

Original Research

Adsorpsi Zat Warna Acid Blue 29 Menggunakan Pristine Multiwalled Carbon Nanotubes

Puguh Setyoprato^{1*}, Rudy Agustriyanto¹, Aloisiyus Yuli Widiyanto¹, Edy Purwanto¹, Endang Srihari¹

¹ Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Surabaya

* corresponding author: puguh@staff.ubaya.ac.id

Abstract—The increasing pollution of dyes in industrial wastewater has recently attracted attention to obtain effective and efficient dye removal techniques. In this study, pristine multiwalled carbon nanotubes were tested for their performance as adsorbents to remove acid blue 29 dye. Multiwalled carbon nanotubes were synthesized by the catalytic chemical vapor deposition method from liquefied petroleum gas with Fe-Co-Mo/MgO catalyst. Adsorption experiments were carried out in batches by varying the initial concentration of dyes. The purpose of this study was to observe the performance of pristine multiwalled carbon nanotubes to adsorb dyes. In addition, observation of the suitability of the adsorption equilibrium model for this system was also carried out. The results showed that pristine multiwalled carbon nanotubes were proven to be able to remove acid blue 29 dye. The experimental results showed that the percentage of dye removal was higher when the initial concentration of dye in the liquid was lower. The pristine carbon nanotubes used were able to reduce dyes from the liquid by 68.8% in just one process cycle. Adsorption equilibrium study showed that Freundlich equilibrium model is more suitable for this system than Langmuir equilibrium model. The results of this study have shown that multiwalled carbon nanotubes have a very good chance as an adsorbent to remove dyes from industrial wastewater.

Keywords: adsorption, carbon nanotubes, equilibrium, model, removal

Abstrak—Meningkatnya polusi zat warna pada limbah cair industri akhir-akhir ini telah menarik perhatian untuk mendapatkan teknik penghilangan zat warna tersebut yang bekerja secara efektif dan efisien. Pada penelitian ini *pristine multiwalled carbon nanotubes* diuji kinerjanya sebagai adsorben untuk menghilangkan zat warna *acid blue 29*. *Multiwalled carbon nanotubes* disintesa dengan metode *catalytic chemical vapor deposition* dari *liquefied petroleum gas* dengan katalis Fe-Co-Mo/MgO. Eksperimen adsorpsi dilakukan secara *batch* dengan memvariasikan konsentrasi awal zat warna. Tujuan penelitian ini adalah untuk menguji kinerja *pristine multiwalled carbon nanotubes* tersebut untuk mengadsorpsi zat warna. Disamping itu juga dilakukan uji kesesuaian model kesetimbangan adsorpsi untuk sistem ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *pristine multiwalled carbon nanotubes* terbukti bisa menghilangkan zat warna *acid blue 29*. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa persen *removal* zat warna semakin tinggi ketika konsentrasi awal zat warna dalam cairan semakin rendah. *Pristine carbon nanotubes* yang digunakan mampu menurunkan zat warna dari cairan sebanyak 68,8% dalam satu siklus proses saja. Studi kesetimbangan adsorpsi menunjukan bahwa model kesetimbangan *Freundlich* lebih sesuai pada sistem ini dibandingkan kesetimbangan model *Langmuir*. Hasil penelitian ini telah menunjukkan bahwa *multiwalled carbon nanotubes* memiliki peluang yang sangat bagus sebagai adsorben untuk menghilangkan zat warna dari limbah cair industri.

Kata kunci: adsorpsi, carbon nanotubes, kesetimbangan, model, removal

PENDAHULUAN

Pertumbuhan jumlah penduduk dunia dan meningkatnya produksi industri manufaktur membawa dampak buruk yaitu bertambahnya bahan-bahan pencemar yang dibuang ke lingkungan. Hal ini berakibat kualitas lingkungan yang semakin buruk. Kontaminasi air permukaan maupun *ground water* dengan bahan organik beracun adalah problem pencemaran lingkungan yang serius. Hal ini bukan hanya berdampak buruk pada kesehatan manusia namun juga mengganggu kehidupan akuatik dan habitat mikroorganisme.

