



**LAPORAN AKHIR
KLASTER RISET - PUBLIKASI PERCEPATAN KE GURU BESAR
UNIVERSITAS ANDALAS
TAHUN 2022**

**SUB TEMA PENELITIAN :
Ketahanan Pangan**

**SUB TOPIK PENELITIAN :
Teknologi Ameliorasi Tanah Bekas Tambang Emas**

**Penelitian ini Dibiayai Oleh :
UNIVERSITAS ANDALAS
Sesuai dengan Kontrak Penelitian Dasar Unggulan Klaster Riset Publikasi Percepatan Ke
Guru Besar (PDU-KRP2GB-Unand)
Nomor: T/18/un.16.17/PP.Pangan-PDU-KRP2GB-Unand/2022
Tahun Anggaran 2022**

**TEKNOLOGI AMELIORASI BERBASIS BATUBARA SUB-BITUMINUS DAN
BIOCHAR LIMBAH KELAPA MUDA TERHADAP TANAH BEKAS TAMBANG EMAS
TERCEMAR MERKURI DI KABUPATEN DHARMASRAYA**

TIM PENGUSUL

Ketua	: Dr. Ir. TEGUH BUDI PRASETYO, MS	(NIDN : 0027056014)
Anggota	: 1. Prof. Dr. Ir. HERVIYANTI, MS	(NIDN : 0027016407)
	2. Dr. MIMIEN HARIANTI, SP., MP	(NIDN : 0010058103)
	3. AMSAR MAULANA, SP., MP	(NIM : 2031612003)
	4. ARESTHA LEO LITA, SP.	(NIM : 2120232001)

**JURUSAN TANAH, FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG, NOVEMBER 2022**

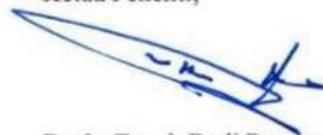
HALAMAN PENGESAHAN
PROPOSAL KLASTER RISET - PUBLIKASI PERCEPATAN KE GURU BESAR
UNIVERSITAS ANDALAS

Judul Penelitian	:	Teknologi Ameliorasi Berbasis Sub-bituminus dan Biochar Limbah Kelapa Muda Pada Tanah Bekas Tambang Emas Tercemar Merkuri Di Kabupaten Dharmasraya	
Skim	:	Publikasi Percepatan Ke Guru Besar	
Sub Tema Penelitian	:	Ketahanan Pangan	
Sub Topik Penelitian	:	Teknologi Ameliorasi Tanah Bekas Tambang Emas	
Ketua Peneliti			
a. Nama Lengkap	:	Dr. Ir. Teguh Budi Prasetyo, MS	L/P
b. NIDN	:	0027056014	
c. ID Sinta	:	6018395	
d. ID Google Scholar	:	OfWoB04AAAAJ	
e. ID Scopus	:	57212090148/2	
f. ID/H indeks Scopus	:		
g. Jabatan Fungsional	:	Lektor Kepala	
h. Prodi, Fak/PPs	:	Ilmu Tanah	
i. Nomor HP	:	0813 7823 7726	
j. Alamat surel (e-mail)	:	teguhbp270560@gmail.com	
Anggota Peneliti (1)			
a. Nama Lengkap	:	Prof. Dr. Ir. Herviyanti, MS	
b. NIDN	:	0027016407	
c. Prodi, Fak/PPs	:	Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian	
Anggota Peneliti (2)			
a. Nama Lengkap	:	Dr. Mimien Harianti, SP. MP.	
b. NIDN	:	0010058103	
c. Prodi, Fak/PPs	:	Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian	
Anggota Peneliti (3)			
d. Nama Lengkap	:	Dr. Ir. Sandra Prima, M.Sc.	
e. NIDN	:	0024046316	
f. Prodi, Fak/PPs	:	Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian	
Anggota Mahasiswa (1)			
a. Nama Lengkap	:	Amsar Maulana, SP., MP	
b. No. BP	:	2031612003	
c. Prodi, Fak/PPs	:	S3 Ilmu Pertanian, Fakultas Pertanian	
Anggota Mahasiswa (2)			
a. Nama Lengkap	:	Arestha Leo Lita, SP.	
b. No. BP	:	2120232001	
c. Prodi, Fak/PPs	:	S2 Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian	
Lama Penelitian Keseluruhan	:	3 tahun	
Usulan Penelitian Tahun ke-	:	1	
Biaya Penelitian Keseluruhan	:	Rp. 299.080.000	
Biaya Penelitian			
- Diusulkan ke UNAND	:	Rp.100.000.000	
- Dana institusi lainnya	:	-	
Biaya Luaran Tambahan	:	-	


Menyetujui,
Dekan Fakultas Pertanian
Dr. Ir. Indra Dwipa, MS
NIP. 196502201989031003

Padang, 25 November 2022

Ketua Peneliti,



Dr. Ir. Teguh Budi Prasetyo, MS
NIP. 196005271984031001

IDENTITAS DAN URAIAN UMUM

1. Judul Penelitian : Teknologi Ameliorasi Berbasis Batubara Sub-bituminus dan Biochar Limbah Kelapa Muda Terhadap Tanah Bekas Tambang Emas Tercemar Merkuri Di Kabupaten Dharmasraya
2. Tim Peneliti :

No	Nama	Jabatan	Bidang Keahlian	Prodi	Alokasi Waktu (jam/minggu)
1.	Teguh Budi Prasetyo, Dr. Ir., MS	Ketua	Kimia Tanah	Ilmu Tanah	12 jam /minggu
2.	Herviyanti, Prof. Dr. Ir. MS.	Anggota 1	Kimia dan Kesuburan tanah	Ilmu Tanah	8 jam /minggu
3.	Dr. Mimien Harianti, SP., MP	Anggota 2	Kimia Tanah	Ilmu Tanah	8 jam /minggu
4.	Amsar Maulana, SP., MP	Mahasiswa 1	-	Ilmu Pertanian	10 jam/ minggu
5.	Arestha Leo Lita, SP.	Mahasiswa 2	-	Ilmu Tanah	10 jam/ minggu

3. Objek Penelitian :
Jenis material yang akan diteliti adalah (a) Batubara dari jenis batubara muda (Sub-bituminus) dan Limbah Kelapa Muda sebagai bahan baku Biochar; (b) Batubara Sub-bituminus dan Biochar limbah kelapa muda sebagai formulasi amelioran; (c) Tanah bekas tambang emas tercemar merkuri sebagai media tanam dan (d) *Tithonia desifolia* sebagai tanaman indikator.
4. Masa Pelaksanaan :
Mulai : Maret 2022
Berakhir : November 2024
5. Usulan Biaya :
Tahun ke-1 : Rp. 100.000.000,-
Tahun ke-2 : Rp. 99.413.000,-
Tahun ke-3 : Rp. 99.667.000,-
6. Lokasi Penelitian :
(a) Lahan Tambang Emas di Kabupaten Dharmasraya, (b) Laboratorium Jurusan Tanah dan (c) Rumah Kawat Fakultas Pertanian Universitas Andalas.
7. Instansi lain yang terlibat : -
8. Temuan yang ditargetkan :
(a) Adsorpsi dalam teknologi ameliorasi; (b) Menyusun dan memproduksi formulasi amelioran berbasis batubara Sub-bitimunis dan Biochar Limbah Kelapa Muda dalam mengatasi pencemaran merkuri pada tanah bekas tambang emas di Kab. Dharmasraya; (c) Teknik Remediasi dalam mengatasi pencemaran merkuri pada tanah bekas tambang emas dengan teknik inaktivasi melalui ameliorasi berbasis batubara Sub-bitimunis dan Biochar Limbah Kelapa Muda

pada tanah bekas tambang emas tercemar merkuri di Kab. Dharmasraya untuk penghijauan dengan *Tithonia desifolia* sebagai tanaman indikator.

9. Kontribusi mendasar pada suatu bidang ilmu :
Formulasi batubara Sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda sebagai bahan dasar dalam teknologi ameliorasi melalui adsorpsi dan teknik inaktivasi untuk dijadikan sebagai sistem dalam proses remediasi tanah bekas tambang emas tercemar merkuri. Sistem ini dapat dijadikan sebagai kebaruan dalam teknik remediasi untuk mengatasi pencemaran logam berat di tanah bekas tambang, khususnya mengurangi pencemaran merkuri dan sekaligus memperbaiki sifat kimia tanah bekas tambang emas untuk dijadikan sebagai usaha rehabilitasi untuk penghijauan dengan *Tithonia desifolia* sebagai tanaman indikator. Terbentuknya sistem ini dapat berkontribusi dalam memperbaiki dan menetralkan logam berat khususnya merkuri melalui proses adsorpsi dan inaktivasi dalam teknik remediasi melalui teknologi ameliorasi, sehingga menjadi media tanam yang sehat untuk proses penghijauan.
10. Kontribusi pada pencapaian RIP dan roadmap sub tema penelitian UNAND :
Berdasarkan roadmap rencana induk penelitian (RIP) Universitas Andalas tahun 2017 - 2021 penelitian ini menggunakan tema Ketahanan Pangan dengan sub topiknya adalah teknologi dan alsintan. Pada tahun 2016 - 2021 telah dilakukan penelitian penggunaan bubuk batubara tidak produktif peringkat rendah (Sub-bituminus) yang telah diaktivasi dengan kapur untuk komoditas pangan, hortikultura serta perkebunan seperti kelapa sawit pada tanah mineral masam (Ultisol dan Oxisol) sedangkan pemanfaatan biochar limbah kelapa muda telah diaplikasikan secara bertahap terhadap komoditas pangan pada tanah marginal. Pada tahun 2022 - 2024 ini akan dilakukan penelitian adsorpsi dalam teknologi ameliorasi berbasis batubara Sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda (BIOGEOSOPSI) untuk mengadsorpsi dan menginaktivasi logam berat pada lahan tambang emas tercemar merkuri. Dengan rangkaian penelitian ini diharapkan dapat teratasi masalah-masalah utama lahan pertambangan sebagai usaha rehabilitasi untuk penghijauan dalam rangka memberikan kontribusi kepada masyarakat dan sejalan dengan RIP Universitas Andalas.
11. Jurnal ilmiah yang menjadi sasaran :
International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology (IJASEIT) akan publikasi 2022; AGRIVITA, Journal of Agricultural Science (AJAS) akan publikasi 2024; Journal of Degraded and Mining Lands Management akan publikasi 2023 dan SAINS TANAH - Journal of Soil Science and Agroclimatology akan publikasi 2023.
12. Rencana luaran berupa buku, purwarupa atau luaran lainnya yang ditargetkan, tahun rencana perolehan atau penyelesaian : (a) HKI/Paten sederhana yang akan didaftarkan pada tahun 2022 dan akan digranting tahun 2023 dan 2024; (b) Buku dalam bentuk draft *Chapter Book* dan *HandBook* : Adsorpsi dalam Teknologi Ameliorasi, yang akan diterbitkan pada Tahun 2020, 2023 dan 2024 dan (c) produk dalam bentuk amelioran dari formulasi formulasi batubara Sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda yang bersertifikasi SNI yang akan diproduksi pada tahun 2023.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
IDENTITAS DAN URAIAN UMUM	iii
DAFTAR ISI	v
RINGKASAN	vi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
BAB 2. RENCANA INDUK DAN PETA JALAN PENELITIAN UNIVERSITAS ANDALAS	6
BAB 3. TINJAUAN PUSTAKA	9
BAB 4. METODE PENELITIAN	13
BAB 5. BIAYA DAN JADWAL PENELITIAN	22
DAFTAR PUSTAKA	24
LAMPIRAN	26

RINGKASAN

Kepedulian terhadap keberadaan Hg di lingkungan daerah sekitar pertambangan emas dan dampak terhadap kesehatan yang berkenaan dengan reaktivitas, toksisitas dan mobilitas dalam sistem tanah dan tanaman harusnya menjadi perhatian yang besar bagi pengambil kebijakan. Mengingat sumber daya keuangan yang terbatas dari masyarakat dan pemerintah, maka strategi dalam remediasi tanah dengan modal rendah dapat dikembangkan untuk cakupan wilayah yang luas. Sehingga, perlunya teknologi sebagai solusi alternatif terbarukan yang bersifat inovasi, efisien, efektif, ekonomis dan ramah lingkungan terhadap lingkungan dan kesehatan yaitu melalui sistem remediasi berkelanjutan dalam mengatasi permasalahan pada tanah bekas tambang emas yang tercemar Hg yaitu menggunakan teknologi ameliorasi dalam proses adsorpsi dan teknik inaktivasi. Teknologi ameliorasi merupakan proses yang memanfaatkan berbagai jenis bahan organik atau anorganik yang telah terbukti dapat menginaktivasi logam berat melalui pembentukan kompleks tak larut antara logam berat dengan bobot molekul tinggi seperti senyawa humat (HS) dan tingginya luas permukaan seperti biochar. HS dan biochar dapat dibuat dari berbagai bahan organik, biomass dan limbah pertanian, yang bersifat ekonomis dan berkelanjutan, dalam meningkatkan kesuburan tanah dan remediasi logam berat. Senyawa humat dari batubara Sub-bituminus dari proses aktivasi dan biochar dari limbah kelapa muda dengan proses karbonasi dengan metode Kon-Tiki dalam prinsip pirolisis, dimana disisi lain juga memiliki afinitas yang sangat tinggi terhadap logam berat seperti Hg^{2+} yang ada di dalam tanah. Tujuan jangka panjang dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan terobosan sistem dan teknologi inovasi berbasis bahan organik alternatif yaitu formulasi batubara Sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda melalui adsorpsi dalam teknologi ameliorasi untuk memperbaiki kesuburan tanah serta mengadsorpsi, menetralkan pestisida dan mengurangi logam berat didalam tanah dan perairan sehingga dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan. Sedangkan target khususnya adalah untuk membuktikan kemampuan batubara Sub-bituminus yang diformulasikan dengan biochar limbah kelapa muda dalam mengadsorpsi merkuri dan mengurangi pencemaran pada lahan tambang emas di Kab. Dharmasraya sehingga dapat dilakukan usaha rehabilitasi untuk penghijauan. Penelitian Tahun 1 menggunakan Rancangan Acak Lengkap dengan 3 ulangan pada masing – masing percobaan yang terdiri dari 3 amelioran (P.1 = P-SC; P.2 = A-SC; P.3 = BC) dengan masing – masing percobaan terdiri dari 5 takaran [A = 0 t ha⁻¹ (0g 100g tanah⁻¹); B = 20 t ha⁻¹ (0.5g 100g tanah⁻¹); C = 20 t ha⁻¹ (1g 100g tanah⁻¹); D = 30 t ha⁻¹ (1.5g 100g tanah⁻¹) dan E = 40 t ha⁻¹ (2g 100g tanah⁻¹)]. Hasil pada penelitian Tahun I membuktikan bahwa aplikasi 40 t ha⁻¹ batubara sub-bituminus Indonesia, SC - NaOH dan Biochar limbah kelapa muda pada tanah bekas tambang emas, dapat menurunkan Hg sebesar 2,50 ; 2,84 dan 1,69 mg kg⁻¹ dibandingkan dengan kontrol melalui peningkatan aktivitas muatan dan memperbaiki sifat kimia tanah bekas tambang emas.

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses pertambangan emas secara tradisional dengan metode amalgamasi menggunakan Hg sebagai pengikat emas, menjadi dasar pencemaran Hg pada tanah bekas tambang emas, dimana 25 - 30% Hg yang ditambahkan dalam proses ini hilang ke lingkungan (Esdaile dan Chalker, 2018). Penggunaan Hg tersebut yang menghasilkan residu yang mengkontaminasi tanah, air, udara dan vegetasi dalam berbagai bentuk seperti Hg⁰, Hg⁺ dan khusus di dalam tanah yang mendominasi yaitu Hg²⁺. Bentuk Hg tersebut sangat mobile dalam tanah sehingga menimbulkan pencemaran terhadap badan air tanah dan masuk kedalam rantai makanan. Dampak pencemaran Hg di lahan tambang emas juga mengakibatkan wilayah pertanian dan perkebunan terancam rusak. Menurut Juneri dan Mubarak (2019) seluas 22.509 Ha (4.144 Ha berstatus kritis) dengan 7.465 Ha sawah diduga sudah tercemar Hg di Kabupaten Dharmasraya. Menurut Alloway (2012) batas standar baku mutu Hg di dalam tanah sebesar $\leq 0,3$ ppm.

Berdasarkan Ratnaningsih *et al.*, (2019), distribusi Hg di DAS Batanghari pada air sungai berkisar 0,001 – 0,07 ppm, sedangkan pada tanah sekitar 0,01 – 0,42 ppm. Menurut Sahara dan Puryanti (2015), Hg pada tanah sebesar 5.20 ppm di Nagari Batu Bakauik, Kab. Dharmasraya. Hal ini menjelaskan bahwa pencemaran Hg di daerah ini berada pada ambang kritis terhadap pencemaran Hg. Mengingat masih banyak daerah yang tercemar Hg di Kabupaten Dharmasraya dan belum teridentifikasi secara keseluruhan, maka perlunya identifikasi geokimia Hg dan karakterisasi fisikokimia tanah bekas tambang emas di Kab. Dharmasraya yang diduga tingkat pencemarannya cukup tinggi yang akan dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman seperti tanaman *Tithonia diversifolia*, jika dimanfaatkan sebagai lahan produktif untuk penghijauan. Pemanfaatan tanaman ini sebagai indikator dalam proses penghijauan karena memiliki kelimpahan biomassa, adaptasi dan kemampuan untuk tumbuh pada lahan tercemar logam berat seperti Ag, Cu, Zn, Cd dan Pb (Purwani, 2010) serta memiliki potensi tinggi terhadap pemulihan kesuburan tanah, namun belum ada penelitian khusus terhadap budidaya tanaman *T.diversifolia* yang dilakukan pada tanah bekas tambang emas tercemar merkuri.

Kemampuan tanah dalam meretensi, mengadsorpsi dan mengakumulasi Hg dapat ditentukan oleh kadar liat, kadar air, potensial redoks, pH, kadar bahan organik dan kapasitas tukas kation (KTK) tanah. Menurut Ugwu dan Igbokwe, (2019) bahwa kapasitas sangga tanah terhadap kation Hg dapat ditingkatkan dengan meningkatkan pH, bahan organik dan KTK. Selain itu, kapasitas tanaman dalam mengakumulasi Hg bergantung pada spesies, kultivar, bagian tanaman, umur atau fase fisiologisnya dan mekanisme tanaman dalam menoleransi toksisitas Hg yaitu melalui fenomena selektivitas serapan ion dari media tanam (Singh *et al.*, 2016). Secara umum, dasar keberhasilan dalam upaya pengelolaan pencemaran Hg dapat diukur pada terjadinya penurunan serapan Hg pada tanaman. Menurut Kalaivanan dan Ganeshamurthy (2016) bahwa penurunan serapan tanaman terhadap Hg dapat terjadi : (1) akibat penurunan kadar fraksi aktif Hg dalam media tanam; (2) peningkatan selektivitas tanaman dalam menyerap unsur dari media tanam atau (3) kombinasi antar keduanya. Maka, dampak pencemaran Hg harus dibawah standar baku mutu atau dibawah nilai kritis. Dengan demikian, perlu upaya menurunkan konsentrasi Hg dengan pemberian amelioran yang dapat menurunkan kelarutan Hg dalam sistem tanah dan tanaman terutama dalam perakaran tanaman (rizosfer).

Kepedulian terhadap keberadaan Hg di lingkungan daerah sekitar pertambangan emas dan dampak terhadap kesehatan yang berkenaan dengan reaktivitas, toksisitas dan mobilitas dalam sistem tanah dan tanaman harusnya menjadi perhatian yang besar bagi pengambil kebijakan. Mengingat sumber daya keuangan yang terbatas dari masyarakat dan pemerintah, maka strategi dalam remediasi tanah dengan modal rendah dapat dikembangkan untuk cakupan wilayah yang luas. Sehingga, perlunya teknologi sebagai solusi alternatif terbarukan yang bersifat inovasi, efisien, efektif, ekonomis dan ramah lingkungan terhadap lingkungan dan kesehatan yaitu melalui sistem remediasi berkelanjutan dalam mengatasi permasalahan pada tanah bekas tambang emas yang tercemar Hg yaitu menggunakan teknik inaktivasi.

Berdasarkan Li *et al.*, (2020) bahwa inaktivasi merupakan teknik remediasi yang merujuk kepada penggunaan bahan pembenah tanah (amelioran) untuk mengubah bentuk geokimia logam berat dalam tanah. Teknik inaktivasi dapat

menjadi teknik yang prospektif untuk diaplikasikan pada tanah yang tercemar dengan logam berat khususnya Hg. Pengembangan teknik inaktivasi bertujuan untuk dapat menurunkan serapan Hg oleh tanaman dan mengurangi laju pencucian Hg di ekosistem. Amelioran yang akan diaplikasikan harus dapat mengubah bentuk fase geokimia Hg dalam tanah yang sebelumnya terlarut dan sangat mudah larut (fraksi aktif seperti CH_3Hg) menjadi fraksi yang secara geokimia lebih stabil (fraksi stabil seperti HgS dan Hg-*Inorganic complexes*), sehingga keterserapan dan toksisitas Hg terhadap tanaman menurun. Dalam hal ini menjadi penting untuk memilih jenis amelioran yang tepat dalam menginaktivasi pada tanah tercemar Hg. Peluang batubara Sub-bituminus dalam bentuk bubuk dan bubuk yang diaktivasi secara kimia serta limbah kelapa muda yang dikarbonisasi menjadi sebagai amelioran tanah harus memiliki kapasitas yang tinggi untuk meningkatkan sorpsi tanah terhadap Hg.

