

TINJAUAN KOMPARATIF ADSORPSI PEWARNA KATIONIK DAN ANIONIK (METHYLENE BLUE DAN ACID ORANGE 7) MENGGUNAKAN BERBAGAI MATERIAL ADSORBEN

Wikrama Sarweswara¹, Mirad Fahri², Rahmat Basuki³
sarweswara.wikrama@gmail.com¹, miradfahri@gmail.com², rhmtbsq@gmail.com³
Universitas Pertahanan Republik Indonesia

ABSTRAK

Pewarna sintetis seperti Methylene Blue (MB) kationik dan Acid Orange 7 (AO7) anionik merupakan polutan persisten utama dalam air limbah tekstil yang menimbulkan risiko toksik dan karsinogenik. Review literatur sistematis ini membandingkan perilaku adsorpsi keduanya pada adsorben berbasis karbon, biomassa, oksida logam, dan komposit, dengan fokus pada pengaruh muatan ionik, pH optimum, kapasitas adsorpsi (q_{max} hingga 757,6 mg/g untuk AO7 dan >1000 mg/g untuk MB), model isotherm/kinetika (Langmuir/PSO dominan), mekanisme (elektrostatik, π - π , hidrogen), serta regenerasi (retensi >90% setelah 5–10 siklus). Hasil menunjukkan MB lebih mudah diadsorpsi pada permukaan negatif dengan regenerasi sederhana, sementara AO7 bergantung pada situs positif; adsorben biomassa murah menjanjikan keseimbangan tekno-ekonomi untuk aplikasi berkelanjutan. Kajian merekomendasikan pengembangan material selektif untuk limbah campuran guna mendukung pengolahan limbah industri efisien dan ramah lingkungan.

Kata Kunci: Adsorpsi, Methylene Blue, Acid Orange 7, Pewarna Kationik, Pewarna Anionik, Material Adsorben, Regenerasi Adsorben, Pengolahan Limbah Pewarna.

ABSTRACT

Synthetic dyes such as cationic Methylene Blue (MB) and anionic Acid Orange 7 (AO7) are persistent pollutants in textile wastewater, posing toxic and carcinogenic risks. This systematic literature review compares their adsorption behavior on carbon-based, biomass, metal oxide, and composite adsorbents, emphasizing ionic charge effects, optimum pH, adsorption capacity (q_{max} up to 757.6 mg/g for AO7 and >1000 mg/g for MB), isotherm/kinetics models (Langmuir/PSO predominant), mechanisms (electrostatic, π - π , hydrogen bonding), and regeneration (retention >90% over 5–10 cycles). Findings reveal MB adsorbs readily on negative surfaces with simple regeneration, while AO7 requires positive sites; low-cost biomass adsorbents offer optimal techno-economic balance for sustainable applications. The review advocates selective material development for mixed wastewater to enable efficient, eco-friendly industrial treatment.

Keywords: Adsorption, Methylene Blue, Acid Orange 7, Cationic Dye, Anionic Dye, Adsorbent Materials, Adsorbent Regeneration, Dye Wastewater Treatment.

PENDAHULUAN

Pewarna sintetis merupakan salah satu kontaminan organik berbahaya yang banyak ditemukan dalam limbah cair industri, khususnya dari sektor tekstil, kertas, kulit, dan kimia, sehingga keberadaannya di lingkungan perairan menjadi perhatian serius karena sifatnya yang persisten, toksik, serta berpotensi karsinogenik [6]. Secara kimia, senyawa ini merupakan molekul organik yang menghasilkan warna akibat adanya sistem ikatan terkonjugasi, terutama pada cincin aromatik dan gugus kromofor seperti azo ($-N=N-$), karbonil ($=C=O$), dan metin ($-CH=$), yang mampu menyerap cahaya pada daerah spektrum tampak, sementara gugus auxokrom seperti $-SO_3H$, $-NH_2$, dan $-OH$ berperan dalam meningkatkan intensitas warna serta memengaruhi kelarutan dan interaksi pewarna dengan permukaan material [44]. Sebagian besar pewarna sintetis memiliki stabilitas tinggi sehingga sulit terdegradasi secara alami, dan akumulasinya di perairan dapat menghambat penetrasi cahaya yang berdampak pada terganggunya proses fotosintesis organisme akuatik serta penurunan kualitas ekosistem. Selain itu, beberapa jenis pewarna maupun produk degradasinya diketahui bersifat toksik, mutagenik, dan karsinogenik, dengan dampak pada manusia meliputi iritasi saluran pernapasan akibat inhalasi, gangguan saluran pencernaan jika tertelan, iritasi kulit, serta kerusakan mata permanen akibat kontak langsung [43], sehingga ketahanannya terhadap oksidasi dan biodegradasi menjadikannya sebagai polutan prioritas yang memerlukan strategi pengolahan limbah yang efektif dan berkelanjutan.

Berdasarkan sifat muatan dalam larutan, pewarna sintetis umumnya diklasifikasikan menjadi pewarna kationik dan anionik yang masing-masing memiliki karakteristik lingkungan serta mekanisme interaksi permukaan yang berbeda [57]. Methylene Blue (MB) termasuk dalam pewarna kationik golongan thiazine yang bermuatan positif akibat adanya gugus amina terprotonasi, sedangkan Acid Orange 7 (AO7) merupakan pewarna azo anionik yang bermuatan negatif karena keberadaan gugus sulfonat ($-SO_3^-$). Kedua senyawa tersebut diketahui bersifat toksik serta memiliki ketahanan tinggi terhadap proses degradasi di lingkungan perairan [14]. Perbedaan sifat muatan ini memengaruhi besarnya interaksi elektrostatik antara molekul pewarna dan permukaan adsorben, yang bersama dengan interaksi $\pi-\pi$, ikatan hidrogen, serta gaya van der Waals menentukan mekanisme adsorpsi yang terjadi [28][38]. Secara struktural, MB memiliki satu sistem cincin aromatik terkonjugasi dengan muatan positif, sedangkan AO7 tersusun atas dua cincin aromatik yang dihubungkan oleh gugus azo ($-N=N-$) dan mengandung satu atau lebih gugus sulfonat bermuatan negatif [39]. Variasi struktur dan distribusi muatan tersebut menyebabkan MB cenderung berinteraksi lebih kuat dengan permukaan adsorben bermuatan negatif melalui gaya tarik elektrostatik dan interaksi $\pi-\pi$, sementara AO7 lebih efektif teradsorpsi pada permukaan bermuatan positif atau adsorben yang telah dimodifikasi secara kationik melalui mekanisme pertukaran anion, ikatan hidrogen, serta interaksi $\pi-\pi$ [29][18][39].

Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk pengolahan limbah yang mengandung pewarna, antara lain oksidasi lanjutan, koagulasi-flokulasi, filtrasi membran, serta proses biologis, namun adsorpsi dinilai sebagai metode yang efektif karena mampu memberikan efisiensi penghilangan yang tinggi, didukung oleh konfigurasi proses yang relatif sederhana, fleksibilitas dalam pemilihan adsorben, serta potensi regenerasi dan penggunaan ulang material. Kinerja adsorpsi sangat dipengaruhi oleh interaksi antara sifat fisikokimia pewarna dan karakteristik adsorben, seperti luas permukaan spesifik, distribusi ukuran pori, serta jenis dan densitas gugus fungsi permukaan yang menentukan muatan permukaan dan afinitas terhadap spesies terlarut. Sejumlah studi menunjukkan bahwa selektivitas adsorben terhadap pewarna kationik dan anionik merupakan faktor krusial, khususnya pada aplikasi pengolahan limbah tekstil yang umumnya mengandung campuran berbagai jenis pewarna. Oleh karena itu, kajian ini bertujuan untuk mengulas secara komprehensif perbedaan sifat fisikokimia MB dan AO7 serta implikasinya terhadap proses adsorpsi pada berbagai jenis

adsorben, termasuk karbon, biomassa, oksida logam, dan material komposit, dengan penekanan pada hubungan antara muatan pewarna, karakteristik permukaan adsorben, kondisi operasi, serta mekanisme adsorpsi yang mendasari perbedaan kinerja dan selektivitas adsorpsi kedua sistem tersebut.

