang pesat, salah satunya industri tekstil. Industri tekstil ini juga memberikan dampak negatif bagi lingkungan karena penggunaan zat warna sintetis yang tidak seluruhnya terserap ke dalam bahan yang diwarnai dan terbuang menjadi limbah cair. Limbah cair zat warna sintetis jika dibuang ke lingkungan menyebabkan rusaknya keseimbangan ekosistem lingkungan karena menyebabkan meningkatnya COD, BOD, TDS, salinitas, turbiditas dan menambah kandungan sulfid dan amonia [1].

Pencemaran lingkungan oleh industri bisa berdampak pada buruknya kualitas air. Kualitas air yang buruk secara fisik dapat dilihat dengan mengamati warna, bau, dan karakteristik air tersebut. Pencemaran oleh zat warna dapat dilihat secara kimia dengan mengamati pH. Beberapa industri yang menghasilkan limbah zat warna adalah industri tekstil, kertas, kosmetik, cat, percetakan, makanan, minuman dan industri kulit [2]. Kebutuhan zat warna baik untuk keperluan proses produksi dan industri meningkat tiap tahunnya. Sekitar 10.000 jenis pewarna digunakan industri tekstil dan lebih dari 7×10^5 ton bahan pewarna diproduksi setiap tahunnya. Selama proses pewarnaan berlangsung, sebagian dari zat warna yang digunakan akan terbuang menjadi limbah. Secara global diperkirakan dihasilkan sebanyak 92 juta ton limbah tekstil per tahun [3].

Di dalam air limbah yang mengandung zat warna terdapat komponen-komponen yang dapat menyebabkan gangguan kesehatan seperti iritasi kulit, iritasi mata hingga menyebabkan kanker [4]. Zat warna juga dapat memberikan efek terhadap organisme akuatik akibat berkurangnya intensitas cahaya matahari dan dapat bersifat toksik bagi flora dan fauna karena mengandung senyawa aromatik, logam, chlorida, dan lain-lain [5].

Metode adsorpsi merupakan metode pengolahan limbah zat warna yang paling sering digunakan karena murah dan mudah ditangani [6]. Selama ini, terdapat berbagai jenis adsorben yang umum dipakai untuk adsorpsi zat warna seperti karbon aktif, *graphene nanosheets*, *carbon nanotubes*, batu bata yang dihancurkan, *magnet/graphene oxide composite*, dan sekam padi. Akhir-akhir ini, *carbon nanotubes* telah muncul sebagai adsorben baru untuk menghilangkan zat warna dari air limbah [7].

Sebagian besar penelitian adsorpsi zat warna pada bahan karbon, seperti karbon aktif dan *carbon nanotubes*, telah memfokuskan untuk menentukan kapasitas adsorpsi zat-zat pewarna dan atau pada aspek kinetika dari adsorpsi. Karena informasi terkait kapasitas adsorpsi dan kinetika adsorpsi sangat dibutuhkan untuk mendesain proses adsorpsi skala industri. Karena itu penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efisiensi penghilangan warna dan kapasitas adsorpsi *activated carbon nanotubes* terhadap zat warna *acid blue 29*. Lebih jauh akan dilakukan uji model kinetika difusi intrapartikel. Eksperimen dilakukan secara *batch* dengan bervariasi rasio massa *activated carbon nanotubes* terhadap volume cairan larutan zat warna *acid blue 29*.

Teori

Zat warna biasanya merupakan senyawa organik berwarna atau campuran yang dapat digunakan untuk memberi warna pada substrat seperti, makanan, kain tekstil, kertas, plastik, kulit, tinta, dan lain-lain, yang memiliki ketahanan terhadap prosedur pencucian normal atau pembersihan dan stabilitas terhadap cahaya. Pewarnaan dari zat warna berasal dari kromofor ikatan azo dan berbagai gugus fungsionalnya seperti, $-NH_2$, $-OH$, $-COOH$, $-SO_3$. Berdasarkan sumbernya, zat warna dikelompokkan menjadi *natural dyes* (zat warna alami) dan *synthetic dyes* (zat warna sintetik). Zat warna alami berasal dari tumbuhan, sedangkan zat warna sintetik berasal dari senyawa organik atau anorganik [8].

Zat warna yang digunakan sebagai pewarna kain akan terikat kuat pada serat selulosa, seperti kapas. Hal ini menyebabkan zat warna tersebut menjadi persisten di lingkungan karena ketahanannya terhadap degradasi alami, yang disebabkan oleh stabilitas kimianya dan adanya amina aromatik, yang menghambat degradasi alami [9].