Potensi dan pemanfaatan batubara Sub-bituminus yang telah dilakukan, namun dalam konteks pengendalian logam berat yang memiliki mobilitas tinggi seperti Hg belum ada. Penelitian khusus yang dilakukan untuk meningkatkan potensi dan efektifitas pemanfaatan batubara Sub-bituminus dalam mengendalikan kelarutan Hg, dengan formulasi biochar sebagai amelioran pada tanah bekas tambang emas tercemar Hg penting untuk dilakukan. Biochar sebagai salah satu jenis amelioran yang sangat menjanjikan, dimana dalam produksinya dari limbah organik yang hemat biaya dan dapat menyuburkan tanah serta mengurangi kelarutan Hg didalam tanah. Biochar adalah bahan kaya karbon yang dihasilkan melalui pirolisis dari limbah organik pertanian. Potensi biochar untuk menghilangkan Hg dari larutan dan untuk mengurangi CH_3Hg dalam tanah dan tanaman (Yang et al., 2021). Namun tetap saja, berbeda bahan baku, suhu dan metode pirolisis, dan fungsionalisasinya memerlukan pengujian untuk mengidentifikasi morfologi dan karakteristik biochar yang digunakan dalam melihat potensi penyerapan Hg. Perlu dipahami bahwa pengaruh biochar pada mobilitas dan bioavailabilitas Hg sangat kompleks, mengingat karakteristik yang bervariasi dari biochar yang berasal dari bahan yang berbeda dan perbedaan dalam kondisi lingkungan dan tingkat aplikasinya. Salah satu yang berpotensi dari limbah organik yang dapat digunakan adalah limbah kelapa muda (*young coconut waste* atau YC_w).

Teknik inaktivasi yang akan menggunakan formulasi amelioran dari batubara Sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda pada tanah bekas tambang emas tercemar Hg dapat dilakukan secara simultan dalam proses remediasi tanah. Namun, penelitian lain yang sejenis, khususnya pengujian formulasi amelioran untuk budidaya komoditi pertanian dari segi efektifitasnya dalam mengadsorpsi dan menginaktivasi Hg serta mekanismenya belum ada dilakukan. Oleh karena itu, melalui penelitian ini harus ditekankan pada formulasi amelioran yang akan digunakan pada tanah bekas tambang emas tercemar Hg untuk dapat mengurangi kadar Hg serendah mungkin dalam sistem tanah dan tanaman, supaya lahan bekas tambang emas dapat dimanfaatkan kembali menjadi lahan produktif untuk penghijauan.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk (a) Mempelajari jenis dan takaran amelioran terhadap pada tanah bekas tambang emas tercemar merkuri di Kabupaten Dharmasraya; (b) Menguji potensi formulasi amelioran dari batubara Sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda terhadap kemampuan mengadsorpsi Hg untuk mengurangi kelarutan pada tanah bekas tambang emas di Kabupaten Dharmasraya dan (b) Mengaplikasikan formulasi amelioran dari batubara Sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda dengan teknik inaktivasi dalam meningkatkan pertumbuhan *Tithonia diversifolia* pada tanah bekas tambang emas di Kabupaten Dharmasraya.

1.3 Urgensi Penelitian

Urgensi penelitian ini adalah terciptanya *Smart Ameliorant* yang terbentuk dari formulasi amelioran dalam teknik inaktivasi pada tanah bekas tambang bersifat ramah lingkungan dan ekonomis dan masyarakat dan pengambil kebijakan dapat mengadsorpsi teknik inaktivasi sebagai usaha rehabilitasi tanah bekas tambang untuk mengurangi dampak negatif dari kontaminasi dan pencemaran logam berat khususnya merkuri.

1.4 Luaran Penelitian

Luaran penelitian ini adalah untuk memperoleh amelioran terbaik untuk adsorpsi dalam teknologi ameliorasi berbasis batubara Sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda yang bersifat ramah lingkungan sebagai alternatif terbaru

sehingga terciptanya *Smart Ameliorant* dalam teknik inaktivasi terhadap pencemaran merkuri pada tanah bekas tambang emas sebagai usaha rehabilitasi untuk penghijauan. Rencana capaian tahunan seperti pada Tabel 1 sesuai luaran yang ditargetkan dan lamanya penelitian yang akan dilakukan.

Tabel 1. Rencana Target Capaian Tahunan

No	Jenis Luaran		Indikator Capaian		
			TS	TS+1	TS+2
1.	Publikasi ilmiah ²⁾	Internasional	accepted	accepted	Accepted
2.	Pemakalah dalam pertemuan Ilmiah ³⁾	Internasional	dilaksanakan	dilaksanakan	dilaksanakan
		Nasional	dilaksanakan	dilaksanakan	dilaksanakan
3.	Keynote speaker dalam pertemuan ilmiah ⁴⁾	Internasional			
		Nasional			
4.	Visiting Lecturer ⁵⁾	Internasional			
5.	Hak Atas Kekayaan Intelektual (HKI) ⁶⁾	Paten			
		Paten sederhana	terdaftar	terdaftar	granted
		Hak Cipta			
		Merek dagang			
		Rahasia dagang			
		Desain Produk Industri			
		Indikasi Geografis			
		Perlindungan Varietas Tanaman			
	Perlindungan Topografi Sirkuit Terpadu				
6.	Teknologi Tepat Guna ⁷⁾		Draft	Penerapan	
7.	Model/Purwarupa/Desain/Karya seni/Rekayasa Sosial ⁸⁾				
8.	Buku Ajar (ISBN) ⁹⁾		Draft	Terbit	
9.	Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) ¹⁰⁾	2	3	4	

¹⁾ TS = Tahun sekarang (tahun pertama penelitian)

²⁾ Isi dengan belum/tidak ada, draf, submitted, reviewed, atau accepted/published

³⁾ Isi dengan belum/tidak ada, draf, terdaftar, atau sudah dilaksanakan

⁴⁾ Isi dengan belum/tidak ada, draf, terdaftar, atau sudah dilaksanakan

⁵⁾ Isi dengan belum/tidak ada, draf, terdaftar, atau sudah dilaksanakan

⁶⁾ Isi dengan belum/tidak ada, draf, atau terdaftar/granted

⁷⁾ Isi dengan belum/tidak ada, draf, produk, atau penerapan

⁸⁾ Isi dengan belum/tidak ada, draf, produk, atau penerapan

⁹⁾ Isi dengan belum/tidak ada, draf, proses editing/sudah terbit

¹⁰⁾ Isi dengan skala 1-9 dengan mengacu pada Bab 2

BAB 2. RENSTRA/RIP DAN PETA JALAN PENELITIAN PERGURUAN TINGGI

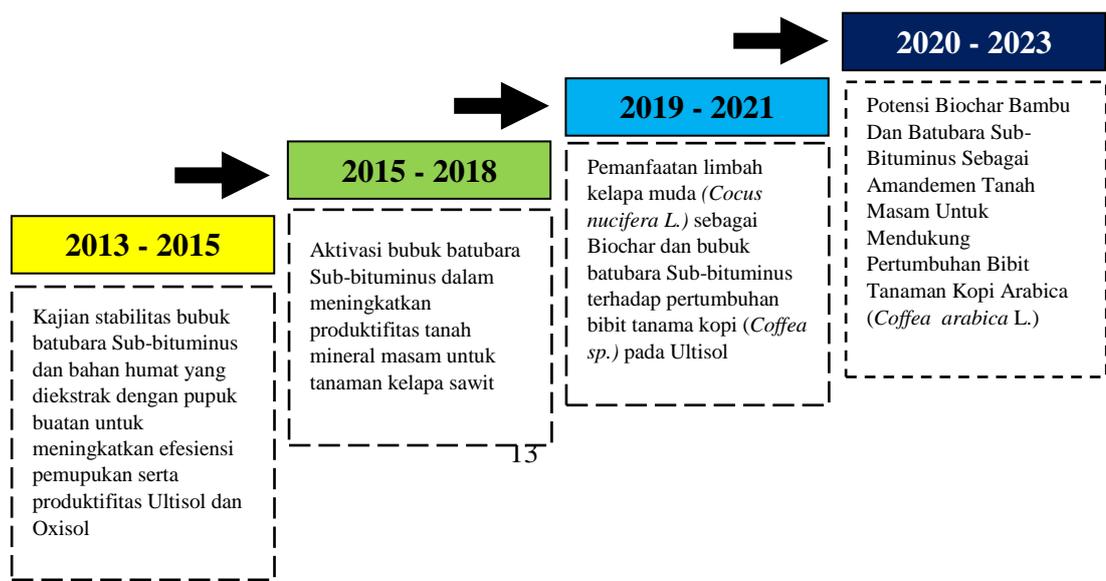
Rencana Induk Penelitian (RIP) Universitas Andalas periode 2017-2020. merupakan arahan kebijakan dalam pengelolaan penelitian institusi Unand selama empat tahun secara efektif, terintegrasi, komprehensif dan berkelanjutan. Rencana Induk Penelitian Universitas Andalas yang terintegrasi terdiri dari tiga tema utama yaitu: Ketahanan Pangan, Obat dan Kesehatan; Inovasi Sains, Teknologi dan Industri; serta Pengembangan SDM (Sumber Daya Manusia) dan Karakter Bangsa. Berdasarkan roadmap rencana induk penelitian (RIP) Universitas Andalas tahun 2017 - 2020 penelitian ini menggunakan tema : Ketahanan Pangan, Obat Dan Kesehatan, sub-tema : Ketahanan Pangan, sedangkan topiknya adalah : Produksi Komoditas Unggulan (antara lain ternak lokal, gandum tropis, padi lokal, kelapa sawit, kakao, buah, sayuran, dan perikanan), dan sub-topiknya adalah teknologi dari komoditas unggulan khususnya tanaman kelapa sawit, sayuran dan tanaman hortikultura yang berorientasi komersial.

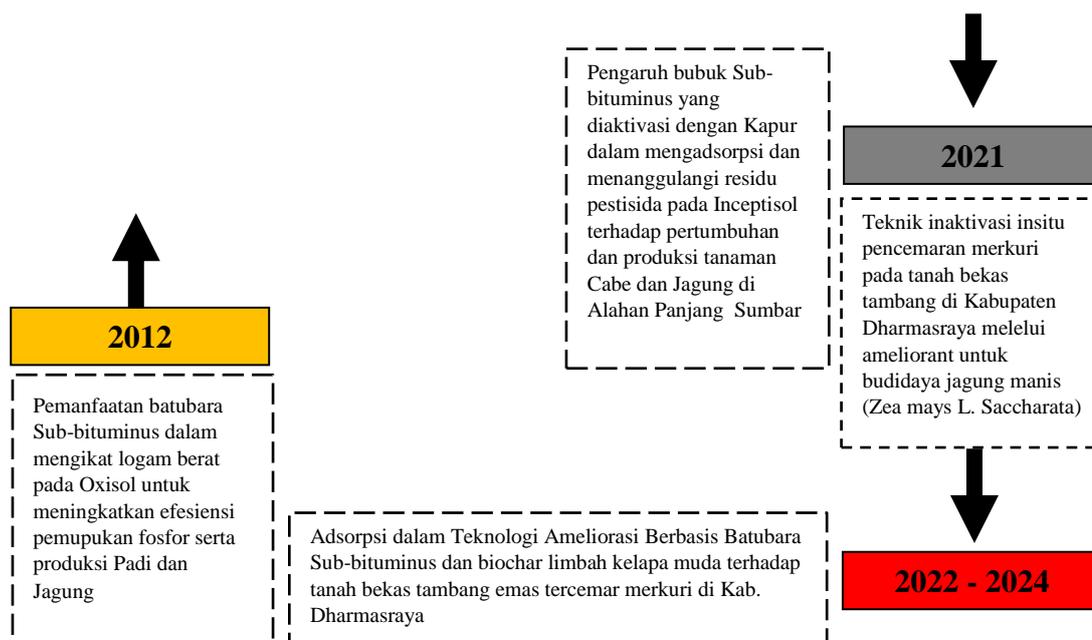
Base Line (keadaan 2015/2016) dari rencana induk penelitian Universitas Andalas adalah : belum tersedia cukup teknologi untuk pengembangan komoditas unggulan, maka pokok bahasan penelitian dari 2017 - 2020 yang berhubungan dengan penelitian yang dilakukan adalah : Modifikasi teknologi perbaikan kesuburan lahan lestari. Berdasarkan base line dan pokok bahasan tersebut telah dilaksanakan penelitian semenjak 2016 -2018 dan rencananya akan dilanjutkan pada tahun 2019- 2021.

Pada tahun 2016 telah dilakukan uji keaktifan bubuk batubara *Sub-bituminus* dengan pupuk buatan dan kapur (Urea dan dolomit) serta NaOH, selanjutnya diuji kemampuan bubuk batubara *Sub-bituminus* yang telah diaktifkan tersebut dengan dosis terpilih dari percobaan pendahuluan dalam memperbaiki sifat kimia dan kesuburan Ultisol dan Oxisol. Rancangan yang dipakai adalah Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan 15 kombinasi perlakuan yaitu 3 takaran bubuk *subbituminus* (10, 20, dan 30 ton ha⁻¹) dikombinasikan dengan 5 dosis bahan pengaktif yaitu 0, 2.5, 5.0, 7.5, dan 10 % dari berat bubuk batubara *Sub-bituminus* dengan 2 kali ulangan untuk masing-masing bahan pengaktif.

Percobaan tahun 2017 : dari 15 kombinasi perlakuan pada percobaan tahun I dilanjutkan dengan percobaan untuk pembibitan kelapa sawit menggunakan rancangan faktorial 3 x 4 dalam RAK. Faktor I adalah takaran bubuk batubara *Sub-bituminus* (10, 20, dan 30 ton ha⁻¹) dan faktor II adalah jenis pengaktif yaitu : tanpa pengaktif, Urea, dolomit dan NaOH dengan takaran yang terbaik dari percobaan tahun I yaitu 10 % dari berat bubuk batubara *Sub-bituminus* dan dilanjutkan untuk pembibitan sawit (pre dan main-nursery) dimana bibit ini nanti siap dipindahkan ke lapangan umur 9 bulan. Pembibitan utama ini juga dilakukan 3 kali ulangan pada tanah jenis Ultisol dan Oxisol. Sedangkan pada Tahun III (2018) dilakukan : a) Percobaan lanjutan tahun II, dimana bibit sawit yang dipelihara sampai umur ± 9 bulan dipindahkan ke lapangan untuk menguji kemampuan bubuk batubara yang diinkubasikan pada Ultisol di Kabupaten Dharmasraya Propinsi Sumatera Barat untuk penanaman kelapa sawit. Dengan dilakukan penelitian tahun 2018 ini telah diperoleh luaran yang sesuai dengan sub-topik penelitian menurut RIP penelitian Unand yaitu : menghasilkan teknologi pengembangan untuk komoditas unggulan (dalam hal ini tanaman kelapa sawit). Luaran topik penelitian ini juga sejalan dengan RIP Unand yaitu produk akhir, teknologi produksi dan bisnis tanaman kelapa sawit yang berorientasi komersial.

Agar penelitian tersebut dapat diterapkan secara luas di masyarakat khususnya petani, maka perlu pula diuji kemampuan bubuk batubara tidak produktif ini dalam mengatasi pencemaran logam berat pada lahan tambang emas yang tercemar merkuri di Kab. Dharmasraya. Penelitian yang akan dilakukan pada tahun 2022-2024 berkontribusi besar terhadap pencapaian Rencana Induk Penelitian Universitas Andalas dengan Sub tema Ketahanan Pangan. Tahap-tahap penelitian yang telah dan yang akan dilakukan disajikan pada Gambar 1.





Gambar 2.1 Road map penelitian

BAB 3. TINJAUAN PUSTAKA

3.1 Karakteristik Tanah Bekas Tambang Emas dan Permasalahannya

Karakteristik lahan pasca tambang emas ditandai dengan lahan yang didominasi oleh tanah yang memiliki daya ikat air rendah serta juga memiliki intensitas cahaya yang sangat tinggi dikarenakan lahan dibuka tanpa adanya vegetasi berkayu yang dapat menghalangi suhu permukaan tanah, selain itu lapisan top soilnya hampir tidak ada, vegetasi dan unsur hara juga sangat minim, dan keasaman tanah bekas tambang tinggi (Joni, 2013). Menurut Aryanti dan Hera (2019) menyatakan bahwa karakteristik lahan bekas tambang ditandai dengan munculnya tanah berpasir, lapisan top soil hampir tidak ada, vegetasi dan unsur hara yang minim, serta kemasaman tanah tinggi. Selanjutnya Neneng *et al.*, (2012) pada lahan bekas tambang emas di Kalimantan Tengah didapatkan bahwa karakteristik lahan bekas tambang ditandai dengan munculnya tanah berpasir, lapisan top soil hampir habis, vegetasi dan unsur hara sangat sedikit, tanah sangat masam, dan kandungan Hg rata-rata 2,4 ppm-4,17 ppm.

Merkuri (Hg) pada limbah perairan diubah oleh aktifitas mikroorganisme menjadi metil merkuri ($\text{CH}_3\text{-Hg}$). Endapan dari proses penambangan ditinjau masuk kedalam air tanah melalui pori-pori tanah dengan air hujan (Putranto,

2011). Menurut Widyati (2012) menyebutkan bahwa logam-logam berat yang terkandung dalam tailing akan terakumulasi dalam akar sehingga dapat mengganggu penyerapan unsur hara dan mengganggu pertumbuhan tanaman. Selanjutnya Munawarah *et al.*, (2017) juga menyebutkan bahwa jika konsentrasi merkuri (Hg) semakin meningkat maka bisa menghambat tanaman untuk tumbuh.

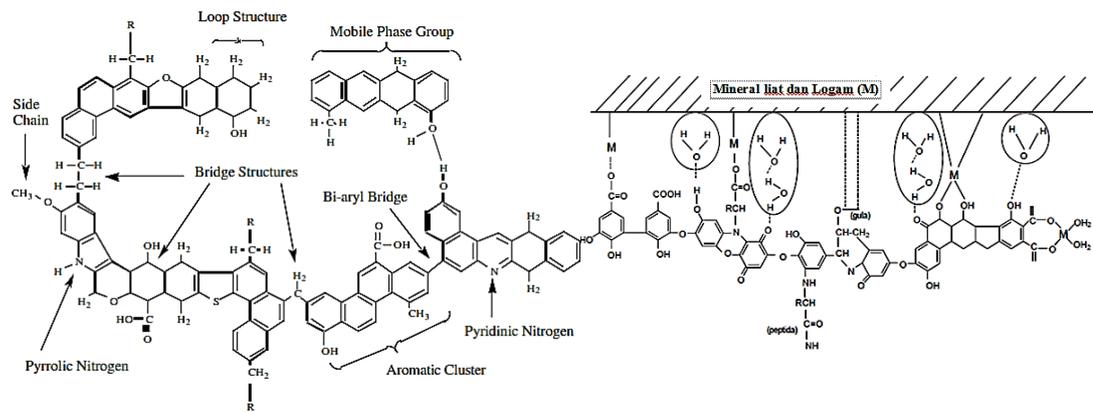
3.3 Potensi Batubara Sub-bituminus dan Biochar Limbah Kelapa Muda Sebagai Bahan Amelioran

Empat jenis batubara tersebut, Lignit dan Sub-bituminus merupakan jenis batubara yang memiliki nilai kalori rendah (Mathews dan Chaffee, 2012). Pemanfaatan batubara Lignit dan Sub-bituminus tidak efektif dan kurang ekonomis sebagai sumber energi, namun dapat dijadikan sebagai sumber amelioran dalam bentuk senyawa humat. Potensi batubara sebagai salah satu sumber amelioran alternatif yang berperan penting dalam produktifitas tanah dan tanaman dalam bidang pertanian. Proses pembentukan batubara membentuk pengkristalan bahan organik yang menyebabkan reaksi berpasangan dan tertutup, dimana gugus fungsional pada batubara akan membentuk rantai yang tertutup sehingga tidak memiliki muatan, hal tersebut terjadi disebabkan oleh pengaruh panas yang sangat tinggi, sehingga rantai yang awalnya terbuka dan memiliki muatan menjadi tertutup (Gambar 2A).

Batubara sebagai salah satu bahan organik yang berperan penting dalam menentukan kemampuan tanah untuk mendukung produksi dan pertumbuhan tanaman. Menurut Tan (2010) bahan organik tanah dibagi menjadi bahan yang tidak terhumifikasi dan yang terhumifikasi. Bahan yang tidak terhumifikasi adalah senyawa yang berada pada tanaman dan organisme lain yang memiliki ciri khas seperti karbohidrat, asam amino, protein, lipid, asam nukleat dan lignin. Sedangkan yang terhumifikasi dikenal sebagai humus atau senyawa humat dan dianggap sebagai produk akhir dari dekomposisi bahan organik.