Salah satu zat pencemar yang akhir-akhir ini banyak mengundang perhatian adalah pencemaran yang diakibatkan oleh zat warna yang terbawa limbah cair industri. Pencemaran zat warna ini jumlahnya meningkat terus seiring dengan pesatnya pertumbuhan industri. Zat warna terutama digunakan di industri tekstil, dan beberapa jenis industri lainnya seperti industri kertas, penyamakan kulit dan industri otomotif. Limbah cair zat warna sangat menantang karena merupakan campuran yang kompleks yang terdiri dari komponen zat warna, aditif dan berbagai ion (Wan et al., 2025). Zat warna bersifat beracun dan persisten keberadaannya di lingkungan sehingga membahayakan bagi kehidupan manusia dan biota lainnya.

Keberadaan zat warna dalam jumlah kecil (<1mg/L) dapat menyebabkan iritasi pada kulit, dermatitis, alergi dan juga bisa menyebabkan kanker dan terjadinya mutagen pada organisme

aquatik dan manusia (Noorimotlagh et al., 2019). Oleh karena itu, dipandang sangat penting untuk menghilangkan zat warna dari limbah cair industri sebelum dibuang ke badan air atau ke lingkungan. Dalam hal ini, pengembangan metode yang kompetitif dan berkelanjutan untuk pengelolaan limbah cair yang mengandung zat warna adalah sangat urgen dalam rangka memproteksi lingkungan dari kerusakan akibat pencemaran zat warna.

Upaya untuk mencari cara yang efektif dan efisien untuk menghilangkan zat warna dari limbah cair industri menjadi perhatian yang sangat serius di kalangan para peneliti dan praktisi industri. Beberapa alternatif teknologi penghilangan zat warna dari limbah cair terus dikembangkan seperti adsorpsi, pertukaran ion, elektrokoagulasi, photodegradasi, degradasi secara mikrobiologis dan teknologi membran (Firmansyah et al., 2025). Dari banyak alternatif tersebut adsorpsi merupakan salah satu opsi yang prospektif karena pengoperasiannya mudah, dapat diterapkan secara kontinu untuk skala besar, dan biaya operasional relatif murah.

Adsorpsi adalah salah satu metode pengolahan limbah cair industri yang handal dan secara luas digunakan, memperlihatkan keunggulan yang signifikan seperti kapasitas adsorpsinya yang tinggi, sludge yang dihasilkan minim dan waktu kontak yang diperlukan cukup singkat untuk aplikasi skala komersial. Dibanding metode lain, adsorpsi memiliki efisiensi yang lebih tinggi dan biaya yang lebih rendah khususnya ketika konsentrasi polutan yang akan dihilangkan rendah (Nugraha et al., 2025).

Adsorpsi melibatkan penggunaan bahan berpori sebagai adsorben. Adsorpsi dapat dikelompokkan menjadi adsorpsi fisik dan adsorpsi kimia. Adsorpsi fisik, yang juga dikenal sebagai adsorpsi *van der Waals*, terjadi akibat gaya *van der Waals* antar molekul. Proses ini *reversible*, dan cenderung berbalik ke desorption ketika suhu meningkat dan atau tekanan menurun. Adsorpsi kimia terjadi karena ikatan kimia antara molekul adsorben dan adsorbat. Adsorpsi kimia umumnya *irreversible* dan memiliki selektivitas yang tinggi terhadap molekul tertentu (Hou et al., 2025).

Di bidang adsorpsi akhir-akhir ini interest terfokus pada upaya untuk mendapatkan bahan adsorben yang relatif murah dan memiliki kapasitas besar untuk menghilangkan zat warna dari limbah cair industri. Dalam hal ini, salah satu adsorben yang menarik banyak perhatian adalah *carbon nanotubes* karena memiliki kapasitas adsorpsi yang besar, selektivitas tinggi, kestabilan sifat fisikokimia, strukturnya yang bervariasi dan dapat diproduksi dengan mudah (Loura et al., 2024).

