

STUDI PENGARUH pH PADA ADSORPSI ACID BLUE 29 MENGUNAKAN MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES

Puguh Setyopratomo*, Endang Srihari, Rudy Agustriyanto, Restu Kartiko Widi

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Surabaya
Jl. Raya Kalirungkut Surabaya 60293, Jawa Timur, Indonesia, Telp. 031-2981158

* Penulis Korespondensi: E-mail: puguh@staff.ubaya.ac.id

Abstrak

Pencemaran oleh zat warna di limbah cair masih merupakan masalah yang serius hingga saat ini. Adsorpsi dipandang sebagai salah satu alternatif metode penghilangan zat warna yang prospektif karena secara teknis layak, mudah dioperasikan dan fleksibel. Pada penelitian ini multi-walled carbon nanotubes yang disintesa dengan metode chemical vapor deposition diuji kinerjanya sebagai adsorben untuk menghilangkan zat warna acid blue 29 yang terlarut dalam air. Tujuan penelitian adalah untuk mengobservasi pengaruh pH terhadap kapasitas adsorpsi multi-walled carbon nanotubes terhadap zat warna acid blue 29 dan menguji kesesuaian kinetika adsorpsinya terhadap model kinetika pseudo first order dan pseudo second order. Percobaan adsorpsi dilakukan secara batch dalam gelas kimia dengan menggunakan pengaduk magnetic yang diputar dengan kecepatan putar konstan sebesar 120 rpm. Konsentrasi zat warna acid blue 29 diukur dengan metode spektrofotometri pada panjang gelombang 600 – 605 nm. Adsorpsi dilakukan pada empat nilai pH yaitu 2, 3, 5 dan 9. Kapasitas adsorpsi tertinggi yang dicapai adalah sebesar 60,4 mg/g dengan persen removal sebesar 85,1% yang dicapai pada pH 2. Kinetika adsorpsi acid blue 29 pada pH tinggi, yaitu pada pH 9, mengikuti model kinetika pseudo second order sedangkan pada pH yang rendah, yaitu pada pH 2, mengikuti model kinetika pseudo first order. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi maupun persen penghilangan zat warna dipengaruhi oleh pH. Nilai pH yang rendah akan meningkatkan muatan positif pada permukaan adsorben sehingga akan meningkatkan atraksi elektrostatik terhadap senyawa anionik.

Kata kunci: acid blue 29; adsorpsi; kuat tarik elektrostatik; carbon nanotubes;

STUDY THE EFFECT OF pH ON ACID BLUE 29 ADSORPTION USING MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES

Abstract

Water pollution by dyes is still a serious problem today. Adsorption was seen as a prospective alternative dye removal method because technically feasible, easy to operate and flexible. In this study, multi-walled carbon nanotubes synthesized using the chemical vapor deposition method were examined for their performance as an adsorbent to remove acid blue 29 dye which was dissolved in water. The aim of this study was to observe the effect of pH on the adsorption capacity of the multi-walled carbon nanotubes for acid blue 29 dye and to examine the suitability of its adsorption kinetics against pseudo first order and pseudo second order kinetic models. The adsorption experiment was carried out in batches in a beaker using a magnetic stirrer stirred at a constant rotation speed of 120 rpm. The concentration of acid blue 29 dye was measured using the spectrophotometric method at wave length 600 – 6005 nm. Adsorption was carried out at four pH values, namely 2, 3, 5 and 9. The highest adsorption capacity achieved was 60.4 mg/g with a percent removal of 85.1% which was achieved at pH 2. The adsorption kinetics of acid blue 29 at high pH, i.e. at pH 9, followed a pseudo second order kinetic model while at low pH, ie. At pH 2, it followed a pseudo first order kinetic model. The results showed that the adsorption capacity and the percent removal of dyes were affected by pH. A low pH value will increase the positive charge on the adsorbent surface so that it will increase the electrostatic attraction towards anionic compounds.

