

## Bab 6

### Aplikasi Proses Adsorpsi untuk Lingkungan

---

Dalam beberapa dekade terakhir, jumlah dan jenis polutan berbahaya yang dibuang ke lingkungan meningkat dengan tajam karena laju industrialisasi yang cepat dan pertumbuhan populasi manusia yang luar biasa. Berbagai jenis polutan hasil proses industri maupun kegiatan lainnya telah menimbulkan kerusakan lingkungan yang cukup parah dan dampak akhir dari kerusakan lingkungan ini akan berpengaruh pada kehidupan dan kesehatan manusia. Berbagai macam polutan yang banyak mencemari lingkungan terutama lingkungan air adalah logam berat, deterjen, pestisida, herbisida, pelarut organik, antibiotik, pewarna sintesis, senyawa-senyawa anorganik, dan lain-lain. Banyak dari polutan ini tahan terhadap degradasi biologis, dan akibatnya, mempengaruhi keseimbangan ekologi dan mengancam kesehatan manusia akibat bioakumulasi dalam rantai makanan. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengolah air limbah sebelum dibuang ke badan air atau ke lingkungan.

Berbagai metode untuk menghilangkan polutan dari air dan air limbah saat ini tersedia; metode ini termasuk koagulasi-flokulasi, pertukaran ion, degradasi aerobik dan anaerobik, filtrasi membran, pengendapan kimiawi, oksidasi kimiawi, adsorpsi, dll. Beberapa metode memberikan efisiensi pemisahan yang tinggi untuk konsentrasi polutan yang tinggi, sementara yang lain memiliki kinerja yang baik pada konsentrasi rendah hingga sedang. Sebagian besar metode pengolahan tersebut di atas memiliki biaya investasi dan operasional yang tinggi kecuali proses adsorpsi. Pada bab ini akan dibahas aplikasi berbagai macam adsorben untuk menyerap polutan yang ada di air maupun air limbah.

#### 6.1. Penyerapan antibiotik

Antibiotik ditemukan pada tahun 1928 oleh Alexander Fleming. Antibiotik alami pertama adalah penisilin. Saat ini, dengan kemajuan dalam bidang kimia obat-obatan, berbagai macam antibiotik telah diproduksi untuk mengobati berbagai macam penyakit karena infeksi mikro organisme. Sebagian besar antibiotik yang tersedia di pasaran merupakan modifikasi semi sintetik dari berbagai senyawa alami seperti antibiotik beta-laktam, sefalosporin, dan karbapenem, hanya aminoglikosida yang masih diisolasi dari organisme hidup (Ismadji dkk., 2015). Karena keampuhannya mengatasi berbagai macam

penyakit karena infeksi, penggunaan antibiotik untuk mengobati penyakit menjadi tidak terkendali, sehingga pada akhirnya akan mencemari lingkungan. Antibiotik yang dapat terserap tubuh manusia jumlahnya terbatas, Sebagian besar antibiotik yang diminum tetap tidak dapat didegradasi oleh tubuh manusia (Putra dkk., 2009). Kira-kira 30 sampai 90% antibiotik yang diminum akan dikeluarkan dari tubuh manusia ke lingkungan. Pada saat berada di lingkungan, antibiotik juga sangat sukar terurai, dengan terjadinya kontak dengan mikro organisme yang bersifat patogen lama kelamaan akan menyebabkan timbulnya kekebalan terhadap antibiotik pada mikroorganisme tersebut. Dengan timbulnya kekebalan ini, antibiotik menjadi tidak manjur untuk mengobati penyakit akibat infeksi, sehingga pengembangan antibiotik jenis baru mutlak harus dilakukan. Pengembangan suatu antibiotik membutuhkan waktu yang cukup lama dan biaya yang mahal.

Antibiotik yang ada di pasaran diklasifikasikan menurut beberapa klasifikasi dan salah satunya adalah sebagai berikut (Ismadji dkk., 2015):

- Antibiotik  $\beta$ -laktam adalah jenis antibiotik yang luas, terdiri dari semua agen antibiotik yang mengandung cincin  $\beta$ -laktam dalam struktur molekulnya, contoh: penisilin (amoksisilin, ampisilin, dll.), Sefalosporin, karbapenem, monobaktam, dll.
- Aminoglikosida adalah golongan antibiotik bakterisida yang bekerja dengan cara menghambat sintesis protein bakteri, contoh: Gentamisin, Tobramisin, Amikasin, Streptomisin, Neomisin, dll.
- Kuinolon adalah agen antibakteri bakterisidal sintetik dengan aktivitas spektrum luas, contoh: Ciprofloxacin, levofloxacin, lomefloxacin, cinoxacin, dll.
- Antibiotik makrolida adalah kelas antibiotik yang ditemukan di streptomycetes. Mereka adalah lakton alami dengan cincin besar, terdiri dari 14 hingga 20 atom, contoh: eritromisin, fidaksomisin, azitromisin, klaritromisin, dll.
- Tetrasiklin adalah famili antibiotik spektrum luas yang efektif melawan beragam organisme yang sangat luas. Tetrasiklin mampu menghambat sintesis protein pada bakteri gram positif dan gram negatif dengan cara mencegah perlekatan aminoasil-tRNA ke situs akseptor ribosom (A), contoh: tetrasiklin.
- Lincosamida adalah antibiotik spektrum luas yang menghambat sintesis protein bakteri gram positif dan gram negatif, contoh: klindamisin.
- Peptida siklik: Vankomisin, Streptogramin, Polimiksin, dll.

