



**LAPORAN AKHIR
KLASTER RISET - PUBLIKASI PERCEPATAN KE GURU BESAR
(KRP2GB) TAHUN II
UNIVERSITAS ANDALAS
TAHUN 2023**

**SUB TEMA PENELITIAN :
Ketahanan Pangan**

**SUB TOPIK PENELITIAN :
Teknologi dan Alsintan**

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

**Penelitian ini Dibiayai oleh:
UNIVERSITAS ANDALAS**

**Sesuai dengan Kontrak Penelitian Dasar Unggulan Klaster Riset-Publikasi Percepatan
Ke Guru Besar (PDU-KRP2GB-Unand)**

**Nomor: 20/UN16.19/PT.01.03/Pangan-PDU-KRP2GB-Unand/2023
Tahun Anggaran 2023**

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. Dr. Ir. INDRA DWIPA, MS	(NIDN : 0020026507)
	4. AMSAR MAULANA, SP., MP	(NIM : 2031612003)
	5. FACHRUL RAZI	(NIM : 1910231006)

**JURUSAN TANAH, FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG, NOVEMBER 2023**

HALAMAN PENGESAHAN
PROPOSAL KLASTER RISET - PUBLIKASI PERCEPATAN KE GURU BESAR
(KRP1GB) UNIVERSITAS ANDALAS

Judul Penelitian	: Teknologi Ameliorasi Berbasis Batubara Sub-bituminus dan Biochar Limbah Kelapa Muda Terhadap Tanah Bekas Tambang Emas Tercemar Merkuri Di Kabupaten Dharmasraya	
Skim	: Riset Publikasi Percepatan Ke Guru Besar (KRP1GB)	
Sub Tema Penelitian	: Ketahanan Pangan	
Sub Topik Penelitian	: Teknologi dan Alsintan	
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&hl=id	
e. Jabatan Fungsional	: Lektor Kepala	
f. Prodi, Fak/PPs	: Ilmu Tanah	
g. Nomor HP	: 0813 7823 7726	
h. 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 (2)		
a. Nama Lengkap	: Dr. Ir. Indra Dwipa, MS	
b. NIDN	: 0020026507	
c. Prodi, Fak/PPs	: Budidaya Pertanian, 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	: Fachrul Razi	
b. No. BP	: 1910231006	
c. Prodi, Fak/PPs	: S1 Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian	

Lama Penelitian Keseluruhan : 3 tahun
Usulan Penelitian Tahun ke- : 2 (dua)
Biaya Penelitian Keseluruhan : Rp. 299.080.000,-
Biaya Penelitian
- Diusulkan ke UNAND : Rp.100.000.000,-
- Dana internal Fakultas : -
- Dana institusi lainnya : -
Biaya Luaran Tambahan : -

Menyetujui,
Dekan Fakultas Pertanian
Universitas Andalas



Dr. Ir. Andra Dwipa, MS
NIP. 196502201989031003

Padang 30 November 2023
Ketua Peneliti,

A handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line, representing the approval of the researcher.

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.	Dr. Ir. Indra Dwipa, MS	Anggota 3	Agronomi	Agronomi	8 jam /minggu
5.	Amsar Maulana, SP., MP	Mahasiswa 1	-	S3 Ilmu Pertanian	10 jam/minggu
6.	Fachrul Razi	Mahasiswa 2	-	S1 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 : Februari 2023
Berakhir : November 2024
5. Usulan Biaya :
Tahun ke-1 : Rp. 100.000.000,-
Tahun ke-2 : Rp. 100.000.000,-
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 :
Journal of Degraded and Mining Lands Management akan publikasi 2023 dan SAINS TANAH - Journal of Soil Science and Agroclimatology akan publikasi 2023 serta mengikuti 13th International Conference on Environmental and Agricultural Engineering (ICEAE 2023), Bangkok, Thailand Juny 9-11, 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 2023 dan akan digranted tahun 2024; (b) Buku dalam bentuk draft *Chapter Book, Monograf dan Ajar* : Adsorpsi dalam Teknologi Ameliorasi, yang akan diterbitkan pada Tahun 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	iv
RINGKASAN	v
BAB 1. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	4
1.3 Urgensi penelitian	4
1.4 Luaran Penelitian	4
BAB 2. RENCANA INDUK DAN PETA JALAN PENELITIAN UNIVERSITAS ANDALAS	6
BAB 3. TINJAUAN PUSTAKA	
3.1 Karakteristik Tanah Tambang Emas dan Permasalahannya	8
3.2 Potensi Batubara Sub-bituminus dan Biochar Limbah Kelapa Muda Sebagai Bahan Amelioran	9
BAB 4. METODE PENELITIAN	
4.1 Tahun II (2023)	14
4.2 Tahun III (2024)	16
BAB 5. BIAYA DAN JADWAL PENELITIAN	
5.1 Anggaran Biaya	19
5.2 Jadwal penelitian	20
DAFTAR PUSTAKA	
Lampiran 1. Justifikasi Anggaran Penelitian	24
Lampiran 2. Dukungan Sarana dan Prasarana	28
Lampiran 3. Susunan Organisasi Tim Peneliti dan Pembagian Tugas	29
Lampiran 4. Biodata Ketua dan Anggota Tim Peneliti	30
Lampiran 5. Surat Pernyataan Ketua Peneliti dan Anggota Peneliti	35

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), SC yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan Biochar limbah kelapa muda pada tanah bekas tambang emas, dapat menurunkan Hg_{Total} sebesar 2,50 ; 2,84 dan 1,69 mg kg⁻¹ dibandingkan dengan kontrol melalui peningkatan aktivitas muatan dan sifat kimia tanah bekas tambang emas di Kab. Dharmasraya.

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 Hg^0 , Hg^+ dan khusus di dalam tanah yang mendominasi yaitu Hg^{2+} . 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

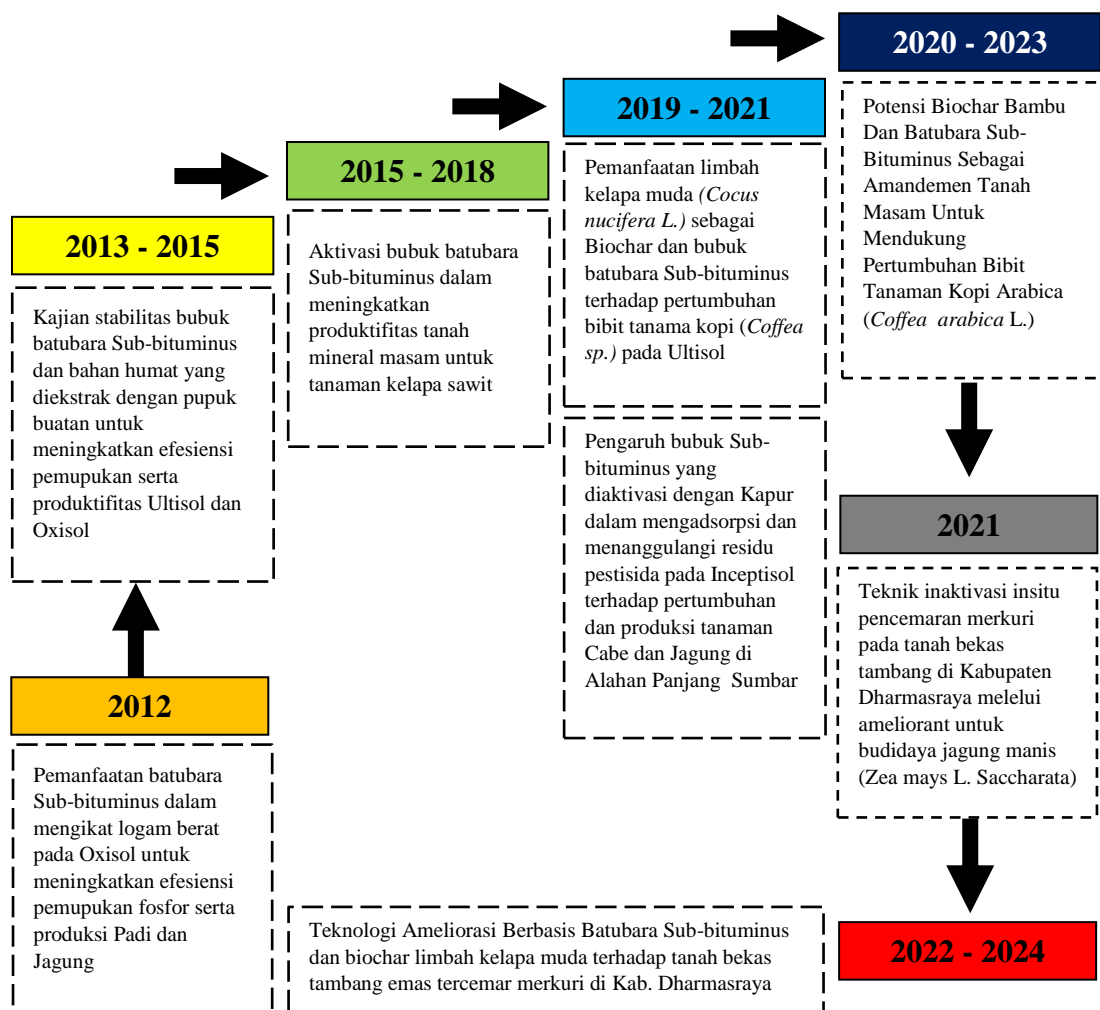
BAB 2. RENSTRA/RIP DAN PETA JALAN PENELITIAN PERGURUAN TINGGI

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.



Gambar 2.1 Road map penelitian

Pada Tahun III (2018) dilakukan : a) Percobaan lanjutan tahun II, dimana bibit sawit yang dipelihara sampai umur \pm 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 2.1.

