

Adsorpsi Pestisida Organofosfat Menggunakan Karbon Aktif : Studi Literatur

Glenn Lucas Hendrajaya^{1*}, Mohamad Rangga Sururi¹, Ratih Nurjayati²

¹Prodi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

²Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

*Koresponden email: glennlucas.hendrajaya@gmail.com

Diterima: 16 Desember 2023

Disetujui: 18 Desember 2023

Abstract

Organophosphate (OP) pesticides are one of the pesticides with the widest and most widespread use in the world. Excessive use of agricultural land can have a negative impact on humans and the environment. One of the alternative methods that can be used to reduce OP in the environment is adsorption using activated carbon (KA). KA has been proven to be able to deal with various hazardous substances in the environment, including pesticides. This paper aims to look at KA's capabilities and obstacles in adsorbing OP. The results of this review show that the adsorption ability of KA on OP depends on environmental temperature and pH. At optimum temperature, OP removal can reach 99.3%, while at optimum pH, KA's adsorption capacity can be higher up to 68.15 mg/g. Other factors such as environmental characteristics, characteristics of the train used, and target adsorbate (OP) are still challenges for future research before its application in the agricultural environment.

Keywords: *adsorption, pesticide, organophosphates, activated carbon, adsorption capacity*

Abstrak

Pestisida golongan organofosfat (OP) merupakan salah satu pestisida dengan penggunaan terluas dan terbanyak di dunia. Penggunaannya di lahan pertanian yang berlebihan dapat berdampak buruk bagi manusia maupun lingkungan. Salah satu metode alternatif yang dapat dilakukan untuk mereduksi OP di lingkungan adalah adsorpsi menggunakan karbon aktif (KA). KA telah terbukti dapat mengatasi berbagai zat pencemar di lingkungan, tak terkecuali pestisida. Tulisan ini bertujuan untuk melihat kemampuan dan hambatan KA dalam mengadsorpsi OP. Hasil review ini menunjukkan bahwa kemampuan adsorpsi KA terhadap OP dipengaruhi oleh temperatur dan pH lingkungan. Pada temperatur yang optimum, penyisihan OP dapat mencapai 99,3%, sedangkan pada pH optimum, kapasitas adsorpsi KA dapat menjadi lebih tinggi hingga 68,15 mg/g. Optimasi keduanya akan memaksimalkan kemampuan KA dalam mengadsorpsi OP. Faktor-faktor lain seperti: karakteristik lingkungan, karakteristik KA yang digunakan, target adsorbat (OP), dan potensi kompetisi dengan adsorbat lain dalam sistem adsorpsi masih menjadi tantangan penelitian ke depan sebelum aplikasinya di lingkungan pertanian.

Kata Kunci: *adsorpsi, pestisida, organofosfat, karbon aktif, kapasitas adsorpsi*

1. Pendahuluan

Penggunaan pestisida pada lahan pertanian cenderung meningkat akibat efisiensi dan efektivitas yang dibutuhkan petani untuk memajukan pertanian mereka [1]. Pestisida digunakan oleh petani untuk mengendalikan atau membunuh organisme pengganggu tanaman (OPT) atau mengatur pertumbuhan tanaman [2]. Namun, di samping penggunaannya yang meningkat, penggunaan pestisida diketahui memiliki risiko buruk terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Pestisida yang digunakan secara berlebihan dan terus menerus akan berpotensi memiliki residu yang tertinggal pada tanah, air, maupun hasil-hasil pertanian. Residu pestisida pada tanah dapat menyebabkan berkurangnya mikroorganisme tanah dan mengancam ekosistem perairan akibat terbawanya pestisida oleh aliran air hujan [3, 4]. Selain itu, paparan pestisida juga berbahaya bagi petani dan konsumen hasil pertanian karena dapat menyebabkan gangguan sistem reproduksi, sistem saraf, hingga penurunan fungsi kognitif [5].

Pestisida digolongkan berdasarkan struktur kimianya. Beberapa golongan pestisida yang umum digunakan diantaranya: organoklorin, organofosfat, karbamat, dan triazin. Organofosfat (OP) merupakan salah satu golongan yang paling banyak digunakan dan luas penggunaannya [6]. OP masih digunakan di sebagian besar petani di Kecamatan Kertasari [7]. Paparan OP terhadap manusia dapat menyebabkan terhambatnya enzim asetilkolin, sehingga mempengaruhi transmisi impuls saraf [8]. Beberapa pestisida yang tergolong OP juga bersifat beracun bagi gen (mutagenik) [9].

