

Remediation of Ex-Unlicensed Gold Mining Using Rice Husk Biochar: its Effect on Reducing Mercury Levels

Riza Hamkary Salam^{1*}, Taufik Fauzi¹, A. A. Ketut Sudharmawan¹, Mulyati¹, Suwardji¹
¹Magister Pertanian Lahan Kering, Pascasarjana Universitas Mataram, Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia;

Article History

Received : October 07th, 2023

Revised : October 24th, 2023

Accepted : November 16th, 2023

*Corresponding Author: **Riza**

Hamkary Salam, Magister

Pertanian Lahan Kering,

Pascasarjana Universitas

Mataram, Mataram, Nusa

Tenggara Barat, Indonesia;

Email:

rizahamkaryofficial1@gmail.com

Abstract: The dangers of mercury in nature cause negative impacts on the environment and humans. The nature of mercury is bioaccumulative and toxic, and it cannot be degraded quickly but only through valence transformation. One effort that can be made to reduce the level of toxicity from mercury is to use biochar as an adsorbent agent in the soil. This article's goal is to review data regarding the use of biological charcoal (biochar) as a soil adsorbent for mercury. In order to clean up soil that has been contaminated with mercury (Hg), rice husk biochar plays a crucial function. Other than that, by using these organic materials instead of synthetic ones, soil production can be increased while environmental impact is reduced by 56%. Mercury is absorbed by biochar through a number of different mechanisms, including: (1) electrostatic bonds; (2) K⁺ and Na⁺ with Hg²⁺ and Hg⁺ ions simultaneously; (3) covalent reduction of mercury from Hg₂⁺ to Hg⁺ and Hg⁰; (4) formation of a mineral complex (Hg₂(OH)₂) through precipitation of Hg₂⁺ with carboxyl groups, such as lactones; and (5) complexation reactions on oxygen-containing functional groups such as - In comparison to soil alone, the use of biochar along with other organic elements can boost the capacity of heavy metal adsorption. With this combination, mercury levels were reduced to 12.45 ppm while soil pH increased dramatically from 0.3 to 1.33 units, near to neutral.

Keywords: Adsorption mechanism, biochar, mercury (Hg), rice husk.

Pendahuluan

Lahan bekas tambang umumnya lahan yang telah mengalami degradasi baik secara fisik, kimia maupun biologi. Umumnya, karakteristik kesuburan tanah berada pada tingkat rendah dan produktivitas tanah serta tanaman rendah. Menurut (Romadhan *et al.*, 2022) bahwa luasan lahan Indonesia yang termasuk bekas tambang mencapai >1,3 juta Ha dan telah tersebar di beberapa provinsi salah satunya Nusa Tenggara Barat. Lahan bekas tambang emas merupakan salah satu lahan yang telah mengalami penurunan kualitas akibat aktivitas pengerukan tanah dan penggunaan bahan-bahan berbahaya, sehingga terjadi hilangnya lapisan topsoil tanah (Setiawan *et al.*, 2018). Massifnya kegiatan

masyarakat dalam mengeksploitasi tanah untuk ditambang, menyebabkan maraknya penambangan emas tanpa izin (PETI) yang mulai bermunculan setiap tahun. Menurut data (DLHK NTB, 2018) bahwa tercatat sebanyak 16.247 unit lokasi kegiatan pengolahan emas yang belum memiliki izin menggunakan merkuri dan tersebar di Kabupaten Lombok Tengah, Sumbawa Barat, Sumbawa dan Bima.

Beberapa penelitian telah menemukan dampak negatif dari kegiatan penambangan emas yaitu aktifitas mikroba tanah menurun, kualitas tanah dan tanaman menurun, tanah bekas tambang bertekstur dominan pasir, kandungan bahan organik 1,036% (Sangat rendah), berat volume >1 g/cm³ (Penyebab pemadatan tanah), struktur tanah rusak, aerasi dan drainase tanah serta retensi airnya

rendah (Afandi, 2014; Henrianto *et al.*, 2019). Salah satu logam berat berbahaya yang terkandung pada limbah tambang emas yaitu Merkuri (Hg). Merkuri salah satu polutan yang tersebar di tanah, air, atmosfer dan biota serta telah terdaftar di Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) dan WHO sebagai bahan berbahaya bagi manusia dan lingkungan karena toksisitasnya (Wang *et al.*, 2012; WHO, 2017).

Sumber dari merkuri dapat dihasilkan dari berbagai lokasi atau kegiatan seperti pembakaran batu bara, pembakaran limbah, pemurnian emas dan manufaktur logam. Dalam penelitian (Bobby & Desmi, 2002), menyatakan bahwa unsur Hg dapat terakumulasi dalam jangka panjang di dalam tubuh, sehingga menyebabkan cacat bawaan atau kerusakan organ (otak, ginjal dan hati) dan susunan kromosom. Mengacu pada permasalahan tersebut dibutuhkan upaya untuk menurunkan kadar Hg pada tanah tercemar. Metode yang telah banyak berkembang yaitu adsorpsi (Bahan organik). Menurut (Setyowati, 2018) bahwa metode yang banyak digunakan yaitu adsorpsi karena memiliki beberapa keuntungan seperti lebih ekonomis dan tidak menimbulkan efek samping pada pengaplikasian. Proses pirolisis merupakan konversi biomasa limbah menjadi biochar merupakan metode yang efektif dalam pengolahannya.

Biochar merupakan arang aktif hasil pembakaran tak sempurna yang memiliki peranan dalam mengatasi masalah pencemaran hingga ke tingkat. Salah satu karakteristik biochar dalam mengurangi pencemaran yaitu memiliki luas permukaan dengan daya jerap tinggi untuk mengurangi ketersediaan logam berat di dalam tanah dan proses *leaching* dari polutan tanah (Fellet *et al.*, 2014). Beberapa sumber melaporkan bahwa limbah biomassa yang digunakan sebagai adsorben logam berat merkuri di dalam tanah yaitu sekam padi. Hal tersebut dikarenakan ketersediaan dari sekam padi cukup tinggi di alam, tercatat sekitar 30% dari total gabah kering giling dari hasil panen menjadi limbah sekam padi (Wijaya, 2018). Lebih lanjut, Penambahan biochar sekam padi dapat meningkatkan kesuburan tanah baik dalam menggemburkan dan memperbaiki sifat kimia tanah (Agustono *et al.*, 2017).