- Antibiotik Sulfa adalah antimikroba sintetik yang mengandung gugus sulfonamida, contoh: sulfisoxazole, Sulfadimethoxine, Sulfadoxine, dll.
- Oxazolidinones adalah antimikroba sintetis. Mereka menunjukkan mekanisme unik penghambatan sintesis protein dan umumnya menampilkan aktivitas bakterostatik terhadap banyak patogen penting manusia, misalnya: Linezolid.

Penyerapan berbagai macam antibiotik baik dari limbah sintetis maupun limbah industri dengan menggunakan berbagai macam adsorben telah banyak dilakukan oleh berbagai peneliti seperti terangkum pada Tabel 6.1 berikut ini.

**Tabel 6.1.** Penyerapan antibiotik dengan menggunakan berbagai macam adsorben

<b>Antibiotik</b>	<b>Adsorben</b>	<b>Kapasitas Adsorpsi, mg/g</b>	<b>Referensi</b>
Azithromycin	Clinoptilolite	44,6	Saadi dkk., 2021
Ciprofloxacin	Biochar dari lumpur aktif	74,2	Ma dkk., 2021
Ciprofloxacin	Karbon aktif/Ni-Co-S nano partikel	744,7	Chowdhury dkk., 2021
Ciprofloxacin	Limbah biji asam	125,0	Eze dkk., 2021
Ciprofloxacin	montmorillonite	226,7	Zhang dkk., 2021d
Klorotetrasiklin	Nanopartikel magnetik	1158,0	Fan dkk., 2021
Norfloxacin	Karbon aktif dari luffa	581,4	Wang dkk., 2021c
Norfloxacin	Keratin	79,3	Chao dkk., 2021
Ofloxacin	Karbon aktif dari luffa	434,8	Wang dkk., 2021c
Ofloxacin	ZIF-8 MOF	95,0	Capsoni dkk., 2021
Ofloxacin	Zn <sub>3</sub> (BTC) <sub>2</sub>	25,3	Capsoni dkk., 2021
Oksitetrasiklin	Fe-MCM-41-A	625,9	Guo dkk., 2021

Oksitetrasiklin	Tetragonal-ZrO <sub>2</sub> @rGO	198,4	Hao dkk., 2021
Oksitetrasiklin	Karbon nanotube termodifikasi Lantanum	117,2	Yu dkk., 2021
Oksitetrasiklin	Monoclinic-ZrO <sub>2</sub> @rGO	177,9	Hao dkk., 2021
sulfamethoxazole	zeolite beta-templated karbon	1367,0	Ahmed dkk., 2021
Tetrasiklin	Biochar dari lumpur aktif	145,0	Ma dkk., 2021
Tetrasiklin	Karbon aktif dari luffa	537,6	Wang dkk, 2021c
Tetrasiklin	Karbon aktif/Ni-Co-S nano partikel	962,2	Chowdhury dkk., 2021
Tetrasiklin	TiO <sub>2</sub> (B) nanosheets@hidrochar	49,2	Mengting dkk., 2021

Yu dkk. (2021) melakukan modifikasi karbon nanotube dengan lanthanum (La-CNTs). La-CNTs kemudian digunakan untuk menyerap oksitetrasiklin dari limbah budidaya tanaman. Adsorpsi maksimal oksitetrasiklin pada La-CNTs adalah sebesar 117,23 mg/g yang dicapai pada pH 7 dalam waktu 3 jam. Kinetika dan isotherm adsorpsi oksitetrasiklin masing-masing dapat diwakili oleh persamaan semu-orde dua dan isotherm Langmuir.

Pemanfaatan limbah biji asam untuk menyerap ciprofloxacin dipelajari oleh Eze dkk. (2021). Sebelum digunakan, biji asam diolah terlebih dahulu dengan menggunakan asam klorida. Penyerapan maksimum ciprofloxacin pada biji asam adalah sebesar 125 mg/g, dan hanya 60% dari ciprofloxacin yang terserap dapat diambil kembali dengan menggunakan larutan HCl atau air. Persamaan orde-satu semu dapat mewakili data kinetika adsorpsi ciprofloxacin pada biji asam, sedangkan untuk data kesetimbangan dapat diwakili oleh persamaan empiris Freundlich.

## 6.2. Penyerapan logam berat

Keberadaan logam berat dalam air menyebabkan gangguan kesehatan yang serius bagi manusia. Meskipun beberapa efek merugikan kesehatan dari logam berat telah diketahui sejak lama, paparan logam berat terus berlanjut dan

meningkat di beberapa bagian dunia, terutama di negara-negara kurang berkembang. Setiap logam memberikan efek dan gejala yang berbeda terhadap kesehatan manusia. Logam berat bersifat persisten, dan oleh karena itu, sangat sulit untuk dihilangkan secara alami dari lingkungan, meskipun dalam jumlah yang kecil. Tabel 6.2 mencantumkan logam berat yang umum ditemukan di lingkungan air sebagai polutan dan dampaknya terhadap kesehatan manusia (Ismadji dkk., 2015).