Sejak diketemukan oleh Iijima pada tahun 1991, *carbon nanotubes* telah menaikkan interest yang luas dalam bidang science dan teknologi. Studi sintesis dan aplikasi penggunaan *carbon nanotubes* terus tumbuh untuk berbagai aplikasi karena memiliki keunggulan dalam hal sifat-sifat fisik dan kimianya.

Ada beberapa metode yang dikembangkan untuk memproduksi *carbon nanotubes* yaitu metode *catalytic chemical vapor deposition*, *electric arc discharge* dan *laser ablation*. Dari beberapa alternatif tersebut metode *catalytic chemical vapor deposition* dipandang sebagai metode yang paling prospektif. Keunggulan metode *catalytic chemical vapor deposition* adalah keefektifan dalam memanfaatkan sumber carbon dan potensi untuk memproduksi berbagai tipe *carbon nanotubes* dengan mengendalikan berbagai parameter yang mempengaruhi pertumbuhan *carbon nanotubes*. Keunggulan lain dari metode ini adalah produksinya mudah dikendalikan (Su et al., 2025).

Komponen dasar penyusun *carbon nanotubes* adalah *graphene*, yaitu lapisan atom karbon yang tersusun secara *hexagonal*, yang tergulung membentuk silinder (tube) dengan diameter beberapa *nanometer* dan panjang beberapa mikrometer. Berdasarkan jumlah dinding yang dimiliki, *carbon nanotubes* diklasifikasikan menjadi 3 kelompok yaitu: (1) *single wall*, untuk yang hanya terdiri satu dinding; (2) *double wall*, jika tersusun dari 2 dinding dan (3) *multi wall*, jika tersusun dari lebih dua dinding (Kishore et al., 2024). Untuk *carbon nanotubes* yang disintesa dengan metode *catalytic chemical vapor deposition*, berdasarkan tingkat kemurniannya, *carbon nanotubes* dikelompokkan menjadi 2 kelompok yaitu *pristine carbon nanotubes* dan *purified carbon nanotubes*. *Pristine carbon nanotubes* atau juga sering disebut *as synthesized carbon nanotubes* atau juga dapat disebut *as grown carbon nanotubes* adalah *carbon nanotubes* yang belum mengalami proses pemurnian dan atau modifikasi. Sedangkan *purified carbon nanotubes* adalah *carbon nanotubes* yang telah mengalami proses pemurnian untuk menghilangkan partikel logam yang berasal dari katalis.

Proses pemurnian salah satunya dilakukan dengan treatment menggunakan asam kuat untuk melarutkan komponen logam yang berasal dari katalis. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji kinerja *pristine multiwalled carbon nanotubes* untuk menghilangkan zat warna *acid blue 29* dari limbah cair. Kinerja *pristine multiwalled carbon nanotubes* dalam menghilangkan zat warna *acid blue 29* diukur berdasarkan persen *removal* terhadap zat warna tersebut. Disamping itu juga dilakukan pengujian model kesetimbangan adsorpsi yang sesuai untuk sistem ini untuk mengetahui interaksi antara molekul zat warna *acid blue 29* dengan adsorben *pristine carbon multiwalled nanotubes*.

METODE

Pristine multiwalled carbon nanotubes disintesa dengan metode *catalytic chemical vapor deposition* di dalam *fluidized bed reactor* dengan menggunakan *carbon precursor liquified petroleum gas* seperti yang telah diuraikan dalam publikasi sebelumnya (Setyoprato et al., 2018). Pada prinsipnya katalis tri-metallic Fe-Co-Mo/MgO dengan komposisi berat Fe:Co:Mo= 2:2:1. Padatan kristal dari *ferric (III) nitrate nonahydrate*, *cobalt (II) nitrate*, dan *ammonium heptamolybdate tetrahydrate* (semua produk dari Merck Millipore) digunakan sebagai *metal precursors*, sementara yang digunakan sebagai *catalyst support* adalah padatan kristal MgO (juga produk dari Merck Millipore). Penempelan komponen logam ke permukaan *catalyst support* MgO dilakukan dengan metode impregnasi basah.