BAB 3. TINJAUAN PUSTAKA

3.1 Karakteristik Tanah Bekas Tambang Emas dan Permasalahannya

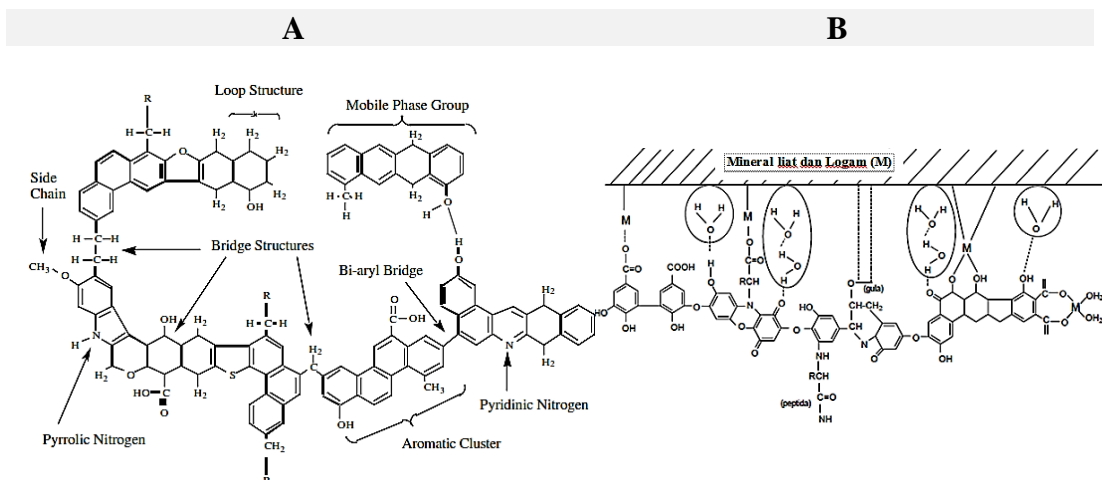
Karakteristik lahan pasca tambang emas ditandai dengan lahan yang didominasi oleh tanah yang memiliki daya ikat air rendah serta juga memiliki intensitas cahaya yang sangat tinggi dikarenakan lahan dibuka tanpa adanya vegetasi berkayu yang dapat menghalangi suhu permukaan tanah, selain itu lapisan top 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 keasaman 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 ditanah

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.

3.2 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).



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)

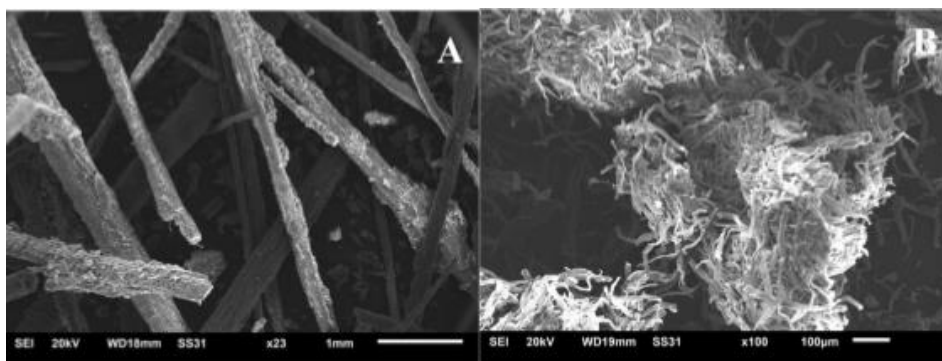
Batubara sebagai salah satu bahan organik yang berperan penting dalam menentukan kemampuan tanah untuk mendukung produksi dan pertumbuhan tanaman. Menurut Tan (2010) bahan organik tanah dibagi menjadi bahan yang tidak terhumifikasi dan yang terhumifikasi. Bahan yang tidak terhumifikasi adalah senyawa 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.

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 partikel 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.

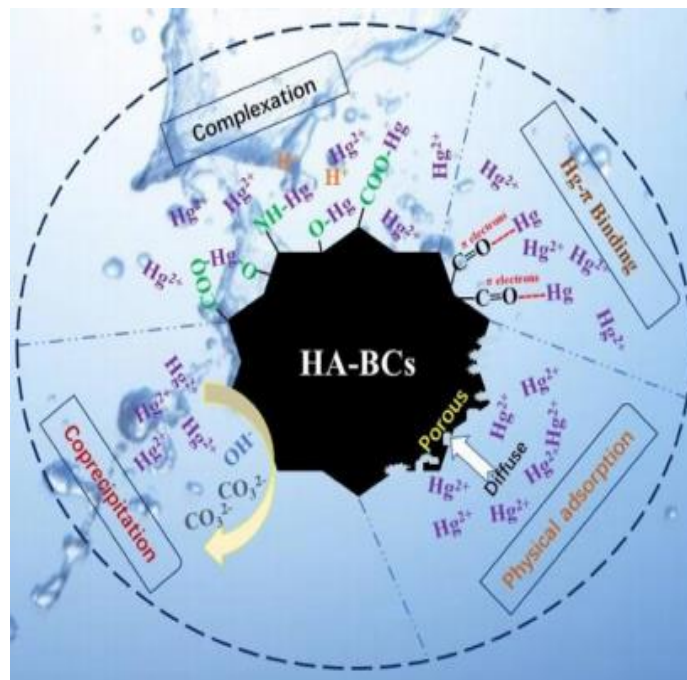


Gambar 3.2. SEM dari serat (A) dan selulosa (B) dari limbah kelapa muda (Rentang 1 mm dan 100 µm) (Cerqueira *et al.*, 2017)

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).

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.



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

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.

Teknik inaktivasi melalui ameliorasi dengan biochar limbah kelapa muda berpengaruh nyata terhadap lahan bekas tambang emas dan budidaya jagung. Perlakuan biochar 40 t ha⁻¹ berpengaruh nyata terhadap peningkatan aktivitas muatan negatif dan cadangan nutrisi, dimana terjadi peningkatan pH [3,54 unit], EC [0,09 dS m⁻¹], 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]. Selain itu, teknik inaktivasi melalui ameliorasi dengan biochar limbah kelapa muda secara nyata memberikan hasil terbaik untuk tinggi tanaman jagung [81,66 cm] (Prasetyo *et al.*, 2023). Aplikasi biochar sekam padi dapat menurunkan konsentrasi Hg pada tanah tercemar hingga 75% (dari 12,82 ppm menjadi 4,20 ppm), dengan serapan tertinggi diperoleh pada dosis aplikasi biochar sekam padi 20 ton/ha (Maulana, 2020).

Teknologi ameliorasi dengan batubara sub-bituminus Indonesia, pada aplikasi 40 t ha⁻¹ pada tanah bekas tambang emas, dapat meningkatkan muatan permukaan tanah (ΔpH) 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. Sedangkan teknologi ameliorasi dengan SC yang diaktivasi dengan 10% NaOH (SC-NaOH), pada aplikasi 40 t ha⁻¹ pada tanah bekas tambang emas, dapat memodifikasi muatan permukaan tanah melalui perubahan karakteristik kimia dengan meningkatkan pH H₂O EC, CEC, dan SOM berturut-turut. sebesar 5,77; 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)] juga terjadi penurunan transmitansi pada gugus OH (0,18%) yang menyebabkan peningkatan kapasitas adsorpsi tanah terhadap Hg, yang menyebabkan penurunan Hg 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 > ΔpH > EC > pH H₂O > CEC) (Prasetyo et al., 2023).

BAB 4. METODE PENELITIAN

4.1 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.

4.1.1 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 = konstanta Langmuir (L mg^{-1}); K_f = konstanta Freundlich ($\text{mg}^{n+2} * \text{L}^n$); C_e = konsentrasi kesetimbangan dan n = konstanta adsorpsi.

4.2 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.

4.2.1 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

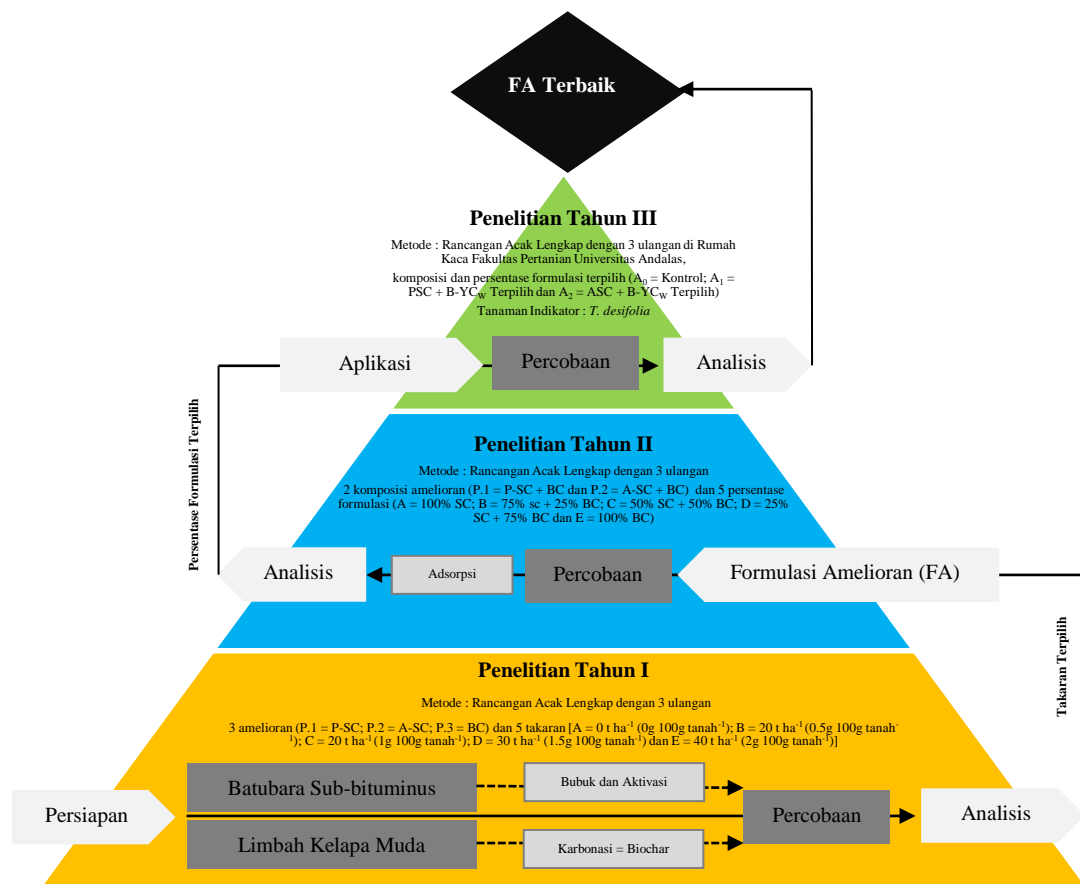
1. Analisis Tanah

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 (H₂SO₄

96% p.a dan H₂O₂ 30%) dan (3) Kandungan CH₃Hg metode HPLC-IPC-MS pada masing – masing tanaman.