**Tabel 6.2.** Dampak logam berat terhadap kesehatan manusia

<b>Logam berat</b>	<b>Dampak kesehatan</b>
As(V)	Kerusakan pada kulit, mata, dan hati, juga dapat menyebabkan kanker
Cd(II)	Memacu timbulnya kanker, kerusakan ginjal, kerusakan selaput lendir, muntah, diare, kerusakan tulang, penyakit itai-itai, mempengaruhi produksi hormone progesteron dan testosteron
Cr(III)	menyebabkan alergi kulit dan kanker di saluran pencernaan dan paru-paru
Cr(VI)	Sakit kepala, mual, diare parah, muntah, nyeri epigastrium, perdarahan, memacu kanker dan berpotensi mengubah proses transkripsi DNA
Cu(II)	Kerusakan hati, penyakit Wilson, insomnia, kerusakan otak, kerusakan pankreas, dan kerusakan miokard
Hg(II)	Kerusakan sistem saraf, ginjal, dan penglihatan, meracuni protoplasma
Mn(II)	Memacu neurotoksisitas, kadar hemoglobin rendah, dan pendarahan saluran pencernaan
Ni(II)	Dermatitis, mual, asma kronis, batuk, perdarahan bronkial, gangguan saluran cerna, lemas dan pusing
Pb(II)	Anemia, kerusakan ginjal, kerusakan sistem saraf, kerusakan kemampuan mensintesis protein
Zn(II)	Menyebabkan kekakuan otot, kehilangan nafsu makan, mual, depresi, lesu, tanda-tanda neurologis seperti kejang dan ataksia, dan peningkatan rasa haus

Keberadaan logam berat di udara, tanah dan air sangat berbahaya bagi makhluk hidup. Beberapa logam berat yang menjadi perhatian khusus saat ini meliputi: merkuri, arsen, timbal, kadmium, kromium, tembaga, kobalt, mangan,

nikel, dan timah. Beberapa logam berat seperti besi, selenium, tembaga, seng, molibdenum dalam jumlah tertentu sangat penting bagi manusia untuk berbagai proses metabolisme dalam tubuh. Setiap logam memberikan efek dan gejala yang berbeda bagi tubuh manusia (Tabel 6.2). Merkuri (Hg) dapat menyebabkan kerusakan pada sistem saraf, ginjal, dan penglihatan. Timbal (Pb) adalah salah satu logam berat yang paling mematikan, logam ini menyebabkan anemia, kerusakan ginjal, kerusakan sistem saraf, kerusakan kemampuan untuk mensintesis protein, dll. Arsen (As) menyebabkan kerusakan pada kulit, mata, dan hati, juga dapat menyebabkan kanker.

Sumber logam berat di lingkungan berasal dari sumber alam, kegiatan pertambangan, kegiatan industri, agrokimia, sistem pengolahan air limbah, dll. Hg masuk ke lingkungan melalui berbagai jalur seperti pembakaran batubara, limbah rumah tangga, dan pencucian tanah akibat hujan asam, dan berbagai macam kegiatan industri yang menggunakan Hg pada proses produksi. Sumber Pb meliputi limbah pertambangan, asap knalpot mobil, industri, abu insinerator, dan air yang berkontak dengan pipa timbal, sedangkan sumber kadmium (Cd) adalah elektroplating, pertambangan, industri plastik, dan limbah industri lainnya.

Berbagai jenis adsorben mulai dari limbah pertanian hingga produk sampingan industri telah diteliti untuk menghilangkan logam berat dari lingkungan perairan dan hasilnya menunjukkan bahwa dari segi ekonomi beberapa adsorben bisa menjadi alternatif untuk menggantikan adsorben komersial yang saat ini digunakan. Namun beberapa diantaranya mungkin hanya berhenti sampai tahap penelitian saja meskipun mereka mempunyai daya adsorpsi yang jauh lebih besar dari adsorben komersial yang ada saat ini. Meskipun beberapa adsorben alternatif tersebut banyak tersedia dan murah, kelemahan utama dari adsorben-adsorben ini adalah kapasitas adsorpsi yang rendah. Beberapa studi terbaru tentang penggunaan adsorben-adsorben alternatif untuk menyerap logam berat dapat dilihat pada Tabel 6.3 berikut ini.

**Tabel 6.2.** Penyerapan logam berat dengan menggunakan berbagai macam adsorben

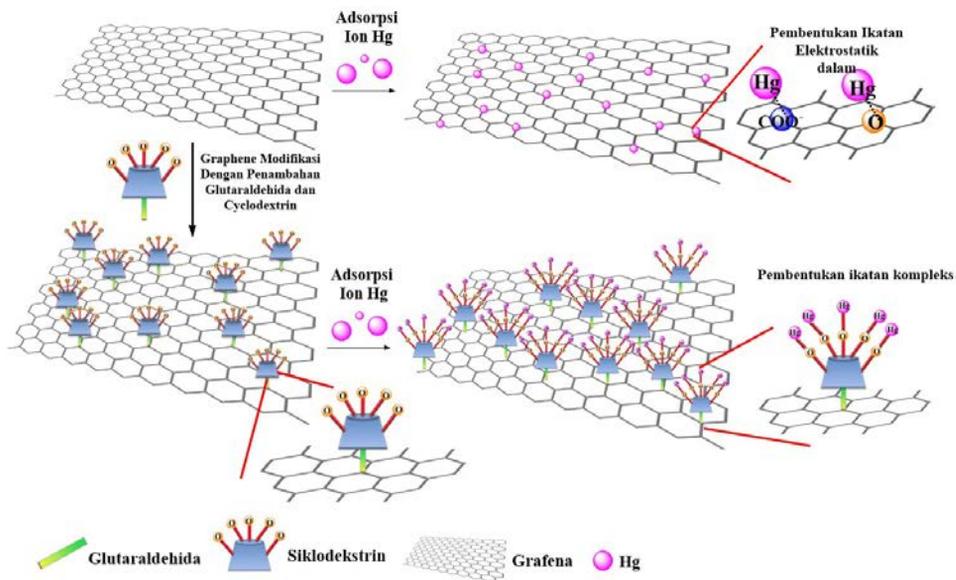
Logam berat	Adsorben	Catatan	Referensi
As(V) dan Cr(VI)	MgAl-LDH@WT	Kapasitas adsorpsi 24,9 mg/g (Cr(VI))	Zhao dkk., 2021