Sifat alkalinitas dari biochar mampu meningkatkan produktivitas tanah baik pH dan mengendalikan ketersediaan logam berat didalam tanah (Fellet *et al.*, 2014). Walaupun teknologi remediasi tersebut cukup mudah dan praktis untuk diproduksi serta diaplikasikan secara langsung ke tanah. Tetapi minat peneliti untuk mengetahui peran dari remediator dan adsorben secara spesifik cukup besar dan kurangnya data eksperimen, sehingga perlu pengembangan lebih lanjut dalam memahami peranan dari biochar sebagai remediator tanah tercemar merkuri (Hg). Tujuan dilakukan penulisan ini yaitu untuk meninjau informasi yang berkaitan dengan pemanfaatan bahan organik dalam bentuk arang hayati (Biochar) sebagai remediator dan adsorben merkuri didalam tanah. Ulasan ini membahas tentang stabilitas merkuri didalam tanah, mekanisme ikatan merkuri oleh biochar, sifat dan karakteristik biochar sekam padi, dan kemampuannya dalam menurunkan kadar merkuri (Hg).

Bahan dan Metode

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental melalui metode library research (kepuustakaan). Strategi ini dilakukan dengan mencari literatur sebagai sumber data, baik dari buku, laporan, atau hasil penelitian terdahulu. Metode pengumpulan informasi dilakukan dengan membedakan pembicaraan dan buku, makalah, artikel majalah, buku harian, web dan data lain yang berhubungan dengan topik pada studi literature ini.

Hasil dan Pembahasan

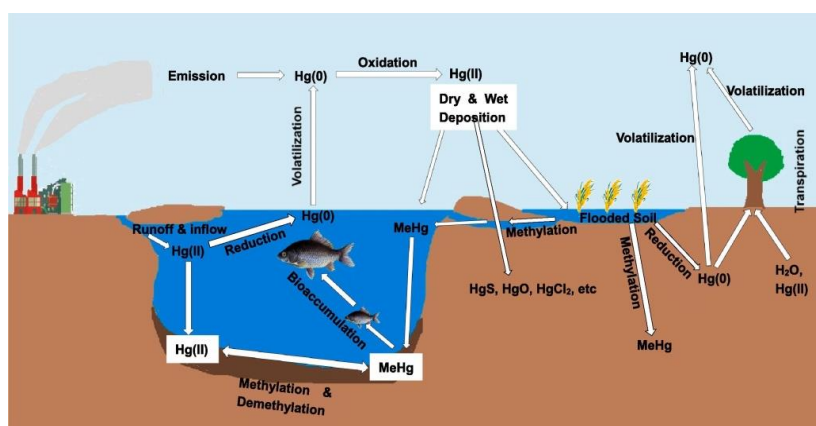
Stabilitas merkuri di dalam tanah

Merkuri merupakan salah satu logam berat yang bersifat bioakumulatif dan beracun, persisten, di dalam tanah serta bersifat volatilite yang lebih tinggi dari semua logam (Hamzah & Priyadarshini, 2019; NEDES, 2019). Sifat dari merkuri tersebut berpotensi untuk membahayakan makhluk hidup dan ekosistem, terutama sifat toksik. Menurut (Lubis, 2020) bahwa kriteria logam berat dikatakan bersifat toksik antara lain: (a) Memiliki daya toksisitas tinggi didalam tanah; (b) Adanya kerusakan secara fisiologis bagi makhluk hidup akibat

bioakumulasi dan biosorpsi logam; (c) Logam berat tidak dapat terdegradasi dengan cepat melainkan bertransformasi valensi saja. Lebih lanjut, proporsi sumber antropogenik yang tersebar didunia saat ini antara lain penambangan emas skala kecil 38%, pembakaran batubara 25%, produksi logam non besi (Al, Cu, Pb, Zn) 10%, produksi semen 9%, penambangan emas skala besar and pembuangan limbah 10% dan lainnya 8% (AMAP, 2013). Selain itu, pada bidang pertanian juga merupakan penyumbang Hg didalam tanah yang berasal dari pestisida, pupuk, limbah lumpur dan air irigasi (Hseu *et al.*, 2010).

Gambar 1. menunjukkan bahwa adanya gas emisi dari pabrik yang dihasilkan berupa gaseous elemental Hg(0) (GEM) terlepas ke atmosfer dan dibawa oleh angin, sehingga

teroksidasi menjadi Hg(II). Lalu Hg tersebut dapat mengendap melalui proses basah kering ke dalam tanah dan badan air. Ketika merkuri terlepas ke perairan, akan mudah terakumulasi menjadi sedimen dan berubah bentuk menjadi metilmerkuri (MeHg) dan Hg(II). Hg(II) yang bereaksi dengan molekul air secara octahedral $[\text{Hg}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$, umumnya bersifat beracun yang dapat masuk ke system rantai makanan. Sejalan dengan (Clarkson & Magos, 2006) bahwa bentuk merkuri yang paling berbahaya baik organik maupun anorganik untuk kesehatan manusia yaitu Hg^{2+} . Lebih lanjut, dampak yang dapat terlihat jelas dari kontaminasi merkuri yaitu adanya kontaminasi pada ikan yang lebih besar, lebih tua dan ikan yang berada di perairan relatif masam atau berwarna seperti teh.



Gambar 1. Transformasi merkuri di tanah, air dan udara (Wang *et al.*, 2020)

Disamping itu, didalam tanah terdapat faktor-faktor yang mempengaruhi mobilisasi dari Hg. Interaksi dari tanah dan merkuri terjadi dalam berbagai bentuk (Schuster, 1991) yaitu: (a) Terlarut (Ion bebas atau kompleks terlarut); (b) Teradsorpsi secara non-spesifik (Terikat kuat akibat gaya elektrostatis); (c) Teradsorpsi secara spesifik (Adanya pengikatan karena tingkat kovalensi); (d) Pengkelatan (Terikat kuat dengan zat-zat organik); (e) Diendapkan (Sebagai sulfide, karbonat, hidroksida, fosfat dll. Selanjutnya, pengaruh dari pH juga sangat mempengaruhi mobilitas Hg dengan mengubah kelarutannya. Keberadaan merkuri (Hg) di dalam tanah, sangat dipengaruhi oleh derajat kemasaman (pH).