Carbon nanotubes adalah material yang berbentuk tabung yang dindingnya berupa atom karbon dengan struktur heksagonal yang berukuran nanometer. Terdapat 2 macam struktur dinding pada *carbon nanotubes* yaitu *single-walled carbon nanotubes* (SWCNT) jika dindingnya hanya satu lapis karbon dan *multi-walled carbon nanotubes* (MWCNT) jika dindingnya terdiri dari beberapa lapis karbon. *Carbon nanotubes* memiliki keunikan dalam strukturnya yaitu lembaran *graphene*, yang telah digulung menjadi bentuk silindris dan menunjukkan kelengkungan dinding yang teratur [10].

Carbon nanotubes memiliki sifat yang menarik seperti area permukaan yang luas, dimensi yang kecil karena berukuran nanometer, stabilitas kimia yang tinggi, kekuatan mekanik yang tinggi, massa jenis yang rendah sehingga sangat fleksibel [11]. Ada beberapa metode yang digunakan dalam sintesis *carbon nanotubes*, yakni *chemical vapor deposition* (CVD), *laser ablation*, dan *arc discharge*. Dari metode-metode tersebut perbedaannya pada prinsipnya adalah cara menyediakan energi bagi atom karbon untuk tumbuh membentuk *carbon nanotubes* [12].

Adsorpsi dengan adsorben *carbon nanotubes* yang morfologinya berupa bundel, molekul solut dapat teradsorpsi di area yang berbeda, yaitu: (1) situs internal: situs ini ditemukan di dalam struktur berongga tabung dan hanya tersedia ketika ujung tabung tutupnya terbuka; (2) ruang interstisial: situs ini mudah diakses oleh spesies adsorbat dan ditemukan di ruang interior bundel di antara *carbon nanotubes* individual; (3) alur eksternal: yaitu alur yang ada di pinggir bundel *carbon nanotubes* dan permukaan luar *carbon nanotubes* terluar, tempat dua tabung paralel yang berdekatan bertemu; (4) situs permukaan terbuka atau permukaan luar: situs permukaan luar sangat mudah diakses oleh adsorbat (adsorpsi permukaan eksternal) dan ditemukan pada permukaan melengkung *carbon nanotubes* individual di bagian luar bundel *carbon nanotubes* [13].

Sebagai bahan adsorben, *carbon nanotubes* unggul karena memiliki luas permukaannya yang tinggi, daya tahan mekanik, porositas tinggi, dan stabil secara termal dan kimia, sehingga menjadikannya kandidat yang sangat baik sebagai adsorben untuk zat warna. Morfologinya yang berbentuk tabung berongga dan konjugasi π yang diperluas memungkinkan interaksi dengan berbagai macam polutan organik, khususnya melalui interaksi ikatan π - π dan interaksi hidrofobik [14]. Namun *carbon nanotubes* yang belum diaktivasi menunjukkan kapasitas adsorpsi yang terbatas. Hal ini dikarenakan pada *carbon nanotubes* yang belum diaktivasi pada kedua ujungnya kondisinya masih tertutup, baik tertutup oleh *carbon nanotubes cap* maupun oleh katalis logam. Dengan proses aktivasi, *carbon nanotubes cap* akan terbuka dan katalis logam terpisahkan. Dengan demikian kedua ujung *carbon nanotubes* menjadi terbuka dan memungkinkan molekul zat warna memasuki ruang bagian dalam *carbon nanotubes*, teradsorpsi pada permukaan dalam *carbon nanotubes*. Dengan demikian proses aktivasi akan meningkatkan kemampuan *carbon nanotubes* dalam mengadsorpsi zat warna.

Metodologi Penelitian

Bahan dan alat

Pada penelitian ini bahan yang digunakan sebagai adsorbat (bahan yang terserap) adalah zat warna *acid blue 29* ($C_{22}H_{14}N_6Na_2O_9S_2$) dengan berat molekul 616,5 g/mol dan *multi-walled carbon nanotubes* sebagai adsorben (bahan yang menyerap) dengan diameter luar 8-14 nm serta diameter dalam 4-10 nm [15]. *Carbon nanotubes* tersebut disintesa dengan metode *chemical vapor deposition* dengan katalis Fe-Co-Mo/MgO [16]. Untuk mengetahui morfologi *carbon nanotubes* dilakukan analisa menggunakan *scanning electron microscope* (SEM). Eksperimen adsorpsi dilakukan dalam gelas beaker yang dilengkapi dengan pengaduk magnetik.

Preparasi *activated carbon nanotubes*

Preparasi *activated carbon nanotubes* dimulai dengan mencampurkan sampel *carbon nanotubes* dengan larutan 3M HNO_3 dan merefluksnya selama 8 jam pada suhu $75^\circ C$ dengan pengadukan secara kontinu. Mendingkan larutan pada suhu kamar semalam (*overnight*), dan selanjutnya merefluk kembali selama 7 jam. Selanjutnya mencuci sampel *carbon nanotubes* dengan air destilasi sampai pH mencapai sekitar 7. Pada tahap akhir mengeringkan sampel *carbon nanotubes* teraktivasi di dalam oven pada suhu $105^\circ C$ selama 4 jam.