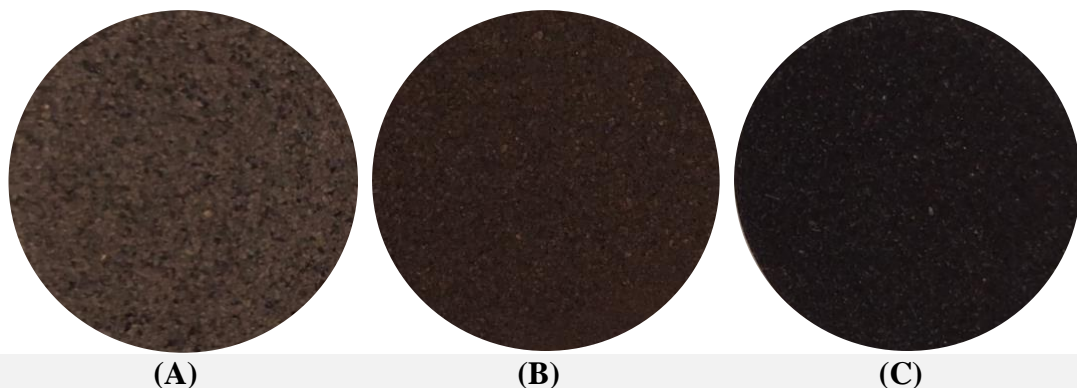
Gambar 4.1 Alir Penelitian

BAB 5. HASIL KEMAJUAN PENELITIAN

A. Morfologi dan Karakteristik Formulasi Amelioran dari Batubara Sub-bituminus dan Biochar Limbah Kelapa Muda

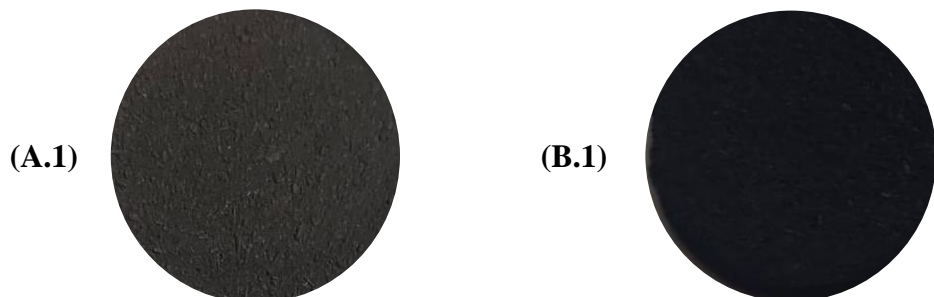
Morfologi bubuk batubara Sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda (Gambar 5.1), terlihat bahwa warna diidentifikasi dengan buku *Soil Munsell Color Chart* yaitu 5 Y 5/1 (*gray*). Secara umum, warna dari batubara yaitu hitam berkilauan (*luster*) metalik, tergantung dari jenis batubara. Hal ini disebabkan batubara yang digunakan merupakan jenis Sub-bituminus dan ini diduga bahwa batubara Sub-bituminus tergolong jenis batubara berkalori rendah. Sedangkan setelah aktivasi 10% bubuk batubara Sub-bituminus terjadi perubahan warna menjadi lebih gelap yaitu 5 Y 4/3 (*dark*). Biochar limbah kelapa muda memiliki warna hitam yaitu 5 Y 2/1 (*black*). Pada umumnya warna batubara adalah metalik,

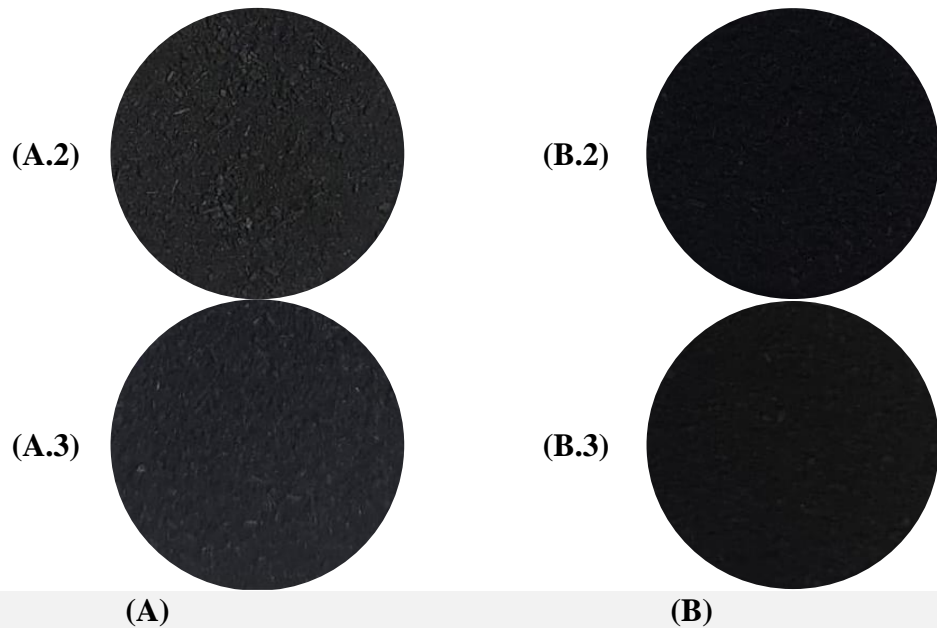
tergantung dari jenis batubaranya. Hal ini dikarenakan batubara yang digunakan adalah jenis BS, dan diduga BS tergolong jenis batubara kalori rendah. Berdasarkan klasifikasi kualitas, BS termasuk dalam kelas rendah. Menurut klasifikasi ASTM, BS memiliki kandungan karbon tetap antara 78 sampai 86% (volatil rendah) dan nilai kalor rata-rata antara 8.300 sampai 13.000 btu/lb. Klasifikasi *National Coal Board* (NCB) menyatakan bahwa BS memiliki kandungan volatil (kering, bebas mineral) antara 9,1 hingga 19,5% (peringkat batubara 200/ volatil rendah), dan klasifikasi internasional untuk BS disebut brown coal (40-50% abu) (Bardet & Pournou, 2017). Sedangkan perubahan warna pada BS-NaOH diduga karena adanya penguraian komponen organik seperti lignin dan humus yang dapat menyebabkan penguraian atau perubahan struktur kimiawi dari komponen organik tersebut. Perubahan warna ini dapat lebih dipahami melalui analisis kimia dan spektroskopi untuk mengidentifikasi senyawa yang terbentuk selama reaksi antara batubara dan NaOH. Selain itu, faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi perubahan warna ini seperti suhu, waktu reaksi, dan konsentrasi larutan juga dapat mempengaruhi hasil akhir dari reaksi tersebut (Ukalska-Jaruga et al., 2023). Warna hitam pada biochar umumnya disebabkan oleh tingginya kandungan karbon yang telah mengalami proses karbonisasi selama pirolisis. Proses pirolisis dapat menghilangkan sebagian besar zat organik dan meninggalkan struktur karbon. Biochar dengan kandungan karbon yang tinggi cenderung memiliki warna hitam. Suhu pirolisis juga dapat memengaruhi warna, dimana suhu yang tinggi cenderung menghasilkan biochar dengan warna hitam dan juga jenis biomassa yang digunakan untuk menghasilkan biochar dapat memengaruhi warna dan struktur yang stabil (Fryda & Visser, 2015).



Gambar 5.1 Morfologi batubara Sub-bituminus (A) dan batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH (B) dan biochar limbah kelapa muda pada lolos ayakan 0.50 mm (35 mesh).

Formulasi amelioran juga terlihat perbedaan warna pada komposisi dan persentase amelioran yang dilakukan. komposisi amelioran terdiri atas dua komposisi yang berbeda yaitu (A) batubara Sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda dan (B) batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan biochar limbah kelapa muda. Persentase amelioran yang dikombinasikan terdiri atas tiga yaitu (1) 75% + 25%; (2) 50% + 50% dan (3) 25% + 75% (Gambar 5.2). Warna yang teridentifikasi pada komposisi pertama terlihat semakin tinggi persentase BS lebih berwarna abu dan semakin gelap dengan semakin penurunanya persentase BS atau meningkatkan persentase biochar limbah kelapa muda yaitu 5 Y 4/2 (*grayish olive*) dan 5 Y 2/2 (*olive black*). Sedangkan pada komposisi kedua dengan semua persentase terlihat berwarna hitam yaitu 5 Y 2/1 (*black*). Perubahan warna pada komposisi kedua disebabkan oleh proses pencampuran dan distribusi partikel material dalam campuran yang dapat mempengaruhi warna akhir. Hal ini juga dapat dipengaruhi oleh paparan cahaya yang berbeda terhadap warna yang terlihat lebih terang atau lebih gelap. Komposisi amelioran antara keduanya memberikan perubahan warna dapat terjadi karena variasi dalam jenis senyawa organik dan mineral yang hadir pada batubara Sub-bituminus dan juga yang diaktivasi dengan NaOH. Sedangkan, biochar limbah kelapa muda dapat berubah tergantung pada proses pembuatannya, termasuk suhu pirolisis dan waktu pirolisis yang dapat mempengaruhi warna. Proses aktivasi dan pirolisis serta kadar air yang berbeda antara material keduanya juga dapat menyebabkan perubahan warna pada pencampuran material tersebut (Chew et al., 2023).