			dan 38,2 mg/g (As(V))	
Cd(II) dan Pb(II)	LDH/MOF		MOF yang digunakan adalah UiO-66-(Zr)-(COOH) <sub>2</sub> , kapasitas penyerapan 415,3 mg/g (Cd(II)) dan 301,4 mg/g (Pb(II))	Soltani dkk., 2021
Cd(II)	3-D CaFu MOF		Adsorpsi maksimum dicapai pada pH 7,8 dan kapasitas adsorpsi 781,2 mg/g.	Singh dkk., 2021
Cd(II) dan Pb(II)	Endapan sungai	lumpur	Kapasitas adsorpsi Pb(II) 1,14 mg/g dan Cd(II) 0,98 mg/g	Fang dkk., 2021
Cd(II)	Komposit Fe-Mn-karbon-natrium alginat		Kapasitas adsorpsi 280,11 mg/g	Deng dkk., 2021
Cu(II), Zn(II), Ni(II), dan Mn(II)	SBA-15		Kapasitas adsorpsi 2,11 mmol/g (Cu(II)), 1,24 mmol/g (Zn(II)), 1,74 mmol/g(Ni(II)) dan 1,25 mmol/g(Mn(II))	Ryu dkk., 2021
Cr(VI)	UiO-66@ABs /alginat		Kapasitas adsorpsi 20 mg/g, pH optimum penyerapan 6,0	Daradmare dkk., 2021

Cr(VI)	Kulit buah naga + <i>Fusarium subglutinans</i>	Kapasitas adsorpsi 16,5 mg/g pada 30°C	Saravanan dkk., 2021b
Hg(II)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> -M <sub>2</sub>	Kapasitas adsorpsi 0,8 mmol/g	Luan dkk., 2021
Hg(II)	3D siklodektrin/grafin	Adsorption efisiensi 96,6%	Qiu dkk., 2019
Hg(II)	Grafिन terinduksi asam fitat	Kapasitas adsorpsi maksimum tercapai pada pH 7,2 yaitu sebesar 361,01 mg/g	Tan dkk., 2018
Pb(II)	Lumpur merah termodifikasi	Modifikasi dilakukan dengan menambahkan NaOH dan koloid silika, kapasitas penyerapan 588,5 mg/g	Lyu dkk., 2021
Pb(II)	Komposit magnetik kitosan (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> @CS-P)	Adsorben yang sangat selektif terhadap Pb(II), tahan asam, penyerapan maksimum terjadi pada pH 6 (124 mg/g)	Huang dkk., 2021

Pemisahan merkuri secara efektif dari air atau air limbah merupakan suatu tantangan berat untuk memastikan keamanan lingkungan, terutama jika merkuri terdapat dalam konsentrasi yang rendah. Pemisahan merkuri dalam konsentrasi rendah membutuhkan suatu adsorben dengan afinitas terhadap merkuri yang tinggi. Qiu dkk. (2019) mengembangkan suatu jenis adsorben komposit 3D yang disintesa dari 3D grafिन dan β-siklodekstrin (3D CD@RGO). Karakterisasi nanokomposit menunjukkan bahwa siklodekstrin tersebar merata pada struktur pendukung 3D grafिन, yang memungkinkan gugus hidroksil yang ada dapat mengikat secara langsung ion Hg(II) melalui gaya elektrostatis.

Mekanisme penyerapan Hg(II) pada komposit CD@RGO dapat dilihat pada Gambar 6.1. Hasil percobaan adsorpsi Hg(II) pada konsentrasi rendah dengan komposit CD@RGO menunjukkan perilaku yang berbeda jika konsentrasi awal Hg(II) juga berbeda. Komposit CD @ RGO memiliki efisiensi adsorpsi yang tinggi yaitu 96,6% dengan afinitas adsorpsi sebesar 172,09 L/g pada  $C_e = 0,01\text{mg/L}$ .