Key words: acid blue 29; adsorption; electrostatic attractions; carbon nanotubes

PENDAHULUAN

Pencemaran oleh zat warna ke lingkungan masih menjadi masalah yang serius sampai saat ini. Salah satu sumber pencemaran oleh zat warna adalah industri tekstil. Industri tekstil menggunakan berbagai zat warna di dalam proses produksinya. Pengolahan limbah cair industri tekstil yang tidak sempurna akan menghasilkan *effluent* limbah cair yang masih mengandung zat warna dengan konsentrasi di atas nilai yang diperbolehkan sehingga akan mencemari lingkungan. Zat warna tekstil tersebut sangat larut di air dan sangat stabil. Keberadaannya di lingkungan akan menimbulkan dampak negatif seperti menyebabkan gangguan kesehatan pada manusia, seperti efek karsinogenik dan mutagenik, menyebabkan jantung berdebar dan disfungsi otak serta menimbulkan kerusakan pada jaringan sel tanaman dan spesies akuatik (Exley *et al.*, 2023). Paparan terhadap zat warna organik menyebabkan iritasi pada saluran pernapasan, kulit, mata, sakit tenggorokan dan asma (Siyal *et al.*, 2018).

Senyawa zat warna terdiri dari dua gugus fungsi utama yaitu kromofor dan auxokrom. Gugus kromofor (antara lain: NR₂, NHR, NH₂, COOH dan OH) bertanggung jawab untuk menghasilkan warna, sedangkan gugus auxokrom (antara lain: N₂, NO dan NO₂) mempunyai peran melengkapi kromofor dan juga membuat senyawa zat warna mudah larut dalam air serta untuk meningkatkan afinitas senyawa zat warna ke serat. Zat warna dapat diklasifikasikan berdasarkan struktur kimianya, berdasarkan penerapannya pada jenis serat dan berdasarkan kelarutannya. Pewarna asam, mordan, kompleks logam, zat warna basa dan zat warna reaktif adalah contoh zat warna yang larut. Sedangkan pewarna azoik, belerang, dan disperse adalah contoh zat warna yang tidak larut (Gupta and Suhas, 2009 ; Kausar *et al.*, 2018)

Penghilangan pencemar zat warna dari limbah cair tetap masih menghadapi kesulitan dan tantangan, khususnya penghilangan pencemar zat warna pada konsentrasi yang rendah. Para peneliti masih terus melakukan penelitian dan pengembangan untuk mendapatkan metode dan teknologi yang terbaik untuk pengolahan limbah cair yang tercemar zat warna. Beberapa metode yang telah dan sedang dikembangkan antara lain meliputi adsorpsi, koagulasi, pemisahan dengan membran, oksidasi kimia, degradasi fotokatalitik, elektrokimia dan degradasi dengan mikroba baik yang *aerobic* maupun yang *anaerobic* (Mu and Wang, 2016).

Koagulasi tidak mampu mencapai tingkat pemisahan yang tinggi, teknologi membrane memerlukan biaya tinggi degradasi fotokatalitik memerlukan katalis yang spesifik sedangkan proses dengan melibatkan mikroba berlangsung lambat. Dibandingkan dengan metode yang disebutkan di atas, adsorpsi telah menarik banyak perhatian karena

kelayakan teknis, fleksibilitas, dan kesederhanaan operasinya (Li, Mua and Yang, 2019). Beberapa adsorben telah diteliti keefektifannya untuk penghilangan zat warna diantaranya karbon aktif, *clay* dan *clay* yang termodifikasi dan adsorben komposit. *Carbon nanotubes* saat ini merupakan salah satu adsorben untuk zat warna yang menarik perhatian para peneliti karena memiliki luas permukaan spesifik yang besar, struktur silinder berongga yang terkontrol, dinding *hidrofobik*, dan permukaan yang mudah dimodifikasi (Zhang *et al.*, 2017).