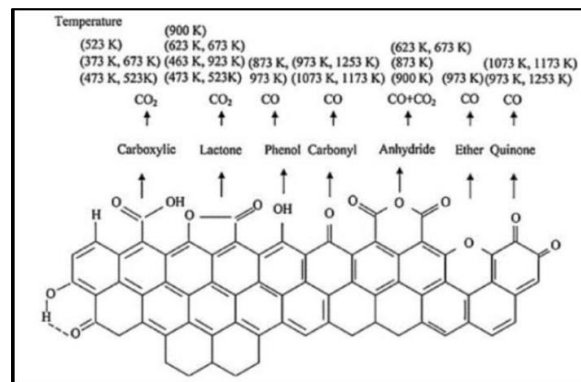
Menurut (Mariwy *et al.*, 2019) bahwa bentuk merkuri ketika pada pH masam dan alkalis berbeda. Jika pH tanah rendah, maka bentuk merkuri yaitu HgCl_2 dan CH_3Hg^+ , sedangkan pada kondisi pH tinggi, maka bentuk merkuri yaitu Hg^0 dan dimetil merkuri $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$. Umumnya, merkuri yang terdapat di dalam tanah akan dimengalami perombakan oleh bakteri dari merkuri (Hg) menjadi $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ dan ion metil merkuri $(\text{CH}_3)\text{Hg}^+$. Selanjutnya ion tersebut akan mengalami volatilisasi ke udara dan senyawa dimetil merkuri akan terurai menjadi metana (CH_4), etana (C_2H_6) dan metalik (Hg^0). Sifat dari ion metil merkuri yaitu mudah larut, sehingga proses bioakumulasi pada organisme baik pada tanah maupun air berlangsung lebih cepat.

Dengan demikian, stabilitas Hg didalam tanah sejatinya tidak pernah hilang dari lingkungan, melainkan hanya berpindah ke lokasi lain (NEDES, 2019).

Mekanisme ikatan merkuri oleh biochar

Sifat dari logam berat yaitu sulit terdegradasi di dalam tanah. Logam berat termasuk non biodegradable dan bertahan dalam jangka waktu yang lama pada tanah tercemar, sehingga membutuhkan waktu yang cukup lama dan mahal dalam penanganannya. Sifatnya yang stabil didalam tanah dapat dikurangi dengan penambahan amelioran tanah. Biochar merupakan salah satu amelioran yang berperan sebagai adsorben untuk dekontaminan tanah

tercemar logam berat. Menurut (Das *et al.*, 2015) bahwa karakteristik hidropobik pada biochar dengan luas permukaan spesifik yang tinggi (800-1200 m²) mampu meremediasi logam berat didalam tanah. Dalam proses produksi biochar, upaya menghilangkan gugus karboksilat (C=O) pada proses karbonisasi dilakukan secara maksimal pada kondisi oksigen terbatas atau dikenal sebagai pirolisis. Sejalan dengan (Shafeeyan *et al.*, 2010) suhu pemanasan yang optimal pada proses pembakaran secara pirolisis yaitu 400°C-600°C, sehingga gugus karboksilat (C=O) dapat terdekomposisi secara sempurna. Struktur kimia dari gugus fungsional karbon pada Gambar 2.



Gambar 2. Dekomposisi gugus fungsi karbon pada kondisi Inert (Pratama *et al.*, 2018)

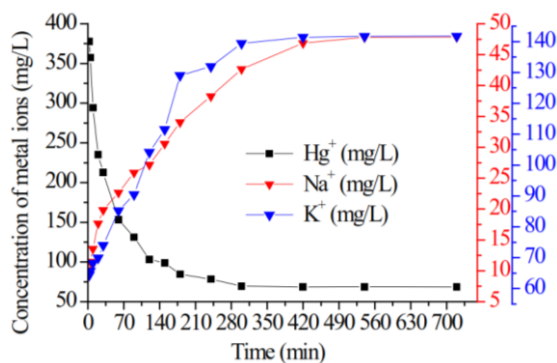
Proses karbonisasi menyebabkan adanya perubahan pada ikatan hidrogen dan gugus OH menjadi gugus monomer. Perubahan tersebut terjadi karena proses karbonisasi menghasilkan aromatisasi senyawa selulosa menjadi struktur poliaromatik, yang dampaknya gugus OH akan menempel pada senyawa aromatik. Lebih lanjut, (Pratama *et al.*, 2018) menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu pembakaran pada proses pirolisis, maka luas permukaan biochar akan semakin tinggi, sehingga senyawa-senyawa volatile menguap dan membentuk pori-pori pada struktur karbon. Ruang kosong tersebut dimanfaatkan oleh mikroba seperti mikoriza dan bakteri sebagai tempat berlindung serta meningkatkan adsorpsi baik kation maupun anion di dalam tanah. Pendekatan metode adsorpsi merupakan yang paling umum digunakan untuk mengurangi kadar Hg didalam tanah (Abbas *et al.*, 2018). Adsorpsi logam berat pada biochar terjadi melalui beberapa

mekanisme (Guo *et al.*, 2020) antara lain :

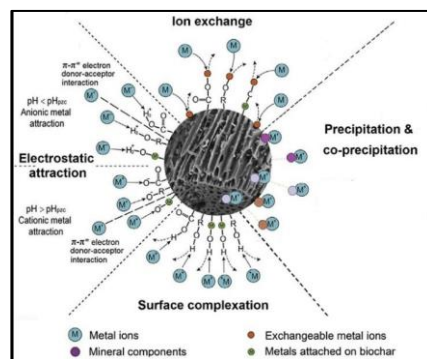
- Ikatan elektrostatis.* Dimana adanya penyerapan H⁺ melalui proses protonasi oleh gugus fungsi karboksil dan hidroksil yang terdapat pada biochar, sehingga membentuk OH²⁺ dan -COOH²⁺ serta bergabung dengan HgCl⁻ dan HgClO⁻ melalui elektrostatis untuk menghilangkan kadar Hg²⁺ dalam keadaan masam (Walcarius & Delacôte, 2005);
- Mekanisme pertukaran ion.* Dimana terjadi pertukaran ion dari biochar dengan merkuri yaitu K⁺ dan Na⁺ dengan ion Hg²⁺ dan Hg⁺ secara bersamaan. Pada Gambar 3. mengindikasikan bahwa unsur konsentrasi Hg²⁺ sangat rentan dipertukarkan oleh unsur K dan Na yang bersumber dari karbon serta berangsur-angsur menurun seiring dengan meningkatnya waktu sampai pada titik keseimbangan adsorpsi. Sejalan dengan penelitian (Kılıç *et al.*, 2008) dan (Carro *et al.*, 2011) yang menyatakan bahwa