METODE PENELITIAN

Kajian ini disusun melalui pendekatan literatur sistematis untuk menganalisis serta membandingkan perilaku adsorpsi pewarna kationik Methylene Blue (MB) dan pewarna anionik Acid Orange 7 (AO7) pada berbagai jenis adsorben. Fokus analisis mencakup hubungan antara sifat fisikokimia pewarna, karakteristik permukaan adsorben, kinerja adsorpsi, kemampuan regenerasi, serta aspek biaya dan potensi aplikasinya dalam pengolahan limbah cair berwarna. Literatur yang dianalisis terutama berasal dari periode 2015–2025 untuk merepresentasikan perkembangan terkini, sementara referensi yang lebih lama digunakan secara selektif sebagai dasar konseptual. Analisis difokuskan pada perbandingan kapasitas adsorpsi maksimum (q_{max}), pH optimum, waktu kontak kesetimbangan, serta model isoterm dan kinetika yang digunakan. Selain itu, mekanisme adsorpsi seperti interaksi elektrostatik, interaksi π - π , ikatan hidrogen, dan pertukaran ion dievaluasi secara komparatif untuk menjelaskan perbedaan selektivitas antara MB dan AO7 pada adsorben yang sama. Dalam konteks keberlanjutan, kajian juga mencakup metode regenerasi adsorben, stabilitas kinerja setelah beberapa siklus, serta penurunan kapasitas adsorpsi, sedangkan aspek biaya dianalisis secara kualitatif dengan mempertimbangkan sumber bahan baku, kompleksitas sintesis, kebutuhan bahan kimia tambahan, dan potensi penggunaan ulang adsorben guna menilai kelayakan aplikatifnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1. Karakteristik adsorben dan kapasitas adsorpsi AO7

No jurnal	Adsorben	Kategori adsorben	pH optimum	C_0 (mg/L)	q_{max} (mg/g)	Suhu ($^{\circ}C$)
1	ACZnO [32]	Karbon aktif granular termodifikasi nanopartikel ZnO	3	50	66.22	25
2	PPNSiO ₂ [42]	Komposit polipirrol–nanosilika	3	10; 25–100	181.4	55
3	MPG [8]	Goetit mesopori	3.0	10; 25; 50; 100	117.9	55
4	MSDBC [46]	<i>Biochar</i> berbasis lumpur IPAL	-	0.06	-	25
5	NGBC700 [51]	<i>Biochar</i> lignoselulosa dari <i>Napier grass</i>	2 pada uji pH; 6.5 pada kinetika/isoterm	10; 20; 30; 10–250	14.3 (10 $^{\circ}C$); 12.7 (25 $^{\circ}C$)	10; 2

No jurnal	Adsorben	Kategori adsorben	pH optimum	Co (mg/L)	qmax (mg/g)	Suhu (°C)
6	Pisum sativum pea pod AC-ZnCl ₂ [13]	<i>Microporous activated carbon berbasis pea pods</i>	1.51	100	473.93	25 ± 2
7	MIL-101Fe [15]	<i>Fe-based metal-organic framework</i>	-	10–80; 80	153.4	25
8	MS-450 [46]	<i>Magnetic Sludge sludge biochar/Fe₃O₄</i>	2.0	5–100	110.27	-
9	AFA [5]	<i>Floating adsorbent berbasis hollow glass microspheres</i>	pH < 2.1; kondisi baku pH 2	100	217.39	25; 35; 45
10	Mesoporous CeO ₂ [49]	Adsorben anorganik <i>mesoporous cerium dioxide</i>	-	120	757.6	Suhu ruang
11	TiO ₂ GO nanocomposite [56]	Nanokomposit TiO ₂ <i>nanopartikel-graphene oxide</i>	5	5; 10; 25; 50	-	30
12	3D-MA-LDH [36]	<i>Self-assembled three-dimensional MgAl layered double hydroxide</i>	-	600; untuk isoterm	485.6	25; 35; 45
13	MG-OPAC [22]	Karbon aktif magnetik berbasis <i>orange peel activated carbon</i>	2.25	150–500	357.14	25
14	Granular activated carbon (GAC) [37]	Karbon aktif granular komersial berbasis batubara	-	50	-	Suhu ruang

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi AO7 bervariasi secara signifikan, mencakup rentang yang luas mulai dari material berbasis biochar sederhana hingga adsorben anorganik dan komposit dengan struktur berpori tinggi. Adsorben berbasis biomassa dan sludge, seperti NGBC700 dan MSDBC, merepresentasikan material berbiaya

rendah dengan nilai q_{max} yang relatif moderat, sementara adsorben dengan rekayasa struktur lanjut, seperti Mesoporous CeO_2 dan 3D-MA-LDH, menunjukkan kapasitas adsorpsi yang jauh lebih tinggi masing-masing sebesar 757,6 mg/g dan 485,6 mg/g. Hal ini mengindikasikan bahwa luas permukaan spesifik yang tinggi serta kerapatan situs aktif bermuatan positif berperan penting dalam meningkatkan afinitas terhadap pewarna anionik seperti AO7. Selain itu, keberadaan adsorben berbasis limbah pertanian, seperti Pisum sativum pea pod AC- $ZnCl_2$ dan MG-OPAC, yang mampu mencapai q_{max} di atas 350 mg/g, menunjukkan bahwa biomassa yang dimodifikasi secara tepat dapat memberikan kinerja adsorpsi yang kompetitif dibandingkan material sintetis, sekaligus menawarkan keuntungan dalam aspek keberlanjutan sumber bahan baku.

Tabel 2. Model isoterm dan kinetika adsorpsi Acid Orange 7 (AO7) pada berbagai adsorben

No. jurnal	Adsorben	Model isoterm terbaik + R^2	Model kinetika terbaik + R^2	q_e (mg/g)	Waktu kesetimbangan
1	ACZnO [32]	Langmuir ; $R^2 = 0.98$	PSO; $R^2 = 0.997$	30.76 (PSO)	150 min
2	PPNSiO2 [42]	Langmuir ; $R^2 = 0.998$ (283 K),	PSO; $R^2 = 0.994-0.997$	29.41; 58.82; 71.92; 98.25 (PSO)	90 min
3	MPG [8]	Langmuir ; 0.998 (313 K)	<i>Intra-particle diffusion</i> (IPD), step-2; $R^2 = 0.956-0.948$	-	75 min
4	MSDBC [46]	-	PSO; $R^2 = 0.9769$	-	100 min
5	NGBC700 [51]	Freundlic h; $R^2 = 0.987$ (25 °C)	PSO; $R^2 = 0.964-0.997$	91.2 (PSO, dosis 2 g/L)	10 h; 12 h
6	Pisum sativum pea pod AC- $ZnCl_2$ [13]	Langmuir ; $R^2 = 1.000$	PSO; $R^2 = 1.000$	163.93 (PSO)	60 min
7	MIL-101Fe [15]	Langmuir ; $R^2 = 0.9963$	-	-	2 h
8	MS-450 [46]	Langmuir ; $R^2 = 0.987$	PSO; $R^2 = 0.990$	12.79 (PSO)	180 min
9	AFA [5]	Langmuir ; $R^2 = 0.9992$ (25 °C)	PSO; $R^2 = 0.9998$	92.5926 (PSO)	5 h