Sejak *carbon nanotubes* ditemukan oleh Iijima pada tahun 1991, banyak metode yang telah dikembangkan untuk mensintesa *carbon nanotubes*. Tiga metode sintesa *carbon nanotubes* yang banyak dikembangkan adalah *arc-discharge*, *laser ablation* dan *chemical vapordeposition* (Hao *et al.*, 2003). Proses sintesa *carbon nanotubes* pada prinsipnya diawali dengan transfer energi ke sumber karbon untuk melepas atom karbon. Atom karbon yang terlepas kemudian digunakan untuk sintesa dan pertumbuhan *carbon nanotubes*. Metode *arc-discharge* menggunakan sumber energi arus listrik, metode *laser ablation* menggunakan sumber energi sinar laser intensitas tinggi, dan metode *chemical vapor deposition* menggunakan energi panas dari *furnace* (Purohit *et al.*, 2014). Dari ketiga metode tersebut metode *chemical vapor deposition* dipandang merupakan metode yang paling prospektif untuk dikembangkan skala komersial dengan biaya produksi yang relatif rendah (Hao *et al.*, 2003). Proses sintesa *carbon nanotubes* dengan metode *arc-discharge* dan *laser ablation* diperlukan *precursor* karbon pada fasa padat dan suhu yang sangat tinggi untuk penguapan karbon dan pertumbuhan *carbon nanotubes*. Sedangkan pada metode *chemical vapor deposition* membutuhkan suhu yang lebih rendah dan gas hidro karbon sebagai sumber atom karbon, tetapi metode *chemical vapor deposition* membutuhkan katalis logam yang berperan untuk mendekomposisi hidro karbon menjadi atom karbon untuk pertumbuhan *carbon nanotubes*. Metode *chemical vapor deposition* memiliki keunggulan kondisi pengoperasian yang ringan sehingga menjadi pilihan metode sintesa *carbon anotubes* yang efisien untuk produksi skala komersial (Liu *et al.*, 2023).

Carbon nanotubes bisa dibedakan atas dasar morfologinya menjadi *single-walled*, *double-walled* dan *multi-walled*. *Single-walled carbon nanotubes* terbentuk dari satu dinding lembaran *graphene* berbentuk silinder dengan diameter kurang lebih 1 nm. *Double-walled carbon nanotubes* tersusun dari dua dinding lembaran *graphene*. Sedangkan *multi-walled carbon nanotubes* tersusun dari lebih dua dinding *graphene*. Lembaran-lembaran *graphene* tersebut membentuk dinding silinder yang berlapis-lapis yang konsentris terhadap pusat silinder dan antar lapisan *graphene* terikat oleh ikatan *van der Waals* sekunder. *Multi-walled carbon nanotubes* yang

berkualitas bagus memiliki diameter berkisar antara 1 – 30 nm. Kualitas *carbon nanotubes* ditentukan oleh susunan atom karbon pada lembaran *graphene*, panjang dan diameter dari *carbon nanotubes* (Liu *et al.*, 2014).

Penggunaan *carbon nanotubes* sebagai adsorben zat warna telah mulai dilakukan oleh peneliti sebelumnya, diantaranya untuk penghilangan zat warna *methyl orange* (Khan *et al.*, 2018), *methylene blue* and *acid red* (Wang *et al.*, 2012), dan *basic red* (Elsagh *et al.*, 2017). Pada penelitian ini *multi-walled carbon nanotubes* diuji kinerjanya untuk mengadsorpsi zat warna *acid blue 29*. Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi kemampuan adsorpsi *carbon nanotubes* terhadap zat warna adalah muatan elektrostatik yang menyelimuti permukaan *carbon nanotubes*. Muatan elektrostatik permukaan suatu adsorben dipengaruhi oleh pH lingkungannya, sehingga pH larutan zat warna sangat berpengaruh terhadap kemampuan adsorpsi suatu adsorben. Dengan pertimbangan tersebut penelitian ini bertujuan untuk mengobservasi pengaruh pH larutan terhadap kemampuan adsorpsi *multi-walled carbon nanotubes* terhadap zat warna *acid blue 29*. Belum banyak dilakukan penelitian yang mengobservasi pengaruh pH terhadap efektifitas adsorpsi zat warna.