- Unsur K^+ dan Na^+ lebih rentan mengalami pertukaran ion dengan Hg^{2+} ;
- c) *Mekanisme Reduksi*, dimana terjadi reduksi dari kovalen merkuri dari Hg^{2+} menjadi Hg^+ dan Hg^0 oleh $-π$ eletron, gugus lakton (C=O), gugus fungsi hidrokarbon aromatik (Struktur graphene $\rightarrow C=C$) dan gugus fungsi (-COOH) serta hidroksil (-OH) pada biochar, sehingga membentuk $Hg-Cπ$ dan menghilangkan Hg^{2+} ;
- d) *Mekanisme Presipitasi*. Pembentukan kompleks mineral ($Hg_2(OH)_2$) dalam keadaan basa melalui Presipitasi Hg^{2+} menjadi larut dalam air dan mengendap dengan struktur

- pengikat pada gugus karboksil yaitu lakton (Yardim *et al.*, 2003);
- e) *Reaksi kompleksasi*, dimana terdapat gugus fungsi yang mengandung oksigen seperti gugus -COOH dan -OH bereaksi dengan Hg^{2+} membentuk $(-COO)_2Hg$ dan $(-O)_2Hg$ Kompleks. Rumus reaksi adalah sebagai berikut (Kong *et al.*, 2011): Berikut reaksi dari kompleksasi:
- $$2 (-COOH) + Hg^{2+} \rightarrow (-COO)_2 -Hg + 2H^+ \dots\dots (1)$$
- $$2 (-OH) + Hg^{2+} \rightarrow (-O)_2 -Hg + 2H^+ \dots\dots\dots (2)$$
- (Guo *et al.*, 2020).



Gambar 3. Perubahan konsentrasi K^+ , Na^+ dan Hg^{2+} setelah Hg^{2+} teradsorpsi oleh karbon (Guo *et al.*, 2020)



Gambar 4. Mekanisme biochar dalam menstabilkan logam berat di larutan tanah (Tan *et al.*, 2015)

Mekanisme dalam penurunan kadar merkuri (Hg^{2+}) dapat dilakukan dengan beberapa reaksi yaitu adsorpsi elektrostatis, pertukaran ion, reduksi, presipitasi dan kompleksasi. Diantara semua mekanisme adsorpsi tersebut, didapatkan reaksi kompleksasi yang memiliki peran lebih besar dibandingkan mekanisme lainnya. Hal ini dikarenakan pada biochar terdapat gugus -COOH dan -OH yang berikatan dengan Hg^{2+} . Semakin tinggi luas permukaan spesifik biochar, maka semakin tinggi juga tingkat adsorpsinya. Dalam hal ini, gugus fungsi (COOH) memiliki tingkat kontribusi lebih besar daripada gugus fungsi -OH, karena reaksi yang dihasilkan dapat mengikat merkuri hingga ke dasar air (Mengendap). Mekanisme tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.

Sifat dan karakteristik biochar sekam padi

Biochar merupakan arang aktif hasil pembakaran tak sempurna atau dengan kondisi O_2 terbatas (Pyrolysis) yang diproduksi dari berbagai sumber. Sumber bahan baku yang dapat

digunakan yaitu sekam padi, kayu-kayuan, serbuk gergaji, tongkol jagung, pupuk kandang, dan batok kelapa. Masing-masing bahan baku tersebut memiliki kemampuan yang berbeda dalam mempengaruhi kualitas tanah. Menurut (Annisa & Hairani, 2021), bahwa komposisi kimia dari tiap bahan baku bervariasi seperti selulosa atau holoselulosa, lignin dan abu, sehingga mempengaruhi laju pemanasan dalam pirolisis.

Selama proses pembakaran, suhu yang dikehendaki berkisar antara 300-700°C, sehingga kandungan karbon dari biochar akan lebih tinggi 70-80% untuk meningkatkan pori-pori biochar dalam berperan sebagai adsorben dan adsorben didalam tanah (Komarayati *et al.*, 2007; Lehmann, 2012). Hal ini mengindikasikan semakin tinggi suhu selama pembakaran, maka mempercepat proses karbonisasi dalam waktu singkat. Prospek kedepan dari biochar dapat berperan sebagai solusi ramah lingkungan untuk mengurangi residu pertanian dan meningkatkan kesuburan tanah khususnya sekam padi.

Jenis limbah yang dihasilkan oleh padi berupa sekam padi, bekatul dan jerami. Sekam padi merupakan limbah pertama yang dihasilkan pada tahap penggilingan setelah panen mengandung 30-50% karbon organik. Menurut (Singh, 2018) bahwa limbah sekam padi yang dapat dijadikan sebagai biochar yaitu 20% dari berat kering padi yang mengandung 50% selulosa, 25-30% lignin dan 15-20% silika. Rendahnya kadar lignin dan selulosa

menyebabkan kandungan yang terdapat pada sekam padi cepat menguap dan perlahan menghilang selama pembakaran dan residu utamanya berupa silikat. Oleh sebab itu, karakteristik kimia maupun fisik dari biochar sekam padi sangat tergantung pada (1) Komposisi sekam padi; (2) Suhu pembakaran; (3) Waktu pembakaran. Berikut karakteristik biochar sekam padi.