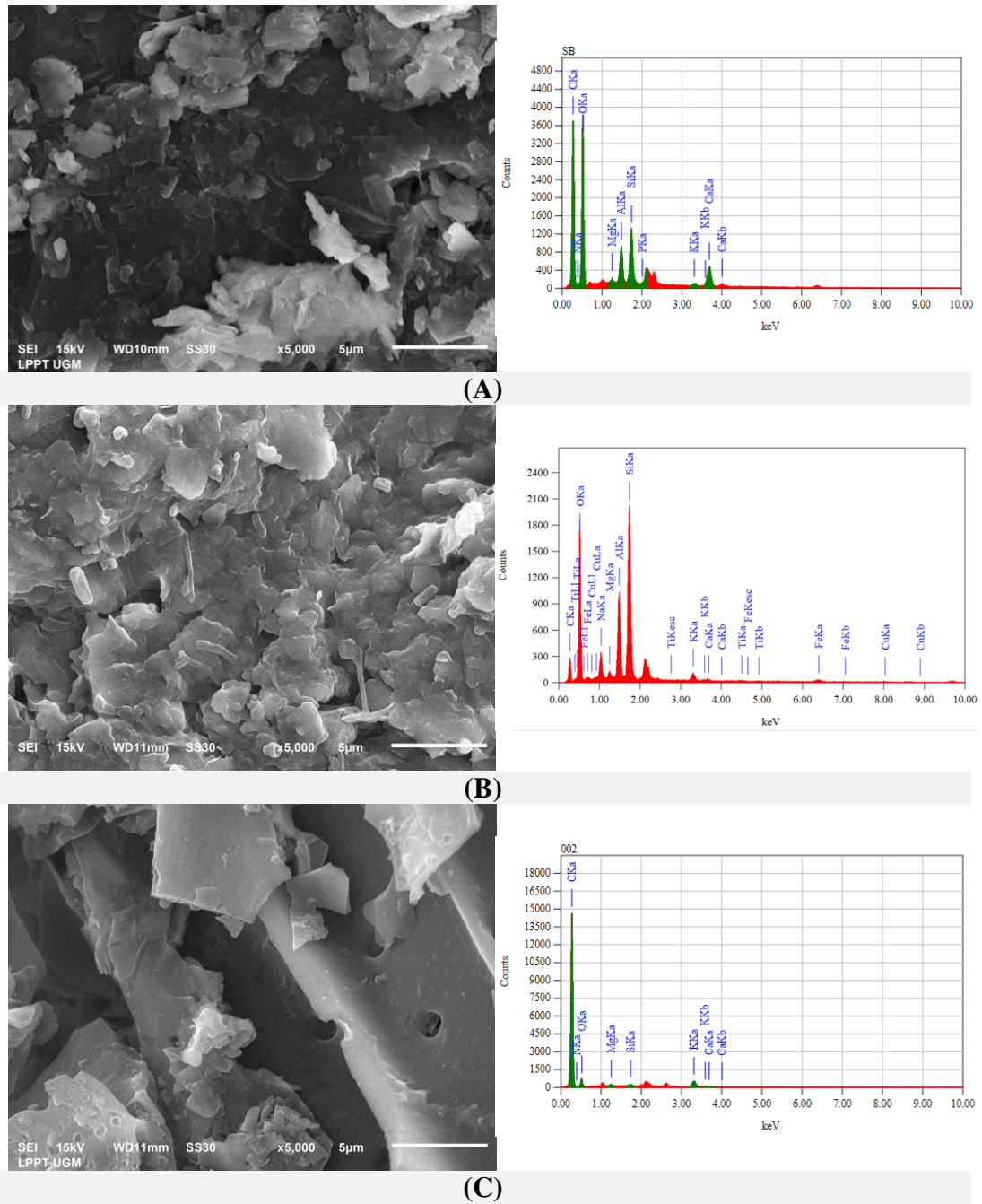




Gambar 5.2 Morfologi formulasi amelioran dari batubara Sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda (A): 75% BS + 25% B-LKM (1); 50% BS + 50% B-LKM (2); dan 25% BS + 75% B-LKM (3) dan batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan biochar limbah kelapa muda (B): 75% BS - NaOH + 25% B-LKM (1); 50% BS - NaOH + 50% B-LKM (2); dan 25% BS - NaOH + 75% B-LKM (3) pada lolos ayakan 0.50 mm (35 mesh)

Analisis SEM dari bubuk batubara dan yang diaktivasi dengan 10% NaOH pada perbesaran 5000 kali terlihat distribusi pori batubara tidak homogen. Batubara Sub-bituminus memiliki pori yang sangat besar dengan pori berbentuk baji (Gambar 5.3A dan B). Sedangkan biochar limbah kelapa muda memiliki distribusi pori yang homogen dengan pori lebih kecil dan terdapat lapisan yang berbentuk tabung silinder (Gambar 5.3C). Perbedaan ini terjadi akibat adanya perbedaan proses perbentukannya, dimana batubara terjadi melalui proses pembatubaraan sedangkan biochar melalui proses pirolisis. Pembatubaraan tidak melibatkan mekanisme seperti penghancuran, penataan ulang, atau kondensasi molekul yang lebih kecil untuk menghasilkan molekul yang lebih besar, melainkan pengawetan jaringan atau bagian jaringan secara selektif. Hal ini tampaknya berlaku tidak hanya untuk kayu tetapi juga untuk peninggalan hidup tertentu. Peristiwa biokimia yang terlibat dalam pembalseman, berbagai kriteria, seperti tingkat pemadatan dan morfologi asli kayu berdampak pada pelestarian karakteristik anatomi peninggalan botani (Utescher et al., 2021). Sedangkan, pada batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan NaOH, mengalami peningkatan

kelarutan batubara dengan ditemukannya peningkatan kelarutan karbon organik dan pelepasan fragmen aromatik dengan berat molekul rendah (Guo et al., 2020). Bentuk SEM biochar dapat dipengaruhi oleh omponen selulosa, lignin, dan hemiselulosa serta mineral dalam biomassa, suhu, lama waktu, tekanan pirolisis, dan kondisi oksigen, dimana hal ini dapat memberikan kontribusi pada morfologi biochar yang dihasilkan (Amalina et al., 2022).



Gambar 5.3 Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX) batubara Sub-bituminus (A) dan batubara Sub-bituminus yang

diaktivasi dengan 10% NaOH (B) dan biochar limbah kelapa muda (C) pada pembesaran 5000 (5 μm).

Hasil SEM juga teridentifikasi komposisi atom yang terdapat pada amelioran. Komposisi atom yang sama yang terdapat pada ketiga jenis amelioran yaitu atom C, O, K, Mg dan Si. Atom C merupakan komposisi terbesar dari ketiga jenis amelioran yaitu biochar limbah kelapa muda (67,77%) > batubara Sub-bituminus (43,60%) > batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH (27,58%). Komposisi atom lainnya yang teridentifikasi berupa N, Ca, Na, Al, Fe, Cu dan Ti. Aktivasi batubara Sub-bituminus dengan 10% NaOH terjadi peningkatan oksigen dan penurunan karbon. Hal ini juga terjadi penambahan atom Na dari proses aktivasi dengan 10% NaOH. Unsur-unsur pada batubara Sub-bituminus dapat ditemukan dalam komponen batubara organik dan anorganik, dan setiap unsur memiliki afiliasi dan afinitas yang menonjol dengan fase yang berbeda. C, O, dan N merupakan komponen utama yang paling melimpah dalam batubara (Wu et al., 2019) (Tang et al., 2023). Berbeda pada proses aktivasi batubara dengan NaOH dapat mengakibatkan perubahan yang kompleks pada komposisi dan struktur batubara. Baik penurunan maupun peningkatan jumlah atom tertentu dapat terjadi tergantung pada kondisi pengolahan, sifat awal batubara, dan mekanisme reaksi yang terjadi. NaOH dapat berkontribusi terhadap perubahan struktur karbon batubara karena terbentuknya gugus fungsi baru atau modifikasi struktur aromatik (Parsa & Chaffee, 2019). NaOH dapat membentuk gugus oksigen baru pada batubara, seperti gugus hidroksil (OH) atau gugus karboksil (COOH), sehingga menyebabkan peningkatan jumlah atom oksigen pada permukaan batubara dan NaOH juga dapat teradsorpsi pada permukaan batubara sehingga menyebabkan peningkatan jumlah atom natrium pada batubara serta adanya interaksi dengan logam-logam lain yang terdapat pada batubara, sehingga menyebabkan peningkatan jumlah atom logam (Lei et al., 2010; Pawlicka & Doczekalska, 2013). Hal ini terlihat dari peningkatan atom O dan Na, masing-masing sebesar 11,97% dan 2,40%, serta adanya logam-logam seperti Fe, Cu, dan Ti. NaOH juga dapat bereaksi dengan gugus hidroksil (OH) pada batubara atau merombak struktur hidrokarbon, sehingga terjadi penurunan atom hidrogen dan nitrogen dalam bentuk senyawa yang mudah larut. Sementara itu, NaOH dapat

menyebabkan penghilangan sulfur dalam bentuk senyawa terlarut yang terbawa oleh larutan NaOH (Li & Yuan, 2021). Atom N tidak lagi ditemukan pada komponen atom SC-NaOH, dimana sebelumnya atom N pada SC sebesar 11,96%. Sedangkan biochar memiliki kandungan karbon yang tinggi karena proses pembuatannya melalui sistem pirolisis, dimana suatu proses termal yang melibatkan pemanasan bahan organik pada suhu tinggi dengan ketersediaan oksigen yang terbatas atau tanpa oksigen. Proses pirolisis tersebut menyebabkan dekomposisi sebagian besar unsur-unsur organik, seperti hidrogen, oksigen, dan nitrogen, yang terkandung dalam biomassa. Sementara itu, sebagian besar karbon dipertahankan dan tertanam dalam struktur biochar. Akibatnya, biochar memiliki kandungan karbon yang relatif tinggi dan memiliki sifat-sifat tertentu, termasuk stabilitas yang baik terhadap dekomposisi biologis (Yaashikaa et al., 2020).

Tabel 5.1 Analisis Kuantitatif EDX

Atom	Amelioran		
	BS	BS - NaOH	B-LKM
 %		
C	43,60	27,58	67,77
N	11,96	-	22,93
O	40,64	52,61	8,39
K	0,11	0,62	0,63
Ca	0,92	-	0,04
Mg	0,14	0,37	0,15
Na	-	2,40	-
Si	1,57	10,48	0,10
Al	1,06	4,98	-
Fe	-	0,44	-
Cu	-	0,28	-
Ti	-	0,10	-

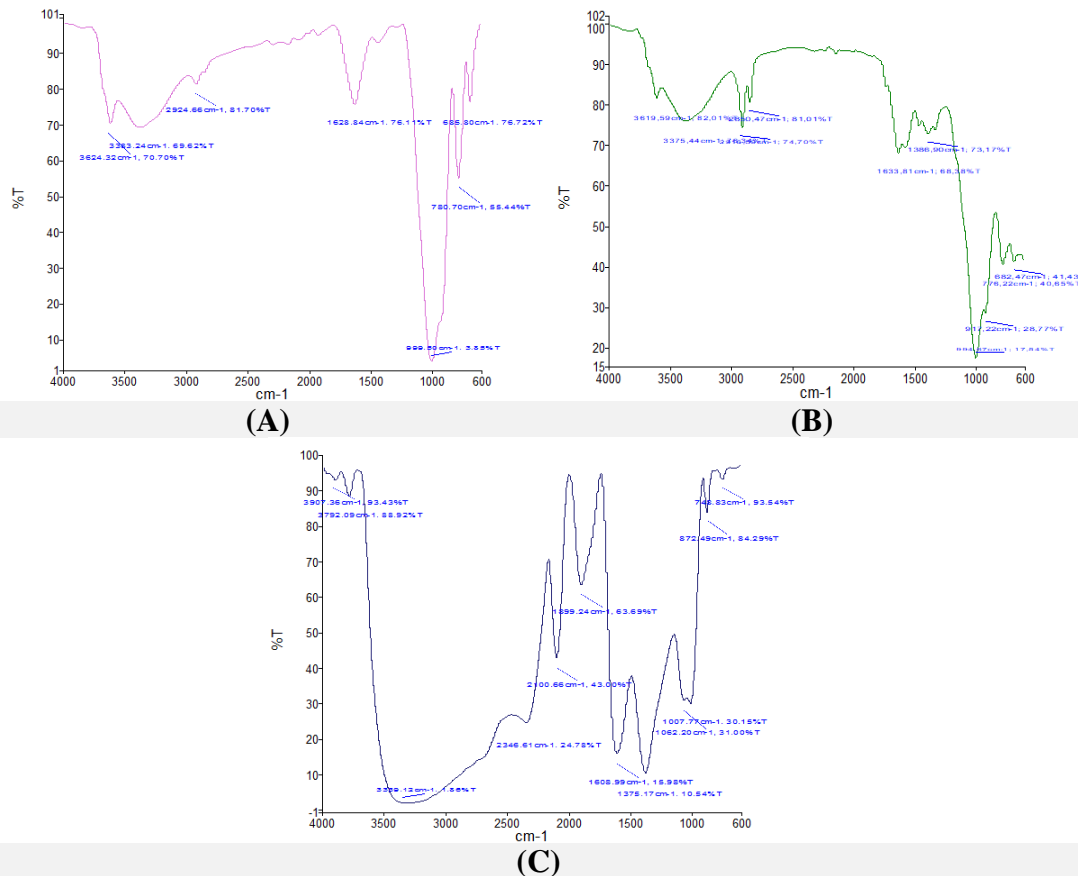
Keterangan: BS = batubara Sub-bituminus; BS – NaOH = batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan B-LKM = biochar limbah kelapa muda

a. Karakteristik Formulasi Amelioran dari Batubara Sub-bituminus dan Biochar Limbah Kelapa Muda