Eksperimen adsorpsi

Eksperimen dilakukan dengan melakukan variasi massa *activated carbon nanotubes* sebanyak 0,2; 0,4; 0,8; 1,6; dan 3,2 gram pada volume larutan *acid blue 29* tetap sebesar 500 mL. Percobaan dimulai dengan memasukkan larutan zat warna *acid blue 29* dengan konsentrasi 80 ppm ke dalam gelas beaker kemudian mengaduknya dengan *magnetic stirrer* dengan kecepatan pengadukan 120 rpm. Memasukkan sejumlah *activated carbon nanotubes* sesuai variasi yang ditentukan ke dalam gelas beaker tersebut dengan tetap melakukan pengadukan. Pada setiap selang waktu tertentu dilakukan pengambilan sampel cairan dari gelas beaker untuk menentukan konsentrasi zat warna. Pengukuran konsentrasi *acid blue 29* dilakukan dengan metode spektrofotometri dengan menggunakan *Spektrofotometer UV-Vis Genesys 150 Thermo Scientific*.

Penentuan efisiensi penghilangan warna dan kapasitas adsorpsi

Keberhasilan proses adsorpsi dapat diukur dari sejauh mana adsorben mampu memisahkan adsorbat dari fasa cair. Salah satu parameter untuk mengukur keberhasilan tersebut adalah dengan mengukur efisiensi penghilangan warnanya, yang pada prinsipnya adalah prosentase massa adsorbat yang berhasil dipisahkan dari fasa cair dan dihitung dengan formula berikut [17]:

$$\text{Efisiensi penghilangan warna} = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100\% \quad \dots(1)$$

dimana C_o (ppm) adalah konsentrasi zat warna di cairan pada saat awal dan C_e (ppm) adalah konsentrasi zat warna di cairan pada saat kesetimbangan tercapai.

Ukuran lain yang juga lazim digunakan untuk mengukur keberhasilan proses adsorpsi dan sekaligus mengukur kemampuan adsorben mengadsorpsi adsorbat adalah dengan mengukur kapasitas adsorpsi adsorbennya, q_t (mg/g) dan dihitung mengikuti rumusan berikut [18]:

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

dalam persamaan tersebut C_o (ppm) merepresentasikan konsentrasi awal *acid blue 29* di cairan, sedangkan C_e (ppm) merepresentasikan konsentrasi *acid blue 29* yang tersisa di dalam fasa cair pada saat kesetimbangan tercapai, m (g) merepresentasikan massa *activated carbon nanotubes* yang digunakan dalam percobaan dan V (L) merepresentasikan volume larutan *acid blue 29* yang digunakan dalam percobaan. Kapasitas adsorpsi q_t pada prinsipnya adalah mg adsorbat yang berhasil di adsorb oleh 1 gram adsorben.

Model kinetika difusi intrapartikel

Proses adsorpsi pada dasarnya adalah proses perpindahan massa, Dimana molekul solut di fasa cair bermigrasi ke permukaan adsorben dengan cara difusi. Sebagaimana perpindahan massa pada umumnya yang menjadi gaya pendorong atau *driving force* proses adsorpsi adalah perbedaan konsentrasi solut di *bulk* fasa cair dan di *interface* permukaan adsorben.

Proses migrasi solut dari *bulk* fasa cair sampai mencapai permukaan adsorben akan mengalami beberapa tahapan yang terdiri dari difusi eksternal melalui *film* cairan dan difusi molekuler di dalam pori partikel adsorben. Difusi eksternal di *film* memindahkan molekul solut dari *bulk* cairan ke permukaan eksternal adsorben, sedangkan difusi molekuler dalam pori memindahkan molekul solut dari permukaan eksternal adsorben ke pusat aktif di permukaan pori dalam adsorben.

Jadi perpindahan molekul solut dari *bulk* cairan ke pusat aktif yang ada di permukaan pori katalis mengalami dua tahanan perpindahan massa yang tersusun seri, yaitu tahanan difusi di *film* eksternal dan tahanan difusi

molekuler di dalam pori. Dari dua tahanan tersebut jika salah satu lebih dominan dari yang lain maka keseluruhan proses adsorpsi dikontrol oleh tahap yang memiliki tahanan dominan.