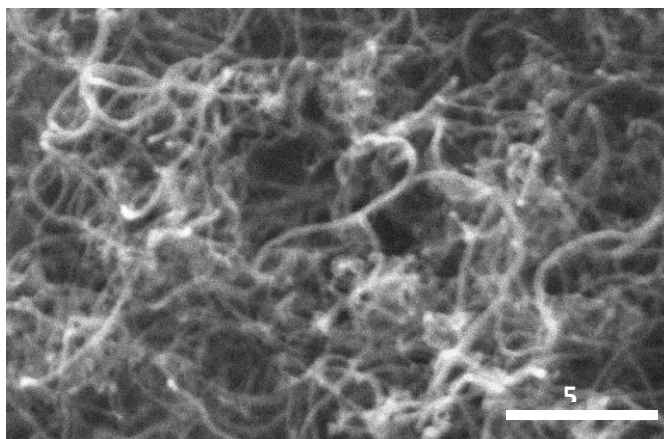
Fluidized bed reactor yang digunakan untuk mensintesa *carbon nanotubes* dipanaskan dengan pemanas Listrik dengan daya 1 kW. Reaktor terbuat dari bahan *quartz* berdiameter 1,6 cm dan panjang 30 cm. Sejumlah *quartz wool* di pasang di bagian bawah reaktor yang berfungsi sebagai penyangga dan distributor gas, sejumlah yang sama di pasang di bagian atas reaktor untuk yang berfungsi sebagai filter untuk mencegah partikel-partikel halus terbawa ke luar reaktor. Sintesa *carbon nanotube* dilakukan pada suhu 750 – 850 °C selama 30 menit dengan mengalirkan gas hidrogen dan argon untuk membantu pertumbuhan *carbon nanotubes*. Morfologi dan orientasi *multiwalled carbon nanotubes* yang digunakan dianalisa menggunakan *scanning electron microscope (JSM-6510A/JSM-6510LA – analytical/analytical low vacuum SEM)*.

Eksperimen adsorpsi dilakukan secara *batch* pada gelas kimia 500 ml pada suhu ruangan dengan dilakukan pengadukan secara kontinu menggunakan *magnetic stirrer* pada kecepatan putar 120 rpm. Konsentrasi awal zat warna *acid blue 29* (Sigma-Aldrich) dalam cairan di variasi sebesar 10, 30, 50, 80 dan 150 ppm. Rasio massa *carbon nanotubes* terhadap cairan yang digunakan adalah 0,032 g *carbon nanotubes*/0,2 liter cairan. Penurunan konsentrasi *acid blue 29* di cairan diukur secara spektrofotometri menggunakan spektrofotometer UV-Vis *Genesys 150 Thermo Scientific*. Pengukuran konsentrasi *acid blue 29* di cairan dilakukan sampai praktis tidak lagi terjadi penurunan konsentrasinya yang artinya kondisi kesetimbangan telah tercapai.

HASIL DAN BAHASAN

Orientasi *Multiwalled Carbon Nanotubes*

Untuk mengetahui orientasi dari *multiwalled carbon nanotubes* yang digunakan dilakukan pengambilan gambar SEM (*scanning electron microscope*) dan hasilnya disajikan pada gambar 1. Gambar SEM tersebut diambil pada perbesaran 50.000 kali. Dari gambar SEM tersebut tampak bahwa *carbon nanotubes* membentuk *bundle* yang didalamnya saling melilit antara yang satu *nanotubes* dengan lainnya. Orientasi ini serupa dengan *carbon nanotubes* yang disintesa oleh Calderon dkk. (Orea-Calderón et al., 2024) dengan metode yang sama yaitu *catalytic chemical vapor deposition method*.