No. jurnal	Adsorben	Model isoterm terbaik + R ²	Model kinetika terbaik + R ²	q _e (mg/g)	Waktu kesetimbangan
10	Mesoporous CeO ₂ [49]	Langmuir ; R ² = 0.9985	-	757.6	30 min
11	TiO ₂ GO nanocomposite [56]	-	-	-	2.5 h
12	3D-MA-LDH [36]	Langmuir ; R ² = 0.988 (318 K)	Elovich; R ² = 0.917 (318 K)	344.3; 401.0; 489.2	24 h
13	MG-OPAC [22]	Temkin; R ² = 0.997 (1.0 g/L),	PSO; R ² = 0.99558	371.3	180 min
14	Granular activated carbon (GAC) [37]	Freundlich; R ² = 0.97–0.99	-	-	7 hari

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2, sebagian besar sistem adsorpsi AO7 menunjukkan kecocokan yang tinggi terhadap model isoterm Langmuir dan pada beberapa kasus juga mengikuti model Freundlich, sementara model kinetika *pseudo-second order* (PSO) menjadi pendekatan yang paling dominan dalam menggambarkan laju adsorpsi. Kesesuaian model Langmuir pada adsorben seperti ACZnO, PPNSiO₂, dan *Mesoporous CeO₂* mengindikasikan bahwa proses adsorpsi berlangsung pada situs aktif yang relatif homogen dengan kecenderungan pembentukan lapisan *monolayer*, sejalan dengan karakteristik permukaan terkontrol pada material sintesis, sedangkan kecocokan terhadap model Freundlich pada sistem seperti NGBC700 mencerminkan heterogenitas permukaan yang umum pada adsorben berbasis biomassa dengan distribusi energi adsorpsi yang lebih luas. Dari aspek kinetika, dominasi model PSO serta keterlibatan difusi intrapartikel pada beberapa sistem menunjukkan bahwa adsorpsi AO7 lebih dipengaruhi oleh interaksi kimia pada permukaan dan difusi ke dalam pori dibandingkan difusi film eksternal, sehingga pengembangan adsorben yang efektif perlu mempertimbangkan tidak hanya modifikasi gugus fungsi permukaan tetapi juga optimasi struktur pori internal untuk meningkatkan aksesibilitas dan kapasitas adsorpsi.

Tabel 3. Karakteristik adsorben dan kapasitas adsorpsi Methylene Blue (MB) pada berbagai material

No. jurnal	Adsorben	Kategori adsorben	pH optimum	C ₀ (mg/L)	q _{max} (mg/g)	Suhu (°C)
1	MHA 2,5:1 [2]	<i>Magnetite humic acid</i> (2,5:1)	-	50–150	161,2 90	30–70
2	Coconut	Selulosa dari sabut	7	20–	42,71	-

No jurnal	Adsorben	Kategori adsorben	pH optimum	C ₀ (mg/L)	q _{max} (mg/g)	Suhu (°C)
	husk cellulose [35]	kelapa		100	68	
3	BPs/Fe ₃ O ₄ [48]	<i>Magnetic biosorbent</i> berbasis <i>bamboo</i> <i>powders</i>	10–11	10–50	7,46	20– 60
4	MPs-3 [27]	Adsorben magnetik berbasis lumpur besi	-	60	87,3	25
5	Ni-Al/MBC [53]	Komposit Ni-Al LDH/ <i>magnetite</i> <i>biochar</i>	-	5; 15; 30; 45; 60	68,49 3	30; 40; 50; 60
7	Ni-Al LDH [53]	<i>Layered double</i> <i>hydroxides</i> berbasis Ni- Al	-	5; 15; 30; 45; 60	33,00 3	30; 40; 50; 60
8	Magnetite biochar (MBC) [53]	<i>Biochar</i> termodifikasi magnetit	-	5; 15; 30; 45; 60	37,73 6	30; 40; 50; 60
9	Komposit Ca/Al LDH/biochar [22]	Komposit LDH– <i>biochar</i>	5	35	32,53 5	60
10	Magnetic peanut husk (PN-Fe ₃ O ₄) [7]	Adsorben biomassa termagnetisasi	10	300	32,5	30
11	Activated Coconut Shells (ACS) [1]	<i>Activated carbon</i> dari tempurung kelapa	6	40– 120	30,30	25
12	Orange peel (OP) [10]	Biomassa lignoselulosa	9	50– 1000	309,6 0	25
13	Paintosorp [31]	<i>Bentonite adsorbent</i> <i>coating</i>	-	30– 200	-	30
14	MCB/ALG– 1 [26]	<i>Beads</i> komposit <i>biochar/alginate</i> termodifikasi KOH/FeCl ₃	-	25– 4000	1485, 03	49,85
15	MgAl-	Komposit LDH–	-	60;	108,6	30;

No jurnal	Adsorben	Kategori adsorben	pH optimum	C ₀ (mg/L)	q _{max} x (mg/g)	Suhu (°C)
	chitosan [41]	biopolimer		70; 80; 90; 100	96	40; 50; 60
16	Fe ₃ O ₄ ACC DAIlg polymer gel beads [51]	Nanokomposit polimer magnetik	6	5 ppm	2,079	Suhu ruang
17	CPPCs [55]	<i>Porous carbons</i> berbasis pektin jeruk	12	100; 125; 150	1155, 2; 1223,2; 1282,6	25; 35; 45
18	OPAC [15]	<i>Activated carbon</i> berbasis kulit jeruk	-	50– 500; 300; 500	382,7 5; 243,66 setelah 5 siklus	30
19	MPAC [15]	<i>Activated carbon</i> berbasis kulit manggis	-	50– 500; 300; 500	379,6 3; 277,45 setelah 5 siklus	30
20	GCNT hybrid [3]	<i>Hibrida graphene– carbon nanotube</i>	-	10– 30; 20	81,97	-
21	P-CSCNT-4 [16]	<i>Porous cup-stacked carbon nanotube</i>	-	75– 500; 150; 300	319,1	20
22	GO6 [52]	<i>Graphene oxide</i>	-	5-600	598,8	25
23	ABA composite beads [9]	<i>Activated carbon– bentonite–alginate composite beads</i>	12	25– 500; 100	756,9 74	30; 40; 50
24	CTC [19]	<i>Chitosan-derived three-dimensional porous carbon</i>	10	50– 100	925,9 3	25; 35; 45
28	RMC composite [20]	<i>Red mud–sucrose based carbon composite</i>	11	10– 500; 25; 50	76,92 3	25
30	Biochar	Komposit MgAl-	-	100	406.4	30;

No jurnal	Adsorben	Kategori adsorben	pH optimum	C ₀ (mg/L)	q _{max} x (mg/g)	Suhu (°C)
	MgAl 2:1 [19]	LDH–biochar			7	40; 50
31	Zeolite NaY [23]	Zeolit sintetis dari <i>rice husk ash</i>	8	10– 100; 50	49 ± 0,02	30
32	3D-MA- LDH [36]	<i>Self-assembled three-dimensional MgAl layered double hydroxide</i>	-	200	58,3	25; 35; 45
33	AC–ZnO [32]	Karbon aktif termodifikasi nanopartikel (AC dilapisi ZnO-np)	11	50	66,6	25

Tabel 3 menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi *Methylene Blue* (MB) pada berbagai jenis adsorben umumnya lebih tinggi dibandingkan *Acid Orange 7* (AO7) pada sistem yang sebanding, yang menegaskan peran penting interaksi elektrostatik antara MB bermuatan positif dan permukaan adsorben bermuatan negatif. Adsorben berbasis karbon berpori dan material komposit berkinerja tinggi, seperti MCB/ALG 1, CPPCs, CTC, dan ABA *composite beads*, menunjukkan nilai q_{max} yang melampaui 700 mg/g, mencerminkan kontribusi sinergis dari porositas yang berkembang, luas permukaan spesifik yang tinggi, serta keberadaan gugus fungsional oksigenat aromatik dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi. Sebaliknya, adsorben berbasis biomassa sederhana, seperti *orange peel dan activated coconut shells*, umumnya memiliki kapasitas adsorpsi pada tingkat menengah, namun menawarkan keunggulan dari segi ketersediaan bahan baku dan biaya yang lebih rendah, sehingga memiliki potensi yang signifikan untuk diterapkan pada skala besar dengan pertimbangan efisiensi ekonomi.