Teknik remediasi residu pestisida pada tanah beragam, seperti: bioremediasi, fitoremediasi, dan remediasi non-biologis seperti penambahan karbon aktif (KA) [10]. Remediasi menggunakan KA diunggulkan karena bahan bakunya yang dapat dibuat dari limbah-limbah di lingkungan pertanian itu sendiri, seperti: tempurung kelapa, bonggol jagung, sekam padi, sekam tebu, tandan kosong kelapa sawit, dll [3, 11]. Karbon aktif telah terbukti mampu mengurangi residu pestisida. Penelitian [11] menunjukkan karbon aktif dapat mengurangi residu pestisida alaklor di tanah hingga 66%. Selain itu, penelitian [12] juga membuktikan bahwa KA dapat mengurangi pestisida dalam air minum hingga 99,9% dari konsentrasi awal 2.250 mg L⁻¹.

Tulisan ini bertujuan untuk membahas kemampuan adsorpsi KA sebagai adsorben bagi pestisida OP. Selain itu, dibahas juga faktor-faktor yang menghambat proses adsorpsi OP oleh KA, sehingga dapat diberikan solusi teknis untuk mengatasi masalah tersebut, serta saran penelitian yang dibutuhkan untuk meningkatkan potensinya.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah studi literatur. Literatur yang digunakan untuk dikaji berupa publikasi ilmiah dan buku-buku yang relevan dengan adsorpsi pestisida OP menggunakan KA. Pencarian publikasi ilmiah dan buku-buku yang relevan dilakukan dengan bantuan database *Google Scholar*. Beberapa kata kunci yang digunakan untuk mempermudah pencarian yaitu: adsorpsi, pestisida, organofosfat, dan karbon aktif. Studi dilakukan dengan merangkum dan membandingkan berbagai literatur tersebut, kemudian disusun berdasarkan poin-poin penting seperti: pestisida dan penggolongannya; OP dan bahayanya; teori adsorpsi dan faktor-faktor yang mempengaruhinya; serta karbon aktif. Penyusunan tersebut dilakukan demi menyusun kerangka pemahaman sebelum masuk ke pembahasan utama: "Kemampuan KA sebagai adsorben bagi OP". Literatur yang digunakan untuk membandingkan kemampuan KA dalam mengadsorpsi OP adalah publikasi ilmiah 10 tahun terakhir.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pestisida

Pestisida dapat diartikan sebagai pembunuh hama (*pest*: hama, *cide*: membunuh) [2]. Penggolongan pestisida dapat ditentukan berdasarkan struktur kimianya, fungsinya, dan sasarannya. Berdasarkan struktur kimianya, pestisida dapat dibagi menjadi: organoklorin, organofosfat, karbamat, formadimin, tiosianat, organotins, denitrofenol, dan piteroid [13]. Menurut [14], pestisida dapat digolongkan berdasarkan fungsinya terhadap hama, diantaranya: penghambat pertumbuhan (*growth inhibitor*), fumigan, penolak (*repellents*), pencegah konsumsi (*feeding deterrent*), dan pencegah perkembangbiakan (*ovipositor deterrent*). Selain itu, pestisida juga dapat digolongkan berdasarkan sasarannya. Penggolongan pestisida berdasarkan sasarannya dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Golongan Pestisida berdasarkan Sasarannya

| No. | Golongan Pestisida | Sasaran |
|-----|--------------------|---|
| 1. | Insektisida | Serangga, telur serangga (<i>ovisida</i>) dan larva serangga (<i>larvasida</i>) |
| 2. | Akarisida | Tungau atau mites (<i>akarina</i>) |
| 3. | Moluskisida | Bangsa siput (<i>moluska</i>) |
| 4. | Rodentisida | Tikus |
| 5. | Nematisida | Nematoda |
| 6. | Fungisida | Jamur atau fungi |
| 7. | Bakterisida | Penyakit tanaman berbasis bakteri |
| 8. | Herbisida | Gulma atau tumbuhan pengganggu |
| 9. | Algisida | Ganggang atau algae |
| 10. | Piskisida | Ikan buas |
| 11. | Avisida | Burung |