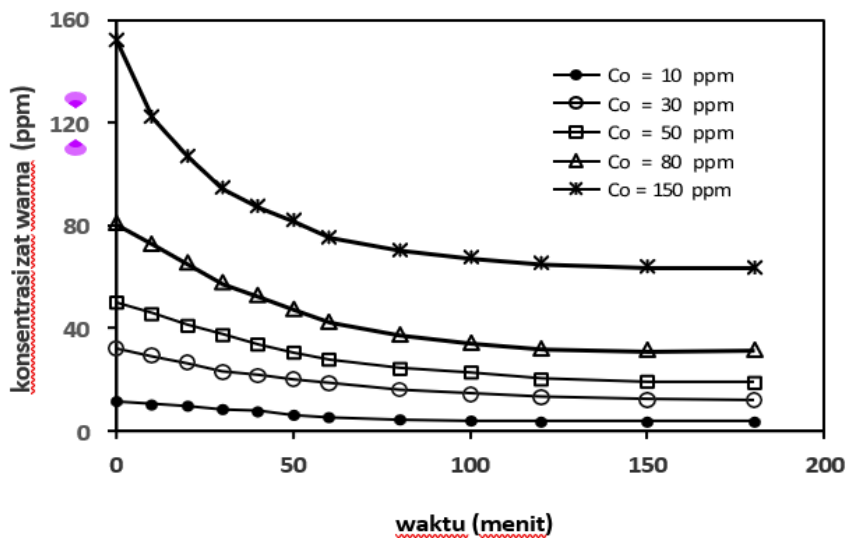
Gambar 1. Orientasi dari *multiwalled carbon nanotubes* yang digunakan.

Profil Adsorpsi Zat Warna *Acid Blue 29*

Adsorpsi zat warna *acid blue 29* dengan adsorben *carbon nanotubes* dilakukan pada suhu kamar dengan rasio massa adsorben terhadap cairan zat warna sebesar 0,16 g/liter. Selama adsorpsi dilakukan pengadukan secara terus menerus dengan menggunakan pengaduk magnetik dengan kecepatan putar 120 rpm. Profil perubahan konsentrasi zat warna *acid blue 29* di cairan dari waktu ke waktu, untuk berbagai nilai konsentrasi awal *acid blue 29* di cairan, disajikan pada gambar 2. Dari gambar tersebut terlihat bahwa penurunan konsentrasi *acid blue 29* di cairan lebih signifikan untuk konsentrasi awal *acid blue 29* yang lebih tinggi. Terlihat juga penurunan konsentrasi zat warna *acid blue 29* praktis tidak terjadi lagi pada saat waktu adsorpsi mencapai 180 menit.

Parameter yang biasa digunakan untuk menyatakan tingkat keberhasilan penghilangan zat warna dalam suatu cairan dengan adsorpsi adalah persen *removal* zat warna. Persen *removal* zat warna menyatakan berapa persen dari jumlah zat warna yang ada di cairan sebelum dilakukan proses adsorpsi yang bisa terserap ke padatan adsorben. Persen *removal* zat warna lazimnya dinyatakan pada saat proses adsorpsi sudah mencapai kesetimbangan. Dengan demikian persen *removal* zat warna menunjukkan jumlah zat warna maksimum yang bisa dihilangkan dari cairan dengan metode adsorpsi untuk kondisi dan parameter operasi tertentu. Nilai persen *removal* zat warna *acid blue 29* yang diperoleh disajikan pada tabel 1. Hasil tersebut menunjukkan bahwa persen *removal* zat warna lebih tinggi untuk konsentrasi awal zat warna *acid blue 29* di cairan yang lebih rendah. Persen *removal* terhadap zat warna lebih tinggi pada konsentrasi zat warna yang lebih rendah juga ditunjukkan pada hasil penelitian yang dilakukan oleh Shabaan dkk. (Shabaan et al., 2020) dan Saxena dkk. (Saxena et al., 2020).