Studi kinetika difusi intrapartikel dilakukan untuk mengetahui tahap mana yang mengendalikan proses adsorpsi secara keseluruhan. Model kinetika yang lazim digunakan untuk maksud tersebut adalah rumusan yang dikemukakan oleh Weber dan Morris berikut [19]:

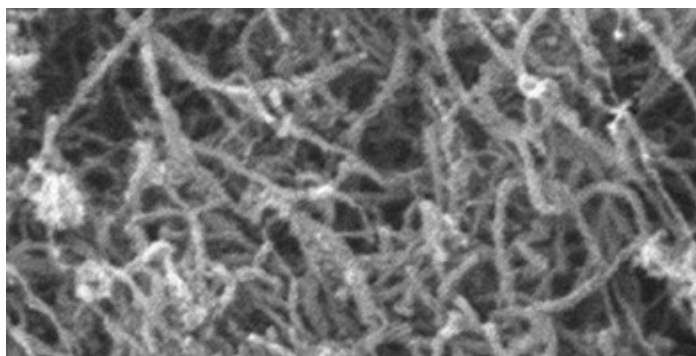
$$q_t = k_i t^{0.5} + C \quad \dots(3)$$

Jika data dari suatu proses adsorpsi berkesesuaian dengan rumusan diatas menunjukkan bahwa tahap difusi molekuler di dalam pori mengendalikan keseluruhan tahap adsorpsi.

Hasil

Morfologi carbon nanotubes

Morfologi *carbon nanotubes* yang dianalisa menggunakan *scanning electron microscope* disajikan pada Gambar 1. Dari gambar tersebut terlihat bahwa *carbon nanotubes* memiliki morfologi berupa *bundle* dan di dalam *bundle carbon nanotubes* individu saling menjerat satu dengan lainnya. Morfologi yang demikian juga banyak dihasilkan dari peneliti-peneliti lain.



Gambar 1. Hasil analisa *scanning electron microscope* terhadap *carbon nanotubes*

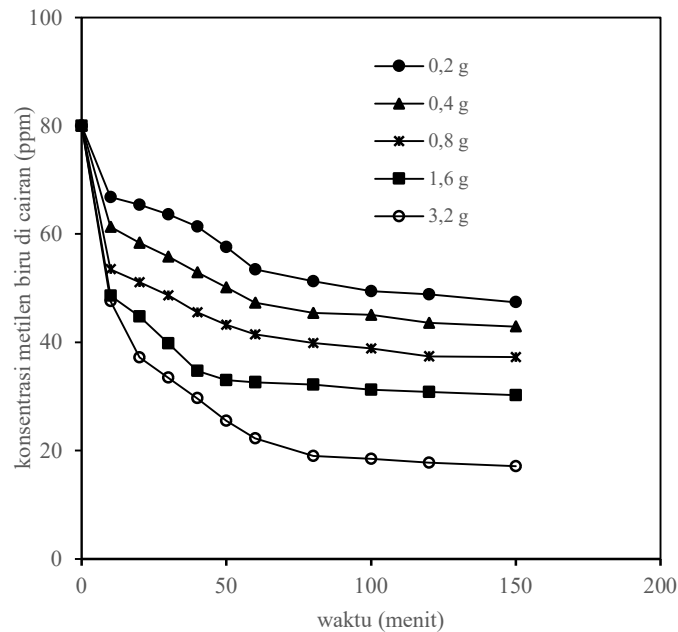
Penurunan konsentrasi *acid blue 29* di cairan

Profil konsentrasi *acid blue 29* di cairan dari waktu ke waktu di sajikan pada Gambar 2. Profil tersebut secara umum menunjukkan bahwa konsentrasi *acid blue 29* di cairan menurun tajam pada saat-saat awal, kemudian penurunannya berkurang seiring berjalannya adsorpsi dan akhirnya konsentrasi *acid blue 29* di cairan tidak mengalami perubahan.

Penurunan konsentrasi *acid blue 29* di cairan yang tajam pada saat-saat awal menunjukkan kecepatan adsorpsi sangat tinggi di saat-saat awal. Hal ini disebabkan karena *driving force* proses adsorpsi, yang berupa perbedaan konsentrasi *acid blue 29* di bulk cairan dan di *interface* fasa cair di sekitar pusat aktif di permukaan pori *carbon nanotubes*, sangat tinggi di saat-saat awal. Kemudian seiring berjalannya waktu konsentrasi *acid blue 29* di bulk cairan menurun dan sementara konsentrasi *acid blue 29* di *interface* fasa cair di sekitar pusat aktif di permukaan meningkat, jadi *driving force* proses adsorpsi semakin lama semakin menurun seiring dengan berjalannya proses adsorpsi. Hal inilah yang menyebabkan kecepatan adsorpsi semakin menurun seiring berjalannya waktu adsorpsi. Pada akhir adsorpsi konsentrasi *acid blue 29* di cairan tidak mengalami perubahan karena tidak ada lagi *driving force* proses adsorpsi. Hal ini karena konsentrasi *acid blue 29* di bulk cairan sama dengan konsentrasi *acid blue 29* di *interface* fasa cair di sekitar pusat aktif di permukaan pori *carbon nanotubes*. Pada kondisi ini proses adsorpsi mencapai keadaan setimbang.