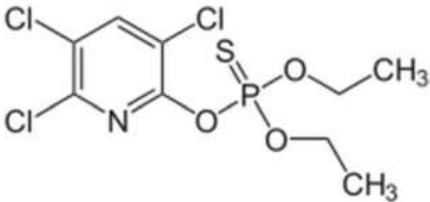
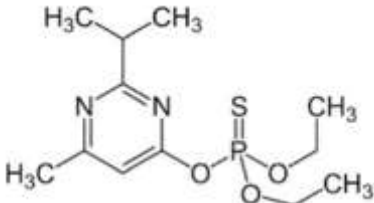
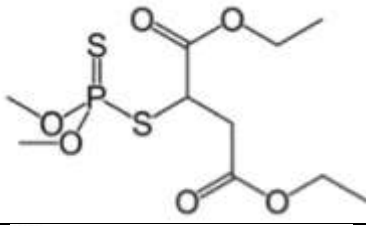
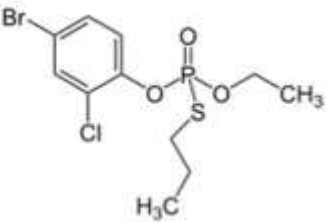
Sumber: [2]

3.2 Organofosfat (OP) dan Bahayanya

Organofosfat (OP) merupakan golongan pestisida yang merupakan turunan organik dari asam fosfat, ditiofosfat, dan tiofosfat. Jenis ini memiliki persistensi yang rendah di lingkungan, sehingga dapat terurai dalam beberapa hari [15]. Meskipun begitu, jenis ini memiliki bahayanya tersendiri. Secara umum, OP berdampak pada transmisi impuls saraf pada manusia dengan cara menghambat enzim asetilkolin [8]. Menurut [16] OP dapat berdampak pada pengurangan berat badan bayi, mengurangi kemampuan belajar, mengurangi berat otak, hingga mengubah perilaku. Selain itu, menurut [15], OP memiliki kelarutan yang

baik dalam lemak dan memiliki toksisitas akut yang lebih tinggi bagi mamalia dibandingkan jenis organoklorin. Beberapa pestisida yang tergolong OP dan karakteristiknya disajikan dalam **Tabel 2**.

Tabel 2. Beberapa Pestisida Organofosfat dan Karakteristiknya

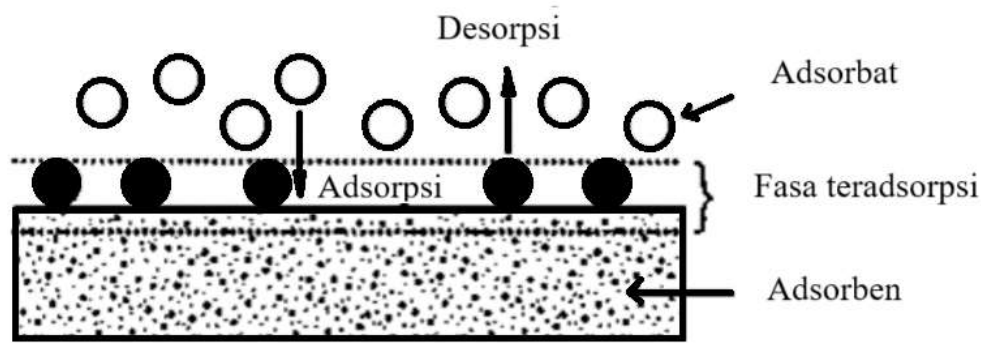
| No. | Pestisida OP | Struktur Kimia | Massa Molekul (g/mol) | Kelarutan dalam Air | Titik lebur (°C) |
|-----|--------------|---|-----------------------|---------------------|------------------|
| 1. | Klorpirifos |  | 350,60 | 1,4 mg/L pada 24°C | 42,0 |
| 2. | Diazinon |  | 304,34 | 1 g/L pada 24°C | <25,0 |
| 3. | Malathion |  | 330,40 | 143 mg/L pada 20°C | 2,80 |
| 4. | Profenofos |  | 373,63 | 28 mg/L pada 28°C | <25,0 |

Sumber: [16]

3.3 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan suatu peristiwa ketika suatu partikel/zat/substansi menempel pada permukaan suatu bahan padatan. Partikel yang menempel dan terakumulasi pada padatan disebut sebagai adsorbat, sedangkan bahan padatannya disebut dengan adsorben [17]. Ilustrasi adsorpsi disajikan pada **Gambar 1**. Adsorpsi dapat terjadi secara fisik (fisisorpsi) maupun kimiawi (kimisorpsi). Fisisorpsi terjadi apabila ikatan antara adsorben dan adsorbat adalah ikatan Van-der Waals yang lemah. Pada kondisi ini, jumlah adsorbat yang diserap akan semakin berkurang akibat peningkatan suhu lingkungan. Sementara itu, kimisorpsi terjadi akibat ikatan kimia antara adsorben dan adsorbat. Adsorpsi kimia biasanya terjadi pada suhu yang relatif tinggi dan bersifat endotermis. Suhu awal yang tinggi ini menyebabkan adsorpsi kimia akan membentuk lapisan tunggal pada permukaan adsorban, diikuti dengan pembentukan multilayer yang terikat oleh gaya fisik [18].