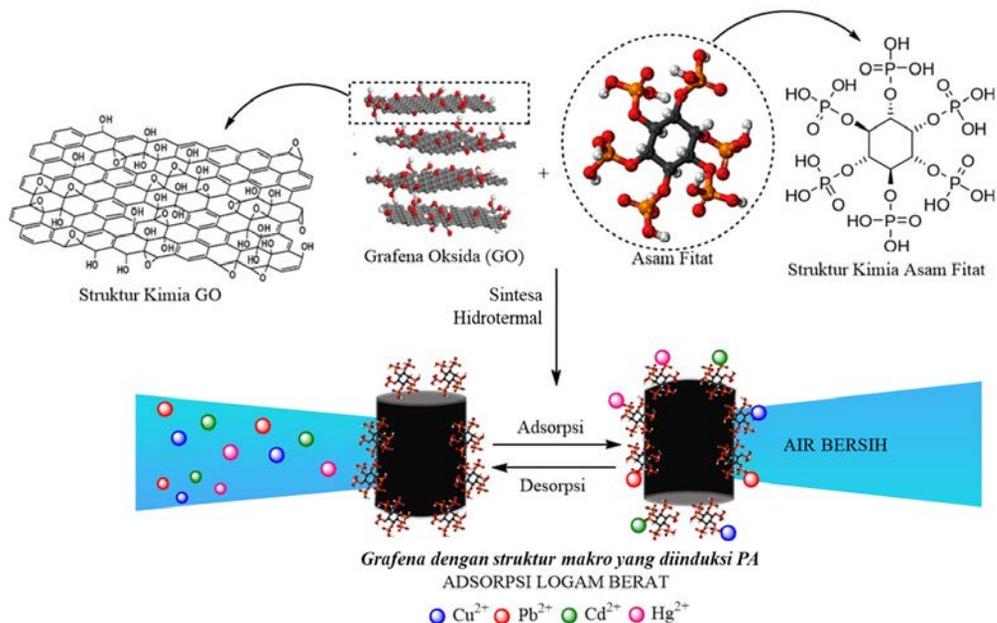


**Gambar 6.1.** Mekanisme adsorpsi Hg(II) pada 3D CD@RGO (digambar ulang dari Qiu dkk., 2019)

Adsorpsi maksimum terjadi pada pH 7. Gaya adsorpsi yang dominan pada CD@RGO merupakan kompleksasi hidroksil-merkuri yang merupakan interaksi elektrostatik dalam RGO.

Grafin makrostruktur yang diinduksi asam fitat (PA) disintesis dan digunakan untuk mengetahui karakteristik dan mekanisme penyerapan merkuri. Grafin berbentuk busa yang diinduksi oleh asam fitat (PAGF) memiliki luas permukaan spesifik yang besar dan bersifat ampifilik (Tan dkk., 2018). Struktur makro grafin tetap mempertahankan gugus fungsi yang mengandung oksigen setelah proses reduksi secara hidrotermal. Adanya tambahan gugus yang mengandung fosfor karena induksi oleh asam fitat juga berhasil diamati dari hasil karakterisasi dengan menggunakan FTIR. Dari hasil percobaan yang dilakukan dapat diketahui bahwa adsorpsi Hg(II) pada PAGF jauh lebih cepat daripada grafin yang berbentuk hidrogel. Model kinetik orde-dua semu dan model isoterm Langmuir dapat mewakili data kinetika dan isoterm adsorpsi

Hg(II) pada PAGF. Kapasitas adsorpsi maksimum pada pH = 7,2 untuk penyerapan Hg(II) adalah 361,01 mg/g. Mekanisme dominan untuk adsorpsi Hg(II) adalah pertukaran ion dan kompleksasi permukaan. Aplikasi nyata pada adsorpsi Hg(II) dengan PAGF dalam air sungai dan air laut menunjukkan hasil yang sangat menjanjikan, menunjukkan prospek yang menjanjikan dalam penjernihan air menggunakan PAGF. Gambar 6.2 menunjukkan mekanisme pembuatan PAGF dan penyerapan logam berat menggunakan PAGF.



**Gambar 6.2.** Diagram pembuatan PAGF dan adsorpsi logam berat menggunakan PAGF (digambar ulang dari Tan dkk., 2018)

### 6.3. Penyerapan zat warna

Pewarna telah digunakan oleh manusia sejak awal peradaban, dan semua pewarna yang digunakan berasal dari alam. Pembuatan pewarna sintetis dimulai pada tahun 1856, dan pada awal abad ke-20, pewarna sintetis hampir sepenuhnya menggantikan pewarna alami. Berdasarkan strukturnya, pewarna sintetis dapat diklasifikasikan menjadi 20-30 golongan yaitu azo (monoazo, diazo, triazo, polyazo), antrakuinon, ftalosianin, triarilmetana, diarilmetana, indigoid, azin, oksazin, thiazine, xanthene, nitro, nitroso, metin, tiazol, indamin, indofenol, lakton, aminoketon, dll.

Golongan pewarna sintetis terbesar dalam indeks warna adalah pewarna asam, dan golongan pewarna ini merupakan senyawa anionik dan sebagian

besar adalah golongan azo, antrakuinon, atau triarilmetana. Pewarna reaktif adalah pewarna dengan gugus reaktif yang membentuk ikatan kovalen dengan gugus OH<sup>-</sup>, NH<sup>-</sup>, atau SH yang terdapat dalam serat. Gugus reaktif seringkali berupa cincin aromatik heterosiklik yang diganti dengan klorida atau fluorida, misalnya diklorotriazin. Gugus reaktif umum lainnya adalah vinil sulphone. Kelas pewarna lainnya adalah pewarna kompleks logam, pewarna langsung, pewarna dasar, pewarna mordan; pewarna dispersi, pewarna pigmen, pewarna anionik dan pewarna ingrain, pewarna belerang, dan fluoresen.

Banyak pewarna dapat terlihat dengan jelas di air bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah (1 ppm). Karena pewarna dirancang agar secara kimiawi dan fotolitik stabil, pewarna sangat persisten di lingkungan alami. Pelepasan pewarna karena itu dapat menimbulkan bahaya ekotoksik dan menimbulkan potensi bahaya bioakumulasi yang pada akhirnya dapat mempengaruhi manusia melalui pengangkutan melalui rantai makanan. Bergantung pada struktur kimianya, beberapa pewarna sintetis sangat beracun bagi manusia dan lingkungan.

Beberapa pewarna sintetis yang ada bersifat karsinogenik, mutagenik, atau teratogenik bagi biota air dan manusia. Paparan dalam jangka waktu lama dengan pewarna berbasis kromium dapat menyebabkan kerusakan parah pada ginjal, hati, sistem saraf pusat, dan sistem reproduksi. Pewarna azo bersifat toksik karena keberadaannya di lingkungan air akan melepaskan senyawa amina. Pewarna berbasis antrakuinon sangat tahan terhadap degradasi dan warnanya dapat pudar dalam waktu yang lama. Pewarna reaktif adalah pewarna yang sangat stabil karena struktur kimianya, dan sangat tahan terhadap biodegradasi.