METODE PENELITIAN

Penyiapan Bahan Adsorben

Multi-walled carbon nanotubes diproduksi sendiri dari hasil sintesa dengan menggunakan gas LPG sebagai bahan bakudengan katalis Fe-Co-Mo/MgO. Sintesa dilakukan dengan metode *chemical vapor deposition*. Rangkaian peralatan dan prosedur sintesa *multi-walled carbon nanotubes* sudah diuraikan pada publikasi sebelumnya (Setyoprato, Wulan and Sudibandriyo, 2018). Bahan-bahan yang digunakan meliputi gas argon, gas hydrogen, gas LPG, besi (III) nitrat nonahidrat ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) – Merck Millipore, amonium heptamolybdate tetrahidrat ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) – Merck Millipore, cobalt(II) nitrate ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)–Merck Millipore, dan magnesium oksida (MgO) – Merck Millipore. Adapun zat warna yang digunakan adalah *acid blue 29* (Sigma-Aldrich).

Alat

Adsorpsi dilakukan dengan pengadukan menggunakan *magnetic stirrer*. Pengukuran pH dilakukan menggunakan pH meter WTW Inolab 7110. Pengukuran konsentrasi zat warna *acid blue 29* di cairan dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis Genesys 150 Thermo Scientific.

Prosedur Percobaan

Percobaan adsorpsi dilakukan secara *batch* pada gelas kimia 500 ml pada suhu kamar. Selama

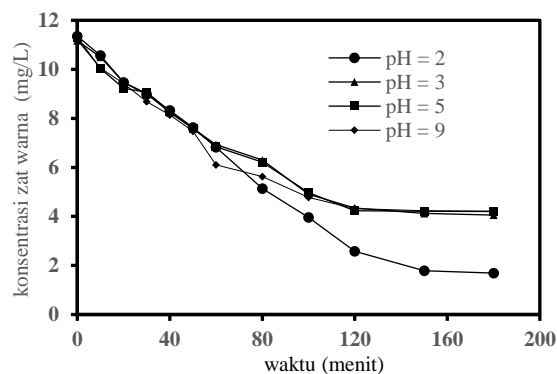
adsorpsi dilakukan pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan putar 120 rpm. Adsorpsi dilakukan sampai kondisi kesetimbangan telah tercapai.

Seluruh *run* percobaan menggunakan konsentrasi awal zat warna yang relatif sama yaitu berkisar 11, 2 – 11, 4 ppm. Konsentrasi zat warna di cairan diukur pada selang waktu tertentu dan percobaan dihentikan ketika konsentrasi zat warna di cairan dianggap sudah tidak berubah dengan kata lain proses adsorpsi sudah mencapai kesetimbangan. Percobaan dilakukan dengan empat variasi pH larutan zatwarna, yaitu pada pH 2, 3, 5 dan 9. Harga pH tersebut dipilih untuk memfasilitasi pergeseran titik isoelektrik dari adsorben yang digunakan. Pengaturan pH dilakukan dengan menambahkan tetesan larutan NaOH atau HCl ke dalam larutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Adsorpsi Zat Warna *Acid Blue 29*

Perubahan konsentrasi *acid blue 29* dalam larutan selama proses adsorpsi disajikan pada Gambar 1. Terjadi penurunan konsenrasi *acid blue 29* di larutan yang cukup signifikan sampai waktu 120 menit dan setelahnya penurunan konsentrasi *acid blue 29* di larutan terjadi sangat lambat hingga mencapai kesetimbangan.



Gambar 1. Pengaruh pH terhadap Penghilangan Zat warna *Acid Blue 29*

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan pH antara pH 3 sampai 9 secara praktis tidak berpengaruh terhadap penghilangan zat warna *acid blue 29* dengan adsorpsi pada *multi-walled carbon nanotubes*, hal ini ditunjukkan oleh penurunan konsentrasi yang relative sama. Namun, untuk pH yang sangat asam, yaitu pada pH 2, penghilangan *acid blue 29* dari larutan masih berlangsung signifikan disbanding pada pH yang lebih tinggi setelah adsorpsi berlangsung selama 80 menit. Hal ini menunjukkan bahwa *multi-walled carbon nanotubes* masih mampu mengadsorpsi molekul *acid blue 29* dengan jumlah yang lebih banyak dibandingkan pada kondisi pH yang lebih tinggi.