Terdapat banyak faktor yang mempengaruhi proses adsorpsi. Menurut [18], faktor-faktor yang mempengaruhi adsorpsi diantaranya: sifat adsorben, sifat adsorbat, sifat pelarut, suhu, dan pH. Sementara itu, menurut [17], beberapa hal yang mempengaruhi adsorpsi yaitu: luas permukaan adsorben, ukuran partikel adsorben, waktu kontak, kelarutan adsorben, afinitas adsorbat terhadap adsorben, ukuran molekul adsorbat, dan konsentrasi adsorbat.



Gambar 1. Ilustrasi Adsorpsi pada Adsorben
Sumber: [17]

3.4 Karbon Aktif (KA)

Karbon aktif (KA) merupakan material karbon berpori yang memiliki aplikasi yang luas dalam pengolahan air, air limbah, dan pemurnian udara. Hal ini disebabkan karena karakteristiknya yang unik [19]. KA memiliki kandungan karbon mencapai 90% dengan porositas dan luas permukaan yang tinggi. Hal ini menyebabkan KA memiliki daya ikat terhadap suatu substansi/partikel/zat [20]. KA dapat dibuat dari berbagai limbah biomassa seperti: sekam padi, tempurung kelapa, ampas teh, bambu, dan tandan kosong kelapa sawit [3].

Proses pembuatan KA dapat dibagi menjadi tiga tahapan: 1) Dehidrasi, 2) Pengarangan, dan 3) Aktivasi [21].

1. Dehidrasi, yaitu proses penghilangan kandungan air dari bahan organik. Proses ini dilakukan dengan pemanasan hingga suhu 170°C atau dengan cara diangin-anginkan [21, 22]
2. Pengarangan, yaitu proses pemecahan bahan organik agar menjadi arang (karbon). Proses ini dilakukan dengan pirolisis menggunakan *furnace* pada suhu 400-700°C [21, 23]
3. Aktivasi, yaitu proses yang dilakukan untuk memperbesar pori-pori karbon, sehingga luas permukaan karbon bertambah. Proses aktivasi dapat dilakukan dengan gasifikasi oleh CO₂, maupun perendaman dengan bahan-bahan kimia seperti: HCl, HNO₃, NaOH, dan H₃PO₄ [21, 24].

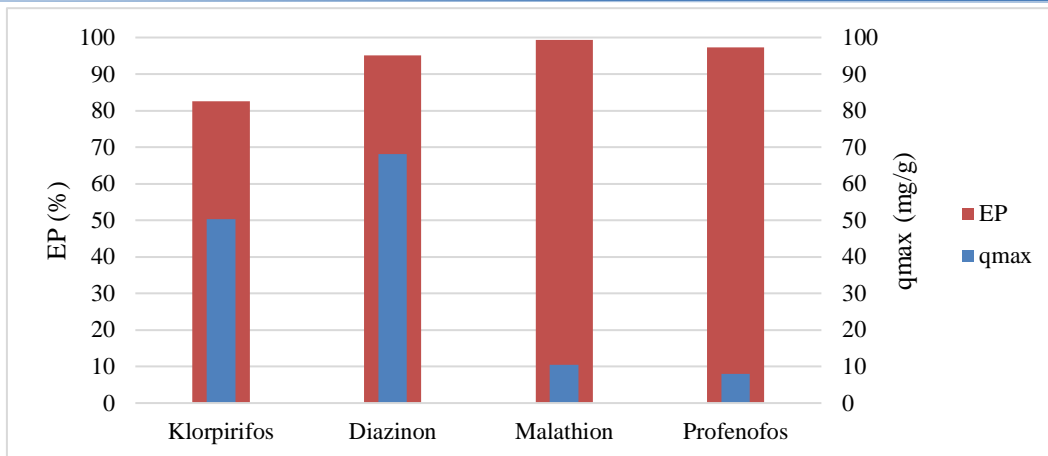
3.5 Adsorpsi OP oleh KA

Eksperimen adsorpsi OP oleh KA telah banyak dilakukan untuk melihat kemampuan KA dalam mengadsorpsi OP. Kemampuan adsorpsi dilihat berdasarkan kapasitas adsorpsi (q_{max}) suatu bahan KA dan efisiensi penyisihan (EP) OP oleh KA tersebut. Nilai q_{max} ditentukan secara langsung melalui eksperimen ataupun melalui pendekatan model isoterm seperti Langmuir dan Freundlich. Beberapa kemampuan KA terhadap adsorpsi OP disajikan pada **Tabel 3**. Perbandingan nilai q_{max} dan EP dapat dilihat di **Gambar 2**.