Secara umum profil penurunan konsentrasi zat warna pada adsorpsi dapat dibagi menjadi tiga fase berikut: (1) fase awal: penurunan konsentrasi zat warna cepat karena adsorben masih memiliki banyak situs aktif yang tersedia; (2) fase transisi: penurunan konsentrasi zat warna melambat karena situs aktif adsorben mulai terisi; (3) fase kesetimbangan: penurunan konsentrasi zat warna berhenti karena adsorben telah mencapai kapasitas adsorpsi maksimum.

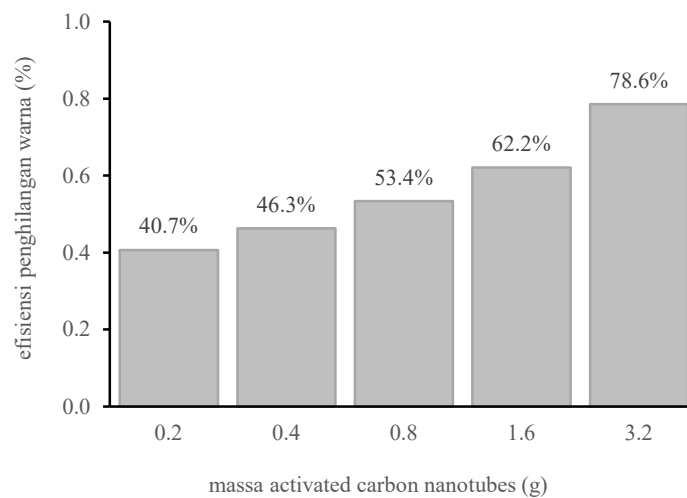
Beberapa faktor yang mempengaruhi profil penurunan konsentrasi zat warna adalah: (a) konsentrasi awal zat warna: konsentrasi awal yang lebih tinggi dapat memperlambat laju penurunan konsentrasi; (b) jumlah adsorben: jumlah adsorben yang lebih banyak dapat mempercepat laju penurunan konsentrasi; (c) pH dan suhu: pH dan suhu dapat mempengaruhi kapasitas adsorpsi dan laju penurunan konsentrasi; (d) jenis adsorben: jenis adsorben yang berbeda dapat memiliki profil penurunan konsentrasi yang berbeda.



Gambar 2. Pofil penurunan konsentrasi acid blue 29 di cairan dari waktu ke waktu

Efisiensi penghilangan warna

Efisiensi penghilangan warna *acid blue 29* ditunjukkan pada Gambar 3. Pofil tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi rasio massa *carbon nanotubes* terhadap cairan, semakin tinggi efisiensi penghilangan warnanya. Efisiensi penghilangan warna tertinggi yang dicapai sebesar 78,6 % pada saat massa *carbon nanotubes* yang digunakan 3,2 g. Hasil ini lebih tinggi dari penelitian yang dilakukan oleh Khalil M.A. Qasem (2025) yang mendapatkan efisiensi penghilangan warna sebesar 34,2 % yang menggunakan *carbon nanotubes* untuk menghilangkan zat warna *remazol red RB* [20].



Gambar 3. Efisiensi penghilangan warna pada berbagai massa adsorben

Kapasitas adsorpsi

Kemampuan adsorben menyerap adsorbat lazimnya dinyatakan sebagai kapasitas adsorpsi, yang menunjukkan mg adsorbat yang dapat diserap per gram adsorben. Data kapasitas adsorpsi *activated carbon nanotubes* pada penelitian ini dalam menyerap *acid blue 29* ditunjukkan dalam Tabel 1.

Pada tabel tersebut dapat dilihat bahwa semakin kecil massa *activated carbon nanotubes* yang digunakan, yang berarti semakin rendah rasio massa *activated carbon nanotubes* terhadap volume cairan yang digunakan, semakin tinggi kapasitas adsorpsi *activated carbon nanotubes*. Hal ini karena semakin sedikit massa *activated carbon nanotubes* maka total luas area yang tersedia untuk menampung *acid blue 29* semakin sedikit sehingga molekul *acid blue 29* pada permukaan pada kondisi setimbang akan lebih rapat dibanding kalau digunakan massa

activated carbon nanotubes yang lebih besar. Kapasitas adsorpsi terbesar yang dicapai adalah 81,43 mg *acid blue 29* per g *activated carbon nanotubes* dan dicapai ketika digunakan *activated carbon nanotubes* sebanyak 0,2 g. Sebagai perbandingan Guobin Song (2025) menghasilkan kapasitas adsorpsi sebesar 133,5 mg/g dengan menggunakan *pristine carbon nanotubes* [21].