Persen *removal* zat warna tertinggi dicapai saat konsentrasi awal zat warna 10 ppm sebesar 68,8% dan persen *removal* zat warna terendah terjadi pada saat konsentrasi awal zat warna 150 ppm sebesar 58,2%. Hasil persen *removal* ini kurang lebih sebanding dengan persen *removal* dari penelitian yang dilakukan oleh Abdullah dkk. (Adnan Abdullah et al., 2022) yang menghasilkan persen *removal* sebesar 60 – 70 % ketika *carbon nanotubes* digunakan untuk mengadsorpsi zat warna *methylene blue*.



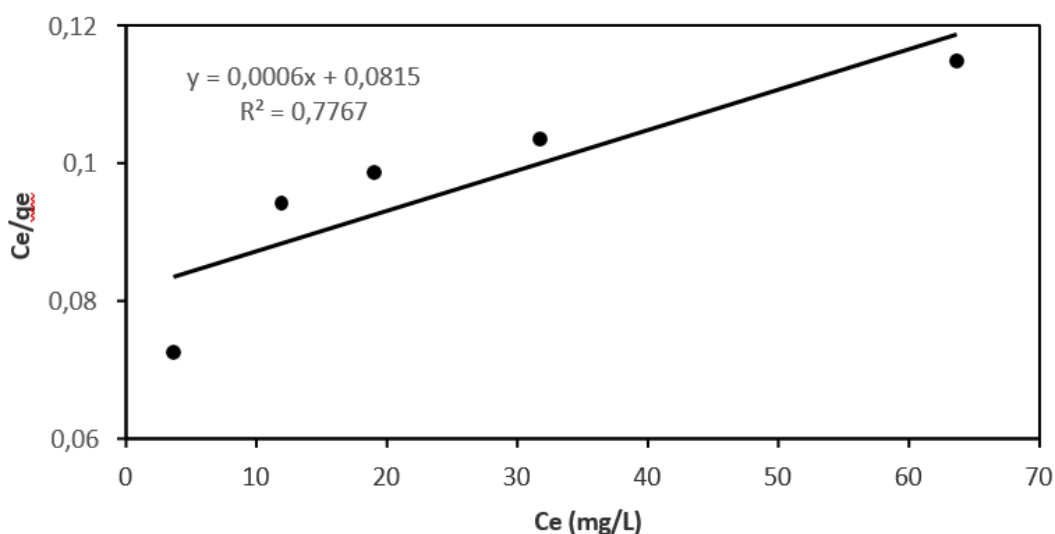
Gambar 2. Profil penurunan konsentrasi zat warna acid blue 29 di cairan selama adsorbs pada berbagai konsentrasi awal zat warna (Co).

Tabel 1
Persen Removal dan Kapasitas Adsorpsi terhadap Zat warna Acid Blue 29

Konsentrasi Awal Zat Warna Acid Blue 29 (ppm)	Persen Removal (%)	Penyerapan Zat Warna Pada Saat Keseimbangan (mg zat warna / g carbon nanotubes)
10	68,8	49,7
30	63,0	126,6
50	61,9	193,1
80	60,7	306,7
150	58,2	554,1

Pengujian Model Keseimbangan

Pada studi ini diuji 2 model keseimbangan adsorpsi, yaitu *isotherm Langmuir* dan *isotherm Freundlich*. Model *isotherm Langmuir* umumnya digunakan untuk adsorpsi homogen, dimana adsorpsi *monolayer* setiap molekul adsorbat ke permukaan padatan adsorben memiliki energi aktivasi sorpsi yang sama (Nethaji et al., 2013).



Gambar 3. Plot kesetimbangan model *Langmuir*.