Perbandingan beberapa metode pemisahan untuk menghilangkan zat warna malachite green dari suatu larutan dilakukan oleh Renita dkk. (2021). Metode yang digunakan adalah elektrolitik, adsorpsi, dan metode hybrid yang mereka kembangkan. Mereka memanfaatkan limbah pertanian yaitu biji *Eucalyptus globulus* sebagai adsorben. Metode hybrid dilakukan dalam reaktor elektrolitik tiga fase dan tiga dimensi yang dirancang dengan tegangan yang dapat divariasikan (6, 9, dan 12 V), biosorben yang digunakan berfungsi sebagai elektroda partikel. Dibandingkan dengan metode lainnya, metode hybrid memberikan efisiensi pemisahan tertinggi (99,8%) pada tegangan 12 V. Selain itu, kapasitas pemisahan zat warna meningkat dengan peningkatan tegangan, dengan waktu kontak optimal pada 15 menit. Efisiensi pemisahan malachite

green yang tinggi dengan menggunakan sistem hibrida ini dapat dikaitkan dengan efek sinergis dari sistem elektrolitik dan adsorpsi. Biosorben dapat digunakan kembali hingga sepuluh kali tanpa kehilangan efisiensi pemisahan yang berarti.

MIL-53(Al-Fe)@SiO<sub>2</sub> digunakan oleh Chatterjee dkk. (2021) untuk mengolah limbah yang mengandung pewarna metil biru dengan metode adsorpsi diikuti dengan degradasi fotokatalitik. Abu terbang batu bara digunakan sebagai sumber silika dalam pembuatan MIL-53(Al-Fe)@SiO<sub>2</sub>. Dari hasil percobaan yang mereka lakukan, MIL-53(Al-Fe)@SiO<sub>2</sub> memiliki rekombinasi lubang elektron yang lebih lambat dibandingkan dengan MIL-53(Al) atau MIL-53(Al)@SiO<sub>2</sub>. MIL-53-(Al-Fe)@SiO<sub>2</sub> mempunyai kapasitas adsorpsi maksimum terhadap metil biru sebesar 681,78 mg/g. Adanya sinar ultra-violet akan meningkatkan efisiensi pemisahan dan degradasi dari 89,34% menjadi 99,95%.

Adsorben karbohidrat berbasis polimer alami dengan gugus fungsi tertentu dapat digunakan untuk menghilangkan pewarna berbahaya dari air limbah. Kubra dkk. (2021) menggunakan tepung graham (GF) sebagai adsorben alami untuk menghilangkan zat warna kationik crystal violet (CyV) dari larutan. Mereka mempelajari berbagai parameter proses yang mempengaruhi proses adsorpsi CyV seperti pH larutan, waktu kontak, jumlah adsorben, dan pengaruh ion lain. Kapasitas adsorpsi maksimal tepung graham terhadap CyV adalah 162,33 mg/g yang dicapai pada pH 7. Lebih jauh, hasil percobaan regenerasi dengan pelarut etanol menunjukkan bahwa tidak ada kehilangan yang berarti pada gugus fungsional mereka setelah beberapa siklus proses adsorpsi.

Hidrogel bio-komposit digunakan untuk menghilangkan pewarna metil biru dari limbah sintetis oleh Andreas dkk. (2021). Hidrogel dibuat dengan menaut silangkan senyawa-senyawa fenolik, flavonoid, dan antosianin (diekstrak dari kubis merah) dengan polimer alam alginate. Percobaan kesetimbangan dan kinetika adsorpsi metil biru pada bio-komposit hidrogel dengan memvariasikan suhu, pH larutan, dan konsentrasi awal larutan. Isoterm adsorpsi metil biru pada hidrogel mengikuti persamaan Langmuir, dan kapasitas adsorpsi tertinggi yang tercatat adalah 1442,0 mg/g pada 323 K dan pH 11,0. Sedangkan untuk persamaan kinetika adsorpsi mengikuti persamaan kinetika orde-satu semu.

Adsorpsi zat warna dengan menggunakan berbagai macam adsorben merupakan bidang penelitian yang menarik minat banyak peneliti. Puluhan ribu artikel ilmiah telah dipublikasikan dalam berbagai macam jurnal ilmiah internasional, dan ada kecenderungan mengalami peningkatan dari tahun ke

tahun. Salah satu sebab yang menarik perhatian peneliti pada bidang ini adalah untuk mencari adsorben murah namun mempunyai kemampuan adsorpsi yang tinggi. Beberapa penelitian terbaru tentang adsorpsi pewarna pada berbagai macam adsorben adalah sebagai berikut:

- Adsorpsi acid fuchsine dan acid orange II pada Silika berserat KCC-1 terfungsionalisasi (Soltani dkk., 2021b).
- Adsorpsi crystal violet pada nano-komposit hidrogel akrilamid/grafin oksida yang diikat dengan natrium alginat (Pashaei-Fakhri dkk., 2021).
- Adsorpsi pewarna biru hijau dengan menggunakan biochar (Ramesh dkk., 2021).
- Adsorpsi congo red dengan menggunakan selulosa – grafir (González-López dkk., 2021).
- Adsorpsi direct yellow 50 dengan menggunakan zeolit (Alabbad, 2021).
- Adsorpsi dan fotodegradasi metil biru dengan PAni(CA)/magnetik besi oksida (Alves dkk., 2021).
- Adsorpsi Congo red dengan karbon aktif dari bahan lignoselulosa (Achour dkk., 2021).
- Adsorpsi Rhodamin B dengan menggunakan nano-komposit NiO/SiO<sub>2</sub> (Rubab dkk., 2021).
- Adsorpsi reactive red 198 dengan zeolite termodifikasi selulosa nanofiber dan magnetic nanopartikel (Salari dkk., 2021).
- Adsorpsi metil biru dengan  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub> nanorods (Mathew dan Saravanakumar, 2021).
- Adsorpsi acid blue 113 dengan menggunakan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanopartikel (Pai dkk., 2021).