Fakta ini menunjukkan bahwa pada pH yang sangat rendah kapasitas adsorpsi *multi-walled carbon nanotubes* terhadap *acid blue 29* meningkat. Nilai pH yang rendah diyakini meningkatkan muatan positif pada permukaan adsorben (Cai *et al.*, 2020). *Acid blue 29* terklasifikasi sebagai zat warna anionik sehingga memiliki gugus bermuatan negatif dalam struktur molekulnya. Sementara itu, pada pH yang rendah permukaan adsorben diselubungi ion H⁺ dan hal ini akan meningkatkan afinitas terhadap molekul-molekul yang bersifat anionik seperti zat warna *acid blue 29*. Inilah latar belakang saintifik yang menjelaskan mengapa kapasitas adsorpsi *multi-walled carbon nanotubes* meningkat pada pH yang lebih rendah.

Cai *et al.*, (2020) pada penelitiannya menunjukkan bahwa pada pH yang semakin rendah suatu padatan adsorben akan memiliki *zeta potential* yang semakin tinggi. Suatu padatan adsorben yang memiliki *zeta potential* yang semakin tinggi akan memiliki atraksi elektrostatis yang semakin besar terhadap senyawa anionik (Cai *et al.*, 2020).

Peneliti lain, Ferreira *et al.* (2017), menyatakan bahwa evaluasi pengaruh pH terhadap kapasitas adsorpsi suatu adsorben akan memberikan informasi penting terkait interaksi elektrostatis antara adsorben dan molekul *solute*. Dinyatakan bahwa pH dari suatu sistem adsorpsi dapat memberikan pengaruh yang besar terhadap penyerapan solut pada permukaan adsorben. Hal ini dikarenakan konsentrasi ion hidrogen dapat menentukan neto muatan pada permukaan adsorben yang menentukan interaksi elektrostatis antara adsorben dan solut (Ferreira *et al.*, 2017).

Persen Removal dan Dyes Uptake

Pada Tabel 1 disajikan data persen *removal acid blue 29* dan *dyes uptake*. Persen *removal* menyatakan persentase molekul zat warna yang dapat dipisahkan dari cairan selama adsorpsi, yang nilainya dihitung mengikuti persamaan (1).

$$Removal = \frac{(C_i - C_f)}{C_f} \times 100\% \tag{1}$$

dimana C_i adalah konsentrasi awal zat warna di larutan dan C_f adalah konsentrasi akhir zat warna di larutan. Sedangkan *dyes uptake* menyatakan jumlah zat warna maksimum yang dapat diserap pada padatan adsorben dan nilainya dihitung mengikuti persamaan (2).

$$Dyes\ uptake = \frac{(C_i - C_f)}{m} \times V \tag{2}$$

dimana V adalah volume larutan dan m adalah massa adsorben yang digunakan.

Persen *removal* zat warna *acid blue 29* pada pH 3 – 9 berkisar antara 62,4 – 63,7 %, sedangkan persen *removal* pada pH 2 mencapai harga tertinggi

sebesar 85,1%. Hasil ini lebih baik dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Qais *et al.* (2023) yang melakukan adsorpsi *acid blue 92* dengan konsentrasi awal 45,32 mg/L menggunakan adsorben *nano-zinc oxide fibers* pada pH 7 dan menghasilkan *removal acid blue 92* pada rentang 20 – 28% (Qais *et al.*, 2023).

