

Pengaruh Remediasi Biochar dan Bioslurry Tanah Tercemar terhadap Kadar Timbal Terlarut dan Bioavailabilitasnya pada Sawi Hijau (*Brassica rapa*)

Himawan* dan Darwanta

Jurusan Kimia Universitas Cenderawasih, Jayapura Indonesia

ABSTRACT

Remediasi tanah dengan metode amobilisasi dapat dilakukan untuk mengaktifkan lahan pertanian tercemar timbal secara efektif dengan biaya rendah. Pada penelitian ini biochar dan bioslurry digunakan untuk amandemen tanah tercemar dan diuji keefektifannya mengurangi kadar Pb terlarut dan Pb yang diserap tanaman sawi hijau (*B. rapa*) di rumah kaca. Selanjutnya budidaya sawi di lapangan dilakukan untuk mengetahui dampak amandemen terhadap pertumbuhan dan kadar Pb-sawi serta kemungkinan kontaminasi Pb pada tanah sekitar. Sampel tanah tercemar diambil dari Desa Cinangka, Bogor sedangkan bioslurry dan sisa kegiatan pertanian/peternakan diperoleh dari Desa Jeruk Sawit di sekitar Kota Surakarta. Amandemen tanah ber-Pb 4.296 ppm dengan kombinasi biochar dan bioslurry (0; 2,5; 5,0; 10%) mampu mengurangi kelarutan Pb s.d 87,7% sekaligus mengurangi risiko ekologisnya dari tingkat moderat ke tingkat rendah. Pada uji rumah kaca, kombinasi biochar dan bioslurry menurunkan kadar Pb-daun sawi mencapai maksimal 63,11% dari 44,00 menjadi 16,23 ppm. Pertumbuhan tanaman sawi meningkat pada penambahan bioslurry tetapi penambahan biochar pada kadar 5 dan 10% menekan pertumbuhan yang kemungkinan karena pH yang terlalu tinggi untuk sawi. Uji lapangan selama satu kali masa tanam dengan kadar biochar dan bioslurry (5%/5%) mengakibatkan pertumbuhan sawi yang 20x lebih baik dibanding hasil budidaya rumah kaca, menurunkan Pb-daun dari 34,92 menjadi 21,71 ppm, serta mampu mencegah migrasi Pb ke sekitar media tanam.

Keywords: amobilisasi, tanah tercemar timbal, biochar, bioslurry, remediasi, *B. rapa*

ABSTRAK

Immobilization method of soil remediation can be conducted to activate lead contaminated agricultural land effectively at low cost. In this study, biochar and bioslurry were used to amend polluted soil and tested their effectiveness in reducing the levels of dissolved Pb and Pb absorbed by the green mustard (*B. rapa*) in the greenhouse. Furthermore, mustard cultivation in the field was carried out to determine the impact of the amendment on the growth and Pb levels of green mustard and the possibility of Pb contamination in the surrounding soil. Polluted soil samples were taken from Cinangka Village, Bogor, while bioslurry and the byproduct of agricultural/animal husbandry were obtained from Jeruk Sawit Village around Surakarta City. Polluted soil containing 4,296 ppm Pb amended with a combination of biochar and bioslurry (0; 2.5; 5.0; 10%) were able to reduce Pb solubility up to 87.7% while reducing the ecological risk from moderate to low level. In the greenhouse test, the combination of biochar and bioslurry reduced the Pb level in mustard leaves upto 63.11% from 44.00 to 16.23 ppm. The growth of mustard plants increased with the addition of bioslurry but the addition of biochar at levels of 5 and 10% suppressed growth which was probably due to the pH being too high for green mustard. Field trial during one planting period with biochar and bioslurry level (5%/5%) resulted in 20x better growth of green mustard than greenhouse cultivation, reduced leaf-Pb from 34.92 to 21.71 ppm, and was able to prevent Pb migration around the planting medium.

Kata kunci: immobilization, lead contaminated soil, biochar, bioslurry, remediation, *B. rapa*

Sitasi: Hilmawan dan Darwanta. (2022). Pengaruh Remediasi Biochar dan Bioslurry Tanah Tercemar Terhadap Kadar Timbal Terlarut dan Bioavailabilitasnya pada Sawi Hijau (*Brassica rapa*). Jurnal Ilmu Lingkungan, 20(2), 335-343, doi:10.14710/jil.20.2.335-343

1. Introduction

Pencemaran logam berat merupakan masalah dunia. Timbal merupakan logam berat pencemar tanah yang berbahaya dan dapat mengancam keamanan pangan utamanya di negara agraris. Remediasi tanah tercemar timbal dengan bahan alami yang murah dan melimpah penting dilakukan di negara berkembang. Metode amobilisasi memungkinkan remediasi *in situ*

yang cepat, efektif, dan efisien. Teknik amobilisasi merupakan teknik remediasi tanah untuk mengurangi mobilitas / kelarutan logam yang dapat dilakukan dengan temperatur tinggi (vitrikifikasi), penggunaan semen Portland, penambahan bahan organik atau anorganik (Khalid et al 2016). Hal ini dilakukan untuk mempercepat perubahan mobilitas dan toksisitas logam di tanah (stabilisasi). Bahan yang paling sering digunakan adalah lempung, semen, zeolit, mineral-

* Corresponding author: himawanhim.11@gmail.com

mineral, fosfat dan kompos organik (Wuana dan Okieimen, 2011; Sharma et al., 2016).