#### **6.4. Penyerapan pestisida**

Pestisida adalah senyawa yang digunakan untuk membunuh, mengusir, atau mengendalikan kehidupan tumbuhan atau hewan tertentu yang dianggap sebagai hama. Pestisida meliputi herbisida, insektisida, fungisida, desinfektan, dan rodentisida. Pestisida diklasifikasikan berdasarkan sumber asalnya yaitu pestisida kimia dan biopestisida. Biopestisida bekerjanya sangat spesifik terhadap hama sasaran, sedangkan pestisida kimia tidak spesifik dan menyasar pada sebagian besar organisme termasuk yang bukan sasaran. Biopestisida ramah lingkungan karena tidak terlalu beracun, mudah terurai, dan dibutuhkan dalam jumlah kecil. Biopestisida juga tidak begitu rentan terhadap modifikasi genetik pada populasi tanaman. Pestisida kimia sangat sering menyebabkan

pencemaran lingkungan karena beracun dan sebagian jenis tidak dapat terurai secara alami. Pestisida kimia dibagi lagi menjadi organoklorin, organofosfat, karbamat, dan piretroid (Abubakar dkk., 2019).

Pestisida bekerja melalui beberapa mekanisme. Beberapa di antaranya disebut zat pengatur pertumbuhan karena merangsang atau memperlambat pertumbuhan hama, sedangkan yang bersifat penolak dikenal untuk mengusir hama, dan atraktan menarik hama atau kemosterilans, yang mensterilkan hama. Pestisida dengan berbagai macam fungsi dan digunakan untuk mengendalikan lebih dari satu golongan hama sulit untuk diklasifikasikan (Abubakar dkk., 2019).

Penggunaan pestisida secara terus menerus telah meningkatkan masalah pencemaran lingkungan setiap kali pestisida digunakan untuk pengelolaan hama. Masuknya pestisida secara terus menerus ke dalam badan air bersama air irigasi dan air hujan menyebabkan pencemaran yang parah. Pestisida yang tidak bisa terbiodegradasi akan terakumulasi di tubuh tumbuhan dan hewan yang menyebabkan ketidakstabilan di sepanjang rantai makanan dan ketidakseimbangan yang parah dalam ekosistem, yang akan menyebabkan kerusakan keanekaragaman hayati.

Adsorpsi asam 2,4-diklorofenoksiasetat dari limbah sintesis telah banyak dilakukan oleh para peneliti (Binh and Nguyen, 2020; Brito dkk., 2020; Luo dkk., 2021; Georgin dkk., 2021; Salomón dkk., 2021; Vieira dkk., 2021; Wu dkk., 2021; Zadeh dkk., 2021). Asam 2,4-diklorofenoksiasetat adalah herbisida yang paling banyak digunakan untuk membasmi atau mencegah hama dan gulma berdaun lebar. Herbisida ini mempunyai efek yang sangat buruk bagi Kesehatan manusia. Herbisida ini menyebabkan cacat intelektual, keguguran, kegagalan sistem saraf pusat, kegagalan hati, kerusakan telinga, dan efek teratogenik dan karsinogenik lainnya.

Penggunaan komposit polietilenimina/lignin untuk penyerapan asam 2,4-diklorofenoksiasetat dipelajari oleh Wu dkk. (2021). Dengan struktur berpori dan mempunyai banyak gugus fungsional, maka komposit dengan mudah dapat menyerap asam 2,4-diklorofenoksiasetat pada rentang pH yang luas (4-10). Kapasitas adsorpsi maksimum diperoleh pada suhu 45°C yaitu sebesar 909,09 mg/g. Isoterm adsorpsi asam 2,4-diklorofenoksiasetat mengikuti persamaan Langmuir, dan untuk kinetika reaksi mengikuti persamaan kinetika orde-dua semu. Beberapa mekanisme adsorpsi yang terlibat pada penyerapan herbisida ini pada komposit adalah interaksi elektrostatis, van der Waals, ikatan hidrogen, dan interaksi  $\pi - \pi$ .

Beberapa pestisida yang banyak dipelajari untuk percobaan adsorpsi dengan menggunakan berbagai macam adsorben (Ighalo dkk., 2021) dapat dilihat pada Tabel 6.3.

**Tabel 6.3.** Adsorpsi pestisida pada berbagai macam adsorben

<b>Pestisida</b>	<b>Pengaruh pada manusia</b>	<b>Adsorben</b>	<b>Referensi</b>
Ametryn (herbisida)	Muntah, diare, mual, mengeluarkan air liur berlebihan, kelemahan otot, dan kanker	Bentonit	Shattar dkk., 2020
		Bunga typha latifoli	Tolcha dkk., 2020
		Tanah liat	Manzotti dan dos Santos, 2019
Amitrole (herbisida)	Diare, kulit kemerahan, hidung berdarah, dan mual	Tanah Montmorillonit	Tazi dkk., 2018
Aldrin (organoklorin insektisida)	Karsinogenik, menyebabkan penurunan imun tubuh, merusak endokrin, sistem saraf, dan jantung	terfungsionalisasi surfaktan	Gu dkk., 2015
		Limbah cangkang siput laut	Bakka dkk., 2018
Atrazine (herbisida)	Memperlambat perkembangan seksual dan embrio serta pubertas pada manusia dan hewan	Karbon aktif	Aldeguer Esquerdo dkk., 2021
		Komposit alginat/Fe/C	Lei dkk., 2021
		Grafin oksida (lembaran nano)	de Souza Antônio dkk., 2021
		Leonardite biochar	Sakulthaew dkk., 2021
		Tanah	Paszko dkk., 2020