Tabel 1. Data Persen *Removal* dan *Dyes Uptake*

pH	Persen <i>Removal</i> (%)	<i>Dyes Uptake</i> (mg/g)
2	85,1	60,4
3	63,7	44,5
5	62,8	44,4
9	62,4	43,6

Dyes uptake merupakan salah satu parameter penting untuk mengukur kinerja suatu adsorben yang disintesa dengan tujuan untuk menghilangkan zat warna dari cairan. *Dyes uptake* yang dihasilkan dari penelitian ini berada pada rentang 43,6 – 44,5 mg/g untuk adsorpsi pada pH 3 – 9 dan mencapai harga tertinggi sebesar 60,4 mg/g untuk adsorpsi pada pH 2. Nilai *dyes uptake* yang dihasilkan pada penelitian ini lebih tinggi dari *dyes uptake* yang dihasilkan pada penelitian yang dilakukan oleh Marrakchi, Bouaziz and Hameed, (2017), yang menghasilkan *dyes uptake* sebesar 6,77 - 37,99 pada adsorpsi *acid blue 29* dengan konsentrasi awal zat warna bervariasi dalam rentang 25 – 400 mg/L menggunakan adsorben *mesoporous K₂CO₃-activated olive pomace boiler ash* (Marrakchi, Bouaziz and Hameed, 2017). Penelitian lain yang menggunakan adsorben *activated charcoal* menghasilkan *dyes uptake acid blue* sebesar 2,5 – 7,5 mg/g dengan konsentrasi awal *acid blue* di larutan sebesar 2,5 mg/L (Ali *et al.*, 2020).

Kinetika Adsorpsi

Studi kinetika adsorpsi diperlukan untuk memperoleh profil laju kecepatan adsorpsi senyawa solut yang bermigrasi secara difusi dari *bulk* cairan menuju permukaan adsorben. Kecepatan difusi senyawa solut dalam *bulk* cairan dipengaruhi antara lain oleh difusifitas senyawa tersebut dalam cairan pelarut dan bilangan Reynold fasa cair yang dalam hal ini sangat dipengaruhi oleh kecepatan putar pengadukan.

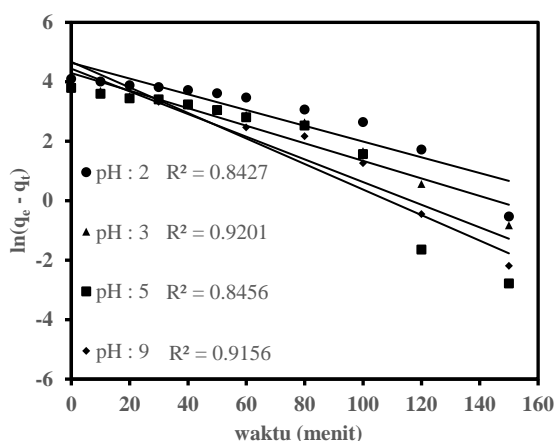
Pada penelitian ini dua model kinetika adsorpsi diuji kesesuaiannya yaitu model kinetika *pseudo first order* dan *pseudo second order* yang formulanya masing-masing secara berturut-turut disajikan pada persamaan (3) dan (4). Plot model kinetika *pseudo first order* dan *pseudo second order* masing-masing secara berturut-turut disajikan pada Gambar 2 dan Gambar 3.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \tag{3}$$

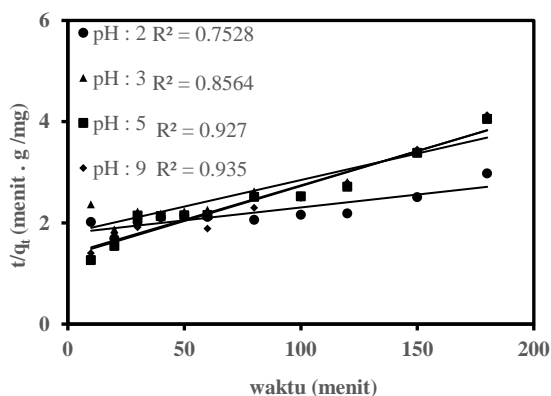
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

dimana q_e : *dyes uptake* pada kesetimbangan; q_t : *dyes uptake* pada saat waktu t ; K_1 : konstanta kinetika *pseudo first order*; K_2 konstanta kinetika *pseudo second order*.