Tabel 3. Kemampuan KA dalam Mengadsorpsi OP pada beberapa Penelitian

| OP | q_{max} (mg/g) | EP (%) | Temperatur (°C) | pH | Isoterm | Sumber |
|-------------|------------------|--------|-----------------|-----|----------|--------|
| Klorpirifos | 50,25 | 82,50 | 30 | 7,5 | Langmuir | [25] |
| Diazinon | 68,15 | 95,1 | - | 6 | Langmuir | [26] |
| Malathion | 10,46 | 99,3 | 25 | 7,0 | - | [27] |
| Profenofos | 7,98 | 97,3 | 25 | 7,0 | - | [27] |

Berdasarkan perbandingan pada **Gambar 2**, didapatkan bahwa klorpirifos dan diazinon memiliki q_{max} paling tinggi dengan nilai berturut-turut 50,25 dan 68,15 mg/g. Hal ini dapat disebabkan oleh struktur kimia klorpirifos dan diazinon yang memiliki cincin benzena. Cincin benzena ini menjadikan mereka kaya akan elektron sehingga memicu efek penumpukan serah-terima elektron dengan permukaan KA [16]. Selain itu, optimasi pH juga menjadi pengaruh penting pada proses adsorpsi [27]. pH lingkungan akan mempengaruhi suasana elektrostatis yang berujung pada tarikan atau tolakan adsorbat pada KA [16]. Penelitian Ahmadi, et al. [26] menunjukkan bahwa pH optimum untuk adsorpsi diazinon adalah pada pH 6, sehingga dapat memaksimalkan adsorpsinya pada permukaan KA. Tarik-menarik antara diazinon dan KA optimal akibat KA yang bermuatan lebih positif (*positive charge*) dan diazinon yang bermuatan lebih negatif (*negative charge*) [26].



Gambar 2. Perbandingan q_{max} KA dan Efisiensi Penyisihan OP
Sumber: [25], [26], [27]

Menurut [16], pH merupakan faktor pengendali utama dalam adsorpsi. pH larutan (pH_L) akan menentukan muatan permukaan adsorben (pH *Point Zero Charge* atau pH_{pzc}). Permukaan KA akan memiliki muatan positif (*positive charge*) apabila pH_L < pH_{pzc}, namun bermuatan negatif (*negative charge*) apabila pH_L > pH_{pzc} [26]. Apabila pH_L = pH_{pzc}, maka permukaan KA tidak bermuatan (*neutral charge*) [28]. Muatan ini akan mempengaruhi suasana tarikan atau tolakan elektrostatis bagi adsorbat. Pada kondisi *negative charge*, KA akan cenderung menyerap kation logam [29]. Namun, pada kondisi *positive charge*, KA cenderung menyerap senyawa-senyawa organik [18]. Umumnya, adsorpsi OP seperti diazinon, malathion, dan parathion pada KA akan optimal apabila KA bermuatan positif (pH_L < pH_{pzc}) [26, 30]. Namun berbeda dengan OP dengan struktur kimia seperti klorpirifos. Penelitian [30] dan [31] menunjukkan bahwa klorpirifos dapat lebih optimal teradsorpsi pada kondisi KA bermuatan negatif (pH_L > pH_{pzc}). Hal ini dapat disebabkan oleh perbedaan proses degradasi klorpirifos dengan OP lain [26]. Selain itu, atom klorin pada klorpirifos dapat terprotonisasi oleh H⁺ dalam larutan, sehingga menyebabkannya lebih positif (*positive charge*) dan tertarik ke permukaan KA [30]. Ini menegaskan bahwa pH_L dan pH_{pzc} adsorben perlu dioptimasi sebelum digunakan untuk mengadsorpsi OP tertentu.

Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 2, malathion dan profenofos memiliki EP yang lebih tinggi dibandingkan dengan klorpirifos dan diazinon. Hal ini dapat disebabkan oleh perbedaan temperatur pada eksperimen-eksperimen tersebut. Pada penelitian [27], disebutkan bahwa temperatur optimum untuk adsorpsi malathion dan profenofos berada pada suhu 25°C. Temperatur tersebut optimum pada konsentrasi awal yang berbeda-beda: 1, 4, dan 8 mg/L. Sementara itu, penelitian [31] menunjukkan penurunan EP klorpirifos oleh KA ketika temperatur dinaikkan dari 25-45°C. Penurunan EP juga semakin tinggi apabila konsentrasi awal klorpirifos dinaikkan dari 20-50 ppm. EP paling rendah didapatkan sebesar <60% pada konsentrasi awal 50 ppm. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan KA dalam mengadsorpsi adsorpsi klorpirifos pada penelitian [25] kurang optimal karena tidak dilakukan pada temperatur optimumnya.

Perubahan temperatur pada sistem akan mempengaruhi perubahan kelarutan adsorbat. Umumnya, apabila kelarutan berkurang, adsorbat cenderung memiliki afinitas lebih besar pada fase non cair [16]. Perpindahan molekul ke dalam pori-pori KA akan dipermudah dengan sifat hidrofobik permukaan KA tersebut [32]. Kelarutan akan menurun seiring meningkatnya temperatur. Selain itu, peningkatan kecepatan molekul pada temperatur yang lebih tinggi juga akan mempermudah adsorbat untuk teradsorpsi ke dalam pori KA [33]. Berdasarkan hal tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa dari sisi adsorbat (OP), kenaikan temperatur akan menurunkan kelarutannya dalam larutan, sehingga memicu meningkatnya adsorpsi terhadap KA. Di sisi lain, temperatur yang terlalu tinggi akan meningkatkan kecenderungan desorpsi bagi adsorbat yang telah teradsorpsi oleh KA [33]. Penelitian [34] menunjukkan bahwa desorpsi asam asetat yang telah teradsorpsi pada adsorben meningkat seiring meningkatnya temperatur. Selain itu, penelitian [35] menunjukkan bahwa peningkatan temperatur dari 295-323 K akan menurunkan laju adsorpsi. Ini menunjukkan bahwa penerapan KA sebagai adsorben bagi OP memerlukan penelitian pendahuluan untuk menentukan temperatur optimal adsorpsi untuk memaksimalkan potensinya.

Faktor-faktor yang mempengaruhi adsorpsi OP oleh KA juga dapat berasal dari karakteristik adsorben seperti luas permukaan KA, distribusi ukuran pori, proporsi karbon murni pada KA, dan kadar air KA [36-39]. Karakteristik ini dapat dioptimasi melalui penelitian mengenai proses pemilihan bahan, pengarangan, dan aktivasi KA yang paling baik bagi suatu bahan KA [39]. Karakteristik OP juga dapat

mempengaruhi adsorpsi oleh KA yaitu melalui perbedaan ukuran partikel, afinitas partikel, kelarutan, dan derajat ionisasi, dan konsentrasinya [16, 17]. Selain itu, faktor lingkungan seperti adanya adsorbat lain dalam sistem akan memungkinkan terjadinya kompetisi adsorpsi dan berkurangnya kapasitas adsorpsi KA [16, 23].

4. Kesimpulan

Tulisan ini menunjukkan beberapa pengaruh penting bagi proses adsorpsi OP oleh KA. Proses adsorpsi dapat dimaksimalkan dengan mencari pH dan temperatur lingkungan yang paling optimal bagi OP yang akan diadsorpsi. Proses pembuatan dan aktivasi KA juga menjadi perhatian agar menjadi adsorben yang cocok bagi OP yang akan menjadi adsorbat. Penggunaan KA untuk menyisihkan OP dari tanah pertanian masih memerlukan analisis lebih lanjut dari variabel-variabel lain yang juga mempengaruhi proses adsorpsi.

5. Saran

Penelitian ke depan memerlukan lebih banyak variabel untuk di analisis pengaruhnya terhadap proses adsorpsi OP terhadap KA. Variabel-variabel tersebut dapat berupa luas permukaan KA, afinitas OP terhadap KA, ukuran molekul OP, dan bagaimana kompetisi adsorpsinya apabila terdapat zat lain di dalam sistem. Optimasi pada variabel-variabel tersebut diperlukan agar dapat memaksimalkan pemanfaatan KA sebagai adsorben bagi OP. Selain itu, hasil penelitian tersebut akan mengarah pada penggunaan KA sebagai adsorben bagi OP di lingkungan dengan kondisi yang lebih rumit seperti tanah.