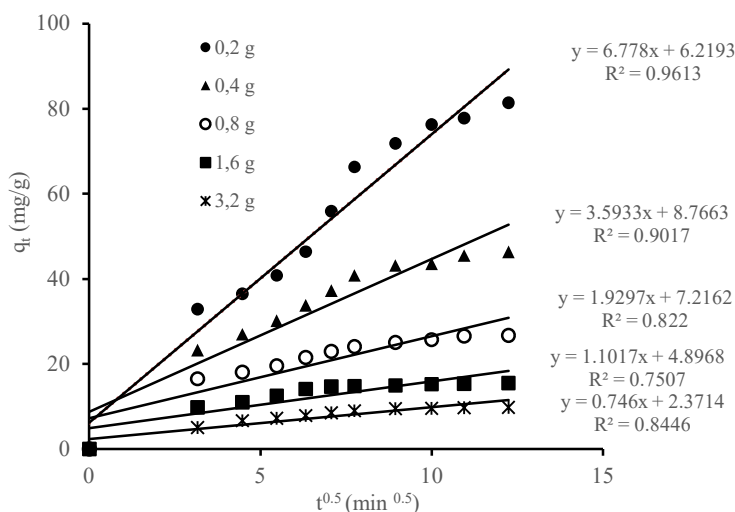
Tabel 1. Kapasitas Adsorpsi Activated Carbon Nanotubes

massa adsorben (g)	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2
kapasitas adsorpsi (mg/g)	81,43	46,34	26,70	15,55	9,82

Uji model kinetika difusi intrapartikel

Perpindahan massa molekul solut dari *bulk* fasa cair ke permukaan aktif yang ada di permukaan pori melalui dua tahapan seri yaitu tahapan difusi di *film* eksternal dan tahapan difusi molekuler di dalam pori partikel. Dari dua tahapan seri tersebut dapat diuji mana yang lebih dominan dengan melakukan uji model kinetika difusi intrapartikel. Uji model kinetika ini dilakukan dengan membuat plot q_t , yaitu mg solut yang yang terserap dipermukaan pori adsorben per g adsorben, versus akar waktu adsorpsi $t^{0.5}$. Jika plot ini mengikuti garis lurus maka tahapan difusi molekuler solut di pori-pori adsorben lebih dominan dibanding tahapan difusi di *film* eksternal.

Plot uji model kinetika difusi intrapartikel adsorpsi *acid blue 29* pada *activated carbon nanotubes* pada penelitian ini disajikan pada Gambar 4 dan nilai parameter-parameter yang ada pada korelasi Weber dan Morris disajikan pada Tabel 2. Dari gambar tersebut dan dari koefisien korelasi yang didapat menunjukkan data eksperimen mengikuti korelasi Weber dan Morris. Hal ini menunjukkan bahwa tahapan difusi dalam pori-pori *carbon nanotubes* pada adsorpsi *acid blue 29* pada *activated carbon nanotubes* lebih dominan dari tahapan di *film* eksternal. Hal ini menunjukkan bahwa tahap difusi molekuler solut di dalam pori-pori *carbon nanotubes* menjadi tahap pengendali terhadap keseluruhan proses adsorpsi [22].



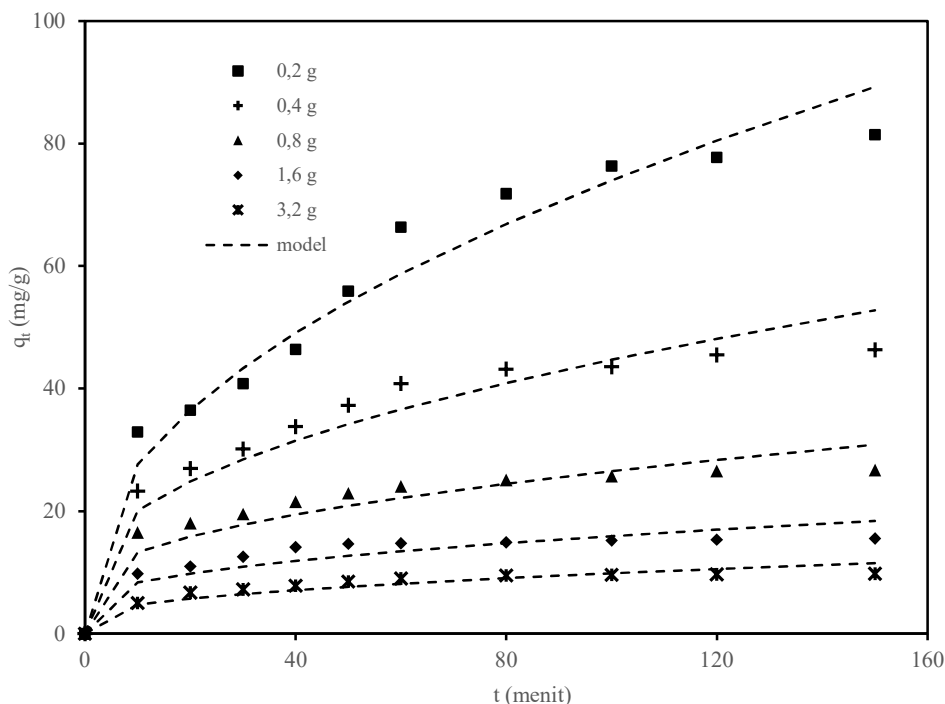
Gambar 4. Plot dan regresi linier model kinetika difusi intrapartikel q_t terhadap $t^{0.5}$