Tabel 4. Model isoterm dan kinetika adsorpsi Methylene Blue (MB) pada berbagai adsorben.

No jurnal	Adsorben	Model isoterm terbaik	Model kinetika terbaik	q _e (mg/g)	Waktu kesetimbangan
1	MHA 2,5:1	Langmuir; R ² = 0,998	PSO; R ² = 0,998	22,7 79	0–180 menit
2	Coconut husk cellulose	Freundlich; R ² = 0,9995	PSO; R ² = 0,99992	2,91 08	30–180 menit; optimum 120 menit
3	BPs/Fe ₃ O ₄	Langmuir (linear fit); R ² = 0,9973	PSO (linear fit); R ² = 0,9996	4,11 45	60 menit; hampir tercapai pada 30 menit
4	MPs-3	Langmuir	PSO; R ² =	51,2	120 menit

No jurnal	Adsorben	Model isoterm terbaik	Model kinetika terbaik	q_e (mg/g)	Waktu kesetimbangan
			0,9992	3	
5	Ni-Al/MBC	Langmuir; $R^2 = 0,7094$ (303 K)	PSO; $R^2 = 0,9993$	30,1 20	50 menit
7	Ni-Al LDH	Langmuir; $R^2 = 0,9245$ (333 K)	PSO; $R^2 = 0,9937$	21,8 34	90 menit
8	Magnetite biochar (MBC)	Langmuir; $R^2 = 0,9141$ (333 K)	PSO; $R^2 = 0,888$	30,3 03	70 menit
9	Komposit Ca/Al LDH/biochar	Langmuir	PSO; $R^2 = 0,999$	15,2 9	>100 menit
10	PN-Fe ₃ O ₄	Langmuir	PSO; $R^2 = 0,972$	29,9 $\pm 0,4$	4 jam
11	ACS	Langmuir	PSO; $R^2 = 0,998$	7,09 2	60 menit
12	Orange peel (OP)	Langmuir	PSO; $R^2 = 0,9999$	103, 52	360 menit
13	Paintosorp	Sips; R^2 hingga 0,995	PS2; $R^2 = 0,990$	44,6 42	150 menit
14	MCB/ALG-1	Langmuir	PSO	1055 ,2 (PSO)	sekitar 250 menit
15	MgAl- chitosan	Langmuir	PSO; $R^2 = 0,999$	46,9 48	90 menit
16	Fe ₃ O ₄ ACCD Alg polymer gel beads	Langmuir; $R^2 = 0,992$	PSO; $R^2 = 0,987$	-	90 menit
17	CPPCs	Langmuir; $R^2 = 0,9997$	PSO; $R^2 = 0,9999$	- numerik	5 menit
18	OPAC (setelah 5 siklus)	Langmuir; $R^2 = 0,998$	-	-	-
19	MPAC (setelah 5 siklus)	Langmuir; $R^2 = 0,999$	-	-	-
20	GCNT hybrid	Freundlich; $R^2 = 0,9665$	PSO; $R^2 = 0,9989$	24,9 6; 37,37;	120 menit (10 mg/L); 180 menit (15-30)

No jurnal	Adsorben	Model isoterm terbaik	Model kinetika terbaik	q_e (mg/g)	Waktu kesetimbangan
				47,64; 57,87; 69,54	mg/L)
21	P-CSCNT-4	Langmuir; $R^2 = 0,9998$	PSO; $R^2 = 0,9998$	248, 4	180 menit
22	GO6	Langmuir; $R^2 = 0,9977$	PFO; $R^2 = 0,9996$	599, 8	≈ 5 menit
23	ABA composite beads	Freundlich	PSO; $R^2 = 0,999$	26,6 2	-
24	CTC	Langmuir; $R^2 = 0,99988$ (318 K)	PSO; $R^2 = 0,99998$ (60 mg/L)	498, 51 (C ₀ = 50 mg/L)	8 jam isoterm; 60–120 menit kinetika
28	RMC composite	Langmuir	PSO; $R^2 = 0,999$ (50 mg/L)	47,6 19	60 menit
30	Biochar MgAl 2:1	Redlich-Peterson; $R^2 = 0,981$ (40 °C)	PSO; $R^2 = 0,999$	46,5 36	20 menit
31	Zeolite NaY	Freundlich; $R^2 = 0,993$	PSO; $R^2 = 0,998$	9,65 $\pm 0,03$	1 jam
32	3D-MgAl- LDH	Freundlich; $R^2 = 0,962$ (318 K)	Elovich; $R^2 = 0,964$ (318 K)	47,5	-
33	AC-ZnO	Langmuir ($R^2 = 0,99$)	PSO ($R^2 = 0,992$)	41.3 2	120 min

Ringkasan pada Tabel 4 menunjukkan bahwa proses adsorpsi *Methylene Blue* (MB) pada sebagian besar sistem mengikuti model isoterm Langmuir dan kinetika *pseudo-second order* (PSO) dengan nilai koefisien korelasi yang tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa interaksi antara MB dan berbagai jenis adsorben berlangsung secara relatif seragam, dengan kecenderungan pembentukan lapisan monolayer pada situs aktif yang homogen, serta laju adsorpsi yang dikendalikan oleh mekanisme chemisorption. Konsistensi kecocokan terhadap kedua model tersebut pada adsorben berbasis karbon, biomassa, maupun komposit menunjukkan bahwa MB dapat digunakan sebagai senyawa model yang representatif dalam evaluasi kinerja material adsorben baru, sekaligus memfasilitasi perbandingan antar penelitian karena penyimpangan terhadap perilaku ideal relatif terbatas.

Tabel 5. Kinerja desorpsi dan regenerasi adsorben pada adsorpsi AO7

No. jurnal	Adsorben	Media regenerasi	Jumlah siklus	Retensi kapasitas / reuse	Penurunan kinerja
1	ACZnO	Pemanasan oven; H ₂ SO ₄ 10%; NaOH 10%; air suling	-	Pemanasan 96.40% (Re = 100%); H ₂ SO ₄ 89.76% (Re = 92.91); NaOH 73.64% (Re = 76.23); air suling 88.86% (Re = 91.98)	Kinerja terendah pada NaOH, tertinggi pada pemanasan oven
2	PPNSiO ₂	-	8	-	Reusability menurun setelah 8 siklus
3	MPG	NaCl 1 M	8	-	Kapasitas uptake turun dari 90.13 menjadi 83.17 mg/g setelah 8 siklus
4	MSDBC	Air deionisasi untuk pencucian	3	-	Plot konstanta laju hampir saling bertumpuk setelah reuse tiga kali
5	NGBC700	NaOH	3	-	Efisiensi removal setelah regenerasi dengan 0.5 N NaOH dari 56.5 menjadi 42.2% sampai siklus ke-3
6	Pisum sativum peapod AC-ZnCl ₂	NaOH 1%	6	Adsorpsi siklus 1–6: 100.00; 98.98; 97.36; 96.11; 95.21; 94.18	Desorpsi siklus 1–6: 97.59; 95.5; 94.45; 93.15; 92.37; 90.97
7	MIL-101Fe	Air deionisasi dan etanol	≥3	-	Efisiensi removal menurun sedikit selama tiga siklus
8	MS-450	NaOH	5	-	Efisiensi removal AO7 menurun dari 98 menjadi 78 setelah siklus ke-5
9	AFA	Larutan basa, spesifik -	5	>80% dari removal awal setelah 5 siklus	Removal rate dipertahankan lebih dari 80% dari penggunaan pertama
10	Mesoporous CeO ₂	NaOH 0.5 mol/L	8	>92% setelah 8 siklus	Efisiensi sedikit menurun; efisiensi