Bentuk linier dari isotherm Langmuir diekspresikan pada persamaan berikut:

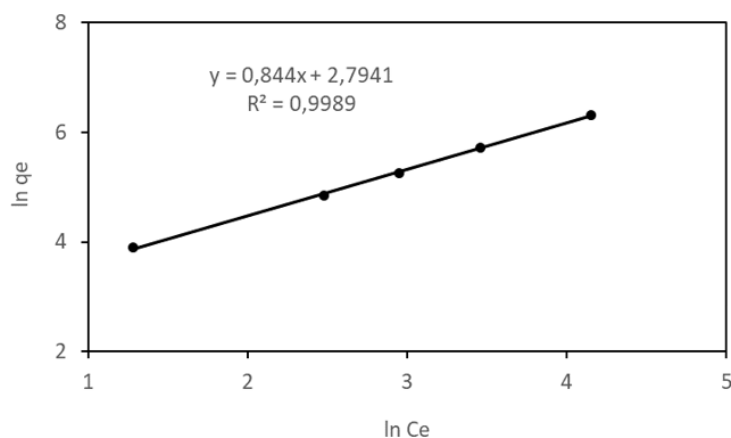
$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{C_e}{q_m}$$

dimana C_e adalah konsentrasi zat warna di fasa cair (mg/L) pada saat kesetimbangan, q_e adalah penyerapan zat warna (mg/g) pada saat kesetimbangan, K_L (L/mg) adalah konstanta kesetimbangan Langmuir dan q_m adalah kapasitas saturasi *monolayer* teoritis. Plot kesetimbangan model Langmuir disajikan pada gambar 3.

Adapun model *isotherm Freundlich* adalah model *isotherm* adsorpsi yang umumnya digunakan untuk adsorpsi *multilayer* (*multisite*) pada permukaan heterogen. Bentuk linier dari *isotherm Freundlich* diekspresikan pada persamaan berikut:

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

dimana K_F adalah konstanta *Freundlich* dan n adalah eksponen *Freundlich*. Plot kesetimbangan model *Freundlich* disajikan pada gambar 4.



Gambar 4. Plot kesetimbangan model *Freundlich*.

Dari kedua model kesetimbangan yang diuji tersebut menunjukkan bahwa model *isotherm Freundlich* lebih sesuai karena menghasilkan koefisien korelasi (R^2) yang lebih tinggi yaitu sebesar 0,9989. Hal ini mengindikasikan bahwa adsorpsi zat warna *acid blue 29* pada *multiwalled carbon nanotubes* terjadi secara *multilayer* pada permukaan heterogen. Hasil yang serupa ditunjukkan pada hasil penelitian yang dilakukan oleh Malakootian dkk. (Malakootian et al., 2015) yang menunjukkan untuk sistem adsorpsi *reactive blue 19* dengan menggunakan *carbon nanotubes* diperoleh model kesetimbangan *Freundlich* lebih sesuai dibandingkan model kesetimbangan *Langmuir*.

SIMPULAN

Pristine multiwalled carbon nanotube dengan orientasi *bundle* yang di dalamnya saling melilit antar individu *nanotubes* terbukti bisa menghilangkan zat warna *acid blue 29* dari cairan dengan cara adsorpsi. Percobaan menunjukkan bahwa persen *removal* semakin tinggi ketika konsentrasi awal zat warna dalam cairan semakin rendah. Persen *removal* tertinggi dicapai pada saat konsentrasi awal zat warna 10 ppm. Pada kondisi ini persen *removal* terhadap zat warna mencapai 68,8%. Studi kesetimbangan adsorpsi menunjukan bahwa model kesetimbangan *Freundlich* lebih sesuai pada sistem ini dibandingkan kesetimbangan model *Langmuir*. Hal ini mengindikasikan bahwa adsorpsi zat warna *acid blue 29* pada *multiwalled carbon nanotubes* terjadi secara *multilayer* pada permukaan heterogen.