A

B



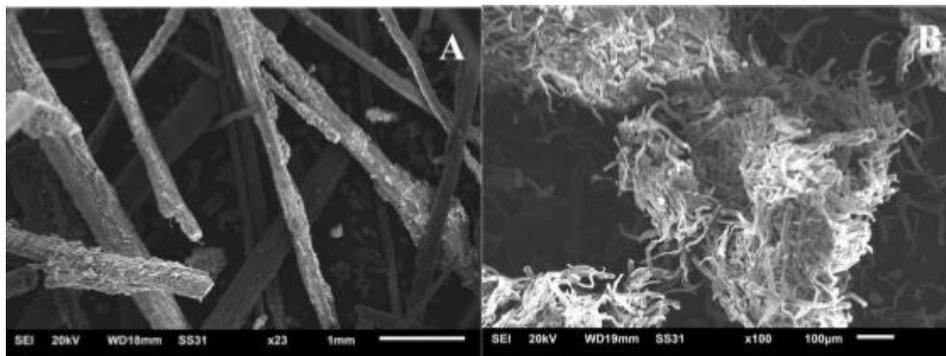
Gambar 3.1 (A) Reaksi thermolitik batubara Sub-bituminus dan (B) Reaksi khelat dalam Ikatan van der Waals antara asam humat dengan mineral liat dan logam (Tan, 2010)

Senyawa humat merupakan senyawa kompleks makromolekul aromatik mengandung asam amino, gula amino, peptida, senyawa alifatik yang saling terikat. Senyawa humat mudah ditemukan pada bahan organik yang sedang terjadi dekomposisi, sehingga asam humat dan asam fulfat berperan sebagai penghubung antara pertikel liat dengan membentuk ikatan kompleks liat – logam – humus (Gambar 2B). Menurut Prasetyo (2019) bahwa aplikasi asam humat dari 0 sampai 600 mg kg⁻¹ yang diikuti dengan 2 minggu irigasi intermiten menurunkan konsentrasi Fe²⁺. Itu mendekati kadar yang tidak beracun bagi tanaman, dengan Fe²⁺ tanah antara 180-250 mg kg⁻¹. Perlakuan terbaik didapatkan pada aplikasi asam humat 600 mg kg⁻¹ yang diekstraksi dari kompos jerami padi dikombinasikan dengan penggenangan 2 minggu – 2 minggu kapasitas lapang pengelolaan air. Perlakuan tersebut menurunkan konsentrasi Fe²⁺ dari 1.614 menjadi 180 mg kg⁻¹ dan meningkatkan berat kering gabah dari 5,15 menjadi 16,73 g pot⁻¹ dibandingkan dengan penggenangan terus menerus dan tanpa aplikasi asam humat. Pengembangan senyawa humat dari batubara dengan melakukan proses aktivasi dari batubara Sub-bituminus. Menurut Prasetyo (2018) Penambahan bubuk batubara Sub-bituminus (PBS) berinteraksi dengan aktivator untuk meningkatkan N total tanah dan tinggi tanaman, tertinggi dicapai pada dosis 30 ton ha⁻¹ PBS dengan urea sebagai aktivator dan penambahan PBS dengan dosis 30 ton ha⁻¹ mampu meningkatkan pH, C organik, P tersedia, KTK Ultisol serta kadar N dan P tanaman sebesar 0,03% dan 0,05% dibandingkan dengan dosis 10

ton ha⁻¹ serta penambahan urea sebagai aktivator meningkatkan pH sebesar 0,09 satuan, C-organik sebesar 0,18%, P tersedia di Ultisol sebesar 0,92 ppm, dan KTK sebesar 2,10 cmol (+)/kg, serta menurunkan pertukaran Al sebesar 0,49 cmol (+)/kg dan peningkatan nitrogen tanaman sebesar 0,07%, jumlah daun sebesar 1,64 daun, bobot kering semai sebesar 9,19g dibandingkan dengan perlakuan tanpa aktivator.

Biochar merupakan karbon hitam yang terbentuk dari proses pyrolisis atau disebut proses pemanasan biomassa dalam kondisi minim oksigen. Penggunaan biochar digunakan sebagai bahan pembenah tanah untuk kesuburan tanah pertanian. Menurut Wilson (2014) biochar yang dihasilkan menyerupai bentuk asli dari biomassa yang hitam dan mengerut. Secara mikroskopis sebagian besar struktur biochar mewarisi struktur biomassa asli. Salah satu pembeda adalah material yang telah dikonversi dari bentuk lignin, selulosa, dan hemiselulosa ke bentuk karbon yang banyak yang dapat bersumber dari biomassa dan limbah organik seperti limbah kelapa muda.

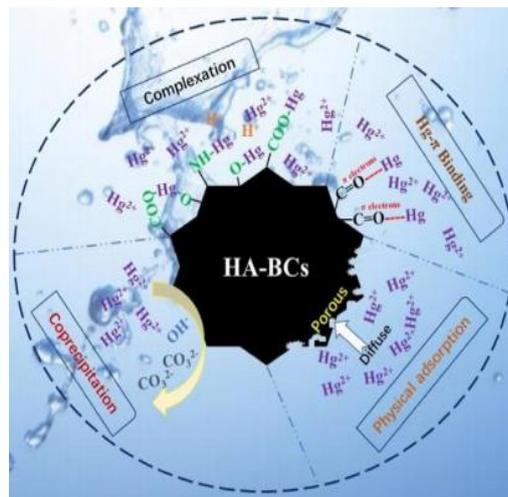
Berdasarkan Cerqueira *et al.*, (2017) kandungan selulosa, lignin, dan hemiselulosa pada buah kelapa muda masing-masing sebesar 32,0%, 38,0%, dan 0,25%, dimana kandungan lignin dan selulosa tanaman muda bervariasi, dan hanya stabil saat pematangan, sedangkan secara khusus ditemukan bahwa kandungan lignin dan selulosa pada buah kelapa muda bervariasi antara 37.2% - 43.9% dan 31.5% - 37.4%. Pada Gambar 8 menunjukkan SEM dari serat (Gambar 4A) dan selulosa (Gambar 4B) limbah kelapa muda.



Gambar 3.2. SEM dari serat (A) dan selulosa (B) dari limbah kelapa muda (Rentang 1 mm dan 100 µm) (Cerqueira *et al.*, 2017)

Biochar dapat digunakan sebagai bahan ameliorant untuk menurunkan konsentrasi logam tanah masam seperti Al dan Fe. Efektifitas penambahan

biochar untuk memperbaiki sifat kimia tanah tergantung pada jenis biochar yang digunakan serta dosis yang diberikan pada tanah yang bermasalah (Nurida, 2014). Pemakaian biochar dapat menurunkan tingkat toksisitas logam berat pada tanah bekas penambangan. Penambahan biochar juga dapat memperbaiki sifat fisik tanah (tekstur, struktur, ukuran pori, kapasitas tahan air, kepadatan tanah). Logam berat yang memiliki mobilitas tinggi dapat diserap oleh tanaman dalam bentuk radikal (bebas). Sehingga dengan penambahan biochar ke tanah sangat efektif dalam imobilisasi logam berat yang menyebabkan ketersediaan (bioavailabilitas) logam berat dalam tanah berkurang serta juga dapat mengurangi daya cemar saat diserap oleh tumbuhan (phytoxiaty) (Hidayat, 2015).



Gambar 3.3. Mekanisme reaksi Penjerapan Hg dengan asam humat (HA) dan biochar (BCs) (Zhang *et al.*, 2020)

Teknologi ameliorasi merupakan proses yang memanfaatkan berbagai jenis bahan organik atau anorganik yang telah terbukti dapat menginaktivasi logam berat melalui pembentukan kompleks tak larut antara logam berat dengan bobot molekul tinggi seperti senyawa humat (HS) dan tingginya luas permukaan seperti biochar. HS dan biochar dapat dibuat dari berbagai bahan organik, biomass dan limbah pertanian, yang bersifat ekonomis dan berkelanjutan, dalam meningkatkan kesuburan tanah dan remediasi logam berat. Senyawa humat dan biochar disisi lain juga memiliki afinitas yang sangat tinggi terhadap Hg^{2+} . Merkuri dapat berikatan dengan bahan organik dalam berbagai cara. Gugus fungsional dari senyawa organik, seperti hidroksil, karboksilat, ligan aromatik dan yang mengandung S dapat memfasilitasi pengikatan Hg^{2+} kationik. Merkuri dalam

tanah cenderung terbentuk ikatan kovalen dengan situs aktif S tereduksi yang tersedia (Reis *et al.*, 2015). Menurut Prasetyo (2021) aplikasi biochar bambu dan sub-bituminous dapat meningkatkan karakteristik kesuburan Ultisol. Terdapat dua perlakuan yang memberikan hasil paling nyata untuk perbaikan sifat tanah yaitu perlakuan 100% Sub-Bituminus berpengaruh nyata terhadap peningkatan pH (1,3 pH unit), C organik (3,34%), N Total (0,12%), KTK (10,87) cmol/kg dan Ca^{2+} (1,2%). Namun, perlakuan 50% Sub-Bituminus + 50% biochar bambu memiliki pengaruh yang signifikan dalam meningkatkan P (1,1 ppm), KTK (9,04 cmol/kg) K^+ (0,51 cmol/kg), Ca^{2+} (1,37 cmol/kg), dan Mg^{2+} (1,27cmol/kg). Selain itu, aplikasi 50% Sub-Bituminus + 50% biochar bambu memberikan hasil terbaik hasil untuk tinggi tanaman, cabang dan daun tanaman kopi.

BAB 4. METODE PENELITIAN

4.1. Tahun 1 (2022)

Penelitian ini dilakukan sebagai dasar dalam penetapan komposisi dan persentase formulasi amelioran pada penelitian Tahun 2 dan 3. Penelitian Tahun 1 menggunakan tanah bekas tambang yang memiliki tingkat kandungan Hg tertinggi di Kabupaten Dharmasraya yang akan diaplikasikan dengan jenis dan takaran amelioran.

Tabel 2. Takaran amelioran terhadap masing – masing amelioran

Kode	Jenis dan Takaran Amelioran
P.1 A	0 t ha P-SC
P.1 B	10 t ha P-SC
P.1 C	20 t ha P-SC
P.1 D	30 t ha P-SC
P.1 E	40 t ha P-SC
P.2 A	0 t ha A-SC
P.2 B	10 t ha A-SC
P.2 C	20 t ha A-SC
P.2 D	30 t ha P-SC
P.2 E	40 t ha A-SC
P.3 A	0 t ha B-YC _w
P.3 B	10 t ha B-YC _w
P.3 C	20 t ha B-YC _w
P.3 D	30 t ha B-YC _w
P.3 E	40 t ha B-YC _w

Keterangan : P-SC = Bubuk batubara Sub-bituminus; A-SC = Aktivasi kimia bubuk batubara dengan 10% NaOH dan B-YC_w = Biochar limbah kelapa muda.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari : (1) pengaruh jenis amelioran terhadap tanah bekas tambang emas tercemar merkuri di Kabupaten Dharmasraya dan (2) pengaruh takaran amelioran terhadap tanah bekas tambang emas tercemar merkuri di Kabupaten Dharmasraya. Penelitian Tahun 1 menggunakan Rancangan Acak Lengkap dengan 3 ulangan pada masing – masing percobaan yang terdiri dari 3 amelioran (P.1 = P-SC; P.2 = A-SC; P.3 = BC) dengan masing – masing percobaan terdiri dari 5 takaran [A = 0 t ha⁻¹ (0g 100g tanah⁻¹); B = 20 t ha⁻¹ (0.5g 100g tanah⁻¹); C = 20 t ha⁻¹ (1g 100g tanah⁻¹); D = 30 t ha⁻¹ (1.5g 100g tanah⁻¹) dan E = 40 t ha⁻¹ (2g 100g tanah⁻¹)] seperti yang terlihat pada Tabel 2.

4.1.1 Pelaksanaan Penelitian

a. Persiapan Bahan Baku

Bahan baku yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah batubara dan limbah kelapa muda. Batubara akan diambil dari Kenagarian Ganggo Mudiak Kecamatan Bonjol Kabupaten Pasaman Sumatera Barat pada kedalaman 1–2 meter dari permukaan tanah. Tipe dari batubara yang akan digunakan yaitu Sub-bituminus berdasarkan hasil penelitian Rezki *et al.*, (2007). Batubara tersebut dibersihkan menggunakan air mengalir, lalu dikeringkan pada suhu kamar (25⁰C) selama 2*24 jam di Rumah Kaca Fakultas Pertanian Universitas Andalas dan dihancurkan dengan menggunakan mesin penggiling *Disc Mill* model FFC 23 dan pengayakan dengan kehalusan ayakan 0.50 mm dengan menggunakan *Electromagnetic Sieve Shaker* EMS-8 selama 10 menit. Selanjutnya, bubuk batubara siap untuk digunakan dan di ekstraksi menjadi senyawa humat.

Limbah kelapa muda diperoleh dari hasil limbah pedagang air kelapa muda yang ada di sekitar Kota Padang. Selanjutnya limbah kelapa muda dicacah menjadi ukuran kecil ($\geq 50 \text{ cm}^2$) dan dikeringkan pada suhu kamar (25⁰C) selama 7 * 24 jam di Rumah Kaca Fakultas Pertanian Universitas Andalas. Selanjutnya, limbah kelapa muda siap untuk di karbonisasi dengan menggunakan Metode Kontiki sesuai dengan prinsip pirolisis dengan suhu 682⁰C dan lama pembakaran 41 menit (Maulana *et al.*, 2021).

b. Proses Aktivasi Kimia Bubuk Batubara Sub-bituminus

Bubuk batubara ditimbang berdasarkan takaran dan persentase formulasi yang akan digunakan (bobot sampel). Aktivasi dilakukan dengan memberikan 10% NaOH sebagai bahan pengaktif yang dilarutkan dengan H₂O/ akuades berdasarkan kapasitas lapang pada bubuk batubara Sub-bituminus. Selanjutnya komposisi tersebut diaduk rata dan didiamkan selama 1*24 jam di dalam gelas piala 250 mL dan, ditutup dengan aluminium foil yang dilapisi dengan plastik *wrapping*. Hasil aktivasi bubuk batubara Sub-bituminus dikeringkan dengan menggunakan oven pada suhu 70⁰C selama 1*24 jam dengan tujuan untuk menghomogenkan kadar air dalam amelioran (Herviyanti *et al.*, 2018; Maulana, 2020). Selanjutnya hasil aktivasi dianalisis di laboratorium.

c. Proses Karbonasi dari Limbah Kelapa Muda

Limbah kelapa muda yang telah dikeringanginkan pada suhu kamar, kemudian dioven pada 70⁰C selama 1*24 jam untuk mendapatkan berat kering konstan dari bahan baku yang akan digunakan. Limbah kelapa muda ditimbang sebanyak 10 kg untuk proses pirolisis. Proses karbonasi akan dilakukan menggunakan metode Kon-Tiki dengan prinsip pirolisis. Arang yang terbentuk dari metode Kon-Tiki disiram menggunakan air dan dioven pada suhu 70⁰C selama 2*24 jam untuk mendapatkan berat kering dan nilai rendemen arang yang dihasilkan selama proses pirolisis. Arang yang dihasilkan diayak menggunakan *Electromagnetic Sieve Shaker* EMS-8 selama 10 menit pada ayakan yang berukuran 0.50 mm. Selanjutnya, biochar limbah kelapa muda dianalisis di laboratorium untuk mempelajari morfologi dan karakteristik arang yang dihasilkan (Singh *et al.*, 2017; Maulana *et al.*, 2021).

d. Persiapan Tanah dan Pemberian Perlakuan

Tanah bekas tambang yang akan digunakan untuk percobaan merupakan tanah bekas tambang yang memiliki kadar Hg tertinggi yang kemudian akan diambil secara komposit pada kedalaman 0 - 20 cm, dari permukaan tanah bekas tambang di Kabupaten Dharmasraya. Kemudian sampel tanah dikeringanginkan, dihaluskan kemudian diayak dengan ayakan 2 mm dan diaduk hingga homogen. Kadar air tanah ditetapkan, kemudian sampel yang sudah diayak dimasukkan kedalam pot masing – masingnya setara 100g tanah setara kering mutlak.

Berbagai jenis amelioran yang telah disiapkan sesuai dengan takaran perlakuan pada percobaan 1 (Tabel 2). Takaran dari masing – masing jenis amelioran di campurkan dengan tanah pada masing – masing pot percobaan dengan berat tanah 100g setara kering mutlak, selanjutnya diaduk rata dan ditambahkan H₂O/ akuades sesuai dengan kadar air kapasitas lapang dari tanah yang digunakan dan kemudian di inkubasi selama 1 minggu. Setelah proses inkubasi tanah dilakukan, selanjutnya dilakukan pengambilan sampel tanah untuk dianalisis di laboratorium.

e. Pengamatan

Analisis tanah yang akan dilakukan pada penelitian Tahun 1 dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter sifat kimia tanah bekas tambang emas di Kabupaten Dharmasraya (Balai Penelitian Tanah, 2012).

No	Parameter	Satuan	Metode Analisis
1	pH	unit	Elektrometrik
2	Abu dan Bahan organik	%	<i>Dry-Ashing</i> dan <i>Walkley and Black</i>
3	KTK	cmol _c kg ⁻¹	<i>Leaching</i> NH ₄ OAc pH 7
4	MTN	unit	Titrasi Garam
5	Total Hg	ppm	Uap Dingin

Keterangan : KTK = Kapasitas tukar kation; MTN = Muatan titik nol.

4.2 Tahun 2 (2023)

Penelitian ini dilakukan berdasarkan dari penelitian Tahun 1 yang menggunakan jenis dari masing – masing amelioran dan satu dosis terpilih yang akan digunakan dalam penelitian Tahun 2.

Tabel 4. Persentase formulasi terhadap masing – masing komposisi amelioran

Kode	Komposisi dan Persentase Formulasi Amelioran
P.1 A	100% P-SC
P.1 B	75% P-SC + 25% B-YC _w
P.1 C	50% P-SC + 50% B-YC _w
P.1 D	25% P-SC + 75% B-YC _w
P.1 E	100% B-YC _w
P.2 A	100% A-SC
P.2 B	75% A-SC + 25% B-YC _w
P.2 C	50% A-SC + 50% B-YC _w
P.2 D	25% A-SC + 75% B-YC _w
P.2 E	100% B-YC _w

Keterangan : (P-SC + B-YC_w) = Bubuk batubara Sub-bituminus dan Biochar limbah kelapa muda; (A-SC + B-YC_w) Bubuk batubara Sub-

bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan Biochar limbah kelapa muda.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari: (1) morfologi dan karakteristik komposisi dan persentase formulasi amelioran dari batubara Sub-bituminus dengan biochar limbah kelapa muda dan (2) kemampuan formulasi amelioran dari batubara Sub-bituminus dengan biochar limbah kelapa muda dalam adsorpsi Hg. Penelitian Tahun 2 menggunakan Rancangan Acak Lengkap dengan 3 ulangan pada masing – masing percobaan yang terdiri 2 komposisi ameliorant (P.1 = P-SC + BC dan P.2 = A-SC + BC) dengan masing – masing percobaan terdiri dari 5 persentase formulasi (A = 100% SC; B = 75% sc + 25% BC; C = 50% SC + 50% BC; D = 25% SC + 75% BC dan E = 100% BC) seperti terlihat pada Tabel 4.