Bioslurry (BS), produk samping pembuatan biogas, selain banyak dimanfaatkan pada bidang pertanian juga diketahui kaya akan senyawa kelator yang berpotensi menjadi bahan stabilisasi tanah tercemar logam (Sanchez et al 2016); (De Groot and Bogdanski 2013). Arang hayati hasil pembakaran tidak sempurna biomassa (biochar/BC) bersifat alkalis, merupakan bahan murah dan melimpah yang memiliki sifat penyerapan (sorpsi) yang tinggi (Bandara et al 2017)(Yang et al 2016) Kombinasi penambahan bioslurry dan biochar pada tanah tercemar timbal diharapkan mampu mengurangi kelarutan timbal dan mengurangi penyerapan Pb oleh tanaman. Juga berperan untuk mengaktifkan tanah tercemar agar produktif. Metode amobilisasi tanah dengan penambahan zat amandemen yang murah seperti BC dan BS dinilai efisien dan berdampak positif terhadap kualitas tanah. Dampak positif lainnya pada tanah yang diberi bioslurry adalah peningkatan kesuburan, keremahan dan daya ikat air, serta sifat-sifat mikrobiologi tanah. Budidaya tanaman pada tanah tercemar Pb dengan teknik stabilisasi bioslurry dan biochar akan mengurangi kelarutan Pb di tanah, menurunkan toksisitasnya, meningkatkan keamanan orang di sekitarnya, meningkatkan produktifitas, dan menghasilkan produk tanaman yang lebih aman sehingga mendukung pertanian berkelanjutan.

Tanaman sawi-sawian banyak digunakan pada fitoremediasi karena tahan terhadap logam dan memiliki kemampuan akumulasi logam (Baikhamurova, 2020) (Mourato et al. 2015). Sawi hijau, caisim (*Brassica rapa*) merupakan tanaman sayuran yang populer karena mudah dibudidayakan, tumbuh cepat, dan memiliki rasa yang digemari. Penelitian ini bertujuan: (i) mengukur efektifitas kombinasi BC/BS terhadap kondisi kimia tanah, pengurangan kadar Pb tanah terlarut (efisiensi amobilisasi) dan risiko ekologis; (ii) mengetahui efek BC/BS terhadap kelimpahan mikroba tanah, pertumbuhan tanaman sawi dan kadar Pb daun pada uji rumah kaca); serta (iii) mengevaluasi efektifitas amobilisasi BC/BS pada uji lapangan.

2. Metode Penelitian

Tanah tercemar timbal pengolahan aki bekas berasal dari Desa Cinangka, Bogor. Tanah tersebut bersifat asam (pH 5,5), bertekstur geluhan (loam), dan minim bahan organik. Bioslurry (BS) dan kotoran ayam yang digunakan untuk pembuatan BC diperoleh dari salah satu peternakan tradisional di Desa Jeruk Sawit, Gondangrejo, Karanganyar. Dari data XRF, komposisi BS untuk unsur Ca; K; P; S; dan Si berturut-turut sebesar 7,88; 2,86; 2,26; 2,74; dan 19,16%. BC dibuat dengan pemanasan minim oksigen pada temperatur 450°C dalam sebuah *furnace* skala laboratorium. Komposisi BC untuk unsur Ca; K; P; S; dan Si berturut-turut sebesar 17,91; 18,86; 7,08; 2,25; dan 1,96%.

336

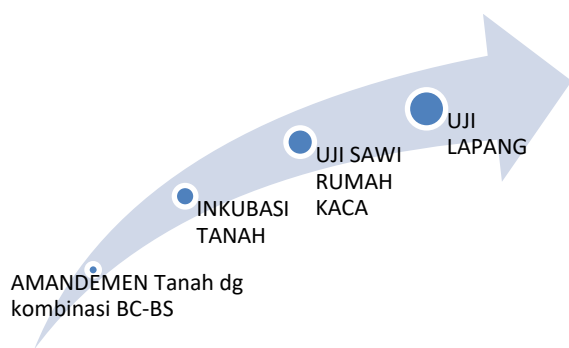
Gugus-gugus fungsi C-O, fosfat, karbonat, C=C, C=O, dan O-H diindikasikan terdapat pada BC dan BS dan hasil lengkap karakterisasi keduanya dengan FTIR dan SEM dapat dilihat pada tulisan terdahulu (Himawan et al 2021).