Tabel 1. Karakteristik dan kualitas biochar sekam padi

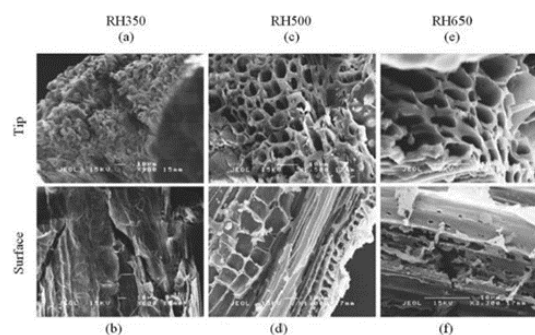
Sumber biomassa	Suhu pirolisis (C°)	Karakteristik biochar								Referensi
		Karakteristik fisik biochar		Karakteristik kimia biochar						
		Luas permukaan spesifik (m ² /g)	pH	Abu (%)	C-Org (g/kg)	N-tot (g/kg)	P-tot (g/kg)	K-tot (g/kg)	KTK (cmol/kg)	
Sekam padi	300	78,401*	7,4	-	31,92	0,14	0,93	1,92	32,34	(Hamzah & Hapsari, 2017)
Sekam padi	400	101,29*	8,6	27,5	54,1	4,9	-	-	-	(Nwajiaku <i>et al.</i> , 2018)
Sekam padi	500	230,91**	9,2	-	47,8	-	-	-	17,6	(Ghorbani <i>et al.</i> , 2019)
Sekam padi	600	292,59*	9,9	47	54,5	11	-	-	-	(Windeatt <i>et al.</i> , 2014)

Ket: * = (Jia *et al.*, 2018); ** = (Claoston *et al.*, 2014)

Disamping itu, karakteristik fisik dari biochar sekam padi (BSP) terdapat pada Gambar 5. Ada perbedaan struktur BSP pada ketiga suhu pirolisis yang ditunjukkan pada Gambar 5 (Claoston *et al.*, 2014). Pada suhu 500°C, struktur BSP yang memiliki kandungan SiO₂, Al₂O₃ dan Fe₂O₃ mengalami perubahan bentuk menjadi sarang lebah dan banyak pori-pori yang terbentuk setelah pemanasan pada suhu tersebut. Pada suhu 350°C pori-pori dari BSP tidak sepenuhnya berkembang sedangkan pada suhu 650°C pola regulernya dapat dihancurkan yang mengindikasikan banyak pori-pori yang terbentuk pada struktur BSP. Hal tersebut menunjukkan bahwa morfologi dari BSP sangat dipengaruhi oleh suhu pemanasan pirolisis yang semakin tinggi suhu, maka struktur fisik biochar akan terbentuk sempurna.

Meningkatnya luas permukaan dapat meningkatkan kualitas biochar khususnya daya adsorpsi terhadap unsur logam maupun non logam. Dengan demikian, penting untuk dilakukan pengawasan pada laju suhu pirolisis BSP agar memastikan proses karbonisasi berjalan dengan baik. Karakteristik kimia dan

fisik dari biochar sekam padi tersebut, memiliki kaya manfaat bagi tanah. Tingginya daya adsorpsi BSP berperan sebagai peretensi yang baik untuk memperbaiki sifat fisik, kimia maupun biologi tanah. Kadar lengas tanah merupakan salah satu sifat tanah yang penting untuk pertumbuhan tanaman. (Abukari, 2019) melaporkan bahwa pemberian BSP kedalam tanah dapat meningkatkan kapasitas menahan air didalam tanah dan merekomendasikan pengaplikasian sebanyak 4 ton/Ha.



Gambar 5. Karakteristik fisik dari Scanning electron microscope (SEM) biochar sekam padi pada suhu pirolisis 350°C, 500°C dan 650°C (Claoston *et al.*, 2014).

Tingginya jumlah BET yang terdapat pada Tabel 1. Seiring dengan bertambahnya suhu pirolisis mengindikasikan bahwa semakin tingginya kemampuan BSP dalam mengikat air maupun mineral didalam tanah. Hal tersebut dikarenakan adanya pori-pori mikro dan meso pada BSP yang secara efektif dan kuat menahan dengan gaya kapiler. Selain itu, BSP juga meningkatkan porositas tanah dan air menembus tanah lebih baik pada berbagai jenis tanah. Sebagai contoh, pemberian BSP pada tanah basalt dan grey soil serta Savannah Ochrosol dapat meningkatkan kapasitas tanah menahan air (Abukari, 2019; Duong *et al.*, 2017).

Kemampuan biochar sekam padi dalam menurunkan kadar merkuri (Hg)

Biochar merupakan bahan organik yang memiliki manfaat multifungsi. Disamping berperan sebagai pembenah tanah, biochar juga mampu meningkatkan karbon tanah dalam mengadsorpsi emisi gas rumah kaca dan memperbaiki kualitas tanah (unsur hara N, P, K, Ca, Mg, S, pH tanah, kapasitas tukar kation (KTK) dan meningkatkan immobilisasi logam berat) untuk meningkatkan produksi pertanian (Gascó *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2013; Romadhan *et al.*, 2022; Uchimiya *et al.*, 2010). Maka dari itu, manfaat potensial biochar secara fisik dan kimia untuk mengurangi aktivitas ion logam berat pada larutan tanah.

Tabel 2. Beberapa hasil penelitian tentang penurunan kadar merkuri akibat pemberian biochar sekam padi

No.	Sumber bahan	Jenis tanah	Komoditi	Pengaruh biochar	Mekanisme	Referensi
1.	Biochar sekam padi dan pupuk kandang ayam	Tanah bekas tambang emas, Sumatera Barat	Bunga matahari (Helianthus annuus L.)	<ul style="list-style-type: none"> •Peningkatan pH tanah akibat kombinasi biochar dan pupuk kandang ayam hingga 1,33 unit •Penurunan kadar merkuri (Hg) didalam tanah hingga 12,45 ppm dibandingkan control akibat penambahan biochar 100%. 	<ul style="list-style-type: none"> •Semakin tinggi proporsi biochar dalam kombinasi, maka semakin tinggi unit pH yang meningkat •Ketersediaan merkuri (Hg) stabil didalam tanah karena adanya proses khelat dari biochar dan bahan organik. 	(Romadhan, 2022)
2	Modifikasi biochar sekam padi dengan sulfur	Areal lahan tercemar Hg (Pertambangan) di Cina Selatan	-	<ul style="list-style-type: none"> •Aktivasi biochar dengan sulfur meningkatkan kandungannya dari 0,20% menjadi 13,04%. •Pengaplikasian biochar termodifikasi dapat mengurangi Hg pada larutan tanah hingga <1,2 mg/l dengan tingkat efisiensi >94%. 	<ul style="list-style-type: none"> •Unsur S pada biochar termodifikasi bereaksi dengan Hg dan membentuk HgS fase padat yang stabil melalui pengendapan didalam tanah. 	(O'Connor <i>et al.</i> , 2018)