1. Analisis *Fourier-Transform Infra-Red Spectroscopy* (FT-IR)

Hasil spektrum FTIR dari bubuk batubara Sub-bituminus, bubuk batubara Sub-bituminus dengan 10% NaOH dan biochar limbah kelapa muda (Gambar 5.4), sedangkan tabel fibrasi infra merah dapat dilihat pada Tabel 5.2. Hasil spektrum FTIR bubuk batubara Sub-bituminus mempunyai beberapa puncak gelombang pita serapan utama yaitu pada bilangan 3624.32 cm^{-1} yang mencirikan ikatan O-H dan N-H, bilangan 3383.24 dan 2924.66 cm^{-1} yang mencirikan ikatan

perengangan C-H dari $-C\equiv C-H$; $C=C-H$. Serapan pada gelombang 1628.84 cm^{-1} yang mencirikan ikatan $C=O$, pada bilangan gelombang 999.59 ; 798.00 dan 685.80 cm^{-1} terdapat ikatan $C=C-H$ dan ikatan mineral. Hasil spektrum FTIR bubuk batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH mempunyai beberapa puncak gelombang pita serapan utama yang hampir sama dengan bahan utamanya, namun, juga terdapat bilangan tambahan yaitu 1386.90 cm^{-1} yang mencirikan ikatan Pengerutan $-C-H$.



Gambar 5.4 *Fourier-Transform Infra-Red Spectroscopy* (FT-IR) batubara Sub-bituminus (A) dan batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH (B) dan biochar limbah kelapa muda

Tabel 5.2 Pita serapan *Fourier-Transform Infra-Red Spectroscopy* (FT-IR) batubara Sub-bituminus, batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan biochar limbah kelapa muda

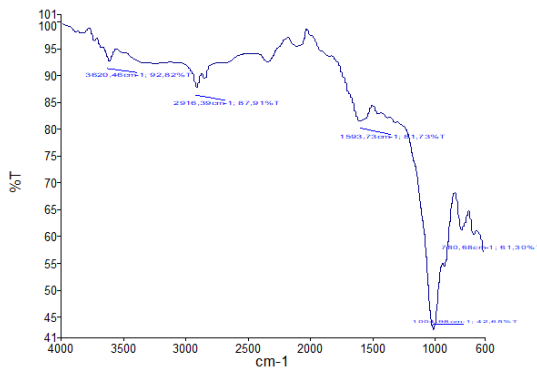
Amelioran			Deskripsi Fibrasi (Jenis Ikatan dan Intensitas)
BS	BS-NaOH	B-LKM	
Bilangan Gelombang / Transmitan (cm^{-1} / %)			
-	-	3907.36/ 93.43	Perengangan O-H atau N-H
3624.32/	3619.59/	3729.09/	

70.70	82.01	88.92	
3383.24/	3375.44/	3339.12/	
69.62	76.34	1.56	
2924.66/	2916.59/	-	
81.70	74.70	-	
-	2850.47/	-	Perengangan C-H dari -C≡C-H; C=C-H
-	81.01	-	
-	-	2345.61/	
-	-	24.78	
-	-	2100.66/	Perengangan -C≡C; C≡N
-	-	43.00	
-	-	1899.24/	
-	-	63.69	Perengangan C=O
1628.84/	1633.81/	1608.99/	
76.11	68.38	15.98	
-	1386.90/	1375.17/	
-	73.17	10.54	Pengerutan -C-H
999.59/	994.67/	1062.20/	
3.55	17.54	31.00	
-	-	1007.77/	
-	-	30.15	
-	917.22/	872.49/	Pengerutan C=C-H
-	28.77	84.29	Ikatan Mineral
780.70/	776.22/	748.83/	
55.44	40.65	93.54	
685.80/	682.47/	-	
76.72	41.43	-	

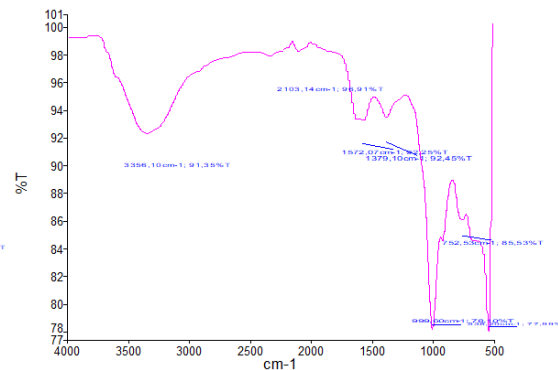
Keterangan: BS = batubara Sub-bituminus; BS – NaOH = batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan B-LKM = biochar limbah kelapa muda

Hasil spektrum FTIR bubuk biochar limbah kelapa muda mempunyai beberapa puncak gelombang pita serapan utama yaitu pada bilangan 3907.36 dan 3729.09 cm^{-1} yang mencirikan ikatan O-H dan N-H, bilangan 3339.12 cm^{-1} yang mencirikan ikatan perengangan C-H dari -C≡C-H; C=C-H. Serapan pada gelombang 2345.61 dan 2100.66 cm^{-1} yang mencirikan ikatan perengangan -C≡C; C≡N; 1899.24 dan 1633.79 cm^{-1} yang mencirikan ikatan C=O, 1375.17 yang mencirikan ikatan pengerutan -C-H dan bilangan gelombang 1062.20; 1007.77; 872.49 dan 748.83 cm^{-1} terdapat ikatan C=C-H dan ikatan mineral. Hasil spektrum FTIR formulasi amelioran pada komposisi pertama antara batubara Sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda, dimana pada ikatan perengangan O-H; N-H hanya pada muncul pada 75% BS + 25% B-LKM dan menghilang dengan penurunan persentase batubara Sub-bituminus atau peningkatan persentase biochar limbah kelapa muda. Pada bilangan 2900 – 2800 cm^{-1} ; 1500 cm^{-1} dan 1000 – 700 cm^{-1} yang mencirikan ikatan perengangan C-H dari -C≡C-H; C=C-H;

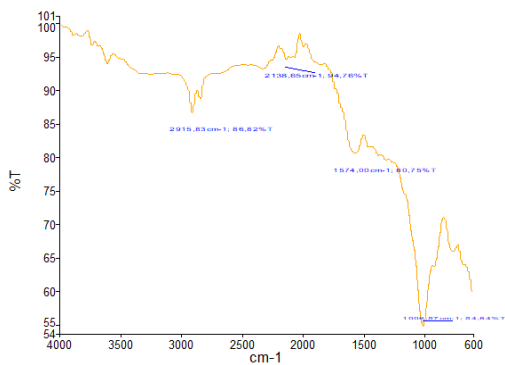
perengangan C=O dan pengerutan C=C-H dan ikatan mineral muncul pada setiap persentase. Perengangan $-C\equiv C$; $C\equiv N$ pada bilangan $2000 - 2100 \text{ cm}^{-1}$ muncul dengan peningkatan persentase biochar limbah kelapa muda. Pengerutan $-C-H$ pada bilangan 1300 cm^{-1} tidak muncul pada ketiga persentase dari komposisi ini, namun pada komposisi kedua antara batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan biochar limbah kelapa muda muncul. Namun ikatan pada perengangan C-H dari $-C\equiv C-H$; $C=C-H$ tidak muncul pada ketiga persentase. Pada bilangan $> 3300 \text{ cm}^{-1}$ (perengangan O-H; N-H); $2100 - 2300 \text{ cm}^{-1}$ (perengangan $-C\equiv C$; $C\equiv N$); 1500 cm^{-1} (perengangan C=O) dan $500 - 1000 \text{ cm}^{-1}$ (pengerutan C=C-H dan ikatan mineral).



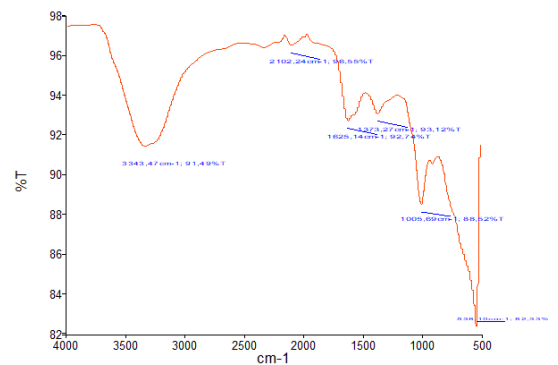
(A.1)



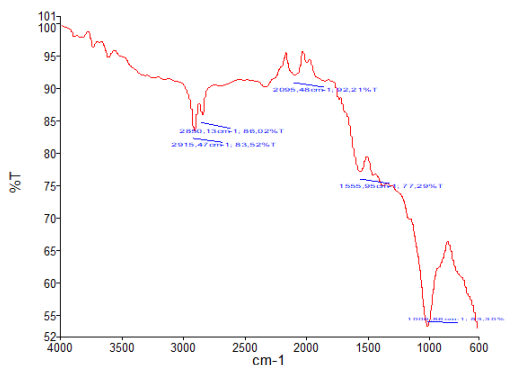
(B.1)



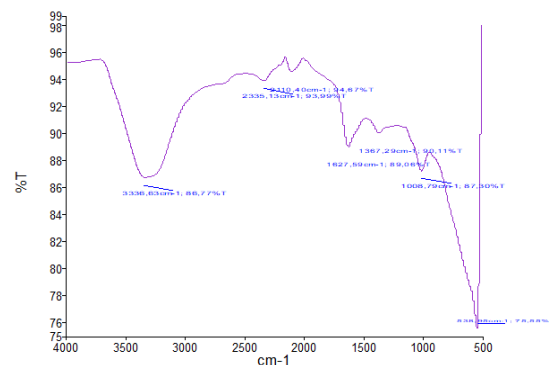
(A.2)



(B.2)



(A.3)



(B.3)

(A) **(B)**

Gambar 5.5 *Fourier-Transform Infra-Red Spectroscopy* (FT-IR) formulasi amelioran dari batubara Sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda (A): 75% BS + 25% B-LKM (1); 50% BS + 50% B-LKM (2); dan 25% BS + 75% B-LKM (3) dan batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan biochar limbah kelapa muda (B): 75% BS - NaOH + 25% B-LKM (1); 50% BS - NaOH + 50% B-LKM (2); dan 25% BS - NaOH + 75% B-LKM (3).