No. jurnal	Adsorben	Media regenerasi	Jumlah siklus	Retensi kapasitas / reuse	Penurunan kinerja
					siklus pertama 98.4%
11	TiO ₂ GO nanocomposite	Etanol murni dan air	6	-	Efisiensi degradasi menurun sebesar 8.27 setelah 6 siklus
12	3D-MA-LDH	Kalsinasi dalam atmosfer udara	5	Efisiensi removal AO7 dipertahankan 100% selama 5 siklus	Dilaporkan lebih tinggi daripada efisiensi awal 3D-MA-LDH 72%
13	MG-OPAC	0.1 M NaOH dan HCl	6	-	Kapasitas adsorpsi menurun 11.89 setelah 6 siklus; kapasitas desorpsi menurun 10
14	Granular activated carbon (GAC)	Udara sebagai gas proses pada regenerasi DBD plasma	5	Efisiensi regenerasi >73% setelah 5 siklus	Efisiensi regenerasi menurun seiring jumlah siklus

Informasi pada Tabel 5 menunjukkan adanya *trade-off* yang jelas antara kekuatan interaksi AO7 dengan permukaan adsorben dan kemudahan proses desorpsi selama siklus penggunaan berulang. Adsorben dengan interaksi yang kuat dan selektif terhadap AO7, seperti *Pisum sativum pea pod* AC-ZnCl₂, mampu mempertahankan efisiensi adsorpsi di atas 94% hingga siklus keenam ketika diregenerasi menggunakan NaOH 1%, namun memerlukan penggunaan basa yang berpotensi meningkatkan konsumsi bahan kimia. Sebaliknya, sistem yang menggunakan media regenerasi yang lebih sederhana seperti air deionisasi atau air suling menawarkan kemudahan operasional, tetapi umumnya menunjukkan retensi kapasitas yang lebih terbatas atau penurunan kinerja yang lebih cepat, terutama pada adsorben dengan modifikasi permukaan yang intensif. Temuan ini menegaskan bahwa pengembangan strategi regenerasi untuk AO7 perlu mempertimbangkan secara simultan kekuatan interaksi elektrostatis, stabilitas struktur adsorben, serta efisiensi biaya bahan regenerasi.

Tabel 6. Kinerja desorpsi dan regenerasi adsorben pada adsorpsi MB

No.	Adsorben	Media regenerasi	Jumlah siklus	Retensi kapasitas / reuse	Penurunan kinerja yang dilaporkan
1	MHA 2,5:1	Air suling	5	92,28% menjadi 58,92%	Efisiensi regenerasi turun sampai siklus ke-5
2	Coconut husk	0,5 M HCl	5	98,8%	MB Ada penurunan,

No.	Adsorben	Media regenerasi	Jumlah siklus	Retensi kapasitas / reuse	Penurunan kinerja yang dilaporkan
	cellulose			terdesorpsi; removal >86% setelah kedua siklus	tetapi tidak dirinci per siklus
3	3Ps/Fe ₃ O ₄	0,1 mol/L HCl	3	7,3% hingga siklus ke-5; 57,8% pada siklus ke-8	Turun setelah siklus ke-5
4	MPs-3	Air deionisasi dengan penyesuaian HCl/NaOH	5	57% menjadi 62% pada siklus kelima	Penurunan kecil
5	Ni-Al/MBC	Aquades	5	6,587 hingga 58,494	Penurunan nyata pada siklus ke-5
7	Ni-Al LDH	Aquades	5	2,111; 39,683; 14,395	68,674; 28,660; Penurunan sangat besar
8	MBC	Aquades	5	37,573; 66,145; 31,384	79,762; 56,808; Penurunan bertahap
9	Ca/Al LDH/biochar	Ethanol; acetone	3		Stabil hingga 3 siklus tanpa kehilangan signifikan
10	PN-Fe ₃ O ₄	HCl 0,1 mol/L terbaik; juga diuji dengan 75% ethanol, NaOH, NaCl	3		Desorpsi tertinggi 74,92% dengan HCl
11	ACS	H ₂ O; NaOH; HCl, dengan HCl 4 M tertinggi	4	8,56%; 53,25%; 75,26%; 38%	Menurun tiap siklus
12	Orange peel (OP)	Distilled water dengan penyesuaian pH		Desorpsi >80% pada pH 2	
13	Paintosorp	HCl, HNO ₃ , ethanol, acetone, propanol, NaCl, NaOH, distilled water	7	Efisiensi adsorpsi 99 pada cycle 1 menjadi 63 pada cycle 7	Efisiensi desorpsi 72 menjadi 52
14	MCB/ALG-1	HNO ₃ 1 mol/L	5	35% removal setelah	Tidak dirinci lebih

No.	Adsorben	Media regenerasi	Jumlah siklus	Retensi kapasitas / reuse	Penurunan kinerja yang dilaporkan
				5 siklus	lanjut
5	MgAl-chitosan		5		Penurunan tidak signifikan dari siklus 1 sampai 5
6	Fe ₃ O ₄ /ACCD Alg polymer gel beads	0,1 mol/L HCl	5		Kapasitas maksimum menurun pada siklus ke-5 akibat mass loss oleh asam
7	PPCs		5		q _e menurun dari 499,38 menjadi 433,02 mg/g
8	MPAC/MPAC pada studi microwave	Regenerasi microwave bawah aliran N ₂	5		q _p masih dapat dipertahankan pada 238,89–267,91 mg/g hingga siklus ke-5
9	MPAC	Regenerasi microwave bawah aliran N ₂	5		q _p masih dapat dipertahankan pada 238,89–267,91 mg/g hingga siklus ke-5
10	GCNT hybrid	Etanol asam pH 2,0	4		Hanya sedikit penurunan removal efficiency setelah 4 siklus
11	P-CSCNT-4	Atmosfer Ar	10	96% pada siklus ke-5; 91% pada siklus ke-10	Kapasitas 304,8 menjadi 293,6 lalu 278,2 mg/g
12	GO6	Desorpsi/regenerasi kimia, diikuti adsorpsi-desorpsi berulang	4	Siklus 1: 96.37; Siklus 2: 94.95; Siklus 3: 92.36; Siklus 4: 90.97	Recovery efficiency menurun dari 96.37% pada siklus 1 menjadi 90.97% pada siklus 4 g
13	ABA composite beads	Metanol	5	persen	Removal per siklus 94,42; 90,33; 86,07; 80,14; 79,15; 75,47
14	C-C ₃ N ₄ -20 pada	0,1 M HCl dan 0,1 M HNO ₃	5	93% setelah 5 siklus	Kapasitas turun sekitar 57 menjadi