Salah satu faktor yang mempengaruhi kualitas biochar yaitu suhu pirolisis ketika proses karbonisasi. Semakin tinggi suhu pirolisis, maka kadar C-organik dan luas permukaan dapat kualitas biochar khususnya daya adsorpsi terhadap unsur logam maupun non logam juga meningkat (Tabel 1). Sejalan dengan penelitian (Aryanti & Hera, 2019) melaporkan bahwa kadar C-Organik rendah dalam tanah, menyebabkan ketersediaan merkuri lebih tinggi karena peranan bahan organik mengikat dan menonaktifkan

mobilitas dari merkuri (Hg) pada tanah tercemar. Umumnya, merkuri cenderung akan bertahan lebih lama di dalam tanah karena teradsorb oleh koloid tanah. Tanah yang kaya akan bahan organik, cenderung membentuk senyawa kompleks atau dikenal sebagai kompleks organik logam dari hasil reaksi dengan logam berat, sehingga tingkat kelarutannya berkurang. Efisiensi penggunaan biochar yang berperan sebagai agen remediasi dipengaruhi oleh suhu pemanasan, sumber biochar, ukuran partikel,

perubahan dosis, sifat kimia polutan dan jenis tanah. Hasil penelitian remediasi dan perbaikan sifat kimia tanah akibat penambahan biochar sekam padi yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Perspektif potensi pengembangan biochar

Seiring dengan berkembangnya penelitian tentang biochar, inovasi berbasis limbah sangat massif digaungkan sebagai pengganti karbon aktif untuk meminimalkan dampak lingkungan yang secara keseluruhan sebesar 56% (Hou *et al.*, 2016). Hal ini dikarenakan tingginya limbah biomassa potensial yang dapat digunakan baik bersumber dari perkebunan maupun pangan sebagai bahan baku biochar. Sehingga konsep modifikasi biochar sangat penting untuk dilakukan untuk memperkaya refrensi dalam mengurangi dampak lahan tercemar logam berat khususnya. Dalam pengembangannya, terdapat beberapa perspektif yang harus dipertimbangkan

1. Pengembangan biochar pada beberapa penelitian dengan hasil yang signifikan lebih banyak berdasarkan Uji Laboratorium. Pengujian skala lapang dengan model biochar teraktivasi sangat minim informasi dan membutuhkan biaya yang cukup mahal, sehingga dibutuhkan upaya paling sederhana dengan biaya rendah.
2. Produksi biochar dengan skala lapangan juga menjadi perhatian khusus untuk bisa dilakukan secara efektif dan efisien terutama pada bahan baku yang memiliki kandungan lignin tinggi salah satunya tempurung kelapa dan tongkol jagung. Umumnya biochar dengan berasal dari kayu-kayuan atau tempurung memiliki tingkat kesulitan dalam menghancurkan partikel menjadi ± 2 mm. Sehingga dibutuhkan studi yang berkelanjutan baik dari segi teknik produksi, aplikasi, dan diterima oleh masyarakat merupakan hal penting untuk dirancang.

Beberapa laporan hasil penelitian mengemukakan bahwa biochar yang telah teraktivasi secara kimia ataupun fisik dapat meningkatkan adsorpsi dan degradasi polutan salah satunya Hg didalam tanah dibandingkan tanpa aktivasi. Namun penggunaan bahan kimia berupa asam dan basa kuat dapat menimbulkan ancaman bagi lingkungan. Sehingga dibutuhkan alternative berupa *reagent* yang ramah lingkungan dalam memodifikasi biochar seperti

asam tartarat, asam sitrat, dan asam asetat telah berhasil digunakan (Sun *et al.*, 2015; Zhu *et al.*, 2008). Dengan demikian, penelitian kedepannya harus focus pada pengembangan modifikasi biochar yang ramah lingkungan dan murah.

Kesimpulan

Peranan dari biochar sekam padi sangat penting untuk meremediasi tanah tercemar merkuri (Hg) di dalam tanah. Bahan organik tersebut dapat secara efektif dan efisien dijadikan sebagai alternatif dalam meningkatkan produktivitas tanah dan meminimalkan dampak lingkungan sebesar 56%. Mekanisme penyerapan logam berat merkuri oleh biochar dilakukan dengan beberapa cara yaitu (1) Ikatan elektrostatik; (2) K^+ dan Na^+ dengan ion Hg^{2+} dan Hg^+ secara bersamaan; (3) Reduksi kovalen merkuri dari Hg^{2+} menjadi Hg^+ dan Hg^0 ; (4) Pembentukan kompleks mineral ($Hg_2(OH)_2$) melalui presipitasi Hg^{2+} dengan gugus karboksil yaitu lakton; (5) Reaksi kompleksasi pada gugus fungsi yang mengandung oksigen seperti gugus $-COOH$ dan $-OH$. Dalam penerapannya, pengaplikasian biochar secara kombinasi dengan bahan organik lainya dapat meningkatkan daya jerap logam berat didalam tanah dibandingkan tunggal. Kombinasi tersebut secara signifikan meningkatkan pH tanah dari 0,3-1,33 unit mendekati netral, dan penurunan kadar merkuri hingga 12,45 ppm.

Ucapan Terima Kasih

Terimakasih penulis sampaikan kepada bapak Prof. Ir. Mohamad Taufik Fauzi, M.Sc., Ph.D. dan Dr. Ir. A. A Ketut Sudarmawan, M.P dan Prof. Prof. Ir. Suwardji, M.App.Sc., Ph.D. yang telah membantu dalam menyelesaikan penulisan artikel review jurnal ini.