Tabel 5.3 Pita serapan *Fourier-Transform Infra-Red Spectroscopy* (FT-IR) formulasi amelioran dari batubara Sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda dan batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan biochar limbah kelapa muda

Formulasi Amelioran						Deskripsi Fibrasi (Jenis Ikatan dan Intensitas)
A			B			
A.1	A.2	A.3	B.1	B.2	B.3	
Bilangan Gelombang / Transmittan (cm ⁻¹ / %)						
3620.46/ 92.82	-	-	3356,10/ 91,35	3343,47/ 91,49	3336,63/ 86,77	Perengangan O- H; N-H
2916.39/ 87.91	2915.83/ 86.82	2914.47/ 83.52	-	-	-	Perengangan C- H dari -C≡C-H; C=C-H
-	-	2850.13/ 86.02	-	-	-	
-	-	-	-	-	2335,13/ 93,99	Perengangan - C=C; C≡N
-	2138.65/ 94.76	2095.48/ 92.21	2103,14/ 96,91	2102,24/ 96,55	2110,40/ 94,67	
1593.73/ 81.73	1574.00/ 80.75	1555.95/ 77.29	1572,07/ 92,25	1625,14/ 92,74	1627,59/ 89,06	Perengangan C=O
-	-	-	1379,10/ 92,45	1373,27/ 93,12	1367,29/ 90,11	Pengerutan -C-H
1004.98/ 42.65	1006.57/ 54.84	1006.86/ 53.30	999,60/ 78,10	1005,69/ 88,52	1008,79/ 87,30	
780.68/ 61.30	-	-	752,53/ 85,53	-	-	Pengerutan C=C-H
-	-	-	538,20/ 77,99	538,10/ 82,33	538,95/ 75,55	Ikatan Mineral

Keterangan: A = Formulasi amelioran dari batubara sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda; A.1 = 75% BS + 25% B-LKM; A.2 = 50% BS + 50% B-LKM; A.3 = 25% BS + 75% B-LKM; B = Formulasi ameliorant batubara sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan biochar limbah kelapa muda; B.1 = 75% BS - NaOH + 25% B-LKM; B.2 = 50% BS - NaOH + 50% B-LKM; dan B.3 = 25% BS - NaOH + 75% B-LKM.

Munculnya gugus dan intensitas serapan pada setiap pita karakteristik SC menjadi dasar kemampuan SC sebagai adsorben dalam teknologi ameliorasi. Batubara sub-bituminus memiliki struktur makromolekul yang menunjukkan karakter yang sangat aromatik dengan kandungan karbon yang tinggi dan

hidrogen yang rendah, dimana gugus aromatik dengan 2 sampai 5 cincin kondensasi dihubungkan secara silang terutama oleh jembatan metilena dan eter yang kuat. Transformasi lignit menjadi SC ini menunjukkan bahwa model struktural untuk pengembangan lignit menjadi SC selama proses pembatubaraan. Reaksi-reaksi tersebut adalah (a) pembelahan ikatan aril eter pada lignin dan pembentukan struktur seperti katekol bersama dengan karboksilasi reaktif yang mengalkilasi cincin aromatik yang berdekatan dengan katekol; (b) pembelahan ikatan aril-O lainnya pada lignin dan hilangnya gugus metoksil yang terikat pada cincin aromatik melalui demetilasi; (c) transformasi katekol menjadi fenol; dan (d) dehidroksilasi seluruh rantai samping hidroksil. Komponen struktural utama SC adalah prekursor lignin yang kehilangan gugus hidroksil dan metoksil secara berurutan melalui proses demetilasi dan dehidroksilasi (Fikri et al., 2022).

Proses aktivasi kimia dapat menyebabkan depolimerisasi, yaitu pemutusan ikatan panjang pada rantai molekul batubara. Pengurangan berat molekul ini dapat menyebabkan munculnya serapan baru pada panjang gelombang tertentu, seperti pada ikatan -C-H. Reaksi batubara dengan NaOH dapat menyebabkan dehidrasi dan terbentuknya ikatan rangkap pada rantai hidrokarbon batubara. NaOH dapat bereaksi dengan gugus fungsi yang ada pada batubara, seperti gugus -OH dan -COOH. Proses ini dapat menyebabkan restrukturisasi dan pembentukan ikatan baru serta menyebabkan perubahan pada gugus metil dan metilena dalam batubara. Selain itu terjadi pergeseran pita serapan dan peningkatan intensitas serapan pada setiap pita karakteristik dari proses aktivasi dengan NaOH. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan gugus-gugus tersebut dan merupakan indikasi bahwa telah terjadi depolimerisasi (pemutusan polimer) dari degradasi molekul SC menjadi lebih terbuka dan membentuk lebih banyak muatan negatif. Hal ini sesuai dengan peningkatan pH dan KTK (Tabel 5.4), terlihat bahwa NaOH dapat mengaktivasi SC menjadi lebih aktif dalam meningkatkan muatan negatif. Pemutusan jaringan ikatan pada batubara akibat senyawa alkali diawali dengan terputusnya jembatan alifatik yang merupakan ikatan terlemah. Selanjutnya, jembatan eter memiliki energi ikatan yang sama, sehingga pemutusan jaringan ikatan pada batubara dimanifestasikan dengan transisi ke keadaan plastis, yang mengakibatkan terbentuknya ikatan yang sangat reaktif. Pemutusan ikatan antar

cincin poliaromatik dalam struktur batubara selama proses pirolisis dengan bahan alkali akan menyebabkan batubara menjadi lebih reaktif melalui reaksi ionik pada temperatur rendah. Hal ini juga mengurangi gaya van der Waals antar molekul batubara dan reaksi ikatan silang, yang menjelaskan keberadaan air dalam batubara. Pemecahan molekul batubara dengan kalsium juga menghasilkan anion di dalam batubara yang membentuk ikatan organomineral (Novananda et al., 2020).

Proses aktivasi dengan senyawa alkali juga membentuk ikatan kompleks dengan senyawa organik seperti lignin, ikatan ini diduga dapat memutus ikatan molekul pada lignin, sehingga membentuk molekul baru dan terbentuknya ikatan oksida. Hal ini mengindikasikan bahwa pembentukan ikatan oksida mempengaruhi reaktivitas pada SC, diduga ikatan tersebut akan mengalami netralisasi dan mengubah ion asam menjadi lebih reaktif karena bersifat netral. Selama proses aktivasi, gugus karboksilat pada batubara mengalami pembebasan CO₂ dan mendepositkan spesies anorganik pada permukaan batubara, sehingga terjadi stabilisasi karboksilat. Tingkat aktivitas senyawa alkali yang ditambahkan ke dalam batubara akan tergantung pada senyawa alkalinitasnya (Novananda et al., 2020).

Transformasi gugus fungsional pada biomassa menjadi biochar melalui proses pirolisis akibat adanya penghilangan molekul air dari biomassa terhadap dekomposisi gugus hidroksil dan gugus air terikat. Peningkatan suhu menyebabkan pengurangan pada komponen-komponen biomassa seperti gugus fungsional hidroksil, karboksil, dan gugus fungsional lainnya dapat terdekomposisi, menghasilkan fraksi karbon yang stabil, dimana komponen-komponen organik kompleks dalam biomassa, seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin, mengalami pemecahan menjadi senyawa-senyawa sederhana yang lebih stabil secara termal, termasuk karbon. Pirolisis juga dapat menghasilkan gugus aromatik, yang merupakan struktur berbasis cincin karbon seperti Lignin, yang kaya akan gugus aromatik, dapat memberikan kontribusi pada pembentukan struktur aromatik dalam biochar dan beberapa gugus heteroatom seperti oksigen, nitrogen, dan sulfur dapat tetap ada dalam biochar (Tomczyk et al., 2020).

2. Karakteristik Proksimat, pH, Daya Hantar Listrik, Kapasitas Tukar Katio, C organik Dan N Total

Karakteristik kimia amelioran dan formulasi amelioran dapat dilihat pada Tabel 5.4. Karakteristik dari komposisi proksimat yaitu kadar air, bahan terbang, abu dan karbon tetap dari amelioran dan formulasi amelioran. Kadar air amelioran pada ketiga jenis berbeda dengan persentase kadar air tertinggi pada batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH sebesar 29,59% dan diringi dengan biochar limbah kelapa muda sebesar 23.57% dan terendah pada batubara Sub-bituminus sebesar 16.99%. Sedangkan pada formulasi amelioran menunjukkan semakin tinggi persentase biochar limbah kelapa muda yang diformulasikan dengan batubara Sub-bituminus ataupun yang diativasi dengan 10% NaOH memiliki kadar air yang tinggi, masing – masing sebesar 32.27% dan 46.25%. Kandungan abu pada melioran tertinggi pada batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH sebesar 72.02%. bahan terbang tertinggi pada batubara Sub-bituminus sebesar 97.81% dan karbon tetap tertinggi pada biochar limbah kelapa muda 77.38%. Kelembaban berdampak pada nilai kalori dan konsentrasi unsur-unsur lain, kadar air yang relatif rendah dari sampel batubara menunjukkan peningkatan yang cukup besar dalam kualitas batubara. Konsentrasi abu yang rendah meningkatkan kualitas kokas, oleh karena itu, ini merupakan kriteria penting untuk produksi kokas (Amriansyah & Sihombing, 2021). Terlepas dari penggunaannya dalam pemeringkatan batubara, volatile matter merupakan salah satu karakteristik yang paling penting yang digunakan dalam mengidentifikasi aplikasi yang tepat. Karbon tetap adalah bagian dari batubara yang tersisa sebagai residu, tetapi sebagian besar terdiri dari karbon, meskipun juga mengandung sejumlah kecil H, O, N, dan S yang tidak terbawa oleh gas (Sardi et al., 2023). Terjadinya peningkatan kadar air dan abu setelah aktivasi dengan NaOH. Aktivasi kimia dapat meningkatkan kemampuan batubara untuk menyerap air dari lingkungan sekitarnya. Perubahan struktur permukaan batubara membuatnya lebih reaktif terhadap air dan juga dapat mengubah komposisi mineral dalam batubara atau menyebabkan pembentukan atau pengendapan abu yang lebih tinggi setelah proses aktivasi (Novananda et al., 2020). Namun, terjadi penurunan volatile matter dan fixed carbon batubara setelah aktivasi dengan

NaOH. Aktivasi kimia dapat menyebabkan depolimerisasi atau pemutusan ikatan panjang pada rantai molekul batubara melalui pelepasan komponen volatil seperti gas dan uap dari batubara, yang dapat mengakibatkan penurunan volatile matter dan pelepasan karbon dalam bentuk gas maupun uap juga dapat menurunkan kandungan fixed carbon batubara (Keboletse et al., 2021). Sedangkan pada biochar, peningkatan suhu pirolisis, menyebabkan komponen yang mudah menguap mengalami penurunan (Sadaka et al., 2014), selama polimerisasi ulang struktur biochar dapat dipengaruhi oleh interval waktu tinggal yang dipilih. Waktu tinggal yang lebih lama dapat mendorong pengembangan struktur aromatik yang terkondensasi dengan banyak mikro, meso, dan makropori, menghasilkan hasil karbon tetap yang lebih besar dan porositas yang lebih baik (Huang et al., 2021). Pembelahan bagian yang mudah menguap dari biomassa setelah perlakuan panas yang diperpanjang menghasilkan pembentukan struktur aromatik yang lebih stabil (Wang et al., 2019).