Tanah dipreparasi dengan dikering anginkan (air dried) selama seminggu, dihaluskan dan disaring ukuran 1,0 mm. Tanah tercemar Pb 4.296 ppm ditambah kombinasi BC/BS dan diinkubasi selama dua minggu. Sebanyak 1,0 g tanah dari tiap wadah inkubasi dimasukkan ke dalam sebuah tabung *centrifuge* 50 mL dan diekstraksi (ditambah) dengan 40 mL larutan asam asetat glasial 0,11 M. Campuran di-*shaker* selama 16 jam dan di-*centrifuge* pada 2.500 rpm selama 20 menit. Beningan (supernatan) disaring dan filtratnya dianalisis dengan AAS untuk mengukur konsentrasi Pb fraksi asam (F1) (Nemati et al 2011)(Zhang et al 2015). Pada penelitian ini digunakan rancangan acak lengkap (RAL) 3x4 faktorial dengan dua variabel (BC dan BS). BC ditambahkan pada kadar 0; 5; dan 10% sedangkan BS digunakan dengan kadar 0; 2,5; 5,0; dan 10%. Media tanam dibuat dari tanah tercemar dengan mencampurkan 5% sekam padi untuk meningkatkan porositas tanah. Penanaman dilakukan dalam pot plastik berdiameter 16 cm berisi 1,0 kg media tanam dan dilakukan dalam rumah kaca pada temperatur 20-35°C dengan penyinaran sekitar 11 jam perhari. Pemeliharaan dalam rumah kaca akan menghindari kontaminasi timbal dari debu. Setiap pot ditanami 3-6 semai (dari persemaian biji sawi berumur 6 hari) dengan pengaturan jarak yang sesuai. Penyiraman dilakukan seperlunya untuk menjaga kadar air tanah sesuai kebutuhan air tanaman. Setelah satu minggu dan tanaman sukses beradaptasi, jumlah sawi dikurangi menjadi 3 tanaman perpot. Pemanenan dilakukan setelah tanaman berumur dua bulan. Penetapan karbon mikroba dilakukan terhadap contoh tanah segar dengan metode fumigasi dan ekstraksi (Santosa dan Widati, 2007). Prosedur destruksi biomassa tanaman dilakukan dengan *hot plate* sesuai metode standar APHA, 1998. Biomassa kering dihaluskan dengan mortar sampai kurang dari 1 mm dan ditimbang 0,5 g dalam beaker glass 150 mL secara triplikasi. Campuran ditambah 10 mL HNO₃ p dan dipanaskan pada 90°C selama 45 menit. Pengadukan dilakukan seperlunya jika terbentuk busa dan sesekali dinding beaker dibilas dengan akuades. Suhu kemudian dinaikkan sekitar 120°C sampai tersisa 1 mL asam. Jika diperlukan, dilakukan penambahan asam nitrat pekat sehingga proses destruksi sempurna dan diperoleh larutan berwarna terang yang bening. Setelah didinginkan, larutan diencerkan sampai 20 mL dengan HNO₃ 1%, disaring dengan kertas saring 0,45 mikrometer (Whatman 42); dan disesuaikan volume tepat 50 mL dengan akuabides. Larutan dianalisis kadar Pb-nya dengan AAS.

Untuk mengukur keefektifan amobilisasi dihitung efisiensi amobilisasi (E) dengan rumus; %E = 100 (F1₀ - F1_a) / F1₀. Nilai F1₀ menyatakan konsentrasi Pb

fraksi satu pada tanah tanpa BC dan BS sedangkan $F1_a$ adalah konsentrasi Pb fraksi satu pada tanah yang ditambah (diamandemen) BC dan BS. RAC (% F1) menyatakan risiko atau mobilitas logam / polutan dan ditentukan dengan proporsi logam dalam F1 dari total konsentrasi logam dalam tanah. Risiko potensial adalah: % RAC <1 (tanpa risiko); $1 < \% RAC < 10$ (risiko rendah); $10 < \% RAC < 30$ (risiko sedang); $31 < \% RAC < 50$ (risiko tinggi); dan % RAC > 50 (risiko sangat tinggi) (Tytla et al. 2019).

Uji lapang dilakukan pada petak 1x2 yang dipagar kawat ram 1cm tanpa diberi naungan. Media tanah tercemar setebal 15 cm dicampur sekam 5% dengan amandemen 5/5%. Tanah sekitar media (berjarak 10 cm dari tepi petak) diambil dan diukur kadar Pb untuk mengevaluasi migrasi penyebaran timbal. Garis besar tahap penelitian diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Tahapan penelitian

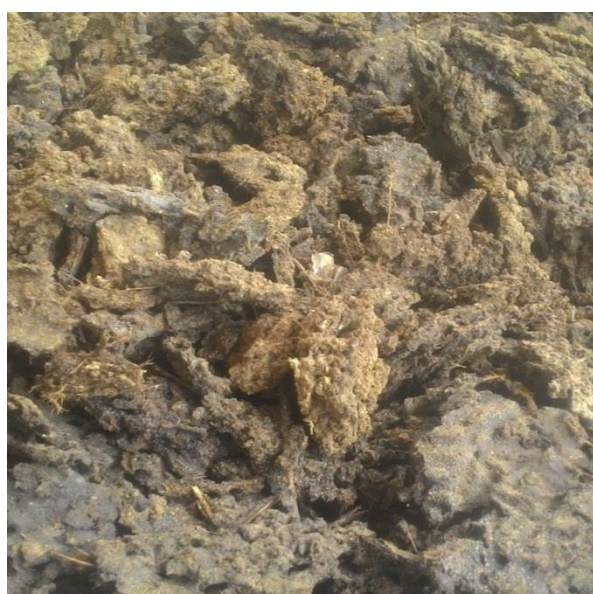
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Keefektifan kombinasi BC/BS dalam memperbaiki kimia tanah, mengurangi kadar Pb tanah terlarut (efisiensi amobilisasi) dan risiko ekologi.

Gambar 2 menampilkan kenampakan BC dan BS yang digunakan pada penelitian ini. Pada tahap inkubasi tanah, hasil pengukuran sifat tanah, kadar Pb terlarut asam, efisiensi amobilisasi (E) dan hasil pengolahannya disajikan pada Tabel 1.

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa penambahan BC dan BS menyebabkan kenaikan pH dan kadar bahan organik (LoI) tanah. Pada saat yang sama kandungan Pb pada fraksi mudah larut (F1) berkurang. Perubahan komposisi fraksi Pb tanah ini meningkatkan efisiensi amobilisasi (E) sekaligus menurunkan risiko ekologi akibat pencemaran timbal. Penambahan amandemen BC dan BS pada semua kombinasi menyebabkan amobilisasi Pb dengan efisiensi beragam berkisar antara 5,3 dan 87,7%. Efisiensi amobilisasi tertinggi (87,7%) diperoleh pada prosentase penambahan BC/BS 10/10. Pada nilai $E \geq 64\%$ (amandemen 5/0 dan seterusnya), risiko ekologis berhasil diturunkan dari tingkat **moderat** ke tingkat **rendah** sehingga tanah yang diamandemen BC/BS lebih aman untuk makhluk hidup.