6. Referensi

- [1] E. Yusuf, "Perilaku Petani Bawang Merah dalam Penggunaan Pestisida: Sebuah Literature Review," *Manajemen dan Kewirausahaan*, vol. 11, no. 2, 2020.
- [2] P. Djojsumarto, *Panduan lengkap pestisida & aplikasinya*. Agromedia, 2008.
- [3] A. N. Ardiwinata, "Pemanfaatan arang aktif dalam pengendalian residu pestisida di tanah: prospek dan masalahnya," *Jurnal Sumberdaya Lahan*, vol. 14, no. 1, pp. 49-62, 2020.
- [4] D. I. K. Sari, "Analisis Kadar Pestisida Dan Dampaknya Terhadap Risiko Kesehatan Masyarakat Di Sekitar Air Tanah Kabupaten Sleman," 2022.
- [5] D. A. Pratama, O. Setiani, and Y. H. Darundiati, "Studi Literatur: Pengaruh Paparan Pestisida Terhadap Gangguan Kesehatan Petani," *Jurnal Riset Kesehatan Poltekkes Depkes Bandung*, vol. 13, no. 1, pp. 160-171, 2021.
- [6] H. Mali *et al.*, "Organophosphate pesticides an emerging environmental contaminant: Pollution, toxicity, bioremediation progress, and remaining challenges," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 127, pp. 234-250, 2023.
- [7] K. Rahmadita and K. Oginawati, "Exposure Assessment of Pesticides to Farmers in Terms of Autoimmune System (Case Study: Farmers in Cibeureum Village, Kertasari District)," *8th International Conference on Chemical, Biological, Agricultural, and Environmental Sciences*, pp. 47-52, 2018.
- [8] I. Mahmood, S. R. Imadi, K. Shazadi, A. Gul, and K. R. Hakeem, "Effects of pesticides on environment," *Plant, soil and microbes: volume 1: implications in crop science*, pp. 253-269, 2016.
- [9] M. Kushwaha, S. Verma, and S. Chatterjee, "Profenofos, an Acetylcholinesterase-Inhibiting Organophosphorus Pesticide: A Short Review of Its Usage, Toxicity, and Biodegradation," *Journal of environmental quality*, vol. 45, no. 5, pp. 1478-1489, 2016.
- [10] C. D. Anggreini, "Bioremediasi Lingkungan Tercemar Klorpirifos," 2019.
- [11] K. S. Ahmad, "Evaluating the adsorption potential of alachlor and its subsequent removal from soils via activated carbon," *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, vol. 27, no. 4, pp. 249-266, 2018.
- [12] S. D. Cunningham, W. R. Berti, and J. W. Huang, "Phytoremediation of contaminated soils," *Trends in biotechnology*, vol. 13, no. 9, pp. 393-397, 1995.
- [13] A. Kalia and S. Gosal, "Effect of pesticide application on soil microorganisms," *Archives of Agronomy and Soil Science*, vol. 57, no. 6, pp. 569-596, 2011.
- [14] Y. Abubakar *et al.*, "Pesticides, history, and classification," in *Natural remedies for pest, disease and weed control*: Elsevier, 2020, pp. 29-42.
- [15] G. C. C. Weis, A. de Oliveira Alves, C. E. Assmann, B. d. S. R. Bonadiman, and I. H. Costabeber, "Pesticides: classifications, exposure and risks to human health," *Archives in Biosciences & Health*, vol. 1, no. 1, pp. 29-44, 2019.