Referensi

- Abbas, K., Znad, H., & Awual, M. R. (2018). A ligand anchored conjugate adsorbent for effective mercury(II) detection and removal from aqueous media. *Chemical Engineering Journal*, 334, 432–443. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.054>

- Abukari, A. (2019). Influence of Rice Husk Biochar on Water Holding Capacity of Soil in The Savannah Ecological Zone of Ghana. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 7, 888–891. DOI: <https://doi.org/10.24925/turjaf.v7i6.888-891.2488>
- Agustono, B., Lamid, M., Ma'ruf, A., & Purnama, M. T. E. (2017). Identifikasi Limbah Pertanian dan Perkebunan sebagai Bahan Pakan Inkonsvensional di Banyuwangi. *Jurnal Medik Veteriner*, 1(1), 12–22. DOI: <https://doi.org/10.20473/jmv.vol1.iss1.2017.12-22>
- AMAP. (2013). Technical Background Report for the Global Mercury Assessment. *Arctic Monitoring and Assessment Programme*, 263.
- Annisa, W., & Hairani, A. (2021). *Biochar-Materials for Remediation on Swamplands: Mechanisms and Effectiveness Biochar-Bahan Remediasi Tanah Rawa: Mekanisme dan Efektivitasnya*. DOI: <https://doi.org/10.21082/jsdl.v15n1.2021.13-22>
- Aryanti, E., & Hera, N. (2019). Sifat Kimia Tanah Area Pasca Tambang Emas: (Studi Kasus Pertambangan Emas Tanpa Izin Di Kenegerian Kari Kecamatan Kuantan Tengah, Kabupaten Kuantan Singingi). *Jurnal Agroteknologi*, 9, 21. DOI: <https://doi.org/10.24014/ja.v9i2.5681>
- Bobby J. Polii, & Desmi N. Sonya. (2002). Pendugaan Kandungan Merkuri Dan Sianida Di Daerah Aliran Sungai (Das) Buyat Minahasa. *Ekoton*, 2(1), 31–37.
- Carro, L., Barriada, J. L., Herrero, R., & Sastre de Vicente, M. E. (2011). Adsorptive behaviour of mercury on algal biomass: Competition with divalent cations and organic compounds. *Journal of Hazardous Materials*, 192(1), 284–291. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.05.017>
- Claoston, N., Samsuri, A. W., Ahmad Husni, M. H., & Mohd Amran, M. S. (2014). Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of empty fruit bunch and rice husk biochars. *Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 32(4), 331–339. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X14525822>
- Clarkson, T. W., & Magos, L. (2006). The toxicology of mercury and its chemical compounds. *Critical Reviews in Toxicology*, 36(8), 609–662. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408440600845619>
- Das, O., Sarmah, A. K., & Bhattacharyya, D. (2015). A sustainable and resilient approach through biochar addition in wood polymer composites. *Science of The Total Environment*, 512–513, 326–336. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.063>
- Duong, V., Khanh, N., Nguyen, N., Phi, N., Nguyen, T.-D., & Xo, D. (2017). Impact of biochar on the water holding capacity and moisture of basalt and grey soil. *Journal of Science Ho Chi Minh City Open University*, 7, 36–43.
- Fellet, G., Marmiroli, M., & Marchiol, L. (2014). Elements uptake by metal accumulator species grown on mine tailings amended with three types of biochar. *Science of The Total Environment*, 468–469, 598–608. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.072>
- Gascó, G., Paz-Ferreiro, J., Cely, P., Plaza, C., & Méndez, A. (2016). Influence of pig manure and its biochar on soil CO₂ emissions and soil enzymes. *Ecological Engineering*, 95, 19–24. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.039>
- Ghorbani, M., Asadi, H., & Abrishamkesh, S. (2019). Effects of rice husk biochar on selected soil properties and nitrate leaching in loamy sand and clay soil. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 258–265. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.005>
- Guo, X., Li, M., Liu, A., Jiang, M., Niu, X., & Liu, X. (2020). Adsorption Mechanisms and Characteristics of Hg²⁺ Removal by

- Different Fractions of Biochar. *Water*, 12, 2105. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12082105>
- Hamzah, A., & Hapsari, R. I. (2017). Remediasi Lahan Pertanian yang Tercemar Logam Berat untuk Menghasilkan Produk Pangan yang Sehat. *Seminar Nasional Hasil Penelitian Universitas Kanjuruhan Malang*, 5(1), 133–139.
- Hamzah, A., & Priyadarshini, R. (2019). Remediasi Tanah Tercemar Logam Berat. *UNITRI Press*, 1(0341), 105–112.
- Henrianto, A., Okalia, D., & Mashadi, M. (2019). Uji Beberapa Sifat Fisika Tanah Bekas Tambang Emas Tanpa Izin (Peti) Di Tiga Kecamatan Di Daratan Sepanjang Sungai Kuantan. *Jurnal Agronomi Tanaman Tropika (Juatika)*, 1, 19–31. DOI: <https://doi.org/10.36378/juatika.v1i1.41>
- Hou, D., Gu, Q., Ma, F., & O'Connell, S. (2016). Life cycle assessment comparison of thermal desorption and stabilization/solidification of mercury contaminated soil on agricultural land. *Journal of Cleaner Production*, 139, 949–956. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.108>
- Hseu, Z.-Y., SU, S.-W., Lai, H., Guo, H.-Y., CHEN, T.-C., & Chen, Z.-S. (2010). Remediation techniques and heavy metal uptake by different rice varieties in metal-contaminated soils of Taiwan: New aspects for food safety regulation and sustainable agriculture. *Soil Science & Plant Nutrition*, 56, 31–52. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00442.x>
- Jia, Y., Liu, J., Su, S., Liang, Q., Zeng, X., & Li, T. (2018). Study of the Effect of Pyrolysis Temperature on the Cd²⁺ Adsorption Characteristics of Biochar. *Applied Sciences*, 8, 1019. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8071019>
- Kılıç, M., Keskin, M. E., Mazlum, S., & Mazlum, N. (2008). Hg(II) and Pb(II) adsorption on activated sludge biomass: Effective biosorption mechanism. *International Journal of Mineral Processing*, 87(1), 1–8. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.minpro.2008.01.001>
- Komarayati, S., Mustaghfirin, M., & Sofyan, K. (2007). Kualitas Arang Kompos Limbah Industri Kertas dengan Variasi Penambahan Arang Serbuk Gergaji The qualities of Compost Charcoal Manufactured from Paper-mill Waste with Varying Addition of Charcoal Sawdust. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kayu Tropis*, 5(2), 78–84. URL: <http://ejournalmapeki.org/index.php/JITKT/article/view/265>
- Kong, H., He, J., Gao, Y., Wu, H., & Zhu, X. (2011). Cosorption of Phenanthrene and Mercury(II) from Aqueous Solution by Soybean Stalk-Based Biochar. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(22), 12116–12123. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf202924a>
- Lehmann J, J. S. (2012). Biochar for Environmental Management. In *Biochar for Environmental Management*.
- Liu, X., Zhang, A., Ji, C., Joseph, S., Bian, R., Li, L., Pan, G., & Paz-Ferreiro, J. (2013). Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—a meta-analysis of literature data. *Plant and Soil*, 373(1), 583–594. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1806-x>
- Lubis, S. S. (2020). Bioremediasi Logam Berat Oleh Fungi Laut. *Amina*, 1(2), 91–102. DOI: <https://doi.org/10.22373/amina.v1i2.411>
- Mariwy, A., Male, Y. T., & Manuhutu, J. B. (2019). Mercury (Hg) Contents Analysis in Sediments at Some River Estuaries in Kayeli Bay Buru Island. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 546(2), 22012. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/546/2/022012>
- NEDES. (2019). *Mercury: Sources, Transport, Deposition and Impacts*.
- NTB, D. (2018). *Laporan Kajian Teknis – Rencana Aksi Daerah Pengurangan dan Penghapusan Merkuri (RAD-PPM)*.
- Nwajiaku, I. M., Olanrewaju, J. S., Sato, K., Tokunari, T., Kitano, S., & Masunaga, T. (2018). Change in nutrient composition of biochar from rice husk and sugarcane bagasse at varying pyrolytic temperatures. *International Journal of Recycling of*