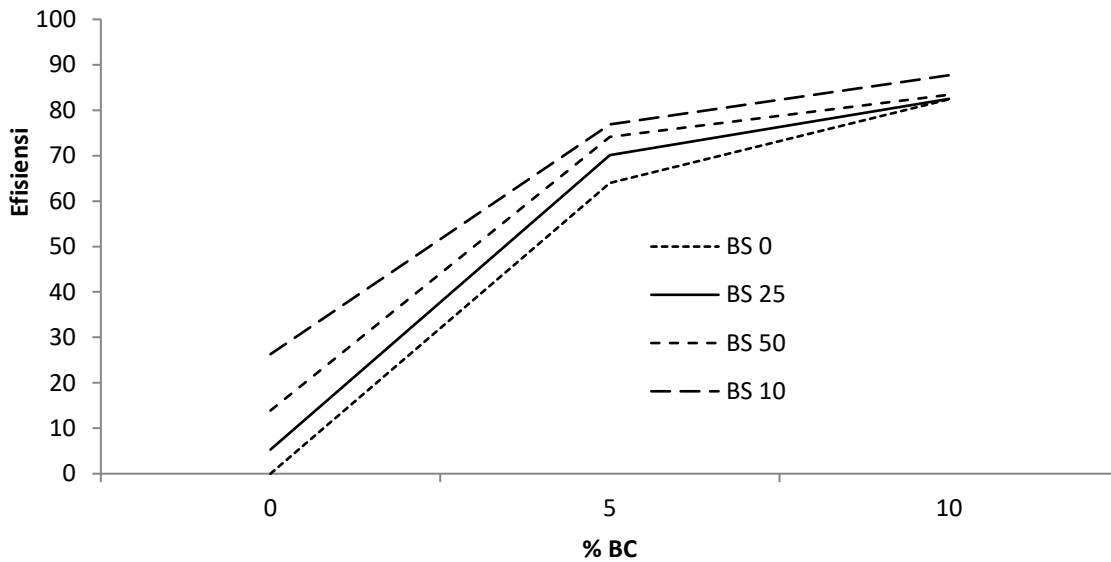
Perbedaan efek BC dan BS dalam menurunkan timbal terlarut diilustrasikan pada **Gambar 3** dan **Gambar 4**.



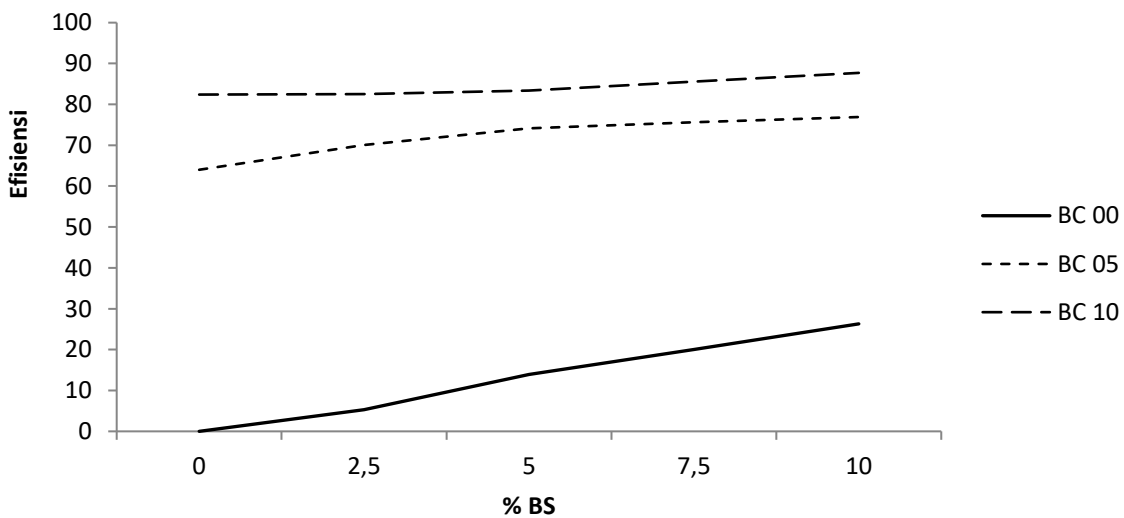
Gambar 2. Biochar (BC) (kiri) dan Bioslurry (BS)(kanan)

Tabel 1. Efek amelioran BC-BS pada sifat-sifat tanah, pengurangan Pb larut, dan risiko ekologi

No	%BC/%BS	pH	LOI	F1 (ppm)	E (%)	RAC (%)	Risiko Ekologi
1	0/0	5,5	8,78	17,1	0,0	15,39	Moderat
2	0/2.5	5,9	9,70	16,2	5,3	14,19	Moderat
3	0/5	6,3	10,48	14,72	13,9	13,42	Moderat
4	0/10	6,8	11,95	12,6	26,3	11,52	Moderat
5	5/0	7,9	9,88	6,15	64,0	5,76	Rendah
6	5/2.5	7,8	10,34	5,11	70,1	4,87	Rendah
7	5/5	7,8	11,68	4,43	74,1	3,98	Rendah
8	5/10	7,9	12,91	3,95	76,9	3,70	Rendah
9	10/0	8,3	10,92	3,01	82,4	2,95	Rendah
10	10/2.5	8,5	11,85	2,99	82,5	2,88	Rendah
11	10/5	8,5	12,34	2,84	83,4	2,69	Rendah
12	10/10	8,4	13,58	2,1	87,7	1,96	Rendah



Gambar 3. Pengaruh Biochar terhadap Efisiensi Amobilisasi (E)



Gambar 4. Pengaruh Bioslurry (BS) terhadap Efisiensi Amobilisasi (E)

Gradien (kecuraman garis) pada Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan kenaikan efisiensi amobilisasi (E) pada penambahan satu satuan BC atau BS. Dengan membandingkan harga gradien pada Gambar 3 (gradien ± 7) dan Gambar 4 (gradien ± 2) terlihat bahwa biochar lebih efektif mengamobilisasi timbal dibanding bioslurry. Ini berarti kenaikan 1% BC dibarengi dengan kenaikan efisiensi amobilisasi sebesar 7%, sedangkan kenaikan 1% BS hanya dibarengi dengan kenaikan efisiensi sebesar 2%.