Tabel 2. Parameter-parameter Hasil Regresi Terhadap Model Kinetika Difusi Intrapartikel

massa adsorben (g)	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2
k_i (mg/g.min ^{0.5}) -slope	6,78	3,59	1,93	1,10	0,75
C (intercept)	6,2193	8,7663	7,2162	4,8968	2,3714
Koefisien korelasi (R^2)	0,9613	0,9017	0,8220	0,7507	0,8446

Lebih lanjut pada Gambar 5 disajikan plot antara q_t terhadap waktu adsorpsi t untuk data eksperimen maupun untuk model kinetik difusi intrapartikel Weber dan Morris. Plot tersebut menunjukkan bahwa kurva model kinetik difusi intrapartikel berkesesuaian dengan data yang diambil dari eksperimen. Hal ini mengkonfirmasi ulang

kesesuaian model kinetik difusi intrapartikel Weber dan Morris pada adsorpsi *acid blue 29* pada *activated carbon nanotubes*.



Gambar 5. Plot penyerapan *acid blue 29* oleh *activated carbon nanotubes* q_t terhadap t data percobaan dan model difusi intrapartikel

Kesimpulan

Hasil eksperimen adsorpsi *acid blue 29* pada *activated carbon nanotubes* menunjukkan bahwa semakin tinggi rasio massa *activated carbon nanotubes* terhadap volume larutan *acid blue 29* semakin tinggi efisiensi penghilangan warnanya dan semakin rendah kapasitas adsorpsi adsorbennya. Uji model kinetika difusi intrapartikel menunjukkan bahwa tahap difusi molekuler solut di dalam pori-pori *activated carbon nanotubes* merupakan tahap pengendali keseluruhan proses adsorpsi.

Daftar Pustaka

- [1] S. Ahmed, S. Islam, and F. Zohra, "Characterization and performance analysis of leather trimming waste incorporated graphene-based composite (UPR-GO-LTW) for the removal of dye from aquatic media: A waste valorization approach," *Clean. Waste Syst.*, vol. 13, p. 100459, 2026, doi: 10.1016/j.clwas.2025.100459.
- [2] D. Kübra and L. Gürel, "Assessment of foodstuff wastes as possible adsorbents for real cationic textile dye removal," *J. Indian Chem. Soc.*, vol. 103, no. 2, p. 102408, 2026, doi: 10.1016/j.jics.2026.102408.
- [3] S. Fan, J. Chen, J. H. Xin, and X. Wang, "Recycling colored silk fibroin from silk waste for versatile applications in dyeing, adsorbing and printing," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 227, p. 108771, 2026, doi: 10.1016/j.resconrec.2025.108771.
- [4] A. Chutani, N. Verma, and V. Kumar, "Valorization of manila tamarind seed coat waste biomass for dye removal," *Sustain. Chem. One World*, vol. 9, p. 100160, 2026, doi: 10.1016/j.scowo.2025.100160.
- [5] R. Shaheen and M. A. Hanif, "Industrial waste powder for the removal of acid dye from contaminated water," *Heliyon*, vol. 12, no. 1, p. e44282, 2026, doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e44282.
- [6] C. Alonso, C. Nieto, M. Villa-garcía, M. A. Vega, and E. M. Martín, "Selective adsorption of azo dyes on engineered polydopamine nanoparticles: Insights into structure-affinity relationships," *Surf. Interfaces*, vol. 81, p. 108459, 2026, doi: 10.1016/j.surf.2026.108459.
- [7] A. Saud, S. Abdullah, A. A. Altamimi, and M. Abualhaija, "Carbon nanotubes-modified crosslinked chitosan – adipic acid nanocomposite for efficient acid blue 93 dye removal: Synthesis, characterization, and adsorption optimization," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 159, p. 112906, 2025, doi: 10.1016/j.diamond.2025.112906.