No.	Adsorben	Media regenerasi	Jumlah siklus	Retensi kapasitas / reuse	Penurunan kinerja yang dilaporkan	
	potongan Tabel 3 dokumen				53 mg/g	
8	MC composite	0.01 M HCl	;	13.9% (removal cycle-5 dibanding cycle-1 98%)	Removal: 98% (cycle-1) 92% (cycle-5)	
10	Biochar MgAl 2:1	Metanol; NaCl 0,5 M	;		Kapasitas removal turun dari sekitar 65–70 menjadi 40–45 mg/g	
11	Zeolite NaY	EtOH:H ₂ O = 1:1	tingga siklus	7	sekitar 90% pada siklus 1–3; 42,4% pada siklus 7	penurunan jelas setelah siklus 4
12	3D-MA-LDH	Kalsinasi udara	dalam ;		Removal MB masih 49% pada penggunaan ke-5	
13	AC-ZnO	1) Oven (pemanasan kering); (2) larutan H ₂ SO ₄ ; (3) larutan NaOH; (4) air suling			Heating η = 96.66% (Re = 100%); sulfuric acid η = 93.24% (Re = 96.52%); sodium hydroxide η = 80.96% (Re = 83.85%); distilled water η = 78.62% (Re = 81.38%)	

Data pada Tabel 6 menunjukkan bahwa sistem adsorpsi Methylene Blue (MB) secara umum memiliki ketahanan regenerasi yang baik, termasuk pada adsorben maju yang menggunakan media regenerasi dengan biaya relatif tinggi. P CSCNT 4, misalnya, mampu mempertahankan kapasitas adsorpsi sebesar 96% pada siklus kelima dan 91% pada siklus kesepuluh saat diregenerasi dalam atmosfer Ar, yang mencerminkan stabilitas struktural tinggi dari jaringan *carbon nanotube*, meskipun penggunaan gas inert berkontribusi terhadap peningkatan biaya operasional. Sebaliknya, adsorben berbasis biomassa dan biochar yang diregenerasi menggunakan media sederhana seperti air suling atau aquades, misalnya MHA 2,5:1 dan Ni Al/MBC, cenderung menunjukkan penurunan kapasitas yang lebih signifikan setelah beberapa siklus, namun tetap menawarkan keunggulan dari segi kesederhanaan proses dan efisiensi biaya. Secara keseluruhan, temuan ini menunjukkan bahwa dalam sistem adsorpsi MB, pemilihan metode regenerasi perlu mempertimbangkan keseimbangan antara stabilitas kinerja jangka panjang dan biaya operasional, dengan memperhatikan target umur pakai adsorben dalam aplikasi praktis.

Tabel 7. Analisis Tekno-Ekonomi Sistem Adsorpsi MB dan AO7

Peran ekonomi	Adsorben	Dasar penilaian ekonomi	qmax (mg/g)	Media regenerasi	Siklus	kinerja regenerasi
Murah –nilai tinggi	<i>Pisum sativum</i> <i>pea pod</i> AC-ZnCl ₂	Berasal dari limbah <i>pea pod</i> ; bahan baku awal murah	473,93	NaOH 1%	6	Adsorpsi turun dari 100,00% ke 94,18%; desorpsi dari 97,59% ke 90,97%.
Mahal – performa tertinggi	<i>Mesoporous</i> CeO ₂	Adsorben anorganik mesopori berbasis <i>cerium dioxide</i> ; bahan dan sintesis relatif mahal.	757,6	NaOH 0,5 mol/L	8	Retensi 92% setelah 8 siklus; efisiensi awal 98,4%.
Regenerasi mahal	TiO ₂ GO <i>nanocomposite</i>	Nanokomposit TiO ₂ – <i>graphene oxide</i> termasuk material maju; regenerasi memakai etanol murni dan air.	qmax tidak dilaporkan pada tabel kapasitas	Etanol murni dan air	6	Efisiensi degradasi menurun 8,27 setelah 6 siklus.
Murah –nilai tinggi	<i>Orange peel</i> (OP)	Biomassa lignoselulosa dari kulit jeruk; bahan baku murah dan mudah diperoleh.	309,60	Distilled water dengan penyesuaian pH	Tidak dilaporkan	Desorpsi sekitar 80% pada pH 2.
Mahal – performa tinggi	GO6	<i>Graphene oxide</i> merupakan material maju dengan biaya bahan dan preparasi tinggi.	598,8	Desorpsi/regenerasi kimia	4	Recovery efficiency turun dari 96,37% ke 90,97%.
Regenerasi mahal	P-CSCNT-4	<i>Porous cup-stacked carbon</i>	319,1	Atmosfer Ar	10	96% pada siklus ke-5 dan 91% pada siklus

Peran ekonomi	Adsorben	Dasar penilaian ekonomi	q _{max} (mg/g)	Media regenerasi	Siklus	kinerja regenerasi
tetapi stabil		<i>nanotube</i> berbasis CNT; biaya material tinggi dan regenerasi memakai atmosfer Ar.				ke-10; kapasitas turun dari 304,8 menjadi 278,2 mg/g.

Sebagaimana disajikan pada Tabel 8, kelayakan adsorben untuk aplikasi praktis tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan kapasitas adsorpsi maksimum, tetapi perlu mempertimbangkan secara terpadu asal bahan baku, kompleksitas proses sintesis, kebutuhan regenerasi, serta stabilitas kinerja selama siklus penggunaan berulang. Pada sistem AO7, adsorben berbasis biomassa seperti *Pisum sativum pea pod* AC-ZnCl₂ menunjukkan kinerja tekno-ekonomi yang kompetitif dengan q_{max} sebesar 473,93 mg/g serta kemampuan mempertahankan efisiensi adsorpsi hingga 94,18% pada siklus keenam, meskipun berasal dari bahan baku berbiaya rendah. Sebaliknya, material anorganik maju seperti *Mesoporous CeO₂* memberikan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi, yaitu 757,6 mg/g dengan retensi 92% setelah delapan siklus, namun memerlukan material khusus dan prosedur sintesis yang lebih kompleks, yang berimplikasi pada peningkatan biaya. Tren yang sama juga terlihat pada sistem MB, di mana adsorben biomassa sederhana seperti orange peel masih menunjukkan kinerja yang memadai dengan q_{max} 309,60 mg/g, sementara adsorben karbon maju seperti GO6 dan P-CSCNT-4 mencapai kapasitas yang lebih tinggi, tetapi dengan konsekuensi biaya bahan baku yang lebih besar. Dari sisi operasional, aspek regenerasi menunjukkan bahwa efisiensi ekonomi jangka panjang sangat dipengaruhi oleh jenis media regenerasi serta kemampuan adsorben mempertahankan performanya setelah beberapa siklus, di mana media sederhana seperti air suling, aquades, dan air deionisasi lebih menguntungkan dibandingkan etanol murni, atmosfer Ar, atau kombinasi multi-reagen karena lebih hemat bahan kimia dan lebih mudah dalam pengolahan lanjutan. Namun demikian, pada beberapa sistem, penggunaan media yang lebih kompleks mampu memberikan stabilitas kinerja yang lebih tinggi, seperti pada P-CSCNT-4 yang masih mempertahankan 96% kapasitas pada siklus kelima dan 91% pada siklus kesepuluh ketika diregenerasi dalam atmosfer Ar, sehingga pemilihan adsorben yang optimal perlu didasarkan pada keseimbangan antara kinerja adsorpsi, biaya material, kemudahan regenerasi, dan retensi performa, bukan semata-mata pada nilai q_{max} tertinggi yang dilaporkan.