Keefektifan BC ini berkaitan dengan kadar fosfor (fosfat) dan alkalinitas (tingkat kebasaaan) yang tinggi dibandingkan BS. Kadar fosfor (P) pada BC (7,08%) lebih besar dari 3 kali lipat kadar fosfor BS (2,26%). Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa penambahan 10% BS hanya menaikkan 1,3 satuan pH sementara penambahan BC dengan jumlah sama mampu menaikkan pH tanah 2,8 satuan yang berarti menaikkan jumlah ion hidroksida (OH⁻) hampir 1000 kali lipat. Kadar fosfor yang tinggi berarti menyediakan lebih banyak fosfat potensial dan bersama ion hidroksida berperan sebagai pengendap ion timbal yang efektif. Akibatnya ion timbal yang larut berkurang.

3.2. Efek BC/BS terhadap kelimpahan mikroba tanah, pertumbuhan, dan kadar Pb daun sawi pada uji rumah kaca

Hasil pengukuran kandungan karbon mikroba (C_{mic}) pada tanah tercemar setelah penambahan BC/BS dan hasil uji tanaman sawi tersaji pada Tabel 2 dan Tabel 3. Dampak penambahan BC/BS terhadap pertumbuhan sawi bisa dikaitkan dengan keaktifan mikroba tanah yang tercermin dari kandungan karbon mikroba tanah (C_{mic}). Dari **Tabel 2** dapat dilihat bahwa adanya kombinasi BC/BS pada tanah tercemar Pb diikuti dengan kenaikan C_{mic} sampai pada kombinasi BC/BS 5/10 (nilai C_{mic} tertinggi 2,42 mg/kg), tetapi kenaikannya tidak berlanjut pada kombinasi BC/BS yang lebih besar. Kombinasi BC/BS mengurangi timbal terlarut, menetralkan tanah yang asam, dan mengurangi cekaman toksisitas Pb dan hal ini direspon dengan kenaikan keaktifan mikroba tanah dan sekaligus pertumbuhan tanaman sawi. Adanya penambahan BC/BS lebih besar semakin menaikkan pH dan kandungan bahan organik tanah (LoI) tetapi kondisi ini (pH>8) mungkin tidak ideal lagi bagi pertumbuhan mikroorganisme tanah dan tercermin dari nilai kadar karbon mikroba tanah yang justru menurun. Hal ini menambah penjelasan akan

menurunnya pertumbuhan sawi pada penambahan BC/BS yang terlalu banyak.

Dari **Tabel 3** terlihat bahwa amandemen BC (pada kadar 5 dan 10%) cenderung menurunkan berat biomassa tanaman sawi. Pengaruh ini terjadi secara konsisten pada semua level BS. Pengaruh negatif ini mungkin disebabkan karena efek pH yang terlalu basa (pH 8,6) sehingga tidak sesuai dengan syarat pertumbuhan sawi hijau / caisim yang berkisar (6,0 – 6,5). Berkebalikan dengan hal tersebut, penambahan BS meningkatkan pertumbuhan dan biomassa tanaman sawi.

Dari **Tabel 3** dapat dilihat bahwa penambahan BC/BS pada tanah tercemar Pb mengakibatkan kandungan rerata Pb sawi berkisar antara 16,23 dan 44,00 ppm berat kering. Nilai tersebut bersesuaian dengan kadar Pb tanaman sawi-sawian yang ditanam pada tanah tercemar Pb pada taraf ribuan ppm (Shen *et al.*, 2002; Clark *et al.*, 2006). Kadar ini melampaui kadar timbal bahan pangan yang diijinkan BPOM sebesar 2,0 ppm. Dari hasil ini dapat dinyatakan bahwa usaha yang lebih optimal masih diperlukan untuk menekan penyerapan Pb tanaman sekaligus menghasilkan pertumbuhan tanaman yang baik. Pemilihan tanaman konsumsi lain yang berbiji atau berumbi (seperti kacang hijau, kedelai, koro benguk atau ketela) yang lebih rendah menyerap Pb mungkin bisa dilakukan. Seandainya kadar Pb tanaman masih tidak memenuhi baku mutu maka hasil tanaman dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi (non konsumsi).

Pengaruh BC terhadap kadar Pb daun sawi diilustrasikan pada **Gambar 3** sedangkan pengaruh BS terhadap kadar Pb daun sawi dapat diilustrasikan pada **Gambar 4**. Pada **Gambar 3** terlihat bahwa penambahan BC diikuti oleh penurunan kadar Pb pada daun sawi. Peningkatan taraf kelompok perlakuan BC dari 0, 5, sampai 10% diikuti penurunan rerata kadar Pb. Peningkatan 10% BC mengakibatkan penurunan rerata kadar Pb dari sekitar 3/7 bagian.