Kesesuaian model kinetika yang diuji ditunjukkan oleh nilai koefisien korelasi (R^2) yang diperoleh setelah data eksperimen di plot mengikuti korelasi model kinetik yang diuji.



Gambar 2. Plot Model Kinetika Pseudo First Order



Gambar 3. Plot Model Kinetika Pseudo Second Order

Hasil uji terhadap kedua model kinetika menunjukkan bahwa pada pH yang tinggi, yaitu pada pH 9, adsorpsi zat warna *acid blue 29* lebih berkesesuaian dengan model kinetika *pseudo second order* karena menghasilkan koefisien korelasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan model kinetika *pseudo first order*. Sementara itu, pada pH yang sangat rendah, yaitu pada pH 2, model kinetika *pseudo first order* lebih sesuai karena menghasilkan koefisien korelasi yang lebih tinggi. Adsorpsi zat warna pada padatan adsorben, khususnya *carbon nanotubes*, banyak bersesuaian dengan model

kinetika *pseudo first order* maupun *pseudo second order* (González-Fernández *et al.*, 2021 ; López-Tinoco *et al.*, 2021). Hasil profil kinetika yang diperoleh dari penelitian ini sangat diperlukan ketika melakukan desain peralatan adsorpsi skala besar.

SIMPULAN

Pada penghilangan zat warna *acid blue 29* secara adsorpsi pada *multi-walled carbon nanotubes* kapasitas adsorpsi dan persen *removal* zat warna dipengaruhi oleh pH. Nilai pH yang rendah akan meningkatkan muatan positif pada permukaan adsorben sehingga akan meningkatkan atraksi elektrostatik terhadap senyawa anionik. Dengan demikian, seperti yang ditunjukkan pada hasil penelitian ini, pada pH yang rendah (pH = 2) nilai persen *removal* paling tinggi. Kinetika adsorpsi *acid blue 29* pada pH tinggi, yaitu pH 9, mengikuti model kinetika *pseudo second order* sedangkan pada pH yang rendah, yaitu pH 2, mengikuti model kinetika *pseudo first order*. Penelitian dengan adsorpsi secara kontinu akan sangat menarik untuk dilakukan sebagai kelanjutan dari penelitian ini karena akan mendekati sistem adsorpsi yang dilakukan di skala komersial.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, F. *et al.* (2020) 'Adsorption isotherm, kinetics and thermodynamic of acid blue and basic blue dyes onto activated charcoal', *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2(August), pp. 1–6. doi: 10.1016/j.csee.2020.100040.
- Cai, Y. *et al.* (2020) 'Constructing a multi-layer adsorbent for controllably selective adsorption of various ionic dyes from aqueous solution by simply adjusting pH', *Chemical Engineering Journal*. Elsevier, 382(100), p. 122829. doi: 10.1016/j.cej.2019.122829.
- Elsagh, A. *et al.* (2017) 'Evaluation of the potential cationic dye removal using adsorption by graphene and carbon nanotubes as adsorbents surfaces', *Arabian Journal of Chemistry*, 10, pp. S2862–S2869. doi: 10.1016/j.arabjc.2013.11.013.
- Exley, J. M. *et al.* (2023) 'Influence of flake size and electrolyte conditions on graphene oxide adsorption of ionic dyes', *Powder Technology*. Elsevier B.V., 421(March), p. 118387. doi: 10.1016/j.powtec.2023.118387.
- Ferreira, Guilherme Max Dias *et al.* (2017) 'Adsorption of red azo dyes on multi-walled carbon nanotubes and activated carbon: A thermodynamic study', *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Elsevier B.V., 529, pp. 531–540. doi: 10.1016/j.colsurfa.2017.06.021.