KESIMPULAN

Kajian ini menunjukkan bahwa perbedaan sifat fisikokimia Methylene Blue (MB) dan Acid Orange 7 (AO7), terutama muatan ionik, memengaruhi kinerja adsorpsi, mekanisme interaksi, dan kondisi operasi pada berbagai adsorben. Adsorben bermuatan negatif efektif untuk MB melalui interaksi elektrostatik dan π - π , menghasilkan kapasitas tinggi (>1000 mg g⁻¹) serta regenerasi stabil (>90%), sedangkan AO7 memerlukan permukaan bermuatan positif atau modifikasi kationik dengan kapasitas maksimum hingga 757,6 mg g⁻¹. Secara umum, adsorpsi mengikuti model Langmuir dan kinetika pseudo-second order (PSO), yang menunjukkan pembentukan monolayer dan dominasi chemisorption, sementara adsorben biomassa cenderung mengikuti Freundlich karena heterogenitas permukaan, dan adsorben berbasis limbah menawarkan keseimbangan kinerja dan biaya yang baik.

Tantangan utama mencakup pengembangan adsorben selektif untuk limbah campuran, optimasi regenerasi berbiaya rendah, dan penerapan skala industri. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu diarahkan pada pengembangan adsorben hibrida dengan gugus amfoter, evaluasi regenerasi jangka panjang dengan eluen ramah lingkungan, serta studi sistem kolom fixed-bed. Integrasi dengan metode lain seperti koagulasi–flokulasi, membran, atau oksidasi lanjutan, serta pemanfaatan pendekatan komputasi seperti DFT dan kecerdasan buatan, menjadi penting untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan pengolahan limbah pewarna.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penyusunan penelitian ini. Ucapan terima kasih secara khusus ditujukan kepada Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Militer, Universitas Pertahanan Indonesia, atas penyediaan fasilitas dan akses literatur selama proses penelitian berlangsung. Segala bentuk dukungan finansial, institusional, dan moral sangat dihargai. Penulis juga menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan terkait dengan dukungan tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Abbas and M. Trari, “Adsorption behavior of Methylene Blue onto activated coconut shells: Kinetic, thermodynamic, mechanism and regeneration of the adsorbent,” *Dose-Response*, vol. 22, no. 4, 2024, doi: 10.1177/15593258241290708.
- [2] N. Ahmad, F. S. Arsyad, I. Royani, and A. Lesbani, “Adsorption of Methylene Blue on magnetite humic acid: Kinetic, isotherm, thermodynamic, and regeneration studies,” *Results in Chemistry*, vol. 4, p. 100629, 2022, doi: 10.1016/j.rechem.2022.100629.
- [3] L. Ai and J. Jiang, “Removal of Methylene Blue from aqueous solution with self-assembled cylindrical graphene–carbon nanotube hybrid,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 192, pp. 156–163, 2012.
- [4] B. A. Al-Mur and M. T. Jamal, “Eco-friendly dye removal using chitosan: Characterization and kinetic modeling of Methylene Blue and methyl orange adsorption,” *Polymers*, vol. 18, no. 5, p. 546, 2026, doi: 10.3390/polym18050546.
- [5] Y. An, H. Zheng, Q. Sun, X. Zheng, Q. Wu, and R. Zhao, “A novel floating adsorbents system of acid orange 7 removal: Polymer grafting effect,” *Separation and Purification Technology*, vol. 227, p. 115677, 2019.
- [6] L. D. Ardila-Leal, A. P. Poutou-Piñales, A. M. Pedroza-Rodríguez, J. D. Quevedo-Hidalgo, and R. Pedroza-Rodríguez, “A brief history of colour, the environmental impact of synthetic dyes and removal by using laccases,” *Catalysts*, vol. 11, no. 6, pp. 1–27, 2021.
- [7] A. A. Aryee, R. Zhang, H. Liu, R. Han, Z. Li, and L. Qu, “Application of magnetic peanut husk for Methylene Blue adsorption in batch mode,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 194, pp. 269–279, 2020.
- [8] D. Balarak, F. Ganji, P. Rajiv, C. A. Igwegbe, and J. O. Ighalo, “Ultimate eradication of Acid Orange 7 from contaminated liquid via synthesized mesoporous goethite,” *Journal of the Turkish Chemical Society Section B*, vol. 4, no. 1, pp. 13–26, 2021.
- [9] A. Benhouria, M. A. Islam, H. Zaghouane-Boudiaf, M. Boutahala, and B. H. Hameed, “Calcium alginate–bentonite–activated carbon composite beads as highly effective adsorbent for Methylene Blue,” *Chemical Engineering Journal*, 2015, doi: 10.1016/j.cej.2015.02.030.
- [10] M. Boumediene, H. Benaïssa, B. George, S. Molina, and A. Merlin, “Effects of pH and ionic strength on Methylene Blue removal from synthetic aqueous solutions by sorption onto orange peel,” *Journal of Materials and Environmental Science*, vol. 9, no. 6, pp. 1700–1711, 2018.
- [11] K. Bousemat, “Experimental and modeling studies for the simultaneous removal of cationic and anionic dyes using activated bentonite,” *Scientific Reports*, vol. 15, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-30039-9.
- [12] M. Ciprian, P. Xu, S. Chaemchuen, R. Tu, S. Zhuiykov, P. M. Heynderickx, and F. Verpoort, “MoO₃NPs/ZIF-8 composite material prepared via RCVD for photodegradation of dyes,” *Data in Brief*, vol. 19, pp. 2253–2259, 2018.