- Organic Waste in Agriculture*, 7(4), 269–276. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0213-y>
- O'Connor, D., Peng, T., Li, G., Wang, S., Duan, L., Mulder, J., Cornelissen, G., Cheng, Z., Yang, S., & Hou, D. (2018). Sulfur-modified rice husk biochar: A green method for the remediation of mercury contaminated soil. *Science of The Total Environment*, 621, 819–826. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.213>
- Pratama, B. S., Aldriana, P., Ismuyanto, B., & Hidayati, A. S. D. S. N. (2018). Konversi Ampas Tebu Menjadi Biochar Dan Karbon Aktif Untuk Penyisihan Cr(VI). *Jurnal Rekayasa Bahan Alam Dan Energi Berkelanjutan*, 2(1 SE-Articles), 7–12. DOI: <https://doi.org/10.21776/ub.rbaet.2018.002.01.02>
- Romadhan, P. G. H. (2022). *Correlation Of Soil Acidity Degree And Mercury Content Of Ex-Gold Mine Land*. 12(1), 62–71.
- Romadhan, P., Gusmini, G., & Hermansah, H. (2022). Perbaikan Sifat Kimia Lahan Bekas Tambang Emas Melalui Aplikasi Biochar Sekam Padi dan Pupuk Kandang Ayam. *Agrotrop : Journal on Agriculture Science; Vol 12 No 1*. DOI: 10.24843/AJoAS.2022.V12.I01.P09
- Schuster, E. (1991). The behavior of mercury in the soil with special emphasis on complexation and adsorption processes - A review of the literature. *Water Air & Soil Pollution*, 56, 667–680.
- Setiawan, K. A., Sutedjo, S., & Matius, P. (2018). Komposisi Jenis Tumbuhan Bawah Di Lahan Revegetasi Pasca Tambang Batubara. *ULIN: Jurnal Hutan Tropis*, 1(2), 182–195. DOI: <https://doi.org/10.32522/ujht.v1i2.1012>
- Setyowati, J. (2018). *Kinetika Adsorpsi Ion Logam Cu, Cd, dan Mn dalam Air Limbah Menggunakan Adsorben Serbuk Gergaji Kayu Meranti*. 1–74.
- Shafeeyan, M. S., Daud, W. M. A. W., Houshmand, A., & Shamiri, A. (2010). A review on surface modification of activated carbon for carbon dioxide adsorption. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89(2), 143–151. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.japa.2010.07.006>
- Singh, B. (2018). Rice husk ash. In *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete: Characterisation, Properties and Applications*. Elsevier Ltd. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00013-4>
- Sun, L., Chen, D., Wan, S., & Yu, Z. (2015). Performance, kinetics, and equilibrium of methylene blue adsorption on biochar derived from eucalyptus saw dust modified with citric, tartaric, and acetic acids. *Bioresource Technology*, 198, 300–308. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.026>
- Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., & Yang, Z. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*, 125, 70–85. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.058>
- Uchimiya, M., Lima, I. M., Klasson, K. T., & Wartelle, L. H. (2010). Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: Roles of natural organic matter. *Chemosphere*, 80(8), 935–940. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.05.020>
- Walcarious, A., & Delacôte, C. (2005). Mercury(II) binding to thiol-functionalized mesoporous silicas: critical effect of pH and sorbent properties on capacity and selectivity. *Analytica Chimica Acta*, 547(1), 3–13. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aca.2004.11.047>
- Wang, J., Feng, X., Anderson, C. W. N., Xing, Y., & Shang, L. (2012). Remediation of mercury contaminated sites – A review. *Journal of Hazardous Materials*, 221–222, 1–18. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.035>
- Wang, L., Hou, D., Cao, Y., Ok, Y. S., Tack, F. M. G., Rinklebe, J., & O'Connor, D. (2020). Remediation of mercury contaminated soil, water, and air: A review of emerging materials and innovative

- technologies. *Environment International*, 134, 105281. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105281>
- WHO. (2017). *Mercury and Health*. <https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/mercury-and-health#:~:text=Exposure to mercury20even small,%2C kidneys%2C skin and eyes>
- Wijaya, H. (2018). *Kajian Dosis Pupuk Abu Sekam Padi terhadap Pertumbuhan dan Serapan Si pada Tanaman Jagung (Zea mays L.)* [Mataram]. URL: <http://eprints.unram.ac.id/7440/1/JURNA L.pdf>
- Windeatt, J. H., Ross, A. B., Williams, P. T., Forster, P. M., Nahil, M. A., & Singh, S. (2014). Characteristics of biochars from crop residues: Potential for carbon sequestration and soil amendment. *Journal of Environmental Management*, 146, 189–197. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.003>
- Y, A. (2014). *Uji Serapan Merkuri (Hg) oleh Tanaman Jagung (Zea mays L.) pada Tanah Tercemar Tailing Gelondongan dan Tong*. Mataram.
- Yardim, M. F., Budinova, T., Ekinci, E., Petrov, N., Razvigorova, M., & Minkova, V. (2003). Removal of mercury (II) from aqueous solution by activated carbon obtained from furfural. *Chemosphere*, 52(5), 835–841. DOI: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00267-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00267-4)
- Zhu, B., Fan, T., & Zhang, D. (2008). Adsorption of copper ions from aqueous solution by citric acid modified soybean straw. *J. Hazard. Mater.*, 153, 300