4.2.1 Pelaksanaan Penelitian

a. Proses Formulasi Batubara Sub-bituminus dengan Biochar dari Limbah Kelapa Muda

Penetapan Formulasi amelioran ditetapkan atas dasar percobaan 1 sebagai 100% formulasi amelioran (FA). FA ditimbang berdasarkan kapasitas retensi air pada masing – masing jenis amelioran yang digunakan. Kombinasi formulasi amelioran dilakukan sesuai dengan takaran perlakuan pada penelitian Tahun 2 (Tabel 4) dan kemudian dihomogenkan didalam gelas piala 100 mL dengan menggunakan shaker dengan kecepatan 300 rpm selama 30 menit. Hasil formulasi dikeringkan dengan menggunakan oven pada suhu 70⁰C selama 1*24 jam. Selanjutnya formulasi amelioran dianalisis di laboratorium.

b. Adsorpsi Hg Pada Formulasi Amelioran

Percobaan adsorpsi dilakukan dengan menimbang sampel 0,5g sampel dari masing – masing percobaan 2 dalam 20 ml larutan NaNO₃ 0,1M, sedangkan untuk konsentrasi Hg(NO₃)₂ yang digunakan adalah 5, 10, 15, 20 dan 25 ppm dengan elektrolit pendukungnya adalah NaNO₃ 0,1M (Zhang *et al.*, 2012). Penetapan konsentrasi Hg(NO₃)₂ berdasarkan penelitian Tahap I. Selanjutnya dishaker (300 rpm) pada suhu 25⁰C selama 24 jam (Chen *et al.*, 2017) dalam tabung sentrifus. Setelah periode ekuilibrase, suspensi disentrifugasi pada 4000 rpm menit⁻¹ selama 30 menit. Konsentrasi Hg dalam supernatan dianalisis dengan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS). Jumlah total Hg yang teradsorpsi dihitung dengan perbedaan

antara konsentrasi Hg awal dan konsentrasi Hg kesetimbangan. Selanjutnya hasil adsorpsi dianalisis menggunakan Ms. Excel 2016 dan Software SPSS 16.

c. Pengamatan

a. Morfologi dan Karakteristik Formulasi Amelioran

Analisis morfologi dan karakteristik yang akan dilakukan pada percobaan 2 :
(a) Vibrasi molekul dikarakterisasi dengan *Inframerah Transformasi Fourier* (FTIR) Shimadzu 8400; (b) Morfologi permukaan dan komposisi dikarakterisasi dengan *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) HITACHI S-3400N; (c) Struktur pori dipelajari melalui *Surface Area Analyzer* (SAA) dengan Quantachrome AsiQwin V3.01 pada temperatur 77K dimana luas permukaan ditentukan dengan metode BET (*Brunaur, Emmett and Teller*) dan volume pori ditentukan dengan metode BJH (*Barret, Joyner and Halenda*) dan (d) Karakteristik tambahan: (1) komposisi elemen menggunakan *X-ray Photoelectron Spectroscopy*; (2) kandungan Proksimat dengan menggunakan metode Gravimetri; (3) nilai pH dan Daya hantar listrik (EC) dengan menggunakan metode Elektrometrik; (4) Muatan Titik Nol (PZC) dengan menggunakan metode Titrasi Garam (CaCl_2 2M); (5) KTK menggunakan metode *Leaching* NH_4OAc 1M pH 7 dan (6) Kandungan C Inorganik dan C Organik dengan menggunakan metode Titrimetrik dan *Walkley and Black* (Balai Penelitian Tanah, 2012; Singh *et al.*, 2017).

b. Analisis Adsorpsi Hg

Perhitungan parameter adsorpsi yang relevan untuk Hg terhadap formulasi amelioran melalui regresi linier yang dipasangkan dengan persamaan Langmuir dan Freundlich Isoterm :

$$\text{Persamaan Langmuir : } Q_e = Q_m * K_l * C_e / 1 + K_l * C_e$$

$$\text{Persamaan Freundlich : } Q_e = K_f * C_e^{1/n}$$

Dimana : Q_e = efektivitas adsorpsi (mg g^{-1}); Q_m = adsorpsi maksimal (mg g^{-1}); K_l = konstantas Langmuir (L mg^{-1}); K_f = konstanta Freundlich ($\text{mg}^{n+2} * \text{L}^n$); C_e = konsentrasi kesetimbangan dan n = konstanta adsorpsi.

4.3 Tahun 3 (2024)

Penelitian Tahun 3 merupakan aplikasi formulasi amelioran dengan teknik inaktivasi berdasarkan dari hasil penelitian Tahun 2. Hasil Tahun 2 yaitu

formulasi amelioran (FA) dari masing – masing komposisi dan persentase terpilih yaitu terdiri dari satu terbaik. Percobaan ini bertujuan mempelajari: (1) pengaruh FA terpilih terhadap perbaikan sifat kimia tanah bekas tambang emas dan (2) pengaruh FA terpilih terhadap pertumbuhan tanaman *Tithonia diversifolia* pada tanah bekas tambang emas. Penelitian ini akan menggunakan Rancangan Acak Lengkap dengan 3 ulangan di Rumah Kaca Fakultas Pertanian Universitas Andalas, dimana komposisi dan persentase formulasi terpilih yaitu: A_0 = Kontrol; A_1 = PSC + B-YC_w Terpilih dan A_2 = ASC + B-YC_w Terpilih.

4.3.1 Pelaksanaan Penelitian

a. Persiapan Tanah dan Pemberian Perlakuan

Tanah bekas tambang yang akan digunakan untuk percobaan merupakan tanah bekas tambang yang memiliki kadar merkuri tertinggi dari hasil penelitian Tahap I yang kemudian akan diambil secara komposit pada kedalaman 0-20 cm, dari permukaan tanah bekas tambang di Kabupaten Dharmasraya. Kemudian sampel tanah dikeringanginkan, dihaluskan kemudian diayak dengan ayakan 2 mm dan diaduk hingga homogen. Kadar air tanah ditetapkan, kemudian sampel yang sudah diayak dimasukkan kedalam pot masing – masingnya setara 10kg tanah setara kering mutlak.

FA yang akan digunakan merupakan perlakuan terpilih dari penelitian Tahun 2, kemudian dihitung kembali sesuai dengan perlakuan pada penelitian Tahun 3. Selanjutnya FA dihomogenkan dengan tanah pada masing - masing pot perlakuan dengan berat tanah 10kg setara kering mutlak didalam pot, kemudian diaduk rata dan disiram menggunakan H₂O sesuai dengan kadar air kapasitas lapang dari tanah yang digunakan dan diinkubasi lagi selama 2 minggu. Kemudian dilakukan pengambilan sampel tanah untuk dianalisis di laboratorium dan dilakukan proses penanaman *T. diversifolia* sebagai indikator.

b. Aplikasi Formulasi Amelioran dari Batubara Sub-bituminus dengan Biochar Limbah Kelapa Muda dengan Teknik Inaktivasi Terhadap Pertumbuhan Tanaman *Tithonia diversifolia* Pada Tanah Bekas Tambang Emas

1. Pembibitan dan Penanaman

Bahan tanam *T. diversifolia* berasal dari bibit stek batang sepanjang 20 cm yang telah ditanam terlebih dahulu dalam polibag selama 4 minggu. Setelah itu dilakukan proses penanaman pada masing – masing pot sesuai dengan perlakuan.

Bibit dimasukkan kedalam lubang tanam dengan posisi tunas tegak lurus ke arah atas, lalu ditutupi kembali dengan tanah. Kemudian dilakukan proses pengamatan dan pemeliharaan selama 3 bulan. Penyulaman tanaman/ rumpun dilakukan apabila terdapat rumpun yang mati. Bahan sulaman dapat diambil dari bibit yang disisakan di persemaian pembibitan yang sebelumnya memang sudah dipersiapkan, harus ada kelebihan bibit di persemaian untuk bahan sulaman.

2. Pemeliharaan

Pemeliharaan berupa penyiangan, dilakukan bila banyak ditemui rumput di sekitar rumpun dengan maksud mengurangi persaingan hara tanaman dan mengurangi kelembaban lingkungan yang menyebabkan munculnya hama dan penyakit. Sedangkan, penyiraman, dilakukan 2 kali sehari yaitu pagi dan sore, dimana penyiraman dilakukan hingga tanah berada pada keadaan kapasitas lapang.

3. Panen

Panen biomassa pada umur 24 minggu setelah perlakuan. Panen dilakukan dengan mencabut 1 tanaman dari setiap pot percobaan untuk mengambil sampel tanah yang menempel di perakaran dan menghitung bobot kering biomassa (daun, tangkai daun, batang dan akar) dan kadar Hg yang ada dalam biomassa.

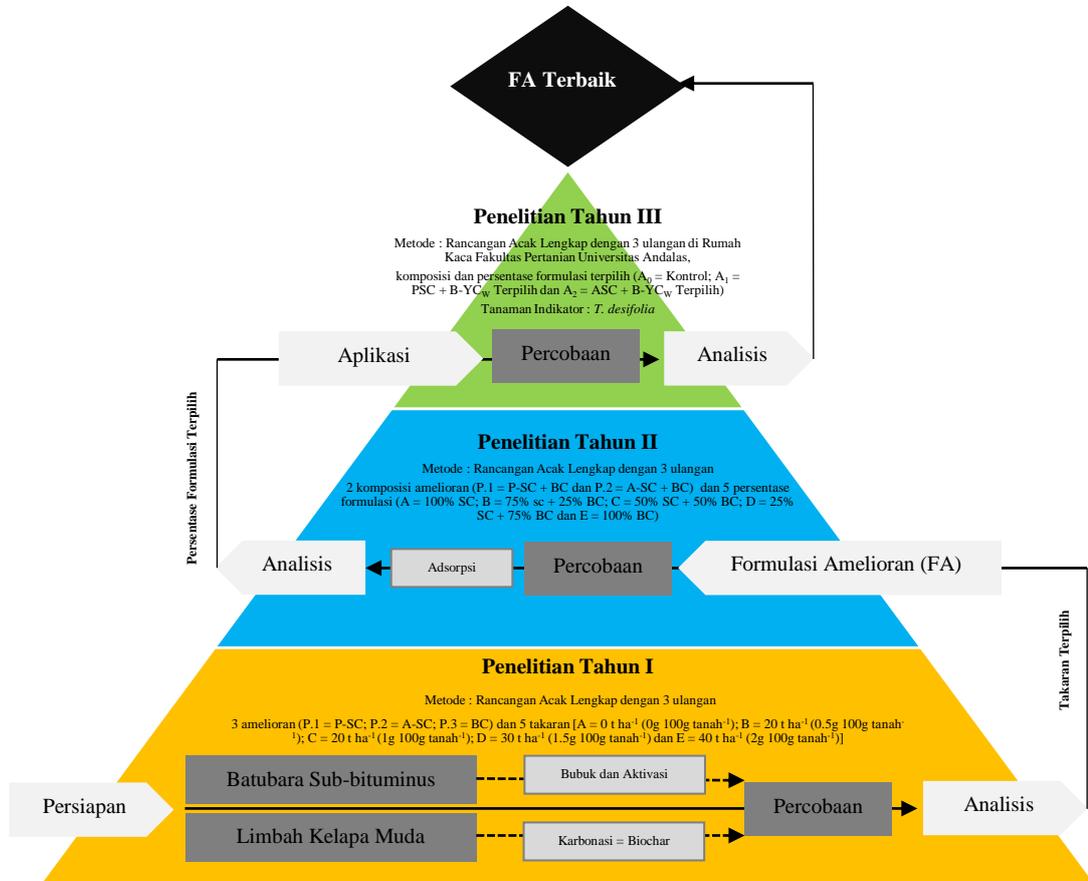
c. Pengamatan

1. Analisis Tanah

Analisis tanah yang akan dilakukan yaitu setelah proses inkubasi dan saat panen diarea perakaran tanaman (rizosfer) berupa: (1) Analisis pH H₂O (1:1) dan potensial redoks (Eh) dengan metode elektrometrik yang diukur menggunakan pHmeter; (2) Kandungan Abu dan C Organik dengan metode *Dry-Ashing* dan *Walkley and Black*; (3) Kandungan N-total dengan metode Kjeldahl; (4) Kandungan P-tersedia metode Bray I diukur dengan Spektrofotometer dengan panjang gelombang 889 nm; (5) KTK dan kation basa dengan metoda *Leaching* Ammonium Asetat (NH₄OAc) 1N pH 7 dan kation basa diukur menggunakan AAS; MTN dengan metode titrasi garam dan (7) Kandungan total Hg dengan metode uap dingin dan CH₃Hg dengan metode HPLC-IPC-MS. Prosedur analisis selengkapnya di sajikan pada Lampiran 4.a.

2. Analisis Tanaman

Analisis tanaman yang akan dilakukan berupa: (1) Tinggi , jumlah cabang utama dan diameter batang yang akan diamati selama 3 bulan setelah pelakuan dilakukan (2) Kadar Hara N, P, dan K dengan metode destruksi basah (H_2SO_4 96% p.a dan H_2O_2 30%) dan (3) Kandungan CH_3Hg metode HPLC-IPC-MS pada masing – masing tanaman.



Gambar 4.1 Alir Penelitian

BAB 5. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian Tahun I telah selesai dilakukan secara keseluruhan. Hasil dan luaran yang telah dicapai yaitu Pertama, draft artikel yang sudah di dalam proses under-review di International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology (IJASEIT) yang terindeks Scopus Q2 yang terfokus kepada tanah bekas tambang emas yang diameliorasi dengan batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH. Kedua, draft dan artikel dalam proses under-review di prosiding IOP terindek Scopus Q4 dalam kegiatan konferensi internasional ASIC 2022. Penjelasan secara lengkap terhadap aplikasi ameliorant yang digunakan sebagai berikut :

A. Aplikasi Batubara Sub-Bituminus Pada Tanah Bekas Tambang Emas Tercemar Merkuri

Hasil karakteristik kimia tanah bekas tambang emas yang telah diperbaiki dengan SC dapat dilihat pada Tabel 5.1. Nilai pH tanah bekas tambang emas dijelaskan melalui dua larutan yaitu H₂O (aktif) dan KCl 1M (potensi). Pada larutan tanah dan koloid tanah terdapat muatan H⁺, dimana nilai pH yang diperoleh pada larutan KCl lebih rendah dari pada larutan H₂O. Pada Tabel 1, aplikasi SC secara signifikan meningkatkan pH H₂O dengan nilai pH larutan KCl lebih kecil dari H₂O. Selain itu, peningkatan pH dan dosis aplikasi pada dosis 40 t ha⁻¹ SC paling baik pada peningkatan pH H₂O masing-masing sebesar 0,37 dan pH KCl tanah bekas tambang emas sebesar 0,07 pada dosis 40 t ha⁻¹ SC. dibandingkan dengan kontrol. Menurut Herviyanti *et al.*, (2012; 2017; 2019) aplikasi batubara Sub-bituminous dapat meningkatkan nilai pH tanah karena memiliki gugus fungsi COOH dan OH. SC mengandung gugus fungsi hidroksil dan karboksil, yang dapat mengikat logam terlarut, artinya gugus fungsi mengikat logam seperti Al sehingga Al dalam tanah menurun sehingga pH naik.

Pada Tabel 5.1, nilai EC meningkat dengan meningkatnya dosis aplikasi SC. Pengaruh SC memberikan pengaruh yang nyata terhadap EC pada tanah bekas tambang emas dengan dosis terbaik pada 40 t ha⁻¹ dengan peningkatan sebesar 0,04 dS m⁻¹ dibandingkan dengan kontrol. Menurut Wang *et al.*, (2017), gerakan ion bermuatan satu ditentukan oleh keseimbangan gaya sederhana yang melibatkan medan listrik dan resistansi kental larutan. Persentase natrium yang dapat ditukar (ESP), kapasitas tukar kation (KTK), luas permukaan spesifik tanah

(S), kerapatan muatan permukaan tanah (δ_0), potensial permukaan tanah (ϕ_0), dan kekuatan medan listrik permukaan tanah adalah permukaan tanah yang paling penting. parameter elektrokimia (E_0) (Li *et al.*, 2019; Toledo, 2020; Liu *et al.*, 2022). Namun terlihat berbeda dengan nilai potensial redoks pada tanah bekas tambang emas, dimana nilai potensial redoks semakin menurun dengan bertambahnya dosis aplikasi SC, dimana menurun sebesar 0,01 volt pada dosis 40 t ha⁻¹ dibandingkan dengan kontrol. Laju transfer elektron umumnya membatasi reaksi reduksi dalam kondisi anaerobik, yang dapat dipercepat oleh mediator redoks dengan reaksi tertentu. Gugus fungsi aktif redoks seperti kuinon dan dapat mentransfer elektron dan menyumbangkannya ke mineral, sehingga mempercepat reduksi (Zhang *et al.*, 2018).

Aplikasi SC terhadap nilai KTK meningkat seiring dengan peningkatan dosis aplikasi dan berpengaruh nyata terhadap KTK tanah bekas tambang emas. Dosis 40 t ha⁻¹ paling baik dalam meningkatkan KTK tanah bekas tambang emas sebesar 2,14 cmol kg⁻¹ dibandingkan dengan kontrol. Interaksi lempung dengan gugus SC memiliki afinitas yang kuat terhadap asam lemah yang mengandung gugus hidroksil dan karboksil. Perubahan sifat elektrokimia lempung berkaitan erat dengan jumlah kompleks aluminium hidroksi yang tergabung dalam lempung serta komposisi kimia dan sifat muatannya. Pengaruh jumlah interlayer terhadap kapasitas tukar kation lempung mempengaruhi titik muatan nol (Preocanin *et al.*, 2016). Pada Tabel 5.1, aplikasi SC menyebabkan penurunan komposisi kandungan mineral dan peningkatan SOM seiring dengan peningkatan dosis aplikasi yang diberikan (0 - 40 t ha⁻¹), dimana aplikasi SC berpengaruh signifikan terhadap mineral dan SOM di lahan bekas tambang emas. Penurunan kandungan mineral pada aplikasi 40 t ha⁻¹ SC sebesar 7,04% dibandingkan dengan kontrol, dan juga terlihat bahwa dosis terbaik untuk meningkatkan SOM adalah 40 t ha⁻¹ sebesar 7,83% dibandingkan dengan kontrol. Menurut Gill *et al.*, (2015) batubara sub-bituminus memiliki kadar abu sekitar 34,90% - 46,30% dan kadar C sekitar 33,68% - 44,28%. Struktur molekul polimer SC dapat terdiri dari cincin aromatik enam karbon dari basis fenol di atau trihidroksi yang dihubungkan oleh -O-, -NH-, -N-, -S-, dan mengandung gugus -OH dan kuinon (O-C₆H₄-O-). Senyawa organik siklik yang memiliki berat molekul tinggi, rantai panjang, dan gugus aktif

karboksil (-COOH) dan fenolik (-OH) yang merupakan gugus aktif yang dapat mengikat kation/anion pada kondisi pH tertentu (pH-dependent charge).

Karboksilat dari beberapa gugus karboksil dilepaskan di bawah pH 6, meninggalkan muatan negatif pada gugus fungsi. Disosiasi H⁺ dari amida (=NH) juga dapat meningkatkan muatan negatif. Gugus terprotonasi seperti R-OH₂ dan R-NH₃ dapat menghasilkan muatan positif, tetapi keseluruhan humus bermuatan negatif. Peningkatan pH, EC, KTK, dan SOM secara tidak langsung akan meningkatkan aktivitas muatan negatif tanah. Kajian ini penting dilakukan untuk meningkatkan ketersediaan unsur hara dan penyerapan polutan (organik dan anorganik) khususnya pada tanah bekas tambang emas. Teknologi ameliorasi dengan aplikasi SC menunjukkan peningkatan kisaran muatan negatif pada muatan permukaan koloid tanah. Secara umum, sifat muatan permukaan dan sifat keasaman/alkalinitas permukaan tanah termasuk titik muatan nol (PZC). Situs fungsional hidroksil tidak hanya situs adsorpsi proton tetapi juga situs adsorpsi untuk polutan anorganik dan organik lainnya. PZC adalah kondisi tertentu di mana keberadaan muatan positif dan negatif adalah sama. Indeks penting dalam menentukan sifat-sifat pendukung tanah (Wen *et al.*, 2020).

Pada Tabel 5.1, pH PZC menurun dengan meningkatnya dosis aplikasi, sedangkan aplikasi SC signifikan untuk pH PZC, sedangkan pH meningkat dengan meningkatnya dosis. Namun dosis 30 dan 40 t ha⁻¹ masih paling baik dalam meningkatkan pH sebesar 0,33 dan 0,60 dibandingkan dengan kontrol. PH PZC lebih rendah dari pH H₂O, sehingga muatan permukaan bersih dalam tanah adalah negatif. Tanah bekas tambang emas dengan ameliorasi 40 t ha⁻¹ SC memiliki rentang muatan negatif (Δ pH) yang lebih tinggi muatan negatifnya pada permukaan tanah koloid dibandingkan tanah kontrol. Aktivitas muatan negatif yang lebih tinggi diharapkan dapat mengatasi pencemaran Hg pada tanah bekas tambang emas. Deskripsi muatan permukaan biasanya terdiri dari muatan permanen dan muatan variabel dua jenis muatan permukaan di dalam tanah. Muatan permanen terbentuk selama proses pembentukan atau pelapukan tanah melalui efek substitusi isomorfik pada mineral lempung.

Table 5.1. Chemical characteristics of ex-gold mining soil ameliorated with sub-bituminous coal Indonesian

SC (t ha ⁻¹)	Clay	pH H ₂ O	pH KCl	EC	Eh	CEC	Mineral	SOM	pH PZC ^a	ΔpH ^b	Hg
	%	unit		dS m ⁻¹	volt	cmol kg ⁻¹	%	unit		mg kg ⁻¹	
0		4.23 b	4.10 b	0.06 b	0.27 a	2.67 d	98.41 a	1.62 e	3.97 a	0.27 c	6.88 a
10		4.30 b	4.10 b	0.06 b	0.27 a	2.81 cd	96.37 b	3.77 d	3.90 ab	0.40 b	5.87 b
20	7.53%	4.30 b	4.10 b	0.07 b	0.27 a	3.21 c	95.34 c	4.89 c	3.90 ab	0.40 b	5.17 c
30		4.40 b	4.10 b	0.09 a	0.26 b	3.88 b	93.24 d	7.25 b	3.80 b	0.60 ab	4.78 cd
40		4.60 a	4.17 a	0.10 a	0.26 b	4.81 a	91.37 e	9.45 a	3.73 c	0.87 a	4.38 d
CV (%)	-	2.13	0.63	11.07	1.03	6.64	0.18	3.57	2.22	33.80	5.14
Duncan's Test	-	**	*	**	**	**	**	**	*	*	**
Std. Error	-	0.08	0.02	0.01	0.002	0.19	0.14	0.16	0.07	0.14	0.23

Remarks: EC = Electrical conductivity; Eh = Potential redox; CEC = Cation exchange capacity; SOM = Soil organic matter; CV = Coefficient of variation; ** = Significant at the 0.01 level; * = Significant at the 0.05 level and ns = non-significant; n = 15.