Bentazon (herbisida)	Menyebabkan iritasi kulit, mata, mual, kehilangan kesadaran, dan kesulitan bernafas	Biochar  Silika terfungsionalisasi	Ponnam dkk., 2020 Spaltro dkk., 2019
Boscalid (fungisida)	Pada konsentrasi rendah tidak ada potensi nyata bagi kesehatan manusia	Biochar dari kayu, limbah kopi	Loffredo dan Parlavecchia, 2021
Carbaryl (insektisida)	Menyebabkan terjadinya mutagenik pada manusia meskipun pada konsentrasi yang sangat rendah	Magnetik karbon nanotube Karbon aktif	Khaghani dkk., 2020 Alves dkk., 2020
Deltametrin (insektisida)	Menyebabkan alergi dan asma pada manusia	Karbon aktif	Alves dkk., 2018
Diazinon (insektisida)	Menyebabkan gangguan saraf, neuropati, komplikasi neurologis	Magnetik nanokomposit Organo bentonit	Fierascu dkk., 2020 Ahmad dan yasin, 2018
Diquat (herbisida)	Menyebabkan kegelisahan, iritasi pada mata dan kulit, disorientasi, dan kegagalan sistem saraf pusat	Tanah liat/grafin oksida/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Fe/kitosan  Kaolin	Sohrabi dkk., 2021 Farhadi dkk., 2021 Tilaki dkk., 2020
Diuron (herbisida)	Menyebabkan iritasi kulit dan mata	Grafit karbon nitrida Biosorben <i>Heracleum</i> <i>Persicum</i>	Liang dkk., 2021 Mehmandost dkk., 2020
		Biochar dari jerami padi serat karbon aktif  Tanah pertanian	Dan dkk., 2021 de Camargo dkk., 2021 Muendo dkk., 2021

Fenuron (herbisida)	Menyebabkan iritasi saluran pernafasan, mata, kulit, mual, sakit perut, diare	Karbon nanotube	Ali dkk., 2019
Glyphosate (herbisida)	Menyebabkan iritasi kulit dan mata, dapat menyebabkan kematian pada dosis tinggi	Magnetik kitosan	Soares dkk., 2021
		Karbon nanotube terimpregnasi dengan nanopartikel logam	Diel dkk., 2021
Imidacloprid (insektisida)	Pada konsentrasi tinggi menyebabkan disorientasi dan mengantuk berkepanjangan	Kalsium hidroksiapatit	Sen dkk., 2021
		CaFu MOF	Singh dkk., 2021
Isoproturon (herbisida)	Menyebabkan kerusakan limpa, hati, ginjal, dan testis Merupakan senyawa karsinogenik, menyebabkan	Biochar dari Jerami dan koran	Zhang dkk., 2021e
		Karbon aktif Norit SA2 Biopolimer - <i>organoclay</i>	Elazabi dkk., 2021 Narayanan dkk., 2020
Linuron (herbisida)	Merupakan senyawa karsinogenik, menyebabkan timbulnya tumor, berbahaya bagi organ reproduksi, menyebabkan kegagalan fungsi hati	Biochar dari jerami padi	Dan dkk., 2021
		Karbon aktif Norit SA2 Zeolit + karbon aktif	Elazabi dkk., 2021 Sirival dkk., 2020
Metribuzin (herbisida)	Pada konsentrasi tinggi menyebabkan kegagalan kerja hati dan kelenjar tiroid	Kitosan – kalsit dari limbah udang Biochar dari kayu, limbah kopi	Borja-Urzola dkk., 2021 Loffredo dan Parlavecchia, 2021

Prometrin (herbisida)	Pada konsentrasi rendah tidak ada potensi nyata bagi kesehatan manusia, pada konsentrasi tinggi menyebabkan turunnya berat tubuh	Kitosan – kalsit dari limbah udang	Borja-Urzola dkk., 2021
Terbutilazin	Menyebabkan penurunan berat badan serta penurunan berat timus, ginjal dan hati	Kitosan – kalsit dari limbah udang	Borja-Urzola dkk., 2021

Adsorben murah dengan kapasitas adsorpsi tinggi dan ramah lingkungan sangat dibutuhkan untuk proses adsorpsi berbagai macam limbah. Kemampuan adsorpsi kitosan – kalsit dari limbah udang untuk menyerap tiga macam herbisida jenis triazin (metribuzin, prometrin, dan terbutilazin) telah dipelajari oleh Borja-Urzola dkk. (2021). Proses adsorpsi dilakukan secara batch dengan variabel proses jumlah adsorben (10 – 100 mg), konsentrasi awal (1 – 100 mg/L), pH larutan (3 – 11), dan waktu kontak (0 – 120 menit). Pada pH di bawah 5 dan di atas 9, kemampuan adsorpsi kitosan – kalsit terhadap ketiga jenis herbisida menurun karena gaya repulsive yang timbul antara adsorben dan adsorbat. Adsorpsi maksimum dicapai pada pH 7. Adsorpsi triazin tidak hanya bergantung pada gugus amino, tetapi juga gugus –OH dari cincin piranosa dan ikatan tunggal NH–CO–CH<sub>3</sub> dari bagian polimer yang berlanjut tanpa deasetilasi.