Nilai pH tertinggi ditemukan pada batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan biochar limbah kelapa muda sebesar 12.60 dan 10.77 yang tergolong sangat basa. Sedangkan batubara Sub-bituminus tergolong masam sebesar 5.23. Pengaruh formulasi ameliorant menunjukkan terjadinya perubahan nilai pH yang tergolong netral (6.77) hingga sangat basa (8.67 – 10.30). Amelioran yang digunakan memiliki muatan negatif, karena nilai pH PZC (4.01 - 9.20) dibawah nilai pH H₂O. Hal ini disebabkan oleh kandungan asam organik yang tinggi pada SC dan juga dipengaruhi oleh berbagai komponen kimia termasuk sulfur, serta interaksi antar larutan (H₂O dan KCl 1N). Sementara itu, pH PZC untuk batubara berkisar antara 4 hingga 7,5 unit. Namun, nilai ini bergantung pada komposisi kimia batubara yang digunakan (Arif et al., 2017). Selama proses aktivasi, NaOH bereaksi dengan komponen asam yang terkandung di dalam batubara, menghasilkan senyawa basa. PZC juga dapat bergantung pada sifat-sifat permukaan batubara yang dapat berubah selama proses aktivasi. PZC yang lebih tinggi mengindikasikan bahwa batubara akan cenderung bersifat basa dalam kondisi tersebut. Hal ini juga terlihat pada biochar limbah kelapa muda.

Tabel 5.4 Karakteristik proksimat, pH, daya hantar listrik (DHL), kapasitas tukar katio (KTK), C Organik dan N total amelioran dan formulasi amelioran

Formulasi Amelioran	Proksimat				pH			DHL	KTK	C Organik	N total	
	Kadar Air	Bahan Terbang	Abu	Karbon Tetap	pH H ₂ O	pH KCl	pH MTN					
	%.....			 unit			ds m ⁻¹	cmol kg	%	
BS		16.99	97.81	69.63	28.19	5.23	4.62	4.01	1.38	35.33	9.81	0.16
BS – NaOH		29.59	76.02	72.02	4.02	12.60	9.43	6.27	2.00	141.60	14.38	0.10
B-LKM		23.57	92.47	15.11	77.38	10.77	9.37	7.97	2.00	32.53	4.67	0.37
A	A.1	15.33	60.47	57.64	2.84	6.77	5.40	4.03	0.98	55.60	12.67	0.34
	A.2	15.98	68.73	48.06	20.69	8.67	6.77	4.87	1.90	52.00	7.58	0.31
	A.3	32.27	74.16	32.67	41.50	10.20	8.00	5.80	2.00	39.20	4.90	0.39
B	B.1	30.50	58.10	50.02	8.10	9.70	9.50	9.20	2.00	75.87	13.70	0.16
	B.2	42.15	90.40	48.06	42.40	9.90	9.30	8.60	2.00	57.60	13.55	0.13
	B.3	46.25	94.76	24.57	70.20	10.30	9.20	8.20	2.00	42.30	11.93	0.18

Keterangan: BS = Batubara Sub-bituminus; ABS – NaOH = Batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH; LKM = limbah kelapa muda; B-LKM = biochar limbah kelapa muda; A = Formulasi amelioran dari batubara sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda; A.1 = 75% BS + 25% B-LKM; A.2 = 50% BS + 50% B-LKM; A.3 = 25% BS + 75% B-LKM; B = Formulasi ameliorant batubara sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan biochar limbah kelapa muda; B.1 = 75% BS - NaOH + 25% B-LKM; B.2 = 50% BS - NaOH + 50% B-LKM; dan B.3 = 25% BS - NaOH + 75% B-LKM

Kemampuan daya hantar listrik (DHL) pada amelioran berada pada nilai 1.38 - > 2.00 dS m⁻¹. Formulasi amelioran dengan persentase biochar limbah kelapa muda lebih tinggi menunjukkan DHL formulasi ameliorant semakin tinggi > 2.00 dS m⁻¹. Hal ini juga mempengaruhi muatan permukaan pada ameliorant dan formulasinya. Batubara memiliki EC yang rendah dan merupakan konduktor yang buruk. Nilai EC batubara sebagian besar ditentukan oleh komposisi mineralnya (seperti Si, Al, Fe, S, dan lainnya) dan komponen non-karbonik. Hal ini dikarenakan batubara adalah bahan bakar fosil yang sering digunakan untuk menghasilkan panas, bukan listrik. EC batubara tidak dianggap sebagai substansi yang relevan dalam konteks EC (Duba, 1977). NaOH, sebagai basa kuat, dapat merombak struktur batubara dan mengubah gugus fungsi yang ada di permukaan batubara. Peningkatan konduktivitas ionik pada batubara dapat meningkatkan kemampuannya untuk menghantarkan listrik dan pembentukan gugus fungsi yang lebih konduktif seperti gugus fungsi karbon pirolitik serta NaOH dapat mengurangi resistansi permukaan batubara, sehingga lebih konduktif. Daya hantar listrik biochar dipengaruhi oleh keberadaan gugus fungsional, struktur kristal, dan kandungan karbon yang masih aktif. Jika pirolisis dilakukan pada kondisi anaerobik (tanpa oksigen), terjadi pengurangan, di mana sejumlah oksigen terhapus dari struktur molekuler biochar. Pengurangan oksigen dapat meningkatkan konduktivitas listrik karena oksigen yang terikat pada gugus fungsional dapat berkurang. Karbon teraktivasi memiliki struktur pori-pori yang besar dan permukaan yang luas, yang dapat meningkatkan konduktivitas listrik. Pori-pori ini dapat memberikan jalur konduktif untuk pergerakan elektron. Pada suhu tinggi, gugus fungsional seperti hidroksil dan karboksil dapat terdekomposisi. Penghilangan gugus fungsional ini dapat mengurangi hambatan terhadap aliran listrik dalam biochar. Mineral yang ada dalam biomassa awal atau yang terbentuk selama pirolisis juga dapat mempengaruhi konduktivitas listrik. Kandungan mineral tertentu, seperti logam transisi, dapat meningkatkan konduktivitas listrik biochar (Saletnik et al., 2019).

Peningkatan aktivitas muatan negatif ditunjukkan pada nilai KTK amelioran, dimana KTK tertinggi pada batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH sebesar 141.60 cmol kg⁻¹. Sedangkan perbandingan KTK batubara Sub-

bituminus dengan biochar limbah kelapa muda tidak jauh berbeda, namun batubara Sub-bituminus lebih tinggi sebesar $35.33 \text{ cmol kg}^{-1}$. struktur aromatik yang dimiliki oleh SC dan diduga sebagai tempat terjadinya pertukaran ion. Pada batubara terdapat adsorpsi kation yang sangat kompleks yang terdiri dari senyawa organik dan anorganik, sehingga hal ini sangat berkaitan dengan KTK batubara serta keberadaan ion hidrogen pada struktur aromatik batubara yang terdiri dari ikatan karbon yang merupakan tempat pertukaran ion secara permanen (Skodras et al., 2014). Peningkatan KTK setelah aktivasi dengan NaOH dapat disebabkan oleh perubahan struktur dan sifat permukaan batubara, dimana ion hidroksida (OH^-) dari NaOH dapat bereaksi dengan berbagai gugus fungsi di permukaan batubara, termasuk gugus asam karboksilat dan gugus fenol. Perubahan ini dapat mempengaruhi kemampuan batubara untuk menukar ion dalam larutan. Secara umum, struktur aromatik SC dianggap sebagai tempat pertukaran ion. Pada batubara terjadi adsorpsi kation yang sangat kompleks yang terdiri dari senyawa organik dan anorganik, sehingga hal ini sangat erat kaitannya dengan KTK batubara serta keberadaan ion hidrogen pada struktur aromatik batubara yang terdiri dari ikatan karbon yang merupakan tempat pertukaran ion yang bersifat permanen. Sedangkan selama proses pirolisis pada suhu tinggi dapat mengakibatkan penghilangan gugus fungsional seperti karboksil, dan gugus fungsional lainnya yang dapat berperan sebagai tempat tukar kation. Pengurangan gugus fungsional ini dapat mengurangi KTK biochar (Vendra Singh et al., 2020).

KTK formulasi dapat dipengaruhi oleh komposisi persentase dari batubara Sub-bituminus yang juga didukung oleh adanya kandungan C organik dengan kandungan C organik tertinggi pada batubara Sub-bituminus dan yang diaktivasi dengan 10% NaOH masing – masing sebesar 9.81% dan 14.38%. Berbanding terbalik dengan kandungan N total tertinggi pada biochar limbah kelapa muda sebesar 0.37%. Kandungan N total juga sangat dipengaruhi oleh komposisi formulasi amelioran pada peningkatan persentase biochar limbah kelapa muda. Semakin tinggi persentase biochar limbah kelapa muda pada formulasi semakin tinggi juga kandungan N total yang didapatkan. Secara umum, SC memiliki kandungan karbon organik yang rendah, biasanya berkisar antara 35 hingga 45% (Ussiri et al., 2014). Meskipun batubara juga mengandung sejumlah kecil N dalam

berbagai senyawa seperti NH_3 , nitrogen organik, dan nitrogen anorganik, konsentrasi N dalam batubara umumnya bervariasi antara 1-2,5% N (Li et al., 2023). NaOH dapat merombak struktur batubara dan membentuk gugus fungsi baru yang terikat pada karbon. Gugus fungsi tersebut dapat berupa gugus fungsi organik seperti gugus asam karboksilat, fenol, atau lainnya. Penambahan gugus hidroksil (OH) pada struktur batubara, yang dapat meningkatkan kandungan karbon organik, juga dapat mengurangi struktur yang lebih kompleks pada batubara dan menghasilkan senyawa yang lebih sederhana dengan gugus fungsi organik. Penurunan N setelah aktivasi sebesar 0,06% disebabkan karena NaOH dapat bereaksi dengan senyawa nitrogen, terutama jika terdapat gugus amina (NH_2) di dalam batubara, membentuk amonia (NH_3). Proses ini dapat menyebabkan nitrogen keluar dari batubara dalam bentuk gas amonia. Sedangkan pada proses pirolisis pada biochar dapat menghilangkan sebagian besar komponen organik *volatile* dari biomassa, seperti air, hidrokarbon, dan senyawa organik lainnya, meninggalkan sebagian besar karbon yang lebih stabil. Seiring dengan itu, kandungan karbon organik dalam biochar cenderung meningkat. Pirolisis pada suhu yang lebih tinggi cenderung menghasilkan biochar dengan kandungan karbon yang lebih tinggi. Sedangkan sebagian nitrogen yang terkandung dalam biomassa dapat terdekomposisi selama pirolisis, menghasilkan gas nitrogen dan amonia. Oleh karena itu, pirolisis dapat menyebabkan pengurangan kandungan total nitrogen dalam biochar. Selain itu, jika terdapat kondisi anaerobik selama pirolisis, sejumlah nitrogen dapat lepas dalam bentuk gas N_2 , yang dapat mengurangi kandungan N total biochar.