- González-Fernández, L. A. *et al.* (2021) 'Equilibrium and kinetic modelling of triclosan adsorption on Single-Walled Carbon Nanotubes', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6). doi: 10.1016/j.jece.2021.106382.
- Gupta, V. K. and Suhas (2009) 'Application of low-cost adsorbents for dye removal - A review', *Journal of Environmental Management*. Elsevier Ltd, 90(8), pp. 2313–2342. doi: 10.1016/j.jenvman.2008.11.017.
- Hao, Y. *et al.* (2003) 'Agglomerated CNTs synthesized in a fluidized bed reactor: Agglomerate structure and formation mechanism', *Carbon*, 41(14), pp. 2855–2863. doi: 10.1016/S0008-6223(03)00425-1.
- Kausar, A. *et al.* (2018) 'Dyes adsorption using clay and modified clay: A review', *Journal of Molecular Liquids*. Elsevier B.V., 256, pp. 395–407. doi: 10.1016/j.molliq.2018.02.034.
- Khan, J. *et al.* (2018) 'Zno/NiO coated multi-walled carbon nanotubes for textile dyes degradation', *Arabian Journal of Chemistry*. King Saud University, 11(6), pp. 880–896. doi: 10.1016/j.arabjc.2017.12.020.
- Li, W., Mua, B. and Yang, Y. (2019) 'Feasibility of industrial-scale treatment of dye wastewater via bio-adsorption technology', *Bioresour Technol*. Elsevier, 277(December 2018), pp. 157–170. doi: 10.1016/j.biortech.2019.01.002.
- Liu, W. W. *et al.* (2014) *Synthesis and characterization of graphene and carbon nanotubes: A review on the past and recent developments*, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry. doi: 10.1016/j.jiec.2013.08.028.
- Liu, X. *et al.* (2023) 'Efficient carbon nanotube growth from pyrolysis of citric acid-based small organic molecules', *Carbon Trends*. Elsevier Ltd, 10(September 2022), p. 100236. doi: 10.1016/j.cartre.2022.100236.
- López-Tinoco, J. *et al.* (2021) 'Microwave-assisted synthesis of ceria nanoparticles on carbon nanotubes and their dye-removal assesment', *Journal of Materials Research and Technology*, 13, pp. 70–82. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.04.036.
- Marrakchi, F., Bouaziz, M. and Hameed, B. H. (2017) 'Adsorption of acid blue 29 and methylene blue on mesoporous K₂CO₃-activated olive pomace boiler ash', *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Elsevier B.V., 535, pp. 157–165. doi: 10.1016/j.colsurfa.2017.09.014.
- Mu, B. and Wang, A. (2016) 'Adsorption of dyes onto palygorskite and its composites: A review', *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Elsevier B.V., 4(1), pp. 1274–1294. doi: 10.1016/j.jece.2016.01.036.
- Purohit, R. *et al.* (2014) 'Carbon Nanotubes and Their Growth Methods', *Procedia Materials Science*. Elsevier Ltd, 6(Icmpec), pp. 716–728. doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.088.
- Qais, D. S. *et al.* (2023) 'Nano-zinc oxide fibers: Synthesis, characterization, adsorption of acid blue 92 dye, isotherms, thermodynamics and kinetics', *Emerging Contaminants*, 9(2). doi: 10.1016/j.emcon.2023.100224.
- Setyoprato, P., Wulan, P. P. D. K. and Sudibandriyo, M. (2018) 'The effect of metal loading on the performance of tri-metallic supported catalyst for carbon nanotubes synthesis from liquefied petroleum gas', *International Journal of Technology*, 9(1), pp. 120–129. doi: 10.14716/ijtech.v9i1.1165.
- Siyal, A. A. *et al.* (2018) 'A review on geopolymers as emerging materials for the adsorption of heavy metals and dyes', *Journal of Environmental Management*, 224(May), pp. 327–339. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.07.046.
- Wang, S. *et al.* (2012) 'Synergistic and competitive adsorption of organic dyes on multiwalled carbon nanotubes', *Chemical Engineering Journal*. Elsevier B.V., 197, pp. 34–40. doi: 10.1016/j.cej.2012.05.008.
- Zhang, X. *et al.* (2017) 'Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials: A review', *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier B.V., 338, pp. 102–123. doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.05.013.