Formula : ^a pH PZC = (2*pH KCl) – pH H₂O; ^b ΔpH = pH H₂O – pH PZC

Table 5.2. Characteristics of mineral assignments of ex-gold mining soil ameliorated with sub-bituminous coal Indonesian

Soil	Description of Minerals*		
	Pos. [°2Th.]	d-spacing [Å]	Pattern List (Score – Mineral - Scale Fac.) : Chemical Formula
Ex-GM	26.69	3.34	(79 – Quartz – 0.733) : SiO ₂
Ex-GM + SC	26.73	3.34	(80 - Quartz – 0.533) : SiO ₂

Remarks: Ex-GM = Ex-gold mining soil; Ex-GM + SC = Ex-gold mining soil with ameliorated Sub-bituminous coal Indonesian

Table 5.3. Characteristics of spectral band assignments of ex-gold mining soil ameliorated with sub-bituminous coal Indonesian

Ex-GM	Ex-GM + SC	Assignment
Wavenumbers / Transmittance (cm ⁻¹ / %)		
3746.17/ 97.51	3746.09/ 97.53	v(OH) from non-hydrogen bonded O-H groups
1029.75/ 73.07	1085.48/ 76.06	v(Si-O) from clay minerals associated with SC
779.50/ 80.29	781.92/ 83.81	O-H bending peaks: trio-quatro
689.70/ 85.71	-	Mineral
535.10/ 72.92	539.94/ 78.15	

Remarks: Ex-GM = Ex-gold mining soil; Ex-GM + SC = Ex-gold mining soil with ameliorated Sub-bituminous coal Indonesian

Muatan variabel muncul dari proses protonasi/deprotonasi gugus fungsi permukaan. Tanah terutama ditemukan pada mineral lempung dan oksida logam (Dultz *et al.*, 2019). Komposisi mineral tanah bekas tambang emas dan ameliorasi tanah bekas tambang emas dengan SC ditentukan dengan menggunakan X-ray diffraction (XRD). Tabel 5.2 dan Gambar 2A menunjukkan komposisi mineral deskriptif dan difraktogram XRD. Hasil analisis XRD menunjukkan d-spacing (Å) yang sama sebesar 3,34 setelah aplikasi SC, dengan hasil yang menunjukkan teridentifikasinya mineral Quartz. Kuarsa adalah mineral dengan rumus kimia SiO₂ yang terjadi secara alami dalam dua bentuk, terbukti pada kedua jenis mineral yang terdeteksi di tanah bekas penambangan emas dan setelah penerapan SC. Menurut Götze & Müller (2021) varietas alfa-kuarsa trigonal, suhu rendah, yang permukaannya stabil, dapat mengalami modifikasi yang paling sering dan substansial. Struktur kristal alfa-kuarsa adalah jaringan tiga dimensi [SiO₄]⁴⁻-tetrahedra yang dihubungkan oleh atom oksigen dan tersusun dalam rantai heliks sepanjang sumbu-c untuk membentuk saluran struktural. Kuarsa adalah salah satu mineral paling murni di kerak bumi, di mana dalam hal kontaminan kimia dinyatakan sebagai konsentrasi elemen jejak hingga muatan ionik dan batas radius, dapat menggantikan Si⁴⁺ dalam kisi kristal atau berintegrasi dengan daerah interstisial. Sebagian besar unsur hadir pada konsentrasi kurang dari satu ppm dalam kuarsa. Ion monovalen dan divalen dapat menempati sejumlah kecil situs kisi interstisial, seperti halnya ion substitusi trivalen dengan kompensasi muatan.

Studi FT-IR menentukan variasi gugus fungsi dan ikatan kimia pada tanah bekas tambang emas sebelum dan sesudah aplikasi SC. Berdasarkan sifat kimianya (Tabel 5.3 dan Gambar 2B), aplikasi SC dapat memperbaiki karakteristik muatan permukaan (KTK, dan pH) tanah bekas tambang emas serta meningkatkan kapasitas adsorpsi tanah terhadap Hg (Tabel 5.1). dan komposisi mineral tanah yang terbentuk untuk mendukung karakteristik muatan permukaan. (Tabel 5.2 dan Gambar 2A). Tabel 3 dan Gambar 2B menggambarkan perubahan gugus fungsi tanah dan ikatan kimia, yang pertama terjadi pada panjang gelombang dan transmisi 3746,17 cm⁻¹/97,51% menjadi 3746,09 cm⁻¹/97,53%, terutama ikatan O-H; N-H. Terlihat bahwa panjang gelombang dan transmitansi

menurun sehingga menyebabkan daya adsorpsi gugus OH meningkat. Masuknya gugus OH pada struktur SC dan penambahan H₂O selama proses aktivasi. Menurut Herviyanti *et al.*, (2018) vibrasi O-H terjadi melalui dua cara, yaitu OH struktural dan H₂O. Temuan identifikasi mineral mengungkapkan adanya mineral grafit sebagai penyumbang gugus OH pada tanah bekas tambang emas yang telah diperbaiki dengan SC. Perubahan panjang gelombang dan transmitansi dari 1029,75 cm⁻¹/73,07% menjadi 1085,48 cm⁻¹/76,06%, yaitu (Si-O) dari mineral lempung berasosiasi dengan SC, mengalami perubahan paling besar. Berdasarkan identifikasi mineral, kelompok ini didominasi oleh mineral kuarsa pada tanah bekas tambang emas dengan perbaikan SC. Dalam hal panjang gelombang dan transmisi, tikungan puncak O-H: trio-Quatro dan mineral seperti MgO adalah 779,50 cm⁻¹/80,29%; 689,70 cm⁻¹/ 85,71%, dan 535,10 cm⁻¹/ 72,92% menjadi 781,92 cm⁻¹/ 83,81% dan 539,94 cm⁻¹/ 78,15%. Pada aplikasi SC pada tanah bekas tambang emas tidak terlihat panjang gelombang pada 500 cm⁻¹.

Tabel 5.1 menunjukkan penurunan kandungan Hg pada tanah bekas tambang emas seiring dengan peningkatan aplikasi SC yang memberikan pengaruh aplikasi yang signifikan terhadap total Hg tanah. Penurunan Hg terbaik terlihat pada aplikasi 40 t ha⁻¹ SC sebanyak 2,50 mg kg⁻¹ dibandingkan dengan kontrol. Perubahan sifat elektrokimia lempung berkaitan erat dengan jumlah kompleks Hg yang tergabung dalam lempung serta komposisi kimia dan sifat muatannya. Penurunan Hg ditentukan oleh kandungan mineral tanah bekas tambang emas yang diperbaiki dengan SC. Pola distribusi lempung, lanau, dan pasir sebanding dengan merkuri, menunjukkan bahwa ukuran butir merupakan faktor utama yang mempengaruhi kadar merkuri dalam tanah. Dibandingkan dengan lempung dan pasir, lempung memiliki kapasitas adsorpsi merkuri yang paling baik, hal ini menunjukkan bahwa ukuran butir yang lebih kecil lebih baik untuk pengayaan merkuri. Hg terikat pada matriks mineral permukaan dan SOM dengan membentuk kompleks organologam Hg yang secara bersamaan ada dalam berbagai bentuk (Reis *et al.*, 2016). SOM sangat penting untuk meningkatkan kapasitas pengikatan logam dan mempengaruhi perilaku dispersi merkuri dalam tanah. Temuan penelitian serupa telah ditemukan untuk mendukung asosiasi SOM-Hg (Qu *et al.*, 2019).

Mekanisme prediksi terhadap SC memiliki gugus hidroksil dan karboksil sebagai dasar muatan negatif. Aplikasi SC pada tanah bekas tambang emas dapat meningkatkan pH H₂O dan muatan negatif tanah (KTK dan ΔpH) yang disebabkan karena gugus OH terdisosiasi, sehingga terlepas H⁺ sehingga bermuatan negative. pH meningkat akibat adanya proses pengkkelatan Al oleh asam-asam organik. Hal ini menyebabkan tanah bekas tambang emas lebih aktif meningkatkan beban permukaan yang didukung oleh kandungan SOM. Dengan demikian, penyerapan Hg oleh tanah lebih tinggi dengan penurunan kadar Hg pada tanah bekas tambang emas setelah aplikasi SC.

B. Aplikasi Batubara Sub-Bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH Pada Tanah Bekas Tambang Emas Tercemar Merkuri

Hasil analisis tanah bekas tambang yang diameliorasi dengan batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dengan rata – rata dari masing – masing dapat dilihat di tabel 5.4.

Table 5.4. Descriptive statistics of Chemical Characteristics of Ex-gold Mining Soil Ameliorated with Sub-bituminous Coal - NaOH

Analysis	Unit	N	Min	Max	Mean	Std. Error	Std. Deviation
pH H ₂ O	unit	15	4.20	10.10	8.19	0.56	2.18
pH KCl			4.10	6.90	5.96	0.26	1.02
EC	dSm ⁻¹		0.05	0.70	0.35	0.06	0.23
Eh	volt		0.08	0.28	0.14	0.02	0.07
CEC	cmol kg ⁻¹		2.41	5.22	3.61	0.25	0.97
Mineral	%		83.90	98.41	89.87	1.34	5.17
SOM			1.62	19.19	11.61	1.61	6.22
pH PZC*	unit		3.30	4.00	3.73	0.05	0.19
ΔpH			0.20	6.60	4.47	0.59	2.32
Hg	mg kg ⁻¹		3.85	6.98	5.29	0.27	1.04

Remaks: EC = Electrical conductivity; Eh = Potential redox; CEC = Cation exchange capacity; SOM = Soil organic matter; and N = Number of observation values;

Formula : *pH PZC = (2*pH KCl) – pH H₂O

Berdasarkan hasil uji statistic secara deskriptif menjelaskan bahwa tanah bekas tambang emas yang di ameliorasi dengan batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH memiliki nilai rata – rata pH (H₂O dan KCl), daya hantar listrik (EC), potensial redoks (Eh), kapasitas tukar kation (CEC),

kandungan mineral dan bahan organik tanah dan karakteristik muatan (pH PZC dan Δ pH) serta kandungan Hg masing – masing sebesar 8.19; 5.96; 0.35 dS m^{-1} ; 0.14 volt; 3.61 cmol kg^{-1} ; 89.87%; 11.61% C; 3.73; 4.47 dan 5.29 mg Kg^{-1} Hg. Hasil karakteristik kimia tanah bekas tambang emas yang telah diperbaiki dengan SC-NaOH dapat dilihat pada Tabel 5.4. Hasil deskripsi juga menjelaskan bahwa peningkatan takaran amelioran berbasis batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH yang diaplikasikan ke tanah bekas tambang emas terjadi peningkatan terhadap nilai pH, EC (Gambar 1), CEC (Gambar 2), SOM (Gambar 3), dan Δ pH (Gambar 4), sedangkan juga terjadi penurunan terhadap nilai Eh (Gambar 5), dan pH PZC (Gambar 4).

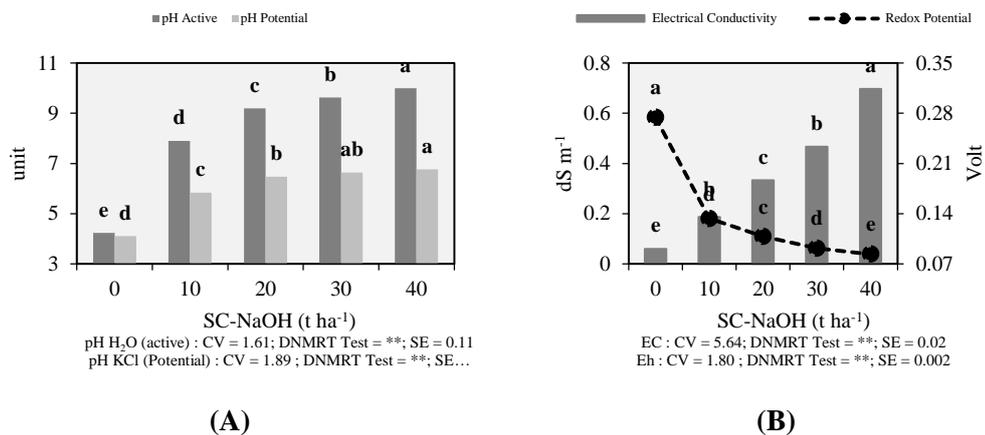


Fig. 1 pH H₂O (Active); pH KCl (Potential) and Δ pH (A); EC and Eh (B) on ex-gold mining soil ameliorated with sub-bituminous coal - NaOH.

Nilai pH tanah bekas tambang emas dijelaskan melalui dua larutan yaitu H₂O (aktif) dan 1M KCl (potensial). Nilai pH dengan larutan KCl lebih rendah dibandingkan dengan larutan H₂O. Pada Gambar 1A, aplikasi SC-NaOH secara signifikan meningkatkan pH H₂O dan KCl sekaligus menjaga nilai pH larutan KCl lebih kecil dari H₂O. Selain itu, peningkatan pH dan dosis aplikasi pada dosis 40 t ha⁻¹ SC - NaOH paling baik dalam meningkatkan pH H₂O sebesar 5,77 dan pH KCl tanah bekas tambang emas sebesar 2,63 dan 2,53 pada dosis 30 dan 40 t ha⁻¹ SC - NaOH, masing-masing, dibandingkan dengan kontrol. Menurut Herviyanti *et al.*, (2018) aplikasi batubara Sub-bituminus teraktivasi dengan NaOH 10% dapat meningkatkan nilai pH tanah karena memiliki gugus fungsi COOH dan OH. HS dari SC - NaOH terdiri dari gugus fungsi hidroksil dan karboksil yang dapat mengikat logam terlarut, yang menunjukkan bahwa gugus fungsi hidroksil dan

karboksil, yang dapat mengikat logam terlarut, artinya gugus fungsi mengikat logam seperti Al sehingga Al dalam tanah menurun sehingga pH naik.

Pada Gambar 1B, nilai EC meningkat dengan meningkatnya dosis aplikasi SC-NaOH. Pengaruh SC - NaOH nyata terhadap EC pada tanah bekas tambang emas dengan dosis terbaik pada 40 t ha⁻¹ dengan peningkatan 0,64 dS m⁻¹ dibandingkan kontrol. Namun terlihat berbeda dengan nilai potensial redoks pada tanah bekas tambang emas, dimana nilai Eh menurun seiring dengan peningkatan dosis aplikasi SC – NaOH. Hal tersebut berpengaruh nyata terhadap Eh pada tanah bekas tambang emas dengan penurunan sebesar 0,19 pada dosis 40 t ha⁻¹ dibandingkan dengan kontrol. Menurut Mahler *et al.*, (2021) studi tentang larutan humat dengan cara konduktometri dimungkinkan karena humat terlarut membawa muatan negatif, terutama karena gugus karboksil yang terdisosiasi, dan karena itu bergerak dalam medan listrik eksternal. Gerak ion bermuatan satu ditentukan oleh keseimbangan gaya sederhana yang melibatkan medan listrik dan resistansi kental larutan. Namun berbeda dengan potensi nilai redoks pada tanah bekas tambang emas, dimana nilai Eh semakin menurun seiring dengan peningkatan dosis aplikasi SC - NaOH. Ini berpengaruh nyata terhadap Eh pada tanah bekas tambang emas dengan penurunan sebesar 0,19 pada dosis 40 t ha⁻¹ dibandingkan dengan kontrol. Laju transfer elektron biasanya membatasi reaksi reduksi dalam kondisi anaerobik, yang dapat dipercepat oleh mediator redoks dengan reaksi spesifik. Gugus fungsi aktif redoks seperti kuinon dan dapat mentransfer elektron dan menyumbangkannya ke mineral, sehingga mempercepat reduksi (Zhang *et al.*, 2018). Gerakan ion bermuatan tunggal ditentukan oleh keseimbangan gaya sederhana yang melibatkan medan listrik dan resistansi kental larutan. Persentase natrium yang dapat ditukar (ESP), kapasitas tukar kation (KTK), luas permukaan spesifik tanah (S), kerapatan muatan permukaan tanah (δ_0), potensial permukaan tanah (ϕ_0), dan kekuatan medan listrik permukaan tanah adalah permukaan tanah yang paling penting dalam parameter elektrokimia (E0) tanah (Li *et al.*, 2019; Toledo *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2022). Laju transfer elektron umumnya membatasi reaksi reduksi dalam kondisi anaerobik, yang dapat dipercepat oleh mediator redoks dengan reaksi tertentu. H₂S mengandung gugus fungsi aktif redoks seperti

kuinon dan dapat mentransfer elektron dan menyumbangkannya ke mineral, sehingga mempercepat reduksi (Zhang *et al.*, 2018).

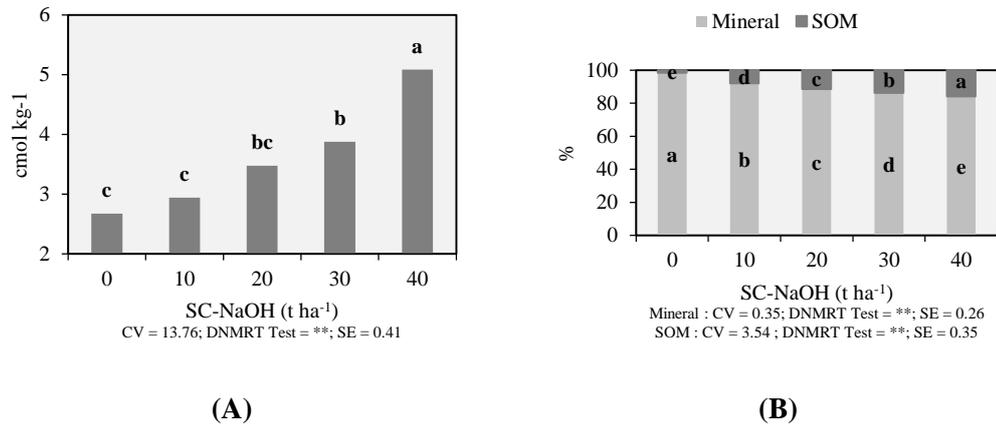


Fig. 2 (A) CEC and (B) Mineral and SOM on ex-gold mining soil ameliorated with sub-bituminous coal - NaOH.

Aplikasi SC - NaOH, terhadap nilai KTK meningkat seiring dengan peningkatan dosis yang diterapkan dan berpengaruh nyata terhadap KTK tanah bekas tambang emas. Dosis 40 t ha⁻¹ paling baik dalam meningkatkan KTK tanah bekas tambang emas sebesar 2,41 cmol kg⁻¹ dibandingkan dengan control (Gambar 2A). Kemampuan HS dengan aktivasi SC - NaOH untuk mengadsorpsi kation mengikuti urutan lipotropik misalnya. Al³⁺ = (H⁺) > Fe³⁺ > Fe²⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺ = NH₄⁺ > Na⁺. Penyerapan NH₄⁺ mirip dengan Na⁺. Pertukaran kation dalam larutan atau yang teradsorpsi oleh clay-HS dari SC - NaOH terjadi selama adsorpsi kation oleh asam humat. Kation mudah diserap oleh akar, meningkatkan transfer mikronutrien ke sistem sirkulasi tanaman sehingga mengubah keseimbangan kation. Adsorpsi kation atau logam oleh HS dari SC - NaOH dapat melalui: (1) Adsorpsi langsung; (2) Kompleksasi atau interaksi bola luar untuk terhidrasi; (3) Melayani sebagai jembatan kation (kompleks bola luar) melalui khelasi langsung atau tidak langsung dan (4) Interaksi dengan logam-HS HS dari agregat SC - NaOH atau dengan gugus amina. Interaksi lempung dengan HS dari SC - NaOH memiliki afinitas padat terhadap asam lemah yang mengandung gugus hidroksil fenolik dan karboksil. Perubahan sifat elektrokimia lempung berkaitan erat dengan jumlah kompleks aluminium hidroksi yang tergabung dalam lempung serta komposisi kimia dan sifat muatannya (Cuevas *et*

al., 2019). Pengaruh jumlah interlayer terhadap kapasitas tukar kation lempung mempengaruhi titik muatan nol Sakuma *et al.*, 2022).

Pada Gambar 2B, aplikasi SC - NaOH menurunkan komposisi kandungan mineral dan meningkatkan kandungan SOM seiring dengan peningkatan dosis aplikasi yang diberikan (0 - 40 t ha⁻¹), dimana aplikasi SC - NaOH signifikan terhadap mineral dan konten SOM. Di lahan bekas tambang emas. Penurunan kandungan mineral pada aplikasi 40 t ha⁻¹ SC - NaOH adalah 14,22%, dibandingkan dengan kontrol, dan juga terlihat dosis terbaik dalam meningkatkan SOM adalah 40 t ha⁻¹ sebesar 17,15%, dibandingkan kontrol. Menurut Samsudin *et al.*, (2021) batubara sub-bituminous memiliki kadar abu sekitar 34,90% - 46,30% dan kadar C sekitar 33,68% - 44,28%. Struktur polimer H₂S dari SC - NaOH yang khas dapat terdiri dari cincin aromatik enam karbon yang mengandung di- atau trihidroksi fenol yang dihubungkan oleh -O-, -NH-, -N-, -S-, dan gugus-OH dan kuinon (O-C₆H₄-O-). HS merupakan molekul organik siklik dengan berat molekul tinggi, rantai panjang, dan gugus aktif karboksil (-COOH) dan gugus fenolik (-OH), yang berfungsi sebagai pengikat kation/anion pada kadar pH tertentu (pH- biaya tergantung). Karboksil dilepaskan dari gugus karboksil tertentu di bawah pH 6, menempatkan muatan negatif pada gugus fungsional. Disosiasi H⁺ dari amida (=NH) juga dapat meningkatkan muatan negatif. Gugus terprotonasi seperti R-OH₂ dan R-NH₃ dapat menghasilkan muatan positif, tetapi keseluruhan humus bermuatan negatif.