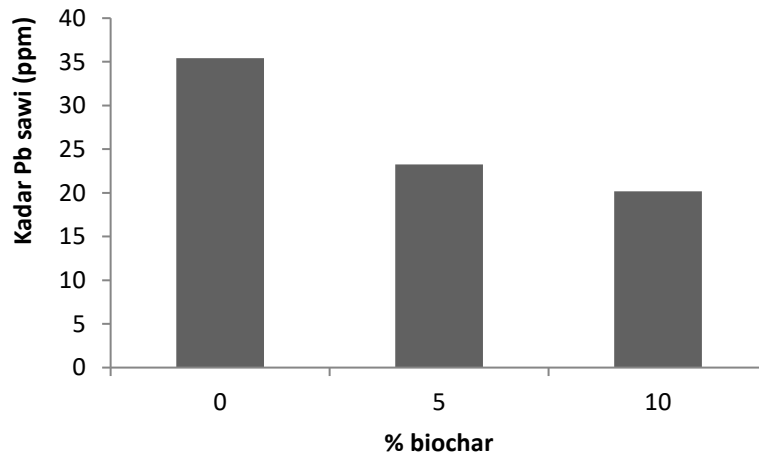
Pada **Gambar 4** terlihat bahwa peningkatan taraf kelompok perlakuan BS dari 0, 2,5, 5, sampai 10% diikuti penurunan rerata kadar Pb. Peningkatan 10% BS mengakibatkan penurunan rerata kadar Pb dari 30,54 menjadi 23,06 ppm (kurang dari 2/7 bagian). Efek BS pada pengurangan Pb sawi kurang efektif dibanding efek BC. Keefektifan BC dibanding BS ini juga sesuai dengan efeknya pada efisiensi amobilisasi (E) sebagaimana dilukiskan pada **Gambar 5** dan **Gambar 6**. Tingginya kandungan unsur fosfor (P) dan kebasaaan pada BC membuat BC lebih mampu menekan kadar Pb terlarut dalam tanah sehingga lebih sedikit ion Pb yang diserap akar tanaman sawi.

Tabel 2. Efek amandemen terhadap kelimpahan mikroba tanah

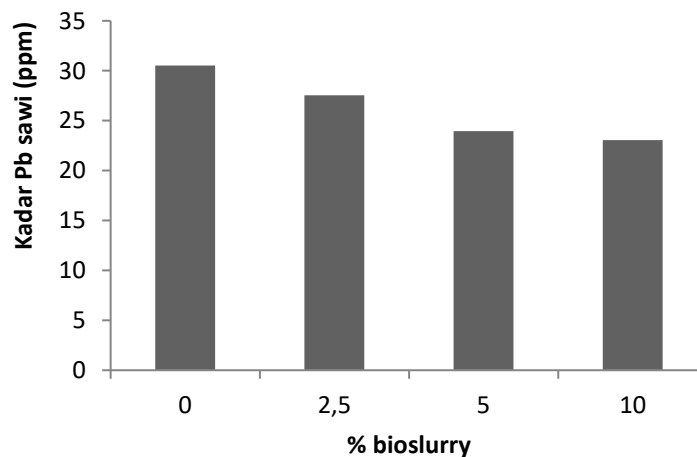
BC/BS(%)	0/0	5/5	5/10	10/5	10/10
C_{mic} (mg/kg)	1,30	1,97	2,42	2,29	2,18

Tabel 3. Hasil Uji Tanaman Sawi Setelah Amobilisasi BC dan BS

BC/BS	Berat Sawi (mg)	Jumlah Daun	Lebar Daun (cm)	Kadar Pb daun
0/0	2.678 ± 767,1	9-11	5,15 ± 1,38	44,00 ± 2,74
0/2,5	4.007 ± 1.987,3	9-11	5,12 ± 1,76	35,08 ± 4,21
0/5.0	3.055 ± 903,1	8-11	4,48 ± 0,62	32,56 ± 3,48
0/10	4.056 ± 2.477,6	8-11	4,38 ± 1,61	30,04 ± 4,73
5/0	1.823 ± 334,4	8-11	4,15 ± 1,84	24,61 ± 0,62
5/2.5	1.894 ± 621,7	8-12	3,90 ± 0,94	25,06 ± 1,54
5/5.0	3.392 ± 832,9	8-11	4,62 ± 0,90	23,06 ± 5,16
5/10	1.738 ± 564,4	8-12	3,40 ± 0,79	20,25 ± 2,73
10/0	1.195 ± 453,5	6-9	3,52 ± 0,83	23,01 ± 4,87
10/2.5	1.235 ± 454,6	7-9	3,30 ± 0,74	22,48 ± 3,68
10/5	1.069 ± 505,6	6-10	3,08 ± 0,38	16,23 ± 1,69
10/10	804 ± 103,9	7-8	2,90 ± 0,73	18,90 ± 3,50



Gambar 5. Pengaruh BC terhadap kadar Pb daun sawi



Gambar 6. Pengaruh BS terhadap kadar Pb daun sawi

3.3. Evaluasi amobilisasi BC/BS pada uji lapangan.

Hasil tanaman sawi pada uji lapang disajikan secara ringkas pada Tabel 4. Pertumbuhan tanaman sawi di lahan sangat berbeda dengan pertumbuhannya di rumah kaca akibat perbedaan intensitas radiasi matahari. Pertumbuhan cepat terjadi terutama setelah hujan deras dan kelihatan nyata pada sepuluh hari terakhir sebelum panen. Adanya penambahan BC dan BS dengan dosis 112,5/112,5 ton/ha (5/5%) turut mendukung pertumbuhan tanaman. Dari **Tabel 4** terlihat bahwa rerata berat daun sawi hasil uji lapangan jauh lebih besar (sampai dengan 20x) daripada berat sawi rumah kaca. Rerata berat sawi lahan (74,5 g) jauh melebihi berat sawi hasil uji rumah kaca yang berkisar antara 0,36 dan 8,36 g.