- [13] M. A. El-Nemr, A. El Nemr, M. A. Hassaan, S. Ragab, L. Tedone, G. DeMastro, and A. Pantaleo, "Microporous activated carbon from *Pisum sativum* pods for adsorption of Acid Orange 7 dye," *Molecules*, vol. 27, p. 4840, 2022.
- [14] H. Faraji, X. Bousemat, and A. R. Ghiasvand, "Removal of Acid Orange 7 dye from aqueous solutions by adsorption onto raw tea residue," *Iranian Journal of Public Health*, vol. 46, no. 12, pp. 1731–1743, 2017.
- [15] K. Y. Foo and B. H. Hameed, "Preparation, characterization and evaluation of adsorptive properties of orange peel based activated carbon," *Bioresource Technology*, vol. 104, pp. 679–686, 2012.
- [16] J. Gong, J. Liu, Z. Jiang, X. Wen, E. Mijowska, T. Tang, and X. Chen, "Porous carbon nanotube with high performance in adsorption of Methylene Blue," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 445, pp. 195–204, 2015.
- [17] S. Gunasekaran, A. J. X. Liu, and S. L. Ng, "Activated carbon/iron oxide composites with different weight ratios for acid orange 7 removal," *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, vol. 28, no. 6, pp. 1359–1373, 2024.
- [18] T. Hongo, R. Yamasaki, T. Kojima, K. Katsumata, and S. Kaneco, "Simultaneous Methylene Blue adsorption and pH neutralization of wastewater," *ACS Omega*, vol. 6, no. 32, pp. 21014–21023, 2021.
- [19] Q. Jin, Y. Li, D. Yang, and J. Cui, "Chitosan-derived porous carbon for fast removal of Methylene Blue," *RSC Advances*, vol. 8, no. 3, pp. 1255–1264, 2018.
- [20] O. Kazak, Y. R. Eker, I. Akin, H. Bingol, and A. Tor, "Red mud@sucrose based carbon composite for Methylene Blue adsorption," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 2639–2647, 2017.
- [21] A. Khalifa, A. Abdelkader, S. Ammar, and others, "Novel pyridine-thiazole hybrid adsorbent for Methylene Blue removal," *Scientific Reports*, vol. 15, 2025.
- [22] A. Khalil, C. Mangwandi, M. A. Salem, S. Ragab, and A. El Nemr, "Orange peel magnetic activated carbon for acid orange 7 removal," *Scientific Reports*, vol. 14, 2024.
- [23] T. P. Le, H. V. T. Luong, H. N. Nguyen, T. K. T. Pham, T. L. T. Le, T. B. Q. Tran, and T. N. M. Ngo, "Adsorption-desorption of Methylene Blue using zeolite NaY," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 16, p. 100281, 2024.
- [24] A. Lesbani, F. Asri, N. R. Palapa, T. Taher, and A. Rachmat, "Removal of Methylene Blue using Ca/Al LDH-biochar composite," 2020.
- [25] X. Li, W. Guo, Z. Liu, R. Wang, and H. Liu, "Fe-based MOFs for adsorption and degradation of acid orange 7," *Applied Surface Science*, vol. 369, pp. 130–136, 2016.
- [26] H. Liu, J. Zhu, Q. Li, L. Li, Y. Huang, Y. Wang, G. Fan, and L. Zhang, "Modified biochar/alginate composite for Methylene Blue adsorption," *Molecules*, vol. 28, p. 2507, 2023.
- [27] J. Liu, Y. Yu, S. Zhu, J. Yang, J. Song, and W. Fan, "Magnetic adsorbent from iron mud for Methylene Blue adsorption," *PLoS ONE*, vol. 13, no. 2, 2018.
- [28] Y. Liu and others, "Adsorption behaviors of Methylene Blue and reactive blue 19 on nano-carbon," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 10, 2022.
- [29] N. A. Malek Nizam, A. M. Ismail, and N. H. Abdullah, "Adsorption of acid orange 7 by modified oil palm leaf powder," *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, vol. 25, no. 6, pp. 966–975, 2021.
- [30] L. Meili, P. V. Lins, C. L. P. S. Zanta, J. I. Soletti, L. M. O. Ribeiro, C. B. Dornelas, and M. G. A. Vieira, "MgAl-LDH/biochar composites for Methylene Blue removal," *Applied Clay Science*, vol. 168, pp. 11–20, 2019.
- [31] S. Mohammad and I. Suzylawati, "Adsorption/desorption of Methylene Blue using bentonite," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 34, 2020.
- [32] H. Nourmoradi, A. R. Ghiasvand, and Z. Noorimotlagh, "Removal of dyes using ZnO-coated activated carbon," *Desalination and Water Treatment*, vol. 55, 2015.
- [33] M. Nitsae, H. R. Solle, S. M. Martinus, and I. J. Emola, "Adsorpsi metilen biru menggunakan arang aktif," *Jurnal Kimia Riset*, vol. 6, no. 1, 2021.
- [34] S. A. Ong, L. N. Ho, Y. S. Wong, O. M. Min, L. S. Lai, S. K. Khiew, and V. Murali, "Photocatalytic mineralization of acid orange 7," *Desalination and Water Treatment*, vol. 48, 2012.

- [35] F. O. Omwoyo and G. Otieno, "Optimization of Methylene Blue adsorption using coconut husk cellulose," *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, vol. 12, 2024.
- [36] X. Pan, M. Zhang, H. Liu, S. Ouyang, N. Ding, and P. Zhang, "Adsorption mechanism of acid orange 7 and Methylene Blue," *Applied Surface Science*, vol. 522, 2020.
- [37] G. Z. Qu, J. Li, Y. Wu, G. F. Li, and D. Li, "Regeneration of acid orange 7-exhausted activated carbon," *Chemical Engineering Journal*, vol. 146, 2009.
- [38] N. N. M. Razi and others, "Adsorption of acid orange 7 using modified oil palm leaves," *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, vol. 25, no. 6, pp. 1108–1121, 2021.
- [39] S. Sawasdee and P. Watcharabundit, "Mechanistic adsorption of dyes on cassava-derived activated carbon," *Thai Industrial Science*, vol. 68, no. 3, 2025.
- [40] D. L. Sembiring, M. Andre, and C. Wijaya, "Analisis kinetika adsorpsi Rhodamin B menggunakan hidroksiapatit," *Pure Chemistry Research*, vol. 1, no. 2, pp. 39–44, 2025.
- [41] P. M. S. B. N. Siregar, A. Lesbani, and R. Mohadi, "Mg/Al-chitosan adsorbent for Methylene Blue removal," *Science and Technology Indonesia*, vol. 7, no. 2, pp. 170–178, 2022.
- [42] M. Sillanpää, A. H. Mahvi, D. Balarak, and A. D. Khatibi, "Adsorption of acid orange 7 using polypyrrole/nanosilica composite," *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2021.
- [43] T. Sulistyarningsih, S. Ariyani, and W. Astuti, "Magnetite coated humic acid as malachite green adsorbent," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1918, 2021.
- [44] N. B. Swan and M. A. A. Zaini, "Adsorption of malachite green and Congo red dyes," *Ecological Chemistry and Engineering S*, vol. 26, no. 1, pp. 119–132, 2019.
- [45] P. Štubňa and others, "Adsorption of Methylene Blue by graphene oxide," *Adsorption Science & Technology*, 2022.
- [46] J. Wang, Z. Liao, J. Ifthikar, L. Shi, Z. Chen, and Z. Chen, "Magnetic sludge-derived biochar for acid orange 7 removal," *RSC Advances*, vol. 7, no. 30, pp. 18696–18706, 2017.
- [47] X. Xing, H. Qu, R. Shao, Q. Wang, and H. Xie, "Mechanism and kinetics of dye desorption from carbon," *Water Science and Technology*, vol. 76, no. 5, pp. 1243–1250, 2017.
- [48] Y. Xu, Y. Zhou, Y. Zhou, P. Wu, L. Gao, and Z. Ding, "Magnetic biosorbent from bamboo for Methylene Blue removal," *Molecules*, vol. 30, 2025.
- [49] Y. Xu and Z. Ding, "Mesoporous CeO₂ for adsorption of acid orange 7," *Materials*, vol. 15, 2022.
- [50] A. K. Yadav, A. K. Chaubey, S. Kapoor, T. Pratap, B. Preetiva, V. Vimal, and D. Mohan, "Napier grass biochar for acid orange 7 removal," *Processes*, vol. 12, 2024.
- [51] S. Yadav, A. Asthana, R. Chakraborty, B. Jain, A. K. Singh, S. A. Carabineiro, and M. A. B. H. Susan, "Magnetic polymer nanocomposite for dye removal," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 1, p. 170, 2020.
- [52] H. Yan, X. Tao, Z. Yang, K. Li, H. Yang, A. Li, and R. Cheng, "Effect of graphene oxide oxidation degree on Methylene Blue adsorption," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 268, pp. 191–198, 2014.
- [53] Z. A. Zahara, I. Royani, N. R. Palapa, R. Mohadi, and A. Lesbani, "Ni-Al/magnetite biochar LDH composite for Methylene Blue removal," *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, vol. 18, no. 4, pp. 659–674, 2023.
- [54] Z. Zaheer, W. A. Bawazir, S. M. Al-Bukhari, and A. S. Basaleh, "Adsorption and thermodynamic studies of acid orange 7 removal," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 232, pp. 109–120, 2019.
- [55] W. Zhang, L. Y. Zhang, X. J. Zhao, and Z. Zhou, "Citrus pectin derived porous carbon for Methylene Blue removal," *Journal of Solid State Chemistry*, 2016.
- [56] T. J. Al-Musawi, P. Rajiv, N. Mengelizadeh, I. A. Mohammed, and D. Balarak, "Development of sonophotocatalytic process for degradation of acid orange 7 dye by using titanium dioxide nanoparticles/graphene oxide nanocomposite as a catalyst," *Journal of Environmental Management*, vol. 292, p. 112777, 2021.
- [57] Yaseen and M. Scholz, "Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 16, pp. 1193–1226, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z>