Peningkatan pH, EC, KTK, dan SOM secara tidak langsung akan meningkatkan aktivitas muatan negatif tanah. Modifikasi ini penting dilakukan untuk meningkatkan ketersediaan unsur hara dan penyerapan bahan pencemar (organik dan anorganik), terutama pada tanah bekas tambang emas. Teknologi ameliorasi dengan aplikasi SC - NaOH menunjukkan peningkatan kisaran muatan negatif pada muatan permukaan koloid tanah. Jenis muatan pada tanah bekas tambang emas setelah diperbaiki dengan SC - NaOH. Umumnya, sifat muatan permukaan dan sifat keasaman/kebasaan permukaan tanah termasuk titik muatan nol (PZC). Situs fungsional hidroksil tidak hanya situs adsorpsi proton tetapi juga situs adsorpsi untuk polutan anorganik dan organik lainnya. Pada Gambar 3A, pH PZC menurun dengan meningkatnya dosis aplikasi, di mana aplikasi SC - NaOH

signifikan untuk pH PZC, sedangkan pH meningkat dengan meningkatnya dosis. Namun, dosis 40 t ha⁻¹ masih paling baik dalam meningkatkan pH sebesar 6,25, dibandingkan dengan kontrol. PH PZC lebih rendah dari pH H₂O, sehingga muatan permukaan bersih negatif di dalam tanah. Tanah bekas tambang emas dengan ameliorasi 40 t ha⁻¹ SC - NaOH memiliki rentang muatan negatif (Δ pH) yang lebih tinggi pada permukaan tanah koloid dibandingkan kontrol. Aktivitas muatan negatif yang lebih tinggi diharapkan dapat mengatasi pencemaran Hg pada tanah bekas tambang emas. PZC adalah keadaan di mana muatan positif dan negatif hadir dalam jumlah yang sama. Indeks penting dalam menentukan sifat penyangga tanah (Wen *et al.*, 2020) Gambaran muatan permukaan biasanya terdiri dari muatan permanen, dan muatan variabel adalah dua jenis muatan permukaan di dalam tanah (Tian *et al.*, 2019). Melalui efek substitusi isomorfik pada mineral lempung, beban permanen terbentuk selama proses pembentukan atau pelapukan tanah (Tao *et al.*, 2019). Muatan variabel muncul dari proses protonasi/deprotonasi gugus fungsional permukaan. Tanah terutama ditemukan pada mineral lempung dan oksida logam (Dultz *et al.*, 2019).

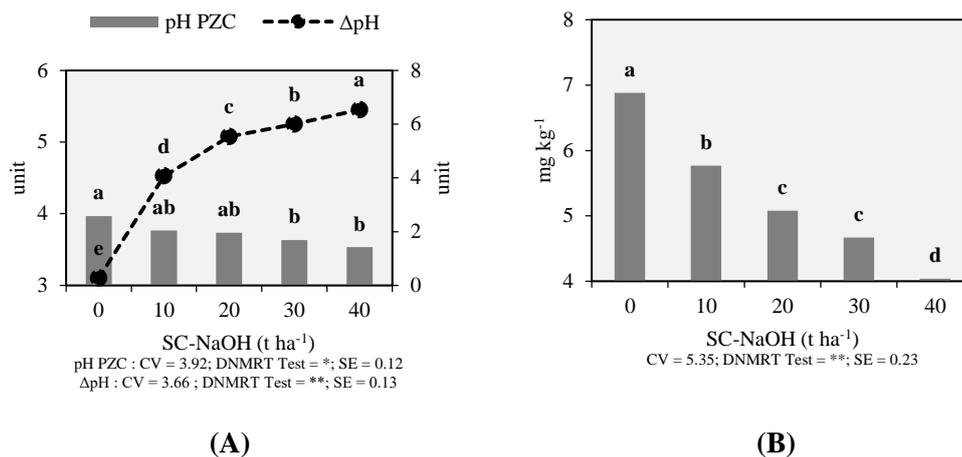


Fig. 3 (A) pH PZC [(2*pH KCl) – pH H₂O] and Δ pH (pH H₂O – pH PZC) and (B) Hg on ex-gold mining soil with amelioration of sub-bituminous coal-NaOH.

Gambar 3B menunjukkan penurunan kadar Hg tanah eks tambang emas seiring dengan peningkatan aplikasi SC - NaOH, dimana pengaruh aplikasi signifikan terhadap Hg Total tanah. Penurunan Hg terbaik terlihat pada aplikasi 40 t ha⁻¹ SC - NaOH sebesar 2,84 mg kg⁻¹ dibandingkan dengan kontrol. Perubahan sifat elektrokimia tanah berkaitan erat dengan jumlah kompleks Hg yang terbentuk yang dipengaruhi oleh komposisi kimia dan sifat muatannya. Tabel 5.5

menunjukkan korelasi antara Hg dan karakteristik kimia tanah bekas tambang emas dengan perbaikan SC - NaOH, dimana karakteristik kimia tanah bekas tambang emas berkorelasi nyata dengan Hg. Hasil penelitian menunjukkan korelasi positif (Hg dengan potensial redoks, Mineral, dan pH PZC) dan negatif (Hg dengan pH H₂O; pH KCl, EC, CEC, SOM, dan pH). Korelasi positif Hg dengan potensial redoks, mineral, dan pH PZC pada tanah bekas tambang emas yang diperbaiki dengan SC - NaOH adalah $r = 0,898; 0,972, \text{ dan } 0,825$. Korelasi Hg dengan Mineral lebih tinggi daripada Hg dengan potensial redoks dan pH PZC (Hg dengan Mineral > Eh > pH PZC). Penurunan Hg ditentukan oleh kandungan mineral tanah bekas tambang emas yang diperbaiki dengan SC - NaOH. Pola distribusi lempung, debu, dan pasir sebanding dengan merkuri, menunjukkan bahwa ukuran butir merupakan faktor utama yang mempengaruhi kadar merkuri di dalam tanah. Dibandingkan dengan lempung dan pasir, lempung memiliki kapasitas adsorpsi merkuri terbaik, menunjukkan bahwa ukuran butir yang lebih kecil lebih baik untuk pengayaan merkuri. Hg terikat pada mineral matriks permukaan dan SOM dengan membentuk kompleks Hg organologam sehingga secara simultan ada dalam bentuk yang berbeda (Gfeller et al., 2022).

Table 5.5. Correlation of Mercury with Chemical Characteristics of Ex-gold Mining Soil Ameliorated with Sub-bituminous Coal - NaOH

Correlations	pH H ₂ O	pH KCl	EC	Eh	CEC	Mineral	SOM	pH PZC	ΔpH	Hg
pH H ₂ O (unit)	1	0.998**	0.844**	-0.992**	0.694**	-0.973**	0.962**	-0.717**	0.998**	-0.933**
pH KCl (unit)		1	0.832**	-0.990**	0.698**	-0.964**	0.951**	-0.670**	0.992**	-0.916**
EC (ds m ⁻¹)			1	-0.804**	0.896**	-0.937**	0.951**	-0.721**	0.853**	-0.939**
Eh (Volt)				1	-0.654**	0.953**	-0.938**	0.707**	-0.990**	0.898**
CEC (cmol kg ⁻¹)					1	-0.785**	0.801**	-0.440	0.688**	-0.741**
Mineral (%)						1	-0.999**	0.775**	-0.978**	0.972**
SOM (%)							1	-0.779**	0.968**	-0.974**
pH PZC (unit)								1	-0.757**	0.825**
ΔpH (unit)									1	-0.945**
Hg (mg kg ⁻¹)										1

Remarks: EC = Electrical conductivity; Eh = potential Redox; CEC = Cation exchange capacity; SOM = Soil organic matter; **. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); *. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed); n = 15.

Korelasi negatif Hg dengan pH H₂O; pH KCl, EC, KTK, SOM, dan pH pada tanah bekas tambang emas dengan perbaikan SC - NaOH sebesar $r = 0,933; 0,916; 0,939; 0,741; 0,974 \text{ dan } 0,945$. Hal ini menunjukkan bahwa urutan korelasinya adalah Hg dengan SOM > pH > EC > pH H₂O > pH KCl > CEC. Penurunan Hg ditentukan oleh kandungan SOM pada tanah bekas tambang emas yang telah diperbaiki SC - NaOH. SOM merupakan korelasi tertinggi ($r = 0,974$)

dibandingkan dengan parameter kimia lainnya. SOM sangat penting untuk meningkatkan kapasitas pengikatan logam dan mempengaruhi perilaku dispersi merkuri di tanah. SOM sangat penting untuk meningkatkan kapasitas pengikatan logam dan mempengaruhi perilaku dispersi merkuri dalam tanah. Temuan studi serupa telah ditemukan untuk mendukung asosiasi SOM-Hg (Qu *et al.*, 2019).

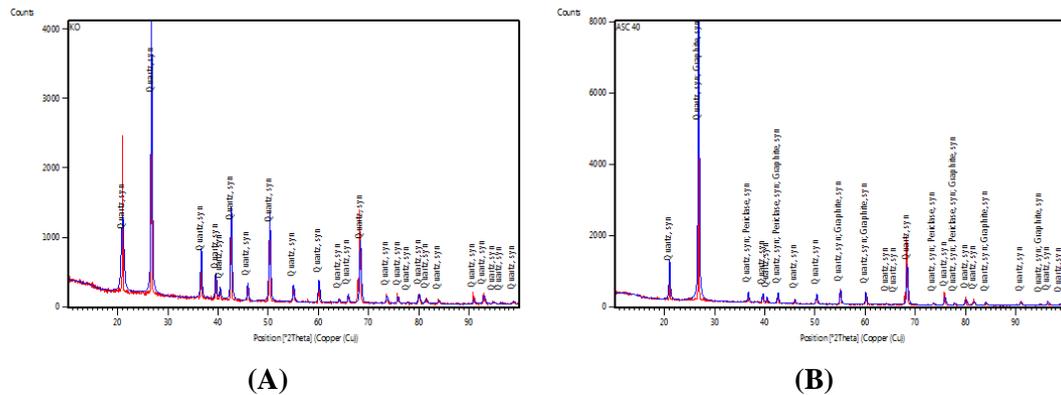


Fig. 4 XRD on ex-gold mining soil (A) and ex-gold mining soil ameliorated with 40 t ha⁻¹ sub-bituminous coal-NaOH (B).

Table 5.6. Characteristics Mineral Assignments of Ex-Gold Mining Soil Ameliorated with Sub-bituminous Coal-NAOH

Soil	Description of Minerals*		
	Pos. [°2Th.]	d-spacing [Å]	Pattern List (Score – Mineral - Scale Fac.) : Chemical Formula
Ex-GM	26.69	3.34	(79 – Quartz – 0.733) : SiO ₂ (74 - Quartz – 0.733) : SiO ₂
Ex-GM + SC-NaOH	26.77	3.33	(26 – Graphite – 0.059) : C (19 - Periclase - 0.016) : MgO

Remaks: Ex-GM = Ex-gold mining soil; Ex-GM + SC-NaOH = Ex-gold mining soil ameliorated with 40 t ha⁻¹ sub-bituminous coal-NaOH.

Komposisi mineral tanah bekas tambang emas dan bekas tambang emas dengan ameliorasi SC - NaOH ditentukan menggunakan difraksi sinar-X (XRD). Tabel 5.6 dan Gambar 4 menunjukkan deskriptif komposisi mineral dan difraktogram XRD. Hasil analisis XRD menunjukkan penurunan d-spacing (Å) dari 3,34 menjadi 3,33 setelah aplikasi 40 t ha⁻¹ SC - NaOH, dengan hasil menunjukkan identifikasi mineral Kuarsa, Grafit, dan Periklase. Kuarsa adalah mineral dengan rumus kimia SiO₂ yang terjadi secara alami dalam dua bentuk, terbukti pada kedua jenis mineral yang terdeteksi di tanah bekas tambang emas dan setelah pemberian 40 t ha⁻¹ SC - NaOH. Menurut Götze et al., (2021) varietas

trigonal, alfa-kuarsa suhu rendah, yang stabil di permukaan, dapat mengalami modifikasi yang paling sering dan substansial. Struktur kristal alfa-kuarsa adalah jaringan tiga dimensi [SiO₄] 4-tetrahedra yang dihubungkan oleh atom oksigen dan disusun dalam rantai heliks sepanjang sumbu C untuk membentuk saluran struktural. Menurut Kamal et al., (2020) Grafit adalah bahan anisotropik yang memiliki konduktivitas listrik dan termal yang tinggi di dalam lapisan tetapi konduktivitas listrik dan termal antar lapisan yang rendah (karena ikatan logam di bidang) (karena gaya van der Waals yang lemah). Menurut Peretti et al., (2018) komponen dasar mineral ini berasal dari batu kapur yang bermetamorfosis. Struktur periklas identik dengan halit, dan NaCl, dengan ion magnesium dan oksigen masing-masing mengisi posisi natrium dan klorin (Bowles, 2021).

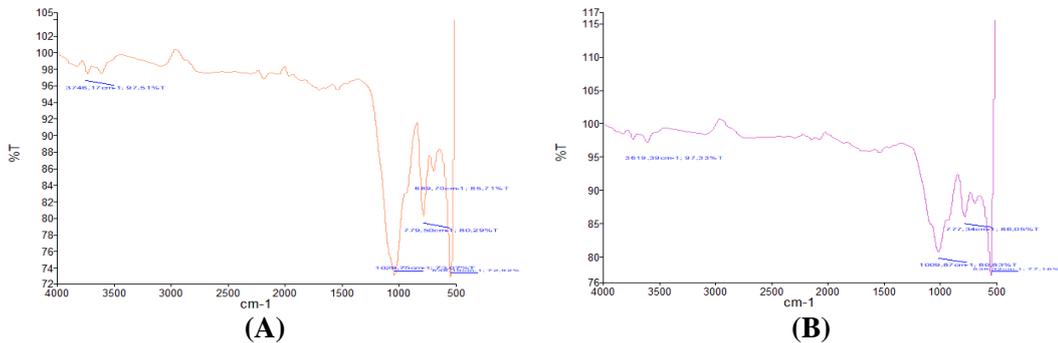


Fig. 5 FT-IR spectrum on ex-gold mining soil (A) and ex-gold mining soil ameliorated with 40 t ha⁻¹ sub-bituminous coal - NaOH (B).

Table 5.7. Characteristics Spectral Band Assignments of Ex-Gold Mining Soil Ameliorated with Sub-bituminous Coal-NAOH

Ex-GM Wavenumbers / Transmittance (cm ⁻¹ / %)	Ex-GM + SC-NaOH	Assignment
3746.17/ 97.51	3619.39/ 97.33	v(OH) from non-hydrogen bonded O-H groups
1029.75/ 73.07	1009.87/ 80.83	v(Si-O) from clay minerals associated with SC-NaOH
779.50/ 80.29	777.34/ 86.05	O-H bending peaks: trio-quatro
689.70/ 85.71	-	Mineral e.g MgO
535.10/ 72.92	539.32/ 77.16	Mineral e.g MgO

Remarks: Ex-GM = Ex-gold mining soil; Ex-GM + SC-NaOH = Ex-gold mining soil ameliorated with Sub-bituminous coal - NaOH

Studi FT-IR menentukan variasi gugus fungsi dan ikatan kimia tanah bekas tambang sebelum dan sesudah perlakuan dengan ameliorasi SC - NaOH. Berdasarkan karakteristik kimianya (Tabel 5.4 dan Gambar 2 dan 3), aplikasi 40 t ha⁻¹ SC - NaOH adalah dosis terbaik untuk meningkatkan karakteristik muatan permukaan (KTK, dan ΔpH) tanah bekas tambang emas dan peningkatan kapasitas adsorpsi tanah terhadap Hg serta komposisi mineral tanah yang terbentuk untuk mendukung karakteristik muatan permukaan. Tabel 5 dan Gambar 5 menggambarkan perubahan gugus fungsi tanah dan ikatan kimia, dengan yang pertama terjadi pada panjang gelombang dan transmitansi 3746,17 cm⁻¹/ 97,51% menjadi 3619,39 cm⁻¹/97,33%, terutama ikatan O-H; N-H. Terlihat bahwa panjang gelombang dan transmitansi menurun, menyebabkan daya adsorpsi gugus OH meningkat. Masuknya gugus OH pada struktur SC – NaOH dan penambahan H₂O selama proses aktivasi. Panjang gelombang dan transmitansi 1029,75 cm⁻¹/ 73,07% menjadi 1009,87 cm⁻¹/ 80,83% yaitu (Si-O) dari mineral lempung berasosiasi dengan SC - NaOH, berubah paling besar. Panjang gelombang turun saat transmitansi naik. Berdasarkan identifikasi mineral, kelompok ini didominasi oleh mineral kuarsa pada tanah bekas tambang emas dengan perbaikan SC - NaOH. Dalam hal panjang gelombang dan transmitansi, tikungan puncak O-H: trio-Quatro dan mineral seperti MgO adalah 779,50 cm⁻¹/ 80,29%; 689,70 cm⁻¹/ 85,71%, dan 535,10 cm⁻¹/ 72,92% menjadi 777,34 cm⁻¹/ 86,05% dan 539,32 cm⁻¹/ 77,16%. Identifikasi mineral yaitu periklas pada tanah bekas tambang emas yang diperbaiki dengan SC - NaOH dan juga menunjukkan bahwa gelombang 500 cm⁻¹ tidak muncul setelah aplikasi 40 t ha⁻¹ SC - NaOH, dan ada juga penurunan panjang gelombang, tetapi juga terjadi peningkatan transmitansi. Menurut Herviyanti *et al.*, (2018) Getaran O-H terjadi dalam dua cara yaitu berasal dari OH struktural dan H₂O.

Temuan identifikasi mineral menunjukkan adanya mineral grafit sebagai penyumbang gugus OH pada tanah bekas tambang emas yang diameliorasi dengan SC – NaOH. Mekanisme prediksi aplikasi SC – NaOH dapat menurunkan Hg di tanah bekas tambang emas disebabkan adanya depolimerisasi (pemecahan polimer) dari degradasi molekul SC menjadi lebih terbuka dan membentuk lebih banyak muatan negatif. Tanah bekas tambang emas meningkatkan gugus OH

dalam tanah. Ini menurunkan persentase transmitansi pada gugus OH di tanah. Tanah lebih aktif dalam meningkatkan muatan permukaan dengan didukung oleh kandungan mineral dan SOM. Dengan demikian, serapan Hg oleh tanah lebih tinggi dengan penurunan kadar Hg pada tanah bekas tambang emas setelah pemberian SC – NaOH.

C. Aplikasi Biochar Limbah Kelapa Muda Pada Tanah Bekas Tambang Emas Tercemar Merkuri

Pengaruh biochar YCW secara umum berpengaruh sangat nyata terhadap aktivitas muatan negatif (pH, KTK, dan SOM). Tabel 5.8 menunjukkan bahwa tekstur tanah bekas tambang memiliki kandungan liat sebesar 7,53%. Mineral lempung adalah senyawa anorganik alami dengan sifat fisik, kimia, dan kristal tertentu dan diklasifikasikan sebagai primer atau sekunder, silikat atau non-silikat, dan kristal atau amorf. Mineral primer terbentuk pada suhu dan tekanan tinggi dan biasanya berasal dari batuan beku atau metamorf, sedangkan mineral sekunder adalah puncak dari perubahan struktur mineral primer atau neoformasi melalui presipitasi atau rekristalisasi konstituen terlarut menjadi struktur yang lebih stabil. Mineral primer yang umum di lingkungan tanah meliputi silikat, oksida Fe dan Al, Zr dan Ti, dan fosfat, sedangkan mineral sekunder tipikal yang ditemukan di lingkungan tanah meliputi alumino-silikat, oksida dan hidroksida, karbonat, sulfat, dan mineral amorf. Mineral sekunder terutama terdapat pada fraksi berukuran lempung dan berukuran lanau halus, dan merupakan bahan anorganik yang paling reaktif di dalam tanah (Churchman, G.J. and Lowe, 2012), sehingga mempengaruhi ketersediaan unsur hara dan adsorpsi logam berat melalui berbagai mekanisme. Mineral lempung tanah dikelompokkan menjadi mineral lempung 1:1 dan 2:1, bergantung pada perbandingan lembaran tetrahedral silika dengan lembaran oktahedral alumina. Mineral lempung 1:1, kaolinit primer, ditemukan di sebagian besar tanah tetapi mendominasi tanah yang sangat lapuk di daerah tropis lembab. Di lingkungan tropis, mineral seskuioksida yang kaya akan Fe dan Al mendominasi. Pembengkakan 2:1 atau lempung yang dapat diperluas termasuk kelompok smektit dan vermikulit, yang memiliki luas permukaan yang besar dan kapasitas tukar kation (CEC) yang tinggi.