Gambar 7 menunjukkan penampilan tanaman sawi hasil budidaya di tanah bertimbal dengan maupun tanpa amandemen BC-BS pada dua tingkat umur. Gambar kiri (tanpa amandemen) menunjukkan tanaman sawi yang kurang subur dengan warna daun yang agak kuning, sedangkan sawi pada gambar kanan terlihat lebih subur dan hijau. Adanya BC-BS menurunkan toksisitas Pb sehingga tidak mengalami hambatan pertumbuhan dan kandungan klorofil yang tinggi. Di sisi lain, daun tanaman tanpa amandemen terlihat mulus sedangkan daun sawi yang diberi BC-BS tampak berlubang-lubang bekas dimakan hama. Sifat toksis dari Pb yang terserap pada daun sawi tanpa amandemen mungkin telah menghasilkan zat / metabolit yang tidak disukai oleh hama pengganggu tanaman. Kebalikannya, detoksikasi Pb oleh BC-BS menyebabkan tanaman sawi sebelah kanan kurang mengembangkan mekanisme pertahanan diri terhadap hama.

Kandungan Pb pada daun sawi pada tanah ber-Pb yang diberi amandemen BC/BS dan tanpa amandemen sebesar 21,71 dan 34,92 ppm. Di lain pihak, tanah yang

tak tercemar menghasilkan sawi dengan kandungan timbal 1,74 ppm yang memenuhi syarat BPOM. Hasil uji lapangan ini mirip dengan hasil sawi yang dibudidaya pada rumah kaca yang pada penambahan BC/BS dengan prosentase dosis yang sama (5/5) menghasilkan kadar Pb sawi 23,06 ppm sekaligus konsisten dengan berbagai penelitian sejenis. Pada penelitian-penelitian tersebut, remediasi tanah bertimbal di atas 500 ppm tidak ada yang menghasilkan tanaman uji dengan kandungan Pb di bawah 2 ppm (Rodriguez *et al.*, 2016; Shaheen & Rinklebe, 2014; Park *et al.*, 2011; Baikhamurova, 2020; Abdelhafez *et al.*, 2016; Lu *et al.*, 2014). Pemanfaatan tanaman non pangan seperti sengon dan mahoni sebagai tanaman fitostabilisasi lebih disarankan untuk tanah tercemar pada penelitian ini karena selain bernilai ekonomi, juga mampu menahan tiupan angin dan aliran air yang mencegah migrasi Pb.

Kandungan timbal tanah di sekitar plot media tanam dan pada lapisan tanah di bawahnya relatif sama berkisar 36 dan 39 ppm. Kadar ini jauh di bawah kadar Pb tanah media tanam 4.296 ppm dan lebih rendah dari tanah pemukiman di Cinangka, Bogor (63,8 ppm) (Himawan *et al.* 2021). Dari data tersebut dapat dinilai bahwa selama 35 hari masa penanaman sawi tidak terjadi mobilisasi Pb tanah baik secara horizontal maupun vertikal. Adanya air hujan dan air siraman selama penanaman tidak mampu melarutkan dan memindahkan timbal ke area sekitar plot tanaman. Kandungan fosfat yang tinggi dan alkalinitas bahan amandemen telah mengubah senyawa timbal ke bentuk dengan tingkat kelarutan yang rendah. Secara alamiah, Pb dikenal sebagai logam yang tidak *mobile* karena dengan anion-anion cenderung membentuk endapan / padatan tak larut (Kabata-Pendias dan Pendias, 2001).

Tabel 4. Hasil Budidaya sawi pada uji lapangan

No	Parameter Tanaman Sawi	Tanah non Pb	Tanah Pb	Tanah Pb + BC/BS
1	Berat daun ± SD (g)	63,9±12,7	45,8±10,2	74,5±16,5
2	Jumlah daun ± SD	13-15	12-14	14-15
3	Lebar daun ± SD (cm)	9,2±1,5	8,0±1,2	10,5±1,8
4	Pb daun (ppm)	1,74±0,32	34,92±5,3	21,71±4,2
5	Berat akar ± SD (g)	11,7 ± 2,4	9,4±2,0	13,4±2,7
6	Pb tanah samping (ppm)	38,62±3,23 a	39,13±3,41a	38,74±2,08 a
7	Pb tanah bawah media	36,50±3,29 a	37,18±2,83 a	36,43±3,19 a



Gambar 7. Kenampakan sawi pada tanah tercemar Pb; tanpa BC-BS (kiri), 112,5-112,5 t/ha (kanan)

4. Kesimpulan

Amandemen tanah ber-Pb 4.296 ppm dengan kombinasi biochar dan bioslurry (0; 2,5; 5,0; 10%) mampu mengurangi kelarutan Pb s.d 87,7% sekaligus mengurangi risiko ekologisnya dari tingkat moderat ke tingkat rendah. Pada uji rumah kaca, kombinasi biochar dan bioslurry menurunkan kadar Pb-daun sawi mencapai maksimal 63,11% dari 44,00 menjadi 16,23 ppm. Pertumbuhan tanaman sawi meningkat pada penambahan bioslurry tetapi penambahan biochar pada kadar 5 dan 10% menekan pertumbuhan yang kemungkinan karena pH yang terlalu tinggi untuk sawi. Uji lapangan dengan kadar biochar dan bioslurry (5%/5%) mengakibatkan pertumbuhan sawi yang 20x lebih baik dibanding hasil budidaya rumah kaca serta mampu menurunkan Pb-daun dari 34,92 menjadi 21,71 ppm. Pada uji lapangan selama satu kali masa tanam tidak ditemukan indikasi terjadinya kontaminasi timbal di sekeliling dan di bawah media tanam.