PUSTAKA ACUAN

1. Adnan Abdullah, T., Juzsakova, T., Le, P. C., Le, H. S., Adelikhah, M., Taleb Rasheed, R., Dawood Salman, A., Domokos, E., Kułacz, K., & Cuong Nguyen, X. (2022). Nanocomposites over modified multiwalled carbon nanotubes for the removal of cationic dye from water. *Total Environment Research Themes*, 3–4. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2022.100005>
2. Firmansyah, M. L., Ashraf, M., & Ullah, N. (2025). A critical review on the removal of anionic dyes by cross-linked resin: Recent progress, challenges and future perspective. In *Separation and Purification Technology* (Vol. 360). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131111>
3. Hou, C. P., Wang, Q., Liu, Q., Li, Z. G., Ke, C. L., Wang, X. F., & Huang, K. (2025). Review: Development and application of porous materials to antibiotic drug adsorption and removal. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 69). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106583>
4. Kishore, K., Sheikh, M. N., & Hadi, M. N. S. (2024). Doped multi-walled carbon nanotubes and nanoclay based-geopolymer concrete: An overview of current knowledge and future research challenges. *Cement and Concrete Composites*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105774>
5. Loura, N., Rathee, K., Dhull, R., Singh, M., & Dhull, V. (2024). Carbon nanotubes for dye removal: A comprehensive study of batch and fixed-bed adsorption, toxicity, and functionalization approaches. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 67). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106193>
6. Malakootian, M., Mansoorian, H. J., Hosseini, A., & Khanjani, N. (2015). Evaluating the efficacy of alumina/carbon nanotube hybrid adsorbents in removing Azo Reactive Red 198 and Blue 19 dyes from aqueous solutions. *Process Safety and Environmental Protection*, 96, 125–137. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.05.002>
7. Nethaji, S., Sivasamy, A., & Mandal, A. B. (2013). Adsorption isotherms, kinetics and mechanism for the adsorption of cationic and anionic dyes onto carbonaceous particles prepared from *Juglans regia* shell biomass. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10(2), 231–242. <https://doi.org/10.1007/s13762-012-0112-0>
8. Noorimotlagh, Z., Mirzaee, S. A., Martinez, S. S., Alavi, S., Ahmadi, M., & Jaafarzadeh, N. (2019). Adsorption of textile dye in activated carbons prepared from DVD and CD wastes modified with multi-wall carbon nanotubes: Equilibrium isotherms, kinetics and thermodynamic study. *Chemical Engineering Research and Design*, 141, 290–301.

<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.11.007>

9. Nugraha, M. W., Kim, S., Roddick, F., Xie, Z., & Fan, L. (2025). A review of the recent advancements in adsorption technology for removing antibiotics from hospital wastewater. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 70). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.106960>
10. Orea-Calderón, B. I., Castillo-Martin del Campo, C. G., Varela-Caselis, J. L., Martínez-Guerra, E., Silva-Vidaurri, L. G., Fajardo-Díaz, J. L., López-Urías, F., Endo, M., & Muñoz-Sandoval, E. (2024). Enhanced synthesis of sponge-type multiwalled carbon nanotubes using SiO₂- Fe₂O₃ catalysts via aerosol-assisted chemical vapor deposition: Electrochemical and absorption capacity studies. *Diamond and Related Materials*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111342>
11. Saxena, M., Sharma, N., & Saxena, R. (2020). Highly efficient and rapid removal of a toxic dye: Adsorption kinetics, isotherm, and mechanism studies on functionalized multiwalled carbon nanotubes. *Surfaces and Interfaces*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100639>
12. Setyoprato, P., Wulan, P. P. D. K., & 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), 120–129. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i1.1165>
13. Shabaan, O. A., Jahin, H. S., & Mohamed, G. G. (2020). Removal of anionic and cationic dyes from wastewater by adsorption using multiwall carbon nanotubes. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(3), 4797–4810. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.01.010>
14. Su, H., Huang, X., Zhang, Z., Ye, Y., & Wang, D. (2025). Synthesis of carbon nanotubes by chemical vapor deposition using nickel supported on nitric acid-treated pine sawdust. *Biomass and Bioenergy*, 193. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107579>
15. Wan, H., Zhu, X., Wang, J., Cao, F., Zhang, Y., Yao, Z., Wang, S., Bhattacharyya, D., & Tang, K. (2025). Adsorptive nanofibrous membranes for bidirectional removal of cationic and anionic dyes. *Separation and Purification Technology*, 361, 131515. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.131515>