Table 5.8. Chemical characteristics of ex-gold mining soil ameliorated with biochar young coconut waste

B-LKM (t ha ⁻¹)	Clay %	pH H ₂ O unit	pH KCl unit	EC dS m ⁻¹	Eh volt	CEC cmol kg ⁻¹	Mineral %	SOM %	pH PZC ^a unit	ΔpH ^b unit	Hg Mg kg ⁻¹
0		4.23 e	4.10 d	0.01 e	0.274 a	2.67 c	98.41 a	1.62 c	3.97	0.27 e	6.88 a
10		5.67 d	4.73 c	0.04 d	0.268 b	3.61 b	98.14 b	1.89 b	3.80	1.87 d	6.46 ab
20	7.53%	6.47 c	5.10 b	0.06 c	0.243 c	3.87 b	98.08 b	1.96 b	3.73	2.73 c	5.97 b
30		7.00 b	5.17 b	0.07 b	0.222 d	4.01 ab	97.94 c	2.10 ab	3.33	3.67 b	5.50 bc
40		7.77 a	5.53 a	0.10 a	0.193 d	4.68 a	97.81 c	2.24 a	3.30	4.47 a	5.19 c
CV (%)	-	2.90	2.22	10.22	0.97	10.66	0.13	6.64	7.90	16.38	5.41
Duncan's Test	-	**	**	**	**	**	**	**	ns	**	**
Std. Error	-	0.15	0.09	0.01	0.002	0.33	0.10	0.11	0.23	0.35	0.27

Remarks: EC = Electrical conductivity; Eh = Potential redox; CEC = Cation exchange capacity; SOM = Soil organic matter; CV = Coefficient of variation;

Formula : ^apH PZC = (2*pH KCl) – pH H₂O; ^bΔpH = pH H₂O – pH PZC;

** = Significant at the 0.01 level; * = Significant at the 0.05 level and ns = non-significant; n = 15.

Mineral lempung ini memainkan peran penting dalam menentukan kesesuaian, perilaku tanah, dan tingkat kontaminasi dan kontaminasi logam berat untuk berbagai penggunaan lahan. Hubungan mineralogi lempung-adsorpsi logam berat-kesuburan tanah merupakan komponen penting dalam memahami dan mengelola kesuburan tanah dan tingkat pencemaran dan pencemaran logam berat untuk mempertahankan produksi tanaman, terutama di daerah tropis. Mineralogi lempung tampaknya menjadi salah satu indikator kualitas tanah yang paling penting dan pengetahuan yang tepat tentang mineralogi lempung tanah memiliki implikasi praktis yang signifikan terhadap penggunaan pupuk pada aplikasi dan pengelolaan (Scherer et al., 2014; Moterle et al., 2016) dan bioavailabilitas logam berat dalam tanah (Kim et al., 2015) dalam mengembangkan sistem rekomendasi pemupukan dan remediasi (Bar-Yosef et al., 2015; Jaiswal et al., 2016).

Pengaruh komposisi mineralogi tanah terhadap produktivitas tanah adalah dua kali lipat; (1) mempengaruhi reaksi kimia yang mengatur serapan dan ketersediaan unsur hara serta adsorpsi logam berat dan (2) mempengaruhi sifat fisik yang mengatur keseimbangan kelembaban tanah dan kondisi fisik tanah. Peningkatan pH terjadi seiring dengan peningkatan pemberian biochar YCW, dimana 40 t ha⁻¹ dapat meningkatkan pH tanah sebesar 3,54 satuan. Peningkatan pH juga meningkatkan konduktivitas listrik (EC) dalam tanah. Peningkatan EC juga sejalan dengan peningkatan biochar YCW terbaik yang diberikan pada 40 t ha⁻¹ dengan peningkatan sebesar 0,09 dS m⁻¹, jika dibandingkan dengan kontrol (0 t ha⁻¹).

Peningkatan pH dan KTK tanah masam umumnya diamati sebagai respons terhadap amandemen biochar. Efek positif keseluruhan dari penambahan biochar pada tanah terhadap produktivitas tanaman dengan efek terbesar pada tanah pH asam dan netral dengan tekstur kasar atau sedang (Jeffery et al. 2017). Peningkatan pH tanah yang signifikan pada Biochar. Perubahan pH tanah setelah penambahan Biochar berhubungan dengan pH tanah awal dan alkalinitas Biochar. Menurut Dai et al. (2017) bahwa aplikasi biochar, untuk menaikkan pH tanah, dapat memberikan solusi yang dapat diterima untuk keasaman tanah yang tinggi. Menambahkan biochar ke dalam tanah terbukti menjadi instrumen yang berharga dalam upaya meningkatkan kesuburan tanah dan penggunaannya dianggap

penting untuk melawan risiko pengasaman tanah dan pada saat yang sama dalam penyerapan logam berat. Biochar merupakan produk berbasis karbon padat, yang dihasilkan selama dekomposisi termal dari bahan organik yang berbeda, dalam kondisi dengan akses terbatas ke oksigen (Lorenz dan Lal, 2014). Menurut Chintala et al., (2014) bahwa biochar memiliki sifat spesifik yang terutama bergantung pada jenis bahan yang digunakan untuk produksinya dan kondisi produksinya. Melalui sifat-sifatnya, biochar dapat mempengaruhi berbagai sifat tanah, seperti stabilitas agregat kandungan karbon organik tanah, berat isi, pH tanah, KTK, konduktivitas listrik (EC).

KTK pada tanah bekas tambang emas adalah 2,67 cmolc kg⁻¹, jika dilihat dari kriteria KTK tanah bekas tambang termasuk dalam kriteria rendah. Hal ini menjelaskan bahwa kemampuan tanah bekas tambang emas untuk menyerap dan menukar kation rendah. Pemberian biochar YCW meningkatkan KTK seiring dengan peningkatan dosis, dimana dosis 40 dan 30 t ha⁻¹ meningkatkan KTK masing-masing sebesar 2,01 dan 1,34 cmolc kg⁻¹, dibandingkan dengan 0 t ha⁻¹. Aplikasi 10 dan 20 t ha⁻¹ biochar YCW menunjukkan efek yang sama pada KTK tanah bekas tambang emas, yaitu masing-masing 3,61 dan 3,87 cmolc kg⁻¹. Mekanisme utama perbaikan tanah meliputi kemampuan biochar untuk meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK), pH, dan kapasitas menahan air serta secara langsung menambah unsur hara mineral (Cornelissen et al. 2018). Tingginya pH dan KTK biochar mengakibatkan peningkatan pH dan KTK tanah (Zhang et al., 2018).

Penentuan aktivitas muatan negatif dalam tanah juga dipengaruhi oleh bahan organik tanah, diketahui komposisi abu dan bahan organik pada tanah bekas tambang (SOM) sebesar 98,41% dan bahan organik tanah sebesar 1,62%. Aplikasi biochar YCW meningkatkan bahan organik tanah, dimana dosis 30 dan 40 t ha⁻¹ meningkatkan SOM masing-masing sebesar 0,62 dan 0,48% jika dibandingkan dengan kontrol. Sedangkan pemberian 10 dan 20 t ha⁻¹ biochar YCW menunjukkan peningkatan SOM yang sama (1,89% dan 1,96%), namun berbeda dengan kontrol (1,62%). Peningkatan SOM pada penambahan biochar YCW menyebabkan penurunan komposisi abu dalam tanah sebesar 0,40%. Biochar adalah bentuk bahan organik yang sangat penting yang mengandung karbon

dalam jumlah tinggi dan aplikasinya membantu meningkatkan kesuburan dan status produktivitas lahan produktif rendah (Scholz et al., 2014). Pengaruhnya terhadap hasil panen dilaporkan dari sedikit negatif hingga sangat positif tergantung pada tanah, jenis biochar, dan iklim (Liu et al., 2017). Penambahan biochar di iklim agro tropis meningkatkan 25% hasil panen dibandingkan dengan iklim agro sedang yang menyebabkan efek negatif. Biochar dapat meningkatkan kapasitas tukar kation, kapasitas menahan unsur hara, kapasitas menahan air, dan stabilitas struktural selain menetralkan pH tanah. Aplikasi jumlah biochar yang lebih tinggi, status bahan organik tanah meningkat dan meningkatkan total luas permukaan tanah. Biochar membantu mengubah sifat tanah seperti retensi air, aerasi, pertumbuhan tanaman dan juga meningkatkan hasil dan komponen hasil di bawah sistem tanam yang berbeda dan juga penting dalam adsorpsi Hg.

Peningkatan pH, KTK, dan SOM secara tidak langsung akan meningkatkan aktivitas muatan negatif tanah. Modifikasi ini penting sebagai upaya untuk meningkatkan ketersediaan unsur hara dan penyerapan bahan pencemar (organik dan anorganik) khususnya pada tanah bekas tambang yaitu Hg. Teknologi ameliorasi dengan inaktivasi in-situ pada tanah bekas tambang dengan biochar YCW menunjukkan peningkatan aktivitas muatan negatif pada permukaan koloid tanah (ΔpH) sebesar 4.47 unit pada 40 t ha⁻¹ biochar YCW, dimana pH₀ lebih rendah dari pH aktif untuk setiap peningkatan dosis biochar YCW YANG diberikan. Tabel 1 juga menunjukkan bahwa pH, KTK, dan SOM tanah rendah yang menggambarkan dan menjelaskan bahwa tanah bekas tambang memiliki aktivitas muatan negatif yang lebih rendah pada permukaan tanah koloid dibandingkan setelah aplikasi biochar YCW. Peningkatan aktivitas muatan negatif yang tinggi pada tanah diharapkan dapat mengatasi terjadinya pencemaran oleh Hg pada tanah bekas tambang emas. Interaksi langsung antara Hg-biochar dengan tanah diatur oleh struktur dan kimia permukaan biochar. Porositas dan luas permukaan merupakan komponen penting dari struktur biochar, dan kimia permukaan biochar didominasi oleh gugus fungsi permukaan dan kandungan unsur (Ahmad et al. 2014; Tan et al. 2016; Xiao et al. 2018). Berbagai mekanisme yang diusulkan untuk interaksi biochar dengan Hg dalam larutan berair, termasuk kompleksasi, presipitasi, pertukaran ion, interaksi elektrostatik (chemisorption),

dan penyerapan fisik. Bahan kimia biochar meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap polutan yang ditargetkan misalnya Hg. Biochar dapat meningkatkan kapasitas tukar kationnya karena adanya gugus fenolik dan karboksilat (-OH dan -COOH) pada permukaan biochar (Faheem et al., 2018). Pengaruh pH tanah terhadap pengikatan DOM dan Hg(II) bersifat kompleks.

Di satu sisi, bahan organik terlarut dan merkuri dalam larutan tanah masam bersaing untuk situs adsorpsi aktif, yang mengakibatkan penurunan adsorpsi tanah untuk Hg(II). Kapasitas tukar kation mewakili kapasitas kation adsorpsi tanah dan juga mencerminkan jumlah muatan permukaan negatif dalam tanah, biasanya semakin besar KTK dalam tanah, semakin besar jumlah kation yang terserap. SOM menghasilkan adsorpsi Hg(II) yang lebih tinggi oleh tanah, yang dapat dijelaskan bahwa bahan organik tanah mengandung lebih banyak gugus khelasi seperti gugus hidroksil dan karboksil. Selain itu, SOM bersifat elektronegatif yang memiliki kemampuan adsorpsi kation yang kuat. SOM dihilangkan, adsorpsi Hg(II) menurun drastis. Saya menunjukkan bahwa bahan organik untuk tanah hitam dan tanah merah masing-masing menyumbang 53% dan 28% dari jumlah serapan maksimum untuk Hg(II). Adsorpsi logam berat meningkat ketika dosis adsorben meningkat. Peningkatan luas permukaan spesifik suatu adsorben diikuti dengan peningkatan jumlah situs yang tersedia untuk adsorpsi (Thavamani dan Rajkumar 2013). Peningkatan aktivitas muatan negatif dengan biochar YCW dapat mereduksi Hg dalam tanah melalui proses adsorpsi. Penurunan Hg dengan pemberian biochar YCW 40 dan 30 t ha⁻¹ berturut-turut adalah 1,69 dan 1,18 mg kg⁻¹ dibandingkan pemberian 0 t ha⁻¹. Sedangkan pemberian 20 dan 30 t ha biochar YCW menunjukkan penurunan Hg yang sama, namun terlihat berbeda pada dosis 0 t ha⁻¹ (Tabel 1). Teknologi ameliorasi dengan inaktivasi in-situ bertujuan untuk menurunkan sebanyak mungkin kadar Hg dalam tanah dengan menginaktivasi fraksi Hg aktif dalam tanah.

BAB 6. RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA (PENELITIAN TAHUN II)

Rencana tahapan penelitian selanjutnya pada Tahun ke-2 merupakan penelitian lanjutan dari penelitian Tahun 1 yang menggunakan jenis dari masing – masing amelioran dan satu dosis terpilih yaitu 40 t/ha pada masing – masing jenis amelioran yang akan digunakan dalam penelitian Tahun 2.

Tabel 6.1. Persentase formulasi terhadap masing – masing komposisi amelioran

Kode	Komposisi dan Persentase Formulasi Amelioran
P.1 A	100% P-SC
P.1 B	75% P-SC + 25% B-YC _w
P.1 C	50% P-SC + 50% B-YC _w
P.1 D	25% P-SC + 75% B-YC _w
P.1 E	100% B-YC _w
P.2 A	100% A-SC
P.2 B	75% A-SC + 25% B-YC _w
P.2 C	50% A-SC + 50% B-YC _w
P.2 D	25% A-SC + 75% B-YC _w
P.2 E	100% B-YC _w

Keterangan : (P-SC + B-YC_w) = Bubuk batubara Sub-bituminus dan Biochar limbah kelapa muda; (A-SC + B-YC_w) Bubuk batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan Biochar limbah kelapa muda.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari: (1) morfologi dan karakteristik komposisi dan persentase formulasi amelioran dari batubara Sub-bituminus dengan biochar limbah kelapa muda dan (2) kemampuan formulasi amelioran dari batubara Sub-bituminus dengan biochar limbah kelapa muda dalam adsorpsi Hg. Penelitian Tahun 2 menggunakan Rancangan Acak Lengkap dengan 3 ulangan pada masing – masing percobaan yang terdiri 2 komposisi amelioran (P.1 = P-SC + BC dan P.2 = A-SC + BC) dengan masing – masing percobaan terdiri dari 5 persentase formulasi (A = 100% SC; B = 75% sc + 25% BC; C = 50% SC + 50% BC; D = 25% SC + 75% BC dan E = 100% BC) seperti terlihat pada Tabel 6.1.

Pelaksanaan Penelitian yang akan dilakukan sebagai berikut:

d. Proses Formulasi Batubara Sub-bituminus dengan Biochar dari Limbah Kelapa Muda

Penetapan Formulasi amelioran ditetapkan atas dasar percobaan 1 sebagai 100% formulasi amelioran (FA). FA ditimbang berdasarkan kapasitas retensi air pada masing – masing jenis amelioran yang digunakan. Kombinasi formulasi amelioran dilakukan sesuai dengan takaran perlakuan pada penelitian Tahun 2

(Tabel 4) dan kemudian dihomogenkan didalam gelas piala 100 mL dengan menggunakan shaker dengan kecepatan 300 rpm selama 30 menit. Hasil formulasi dikeringkan dengan menggunakan oven pada suhu 70⁰C selama 1*24 jam. Selanjutnya formulasi amelioran dianalisis di laboratorium.

e. Adsorpsi Hg Pada Formulasi Amelioran

Percobaan adsorpsi dilakukan dengan menimbang sampel 0,5g sampel dari masing – masing percobaan 2 dalam 20 ml larutan NaNO₃ 0,1M, sedangkan untuk konsentrasi Hg(NO₃)₂ yang digunakan adalah 5, 10, 15, 20 dan 25 ppm dengan elektrolit pendukungnya adalah NaNO₃ 0,1M (Zhang *et al.*, 2012). Penetapan konsentrasi Hg(NO₃)₂ berdasarkan penelitian Tahap I. Selanjutnya dishaker (300 rpm) pada suhu 25⁰C selama 24 jam (Chen *et al.*, 2017) dalam tabung sentrifus. Setelah periode ekuilibrase, suspensi disentrifugasi pada 4000 rpm menit⁻¹ selama 30 menit. Konsentrasi Hg dalam supernatan dianalisis dengan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS). Jumlah total Hg yang teradsorpsi dihitung dengan perbedaan antara konsentrasi Hg awal dan konsentrasi Hg kesetimbangan. Selanjutnya hasil adsorpsi dianalisis menggunakan Ms. Excel 2016 dan Software SPSS 16.

f. Pengamatan

c. Morfologi dan Karakteristik Formulasi Amelioran

Analisis morfologi dan karakteristik yang akan dilakukan pada percobaan 2 : (a) Vibrasi molekul dikarakterisasi dengan *Inframerah Transformasi Fourier* (FTIR) Shimadzu 8400; (b) Morfologi permukaan dan komposisi dikarakterisasi dengan *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) HITACHI S-3400N; (c) Struktur pori dipelajari melalui *Surface Area Analyzer* (SAA) dengan Quantachrome AsiQwin V3.01 pada temperatur 77K dimana luas permukaan ditentukan dengan metode BET (*Brunaur, Emmett and Teller*) dan volume pori ditentukan dengan metode BJH (*Barret, Joyner and Halenda*) dan (d) Karakteristik tambahan: (1) komposisi elemen menggunakan *X-ray Photoelectron Spectroscopy*; (2) kandungan Proksimat dengan menggunakan metode Gravimetri; (3) nilai pH dan Daya hantar listrik (EC) dengan menggunakan metode Elektrometrik; (4) Muatan Titik Nol (PZC) dengan menggunakan metode Titrasi Garam (CaCl₂ 2M); (5) KTK menggunakan metode *Leaching* NH₄OAc 1M pH 7 dan (6) Kandungan C Inorganik dan C Organik dengan menggunakan metode

Titrimetriik dan *Walkley and Black* (Balai Penelitian Tanah, 2012; Singh *et al.*, 2017).

d. Analisis Adsorpsi Hg

Perhitungan parameter adsorpsi yang relevan untuk Hg terhadap formulasi amelioran melalui regresi linier yang dipasangkan dengan persamaan Langmuir dan Freundlich Isoterm :

$$\text{Persamaan Langmuir : } Q_e = Q_m * K_l * C_e / 1 + K_l * C_e$$

$$\text{Persamaan Freundlich : } Q_e = K_f * C_e^{1/n}$$

Dimana : Q_e = efektivitas adsorpsi (mg g^{-1}); Q_m = adsorpsi maksimal (mg g^{-1}); K_l = konstantas Langmuir (L mg^{-1}); K_f = konstanta Freundlich ($\text{mg}^{n+2} * \text{L}^n$); C_e = konsentrasi kesetimbangan dan n = konstanta adsorpsi.

Berdasarkan rencana penelitian ini maka peneliti mencoba merencanakan sebagai luaran penelitian dalam Jurnal ilmiah dan HKI serta Buku yang menjadi sasaran wajib dan wajib khusus yaitu :

a. Luaran Wajib

1. Submitted Article Q2
2. Accepted Article Q4
3. Draft Book Chapter
4. Draft KI

b. Luaran Wajib Khusus

1. Accepted Article Q3
2. Accepted Article Q4
3. Draft Book Monograf, Ajar dan Referensi
4. Draft KI

BAB 7. KESIMPULAN DAN SARAN

7.1 Kesimpulan

Teknologi ameliorasi yang diterapkan pada tanah bekas tambang emas tercemar merkuri di Kabupaten Dharmasraya dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Aplikasi batubara sub-bituminus Indonesia, pada aplikasi 40 t ha⁻¹ pada tanah bekas tambang emas, dapat meningkatkan muatan permukaan tanah (Δ pH) sebesar 0,60 melalui perubahan sifat kimia tanah bekas tambang emas, dimana terjadi peningkatan pH (H₂O) EC, KTK, dan SOM masing-masing sebesar 0,37; 0,04 dS m⁻¹; 2,14 cmol kg⁻¹ dan 7,83% dibandingkan kontrol. Muatan permukaan tanah didukung oleh mineral tanah [Kuarsa (SiO₂)] dan peningkatan sifat kimiawi tanah bekas tambang yang diperbaiki dengan batubara sub-bituminus Indonesia yang menyebabkan penurunan Hg sebesar 2,50 mg kg⁻¹ dibandingkan dengan kontrol.
2. Aplikasi SC - NaOH, pada aplikasi 40 t ha⁻¹ pada tanah bekas tambang emas, dapat memodifikasi muatan permukaan tanah melalui perubahan sifat kimia dengan meningkatkan pH (H₂O, KCl, dan Δ pH) EC, CEC, dan SOM, masing-masing sebesar 5,77; 2,67; 6.25; 4,33 dS m⁻¹; 2,41 cmol kg⁻¹ dan 17,15% dibandingkan kontrol. Muatan permukaan tanah yang didukung oleh mineral tanah [Quartz (SiO₂), Graphite (C), dan Periclase (MgO)] serta terjadi penurunan transmitansi pada gugus OH (0,18%) yang menyebabkan kapasitas adsorpsi tanah terhadap Hg meningkat dengan penurunan sebesar 2,84 mg kg⁻¹ dibandingkan dengan kontrol. Korelasi antara Hg dan sifat kimia tanah pada tanah bekas tambang emas yang diameliorasi dengan SC – NaOH (Hg dengan SOM > Δ pH > EC > pH H₂O > pH KCl > KTK).
3. Aplikasi biochar limbah kelapa muda berpengaruh nyata terhadap lahan bekas tambang emas pada takaran 40 t ha terhadap peningkatan aktivitas muatan negatif dan cadangan nutrisi, dimana terjadi peningkatan pH [3,54 unit], EC [0,09 dS m], KTK [2,01 cmolc kg⁻¹], SOM [0,62 %], pH (3,1 unit), N [0,07%], P [20,53 ppm], K [0,96 cmolc kg⁻¹], Ca [0,20 cmolc kg⁻¹] dan Mg [1,46 cmolc kg⁻¹] dan penurunan abu [0,60%] dan Hg [1,69 mg kg⁻¹].