Daftar Pustaka

- Abdelhafez, AA., Abbas, MHH., and Hamed, MH. 2016. Biochar: A Solution for Soil Lead (Pb) Pollution. The 8th International Conference for Development and the Environment in the Arab World, March 22-24 2016.
- Baikhamurova, MO., Sainova, GA., Abseyit, A., Tashmetova, G., and Kelesbayev, K. 2020. The influence of lead on the growth and development of various mustard types. Eurasian Journal of Biosciences. Vol 14, 57-64 (2020).
- Bandara, T., Herath, I., Kumarathilaka, P., Hseu, ZY., Ok, YS., Vithanage, M. 2017. Efficacy of Woody Biomass and Biochar for Alleviating Heavy Metal Bioavailability in Serpentine Soil. Environ Geochem Health vol 39: 391-401
- Clark, HF., Brabander, DJ., & Erdil, RM. 2006. Sources, Sinks, and Exposure Pathways of Lead in Urban Garden Soil. Journal of Environmental Quality. 35(6):2066-2074
- De Groot, L. and Bogdanski, A. 2013. Bioslurry = Brown Gold? A Review of Scientific Literature on the Co-product of Biogas Production. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations
- Himawan, Rahardjo, SB., Suntoro, S., & Setyono, P. 2021, Remediation of Lead-contaminated Farmland Soil: Efficacy of Low-cost Natural Amendments in

- [Im]mobilization of Lead. *Agrivita Journal of Agricultural Sciences*. Vol 43(1): 209-220
- Kabata-Pendias, A. & Pendias, H. 2001. *Trace Elements in Soils and Plants*, third edition, CRC Press LLC, Washington, D.C.
- Khalid, S., Shahid, M., Niazi, NK., Murtaza, B., Bibi, I., & Dumat, C. 2016. A Comparison of Technologies of Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil. *Journal of Geochemical Exploration*. 11.021
- Lu, L., Tian, S., Yang, X., Peng, H., and Li, T. 2014, Improved cadmium uptake and accumulation in the hyperaccumulator *Sedum alfredii*: the impact of citric acid and tartaric acid, *J Zhejiang Univ-Sci B (Biomed & Biotechnol)* 14(2): 106-114
- Mourato, MP., Moreira, IN., Leitao, I., Pinto, FR., Salis, JR., & Martins, LL. (2015) Effect of Heavy Metals in Plants of Genus *Brassica*. *Int. J. Mol. Sci.* 16, 17975-17998. Doi: 10.3390/ijms 1608 17975.
- Nemati, K., Abu Bakar, N. K., Abas, M. R., & Sobhazadeh, E. 2011. Speciation of heavy metals by modified BCR sequential extraction procedure in different depths of sediments from Sungai Buloh, Selangor, Malaysia. *Journal of Hazardous Materials*, 192, 402-410. <http://doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.05.039>
- Park, JH., Choppala, GK., Bolan, NS., Chung, JW., and Chuasavathi, T. 2011. Biochar Reduces the Bioavailability and Phytotoxicity of Heavy Metals. *Plant Soil* 348: 439-451
- Rodriguez, I., Gomez, R., Sanchez, V., & Azcarate, J. A. 2016. Chemical and plant tests to assess the viability of amendments to reduces metal availability in mine soils and tailings. *Environ Sci Pollut Res*. 23: 6046-6054
- Sanchez, MG., Klouza, M., Holeckova, Z., Tlustos, P., Szakova, J. 2016. Organic and Inorganic Amendment Application on Mercury-polluted Soils: Effects on Soil Chemical and Biochemical Properties. *Environ Sci Pollut Res*, vol 23: 14254-14268
- Santosa, E. dan Widati, S. 2007. Estimasi Karbon Mikroba. hlm. 130-133. dalam Saraswati, R., Husen, E., & Simanungkalit, RDM. (ed.) *Metode Analisis Biologi Tanah*. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian.
- Shaheen, S. M., & Rinklebe, J. 2015. Impact of emerging and low cost alternative amendments on the (im)mobilization and phytoavailability of Cd and Pb in contaminated floodplain soil. *Ecological Engineering* 74 (2015): 319-326. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.10.024>.
- Sharma, S., Tiwari, S., Hasan, A., Saxena, V., & Pandey, LM. 2018. Recent advances in conventional and contemporary methods for remediation of heavy metal-contaminated soils. *3 Biotech*. 8:216
- Shen, Z.G., Li, X.D., Wang, C.C., Chen, H.M., dan Chua, H. 2002. Lead Phytoextraction from Contaminated Soil with High-Biomass Plant Species. *Journal of Environmental Quality*. vol. 31, no. 6, hlm. 1893-1900.
- Tytla, M. 2019. Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk in Sewage Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plant Located in the Most Industrialized Region in Poland-Case Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 16, 2430. Doi: 10.3390/ijerph 16132430
- Wuana, RA , Okieimen, FE, 2011, Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation, *International Scholarly Research Network ISRN Ecology*, Volume 2011: 1-20.
- Yang, X., Liu, J., McGrouther, K., Huang, H., Lu, K., Gou, X., He, L., Lin, X., Che, L., Ye, Z., & Wang, H. 2016. Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, & Zn) and enzyme activity in soil. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 23: 974-984. Doi: 10.1007/s11356-015-4233-0.
- Zhang, L., Liao, Q., Shao, S., Zhang, N., Shen, Q., & Liu, C. 2015. Heavy Metal Pollution, Fractionation, and Potential Ecological Risks in Sediments from Lake Chaohu (Eastern China) and the Surrounding Rivers. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 12: 14115-14131. Doi: 10.3390/ijerph 121114115