- [16] K. Iwuozor *et al.*, "Adsorption of organophosphate pesticides from aqueous solution: a review of recent advances," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 20, no. 5, pp. 5845-5894, 2023.
- [17] L. Botahala, "Adsorpsi arang aktif (kimia permukaan-kimia zat padat-kimia katalis)," ed: Deepublish, 2022.
- [18] S. Ismadji *et al.*, *Adsorpsi pada fase cair: Kesetimbangan, kinetika, dan termodinamika*. Surabaya: Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya, 2021.
- [19] Z. Heidarinejad, M. H. Dehghani, M. Heidari, G. Javedan, I. Ali, and M. Sillanpää, "Methods for preparation and activation of activated carbon: a review," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 18, pp. 393-415, 2020.
- [20] C. J. Ekawati, *Alternatif Bahan Baku Arang Aktif*. Rena Cipta Mandiri, 2023.
- [21] M. T. Sembiring and T. S. Sinaga, "Arang aktif (pengenalan dan proses pembuatannya)," 2003.
- [22] R. Wahi, Z. Ngaini, and V. U. Jok, "Removal of mercury, lead and copper from aqueous solution by activated carbon of palm oil empty fruit bunch," *World Appl Sci J*, vol. 5, no. 84, pp. 84-91, 2009.
- [23] Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Hong Kong: McGraw-Hill Companies, Inc, 2003.
- [24] H. Marsh and F. R. Reinoso, *Activated carbon*. Elsevier, 2006.
- [25] J. Igwe, N. Okoronkwo, S. Eze, and C. Aghalibe, "Isotherm and Kinetic Studies of Chlorpyrifos Adsorption onto Agricultural By-Products," *Chemistry Research Journal*, vol. 3, 5, pp. 1-14, 2018.
- [26] D. Ahmadi, A. Khodabakhshi, S. Hemati, and A. Fadaei, "Removal of diazinon pesticide from aqueous solutions by chemical–thermal-activated watermelon rind," *International Journal of Environmental Health Engineering*, vol. 9, no. December, pp. 1-7, 2020.
- [27] A. A. El-Kady, H. H. Abdel Ghafar, M. B. Ibrahim, and M. A. Abdel-Wahhab, "Utilization of activated carbon prepared from agricultural waste for the removal of organophosphorous pesticide from aqueous media," *Desalination and Water Treatment*, vol. 51, no. 37-39, pp. 7276-7285, 2013.
- [28] P. J. Fadilla, M. R. Sururi, and D. Marganingrum, "Utilization of Bottom Ash as an Adsorbent for Color and COD Removal for Textile Industry Waste," *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, vol. 19, no. 1, pp. 78-88, 2022.
- [29] Ş. Kubilay, R. Gürkan, A. Savran, and T. Şahan, "Removal of Cu (II), Zn (II) and Co (II) ions from aqueous solutions by adsorption onto natural bentonite," *Adsorption*, vol. 13, pp. 41-51, 2007.
- [30] S. Aydin, "Removal of organophosphorus pesticides from aqueous solution by magnetic Fe₃O₄/red mud-nanoparticles," *Water Environment Research*, vol. 88, no. 12, pp. 2275-2284, 2016.
- [31] M. N. Ettish, G. S. El-Sayyad, M. A. Elsayed, and O. Abuzalat, "Preparation and characterization of new adsorbent from Cinnamon waste by physical activation for removal of Chlorpyrifos," *Environmental challenges*, vol. 5, p. 100208, 2021.
- [32] O. A. Eletta, A. G. Adeniyi, J. O. Ighalo, D. V. Onifade, and F. O. Ayandele, "Valorisation of Cocoa (Theobroma cacao) pod husk as precursors for the production of adsorbents for water treatment," *Environmental Technology Reviews*, vol. 9, no. 1, pp. 20-36, 2020.
- [33] M. Horsfall Jnr and A. I. Spiff, "Effects of temperature on the sorption of Pb²⁺ and Cd²⁺ from aqueous solution by Caladium bicolor (Wild Cocoyam) biomass," *Electronic Journal of Biotechnology*, vol. 8, no. 2, pp. 43-50, 2005.
- [34] M. Y. Sengul, C. A. Randall, and A. C. Van Duin, "ReaxFF molecular dynamics study on the influence of temperature on adsorption, desorption, and decomposition at the acetic acid/water/ZnO (10 $\bar{1}$ 0) interface enabling cold sintering," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 10, no. 43, pp. 37717-37724, 2018.
- [35] L. Sharma and R. Kakkar, "Hierarchical porous magnesium oxide (Hr-MgO) microspheres for adsorption of an organophosphate pesticide: kinetics, isotherm, thermodynamics, and DFT studies," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 9, no. 44, pp. 38629-38642, 2017.
- [36] F. Suo *et al.*, "A carbonised sieve-like corn straw cellulose–graphene oxide composite for organophosphorus pesticide removal," *RSC advances*, vol. 8, no. 14, pp. 7735-7743, 2018.
- [37] F. Suo *et al.*, "Mesoporous activated carbon from starch for superior rapid pesticides removal," *International journal of biological macromolecules*, vol. 121, pp. 806-813, 2019.
- [38] A. Rahman, R. Aziz, A. Indrawati, and M. Usman, "Pemanfaatan beberapa jenis arang aktif sebagai bahan adsorben logam berat cadmium (Cd) pada tanah sedimen drainase kota Medan sebagai media tanam," *Agrotekma: Jurnal Agroteknologi dan Ilmu Pertanian*, vol. 5, no. 1, pp. 42-54, 2020.

-
- [39] M. A. A. Mariah, K. Rovina, J. M. Vonnie, and K. H. Erna, "Characterization of activated carbon from waste tea (*Camellia sinensis*) using chemical activation for removal of methylene blue and cadmium ions," *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 44, pp. 113-122, 2023.