7.1 Saran

Berdasarkan hasil dan kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan dapat disarankan bahwa penerapan teknologi tepat guna melalui teknologi ameliorasi yang berbasis batubara Sub-bituminus, aktivasi batubara Sub-bituminus dengan 10% NaOH dan biochar limbah kelapa muda pada takaran 40 ton/ha dapat meningkatkan aktivitas muatan negatif tanah dan menurunkan kandungan Hg yang tercemar pada tanah bekas tambang emas di Kabupaten Dharmasraya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad M, Rajapaksha AU, Lim JE, Ming Z, Bolan N, Mohan D, Vithanage M, Sang SL, Yong SO (2014) Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere* 99(3):19–33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Alloway, B. J., (2012). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*, 3rd. Ed. Blackie Academic & Professional.
- Aryanti, E. and 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 Agroekoteknologi*, 9(2), pp. 21–26.
- Balai Penelitian Tanah. 2012. *Analisis Kimia Tanah, Air, Tanaman dan Pupuk*. Balai Penelitian Tanah. Bogor. 246.
- Bar-Yosef, B., Magen, H., Johnston, A.E. and Kirkby, E.A. (2015) Potassium Fertilization: Paradox or K Management Dilemma *Renewable Agriculture and Food Systems*, 30, 115-119. <https://doi.org/10.1017/S1742170514000295>
- Bowles, J. F. W. (2021). Oxides. In *Encyclopedia of Geology* (2nd ed., pp. 428–441). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102908-4.00185-5>
- Cerqueira, J. C., Da Silva Penha, J., Oliveira, R. S., Nani Guarieiro, L. L., Da Silva Melo, P., Viana, J. D., & Souza Machado, B. A. (2017). Production of biodegradable starch nanocomposites using cellulose nanocrystals extracted from coconut fibers. *Polimeros*, 27(4), 320–329. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.05316>
- Chen, X.-W., Wei, Q., Wang, Z.-P., Wang, C.-L., Bi, Y.-H., & Gu, Y.-F. (2016). Identification and functional analysis of interferon regulatory factor 3 in *Lateolabrax maculatus*. *Developmental & Comparative Immunology*, 63, 1–9. doi:10.1016/j.dci.2016.05.005
- Chintala, R. Schummacher, T. E. Kumar, S. Malo, D. D. Rice, J. A. Bleaklem, B. Chilom, G. Clay, D. E. Julsoin, J. L. Papiernik, S. K. Gu, Z. R. 2014. Molecular characterization of biochars and their influence on microbiological

- properties of soil. In *Journal of Hazardous Materials*, vol. 279, 2014, pp. 244–256. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.06.074
- Cornelissen G, Jubaedah, Nurida NL, Hale SE, Martinsen V, Silvani L, Mulder J (2018) Fading positive effect of biochar on crop yield and soil acidity during five growing seasons in an Indonesian Ultisol. *Sci Total Environ* 634:561–568
- Cuevas, J., Dirocie, N., Yunta, F., Delgado, C. G., Santamaría, D. E. G., Ruiz, A. I., Fernández, R., & Eymar, E. (2019). Evaluation of the sorption potential of mineral materials using tetracycline as a model pollutant. *Minerals*, 9(7), 1–21. <https://doi.org/10.3390/min9070453>
- Dai, Z., Zhang, X., Tang, C., Muhammad, N., Wu, J., Brookes, P. C., Xu, J. 2017. Potential role of biochars in decreasing soil acidification. In *Science of The Total Environment*, vol. 581–582, 2017, pp. 601–611. DOI: 10.1016/scietotenv.2016.12.169
- Dultz, S., Woche, S.K., Mikutta, R., Schrapel, M., Guggenberger, G., 2019. Size and charge constraints in microaggregation: model experiments with mineral particle size fractions. *Appl. Clay Sci.* 170, 29–40
- Esdaille, L. J., & Chalker, J. M. (2018). The Mercury Problem in Artisanal and Small-Scale Gold Mining. *Chemistry - A European Journal*, 24(27), 6905–6916. <https://doi.org/10.1002/chem.201704840>
- Faheem, F., Bao, J., Zheng, H., Tufail, H., Irshad, S., & Du, J. (2018). Adsorption-assisted decontamination of Hg(II) from aqueous solution by multi-functionalized corncob-derived biochar. *RSC Advances*, 8(67), 38425–38435. doi:10.1039/c8ra06622a
- Gfeller, L., Caplette, J. N., Frossard, A., & Mestrot, A. (2022). Organo-mercury species in a polluted agricultural flood plain: Combining speciation methods and polymerase chain reaction to investigate pathways of contamination. *Environmental Pollution*, 311(July), 119854. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119854>
- Gill, A. N., Akbar, M., Qadir, M. A., Pervaiz, M., & Adnan, A. (2015). Chlorine Dioxide Mediated Oxidation of Sub-Bituminous Coal for Humic Acid Production. *Asian Journal of Chemistry*, 27(10), 3658–3662. <https://doi.org/10.3153/jfscom.2010021>
- Götze, J., Pan, Y., & Müller, A. (2021). Mineralogy and mineral chemistry of quartz: A review. *Mineralogical Magazine*, 85(5), 639–664. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.72>
- Herviyanti, -, Prasetyo, T. B., Juniarti, -, & Rezki, D. (2017). Activation Unproductive Coal Powder with Urea to Improve Chemical Properties of Ultisols. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 7(3), 957. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.7.3.2152>
- Herviyanti, Gusnidar, Harianti, M., & Maulana, A. (2019). Improvement of chemical properties of oxisols and rice production with humic substances from sub-bituminous coal Indonesia. *Agrivita*, 41(3), 428–438. <https://doi.org/10.17503/agrivita.v41i3.1106>

- Herviyanti, H., Ahmad, F., Sofiyani, R., Darmawan, D., Gusnidar, G., & Saidi, A. (2012). Pengaruh Pemberian Bahan Humat Dari Ekstrak Batubara Muda (Subbituminus) Dan Pupuk P Terhadap Sifat Kimia Ultisol Serta Produksi Tanaman Jagung (*Zea Mays L.*). *Jurnal Solum*, 9(1), 15. <https://doi.org/10.25077/js.9.1.15-24.2012>
- Herviyanti, H., Prasetyo, T. B., Juniarti, J., Prima, S., & Wahyuni, S. (2018). The Role of Powder Sub-bituminous Coal with Sodium Hydroxide (NaOH) to Improve Chemical Properties of Ultisols. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 8(5), 2052. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.8.5.3543>
- Herviyanti, H., Prasetyo, T. B., Juniarti, J., Prima, S., & Wahyuni, S. (2018). The Role of Powder Sub-bituminous Coal with Sodium Hydroxide (NaOH) to Improve Chemical Properties of Ultisols. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 8(5), 2052–2058. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.8.5.3543>
- Hidayat, B. 2015. *Remediasi Tanah Tercemar Logam Berat dengan Menggunakan Biochar*. *Jurnal Pertanian Tropik*. Vol. 2. No. 1 : 51-61.
- Jaiswal, D.K., Verma, J.P., Prakash, S., Meena, V.S. and Meena, R.S. (2016) Potassium as an Important Plant Nutrient in Sustainable Agriculture: A State of the Art. In: Meena, V.S., Maurya, B.R., Prakash Verma, J. and Meena, R.S., Eds., *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture*, Springer, New Delhi, 21-29. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2_2
- Jeffery, S., D. Abalos, M. Prodana, A.C. Bastos, J.W. vanGroenigen, A. Bruce, B.A. Hungate and F. Verheijen. 2017. Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Journal of Environmental Research* 12: 053001
- Joni, H. 2013. *Peningkatan pH Tanah dan Koloni Mikroorganisme Akibat Bioremediasi dan Fitotemediasi pada Lahan Berpasir Pasca Penambangan Emas*. *Jurnal Hutan Tropika VIII* (2). 46 Hal.
- Juneri, R., & Mubarak, A. (2019). Peran Pemerintah Kabupaten Dharmasraya dalam Memperbaiki Kerusakan Lahan Bekas Tambang. *Jurnal Prespektif: Jurnal Kajian Sosiologi Dan Pendidikan*, 2(3), 139–146.
- Kalaivanan, D., & Ganeshamurthy, A. N. (2016). Abiotic stress physiology of horticultural crops. *Abiotic Stress Physiology of Horticultural Crops*, March 2016, 1–368. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2725-0>
- Kamal, A. S., Othman, R., & Jabarullah, N. H. (2020). Preparation and synthesis of synthetic graphite from biomass waste: A review. *Systematic Reviews in Pharmacy*, 11(2), 881–894.
- Kim, R.Y., Yoon, J.K., Kim, T.S., Yang, J.E., Owens, G. and Kim, K.R. (2015) Bioavailability of Heavy Metals in Soils: Definitions and Practical Implementation—A Critical Review. *Environmental Geochemistry and Health*, 37, 1041-1061. <https://doi.org/10.1007/s10653-015-9695-y>

- Li, Z., Liu, Y., Wang, D., Wang, P., Xu, R., & Xie, D. (2019). Characterizing surface electrochemical properties of simulated bulk soil in situ by streaming potential measurements. *European Journal of Soil Science*, 70(5), 1063–1072. <https://doi.org/10.1111/ejss.12794>
- Liu, J., Yang, Y., Zheng, Q., Su, X., Liu, J., & Zhou, Z. (2022). Effects of soil surface electrochemical properties on soil detachment regulated by soil types and plants. *Science of the Total Environment*, 834(April). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154991>
- Liu, Z., He, T., Cao, T., Yang, T., Meng, J., & Chen, W. (2017). Effects of biochar application on nitrogen leaching, ammonia volatilization, and nitrogen use efficiency in two distinct soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, (ahead), 0–0. doi:10.4067/s0718-95162017005000037
- Lorenz, K. and Lal, R. 2014. Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. In *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, vol. 177, 2014, pp. 651–670. DOI: 10.1002/jpnl.201400058
- Mahler, C. F. , Svierzoski, N. D. S. , & Bernardino, C. A. R. (2021). Chemical Characteristics of Humic Substances in Nature. In (Ed.), *Humic Substances*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.9741>
- Mathews, J. P., & Chaffee, A. L. (2012). The molecular representations of coal - A review. *Fuel*, 96, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.11.025>
- Maulana, A. (2020). *Aktivasi Bubuk Batubara Sub-Bituminus Dengan Berbagai Jenis Kapur Terhadap Sifat Kimia Ultisol*. Masters Thesis, Universitas Andalas. 141 Hal.
- Maulana, A., Herviyanti, Prasetyo, T. B., Harianti, M., & Lita, A. L. (2021). Effect of Pyrolysis Methods on Characteristics of Biochar from Young Coconut Waste as Ameliorant. *The 3rd International Conference on Tropical Silviculture - Inspiring Silviculture Innovation and Research in Achieving Sustainable Development Goals*, 95 p. <http://icts.ipb.ac.id>
- Moterle, D.F., Kaminski, J., dos Santos, R.D., Caner, L. and Bortoluzzi, E.C. (2016) Impact of Potassium Fertilization and Potassium Uptake by Plants on Soil Clay Mineral Assemblage in South Brazil. *Plant and Soil*, 406, 157-172. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2862-9>
- Munawarah. F., Budy. W., Muliatiningsih. 2017. *Peranan Fitoremediasi Pada Lahan Bekas Tambang Emas di Jonggat Kabupaten Lombok Tengah*. *Jurnal Agrotek Ummat*. Vol. 4. No. 2.
- Neneng. L., T. Yushinta., Dewi. S. 2012. *Aplikasi Metode Reklamasi Terpadu Untuk Memperbaiki Sifat Fisik, Kimia, dan Biologis Pada Lahan Pasca Penambangan Emas di Kalimantan Tengah*. *Prosiding Inhas*. 81-86.
- Nurida, N.L. 2014. *Potensi Pemanfaatan Biochar Untuk Rehabilitasi Lahan Kering di Indonesia*. *Jurnal Sumberdaya Lahan*. Edisi Khusus (2014) 57-68.
- Peretti A, Bieri W, Cleveland E, Alessandri M, Kradofer S, Gunther D, Meier M, Jaramillo D, and Musa M (2018) New Types of Synthetic Periclase Identified by C2S Inclusions— Dicalcium Silicate Cement Hardener. *Contributions to Gemology* 1–31. Special Alert Issue.

- Prasetyo, T. B., Ahmad, F., & Saidi, A. (2019). Humic acid and water management to decrease Ferro (Fe^{2+}) solution and increase productivity of established new rice field. *Journal Of Tropical Soils*, 17(1), 9-17.
- Prasetyo, T. B., Herviyanti, Juniarti, Harianti, M., & Panjaitan, N. P. (2018). Activation of Sub-bituminous Powder with Urea and Dolomite to Improve Nutrient Content of Ultisols and The Growth of Oil Palm (*elaeis guineensis jacq*) Seedlings. *Malaysian Journal of Soil Science*, 22, 147–160.
- Prasetyo, T. B., Naspendra, Z., Maulana, A., Solfianti, M., Krisna, S. D., & Herviyanti. (2021). Potential of biochar bamboo and sub-bituminous coal as amendment of acid mineral soils for improving the growth of arabica coffee [*Coffea arabica* L.] seedlings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 741(1), 1–10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/741/1/012026>
- Preocanin, T., Abdelmonem, A., Montavon, G., & Luetzenkirchen, J. (2016). Charging Behavior of Clays and Clay Minerals in Aqueous Electrolyte Solutions — Experimental Methods for Measuring the Charge and Interpreting the Results. In *Clays, Clay Minerals and Ceramic Materials Based on Clay Minerals* (pp. 51–88). <https://doi.org/10.5772/62082>
- Purwani, J. (2010). Pemanfaatan *Tithonia Diversifolia* (Hamsley) A Gray Untuk Perbaikan Tanah Dan Produksi Tanaman. In *Prosiding Seminar Nasional*. Hal 253 – 263.
- Putranto, T. T. 2011. *Pencemaran Logam Berat Merkuri (Hg) Pada Air Tanah*. Jurnal. Teknik. Vol. 32. No.1.
- Qu, R., Han, G., Liu, M., & Li, X. (2019). The mercury behavior and contamination in soil profiles in the mun river basin, Northeast Thailand. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(21), 16. <https://doi.org/10.3390/ijerph16214131>
- Reis, A. T., Davidson, C. M., Vale, C., & Pereira, E. (2016). Overview and challenges of mercury fractionation and speciation in soils. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 82, 109–117. doi:10.1016/j.trac.2016.05.008
- Reis, Ana Teresa; Davidson, Christine M.; Vale, Carlos; Pereira, Eduarda (2016). Overview and challenges of mercury fractionation and speciation in soils. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 82(), 109–117. doi:10.1016/j.trac.2016.05.008
- Rezki, D., Ahmad, F., & Gusnidar, G. (2007). Ekstraksi Bahan Humat Dari Batubara (Subbituminus) Dengan Menggunakan 10 Jenis Pelarut. *Jurnal Solum*, 4(2), 73. <https://doi.org/10.25077/js.4.2.73-80.2007>
- Sakuma, H., Lockner, D. A., Solum, J., & Davatzes, N. C. (2022). Friction in clay-bearing faults increases with the ionic radius of interlayer cations. *Communications Earth and Environment*, 3(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00444-3>
- Samsudin, S., Abdul Aziz, N., Hairuddin, A.A., Masuri, S.U., (2021). Developing Sub-Bituminous Coal Sintering Ratio for Predicting Coal Ash Slagging Factors. *International Journal of Technology*. Volume 12(4), pp. 791-801

- Scherer, H.W., Feils, E. and Beuters, P. (2014) Ammonium Fixation and Release by Clay Minerals as Influenced by Potassium. *Plant, Soil and Environment*, 60, 325-331.
<https://doi.org/10.17221/202/2014-PSE>
- Scholz, S.M., T. Sembres, K. Roberts, T. Whitman, K. Wilson, and J. Lehmann. 2014. *Biochar systems for smallholders in developing countries: Leveraging current knowledge and exploring future potential for climate-smart agriculture*. World Bank, Washington, DC License, CC BY 3.0 IGO
- Singh, B., Camps-Arbestain, M., & Lehmann, J. (2017). *Biochar: A Guide To Analytical Methods*. In CRC Press. CSIRO. www.publish.csiro.au
- Singh, S., Parihar, P., Singh, R., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2016). Heavy metal tolerance in plants: Role of transcriptomics, proteomics, metabolomics, and ionomics. *Frontiers in Plant Science*, 6(FEB2016), 1–36.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01143>
- Tan GC, Sun WL, Xu YR, Wang HY, Xu N (2016) Sorption of mercury (II) and atrazine by biochar, modified biochars, and biochar based activated carbon in aqueous solution. *Bioresour Technol* 211:727–735. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.147>
- Tan, K. H. (2010). *Principles of Soil Chemistry*. CRC Press Taylor and Francis Group. 362 pp.
- Tao, L., Li, F.B., Liu, C.S., Feng, X.H., Gu, L.L., Wang, B.R., Wen, S.L., Xu, M.G., (2019). Mitigation of soil acidification through changes in Soil Mineralogy due to long-term fertilization in Southern China. *CATENA* 174, 227–234.
- Tian, H.H., Wei, C.F., Yuan, R.T., (2019). Thermal and Saline effect on mineral-water in interactions in compacted Clays: an NMR-based Study. *Appl. Clay Sci.* 170, 106–113.
- Toledo Castanheira, Dalysse (2020). *Coffee - Production and Research || Soil Electrochemical and Physical Properties in Coffee Crops in the State of Paraná, Brazil*, 10.5772/intechopen.82913(Chapter 3), -. doi:10.5772/intechopen.91352
- Wang, X.-N., Sun, G.-X., Li, X.-M., Clarke, T. A., and Zhu, Y.-G. (2017). Electron shuttle-mediated microbial Fe (III) reduction under alkaline conditions. *J. Soil Sediment.* 18, 159–168. DOI: 10.1007/s11368-017-1736-y
- Wen, X., Wang, Y., Cheng, P., Liu, D., Ma, S., Zhang, C., Liu, T., & Tao, L. (2020). Surface charge properties of variable charge soils are influenced by environmental factors. *Applied Clay Science*, 189(808), 105522.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105522>
- Widyati, E. 2012. *Pemanfaatan Sludge Industri Pulp dan Kertas Untuk Ameliorasi Tanah Tailing Tambang Emas*. *Jurnal Selulosa*. Vol. 2. No. 2 : 28-38.
- Wilson, K. 2014. *How Biochar Work In Soil* . *the biochar journal* 2014. Switzerland. 13 Hal.
- Xiao X, Chen BL, Chen ZM, Zhu LZ, Schnoor JL (2018) Insight into multiple and multilevel structures of biochars and their potential environmental applications:

- a critical review. *Environ Sci Technol* 52:5027–5047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06487>
- Yang, Q., Wang, Y., & Zhong, H. (2021). Remediation of Mercury-Contaminated Soils And Sediments Using Biochar: A Critical Review. *Biochar*, 3(1), 23–35. <https://doi.org/10.1007/s42773-021-00087-1>
- Zhang C, Liu L, Zhao M, Rong H, Xu Y (2018) The environmental characteristics and applications of biochar. *Environ Sci Pollut Res* 25:21525–21534
- Zhang, H., Feng, X., Zhu, J., Sapkota, A., Meng, B., Yao, H., Qin, H., Larssen, T., 2012. Selenium in Soil Inhibits Mercury Uptake and Translocation in Rice (*Oryza sativa* L.). vol. 46. pp. 10046.
- Zhang, N., Zhang, D. D., Ji, H. Da, Yu, X. W., Zhang, Z. C., Yang, S. M., & Zhang, C. F. (2018). Redox structures of humic acids derived from different sediments and their effects on microbial reduction reactions. *Frontiers in Microbiology*, 9(JUN), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01225>
- Zhang, S., Song, J., Du, Q., Cheng, K., & Yang, F. (2020). Analog synthesis of artificial humic substances for efficient removal of mercury. *Chemosphere*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126606>