- [8] H. Yang, X. Geng, Z. Quan, L. Yu, X. Huang, and W. Li, "Molecular structure-dependent bioelectrochemical decolorization of azo dyes," *Bioelectrochemistry*, vol. 170, p. 109229, 2026, doi: 10.1016/j.bioelechem.2026.109229.
- [9] V. Divya, K. Anbarasu, A. S. Vickram, and A. Saravanan, "Iron-based nanohybrids for sustainable dye removal from wastewater: A comprehensive review on adsorption mechanisms and environmental implications," *Hybrid Adv.*, vol. 12, p. 100607, 2026, doi: 10.1016/j.hybadv.2026.100607.
- [10] A. Ghosh, N. Sahoo, B. Das, P. Patel, and G. Manoj, "Macrostructures of carbon nanotubes for advanced battery application: A comprehensive review," *Synth. Met.*, vol. 314, p. 117944, 2025, doi: 10.1016/j.synthmet.2025.117944.
- [11] S. Cheng, C. Tao, and H. Li, "Preparation of carbon nanotubes from organic solid wastes: A review," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 192, p. 107240, 2025.
- [12] J. F. Perez-robles, J. E. Martínez-v, and A. M. Rodríguez-hern, "Synthesis, and morphological, and structural characterization of multi-walled carbon nanotubes and carbon nanobeads by chemical vapor deposition method," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 161, p. 113180, 2026, doi: 10.1016/j.diamond.2025.113180.
- [13] V. Kumar, R. Kumar, A. Nayak, A. Saleh, and M. A. Barakat, "Adsorptive removal of dyes from aqueous solution onto carbon nanotubes: A review," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 194, pp. 24–34, 2013, doi: 10.1016/j.cis.2013.03.003.
- [14] A. Saud, S. Abdullah, A. A. Altamimi, and M. Abualhaija, "Fabrication of crosslinked chitosan-citrate / carbon nanotubes / Fe₃O₄ nanocomposite for effective adsorption of eosin Y dye using response surface methodology," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 338, p. 149729, 2026, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.149729.
- [15] P. Setyoprato, P. P. D. K. Wulan, and M. Sudibandriyo, "The effect of metal loading on the performance of tri-metallic supported catalyst for carbon nanotubes synthesis from liquefied petroleum gas," *Int. J. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 120–129, 2018, doi: 10.14716/ijtech.v9i1.1165.
- [16] P. Setyoprato, P. P. D. K. Wulan, and M. Sudibandriyo, "Carbon nanotubes synthesis using Fe-Co-Mo / MgO tri-metallic catalyst: study the effect of reaction temperature, reaction time and catalyst weight," *Int. J. Nanomanufacturing*, vol. 16, no. 1, pp. 1–20, 2020.
- [17] T. H. Ho, H. Duy, and T. T. Trinh, "Molecular mechanisms of Congo Red adsorption on hydrochar: The critical role of hydroxyl groups in dye removal," *Chem. Eng. J. Adv.*, vol. 25, p. 101017, 2026, doi: 10.1016/j.ceja.2025.101017.
- [18] N. Das, S. Barua, A. Kashem, and M. Moniruzzaman, "Dye removal from wastewater using ferrihydrite-modified sugarcane bagasse and biochar: Adsorption performance and modeling analysis," *Environ. Challenges*, vol. 22, p. 101390, 2026.
- [19] M. Rajabi, K. Mahanpoor, and O. Moradi, "Preparation of PMMA/GO and PMMA/GO-Fe₃O₄ nanocomposites for malachite green dye adsorption: Kinetic and thermodynamic studies," *Compos. Part B Eng.*, vol. 167, pp. 544–555, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.03.030.
- [20] K. M. A. Qasem *et al.*, "Highly efficient iodine capture and selective adsorption and removal of cationic dyes by using a copper-based coordination polymer decorated over graphene oxide and carbon nanotubes," *J. Water Process Eng.*, vol. 69, p. 106569, 2025, doi: 10.1016/j.jwpe.2024.106569.
- [21] G. Song, W. Fan, J. Zhang, Z. Liu, Y. Shi, and Y. Sun, "Insights into the adsorption behavior and mechanism of ionic dyes on carbon nanotubes with different functional groups," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 157, p. 112577, 2025, doi: 10.1016/j.diamond.2025.112577.
- [22] L. M. S. Silva, M. J. Muñoz-Peña, J. R. Domínguez-Vargas, T. González, and E. M. Cuerda-Correa, "Kinetic and equilibrium adsorption parameters estimation based on a heterogeneous intraparticle diffusion model," *Surf. Interfaces*, vol. 22, pp. 544–555, 2021, doi: 10.1016/j.surf.2020.100791.