3. Analisis X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)

Analisis oksida pada ameliorant menunjukkan perbedaan pada setiap oksida yang ditemukan. Oksida tertinggi pada batubara Sub-bituminus dan yang diaktivasi dengan 10% NaOH yaitu SiO_2 masing – masing sebesar 57.07% dan 64.38%. Sedangkan pada biochar limbah kelapa muda tertinggi pada CaO dan K_2O sebesar 33.37% dan 32.73%. Komposisi oksida pada formulasi menunjukkan adanya keragaman persentase pada setiap oksida. Oksida P_2O_5 menurun dengan tingginya kandungan persentase biochar limbah kela muda, sedangkan oksida K_2O dan CaO meningkat. Keragaman persentase oksida ini dipengaruhi oleh

proses yang terjadinya pada masing – masing amelioran. Oksida SO₃ mengalami penurunan pada formulasi batubara Sub-bituminus dengan biochar limbah kelapa muda, sedangkan meingkat pada formulasi batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dengan biochar limbah kelapa muda.

Tabel 5.5 Komposisi oksida amelioran dan dan formulasi amelioran

Oksida	Amelioran				Formulasi Amelioran					
	BS	BS - NaOH	LKM	B - LKM	A			B		
					A.1	A.2	A.3	B.1	B.2	B.3
 %									
P ₂ O ₅	1.51	1.66	12.86	5.55	5.84	-	5.02	3.92	-	-
K ₂ O	2.59	2.89	33.59	32.73	11.07	31.82	27.28	20.51	26.98	45.65
SO ₃	5.40	-	11.91	-	0.41	2.01	1.33	-	-	3.68
CaO	2.27	1.87	21.66	33.37	6.23	18.53	28.46	17.62	13.85	23.03
MgO	1.81	-	5.41	-	-	-	-	-	-	-
ZnO	0.04	0.02	0.11	0.14	0.08	0.25	0.22	0.28	0.61	0.25
CuO	0.01	0.01	0.04	0.07	0.03	0.11	0.09	0.12	0.08	0.13
MnO	0.02	0.02	0.08	0.13	0.07	0.18	0.16	0.18	0.13	0.17
SiO ₂	57.07	64.38	4.66	3.99	45.08	-	11.09	-	32.80	-
Cl	-	-	4.2	5.51	1.25	4.33	3.09	1.84	3.59	5.59
Fe ₂ O ₃	5.19	5.14	3.44	17.13	13.19	29.13	19.32	36.28	17.80	16.38
Al ₂ O ₃	22.92	22.64	-	-	13.81	7.32	-	11.53	-	-
Lainnya	1.17	1.37	2.04	1.38	2.94	6.32	3.94	7.72	4.16	5.12

Keterangan: BS = Batubara Sub-bituminus; ABS – NaOH = Batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH; LKM = limbah kelapa muda; B-LKM = biochar limbah kelapa muda; A = Formulasi amelioran dari batubara sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda; A.1 = 75% BS + 25% B-LKM; A.2 = 50% BS + 50% B-LKM; A.3 = 25% BS + 75% B-LKM; B = Formulasi ameliorant batubara sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan biochar limbah kelapa muda; B.1 = 75% BS - NaOH + 25% B-LKM; B.2 = 50% BS - NaOH + 50% B-LKM; dan B.3 = 25% BS - NaOH + 75% B-LKM.

Mineral yang stabil termasuk mineral detrital seperti kuarsa, magnetit, mika, dan muskovit. Rasio mineral-mineral ini dalam batubara dapat tetap hampir konstan, meskipun jumlah keseluruhannya sangat bergantung pada asupan material klastik ke dalam rawa gambut. Proporsi mineral detrital dalam sampel batubara yang digunakan dalam penelitian ini lebih tinggi. Telah dibuktikan bahwa jumlah mineral detrital dalam batubara meningkat (Dai et al., 2021). NaOH dapat menyebabkan perubahan komposisi oksida batubara. Reaksi antara NaOH dan batubara dapat mengakibatkan terbentuknya oksida tertentu serta mengubah bentuk oksida yang sudah ada. Aktivasi kimia dapat menyebabkan peningkatan pembentukan oksida karbon, seperti karbonat dan bikarbonat. Fraksi organik batubara dan oksida karbon yang dihasilkan dapat berkontribusi terhadap

peningkatan pH pada batubara. Hal ini terlihat dari peningkatan pH SC-NaOH sebesar 12,60 unit. NaOH dapat menyebabkan pelepasan ion-ion seperti silikon, aluminium, dan kalsium ke dalam larutan dan mempengaruhi bentuk dan kelarutan oksida besi dalam batubara (Wiśniewska et al., 2023). Proses pirolisis dapat menyebabkan reduksi oksida logam tertentu, mengubahnya menjadi bentuk yang lebih sederhana dan juga dapat meningkatkan oksidasi beberapa elemen dalam bentuk yang lebih tinggi. Kandungan mineral awal dalam biomassa akan mempengaruhi jenis dan kuantitas oksida yang muncul dalam biochar (Álvarez et al., 2020).

B. Adsorpsi Hg dengan Formulasi Amelioran berbasis Batubara Sub-bituminus dan Biochar Limbah Kelapa Muda

1. Adsorpsi Hg²⁺

Konsentrasi kesetimbangan adsorpsi Hg meningkat dengan meningkatnya kapasitas adsorpsi Hg. Namun, nilai pH adsorpsi menurun dengan meningkatnya konsentrasi Hg (Tabel 5.6). Kapasitas adsorpsi tertinggi terjadi pada konsentrasi 100 mg L⁻¹ sebesar 262,51 pada pH 1.68 (BS-NaOH); 304.32 pada pH 1.26 (BS) dan 312.88 pada pH 1.55 (B-LKM). Efisiensi penyisihan Hg pada tingkat konsentrasi yang berbeda mengalami penurunan masing – masing sebesar 65.63 (BS-NaOH); 76.08 (BS) dan 78,22% (B-LKM) pada konsentrasi 100 mg l⁻¹. Peningkatan konsentrasi Hg pada proses adsorpsi meningkatkan koefisien sorpsi Hg oleh masing-masing amelioran pada peningkatan konsentrasi. koefisien sorpsi tertinggi pada batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH sebesar 131.12 L kg⁻¹, dibandingkan dengan batubara Sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda.

Tabel 5.6 Karakteristik adsorpsi Hg²⁺ ameliorant.

Amelioran	Co	pH Larutan Hg ²⁺	Ce	Qe	R	Kd	pH Adsorpsi
	mg l ⁻¹	unit	mg l ⁻¹	mg g ⁻¹	%	L kg ⁻¹	unit
BS			0.20	3.20	80.00	62.53	1.29
BS – NaOH	1	1.33	0.31	2.75	68.67	114.41	1.71
B-LKM			0.19	3.24	81.00	58.67	1.62
BS			2.11	31.57	78.93	66.74	1.29
BS – NaOH	10	1.32	3.29	26.83	67.07	123.07	1.70
B-LKM			2.02	31.92	79.80	63.32	1.60

BS			23.92	304.32	76.08	78.67	1.26
BS – NaOH	100	1.30	34.37	262.51	65.63	131.12	1.68
B-LKM			21.78	312.88	78.22	69.64	1.55

Keterangan: BS = Batubara Sub-bituminus; ABS – NaOH = Batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH; LKM = limbah kelapa muda; B-LKM = biochar limbah kelapa muda

Konsentrasi kesetimbangan adsorpsi Hg meningkat dengan meningkatnya kapasitas adsorpsi Hg dengan formulasi amelioran batubara Sub-bituminus, aktivasi batubara Sub-bituminus dengan 10% NaOH dan biochar limbah kelapa muda. Namun, nilai pH adsorpsi menurun dengan meningkatnya konsentrasi Hg (Tabel 5.7). Kapasitas adsorpsi tertinggi terjadi pada konsentrasi 100 mg L⁻¹ sebesar 296.96 pada pH 1.34 (75% BS + 25% B-LKM); 336.40 pada pH 1.40 (50% BS + 50% B-LKM) dan 337.91 pada pH 1.45 (25% BS + 75% B-LKM). Efisiensi penyisihan Hg pada tingkat konsentrasi yang berbeda mengalami penurunan masing – masing sebesar 74.24% (75% BS + 25% B-LKM); 84.10% (50% BS + 50% B-LKM) dan 84.48% (25% BS + 75% B-LKM) pada konsentrasi 100 mg l⁻¹. Peningkatan konsentrasi Hg pada proses adsorpsi meningkatkan koefisien sorpsi Hg oleh masing-masing amelioran pada peningkatan konsentrasi. koefisien sorpsi tertinggi pada formulasi 75% BS + 25% B-LKM sebesar 87.07 L kg⁻¹, dibandingkan dengan formulasi yang lain 47.28 (50% BS + 50% B-LKM) dan 46.08 L kg⁻¹ (25% BS + 75% B-LKM).

Tabel 5.7 Karakteristik adsorpsi Hg²⁺ formulasi amelioran dari batubara Sub-bituminus dengan biochar limbah kelapa muda

Formulasi Amelioran	Co mg l ⁻¹	pH Larutan Hg ²⁺ unit	Ce mg l ⁻¹	Qe mg g ⁻¹	R %	Kd L kg ⁻¹	pH Adsorpsi
							unit
A1	1	1.33	0.21	3.16	79.00	67.00	1.36
A2			0.14	3.43	85.67	41.84	1.43
A3			0.12	3.53	88.33	33.15	1.51
B1	10	1.32	0.18	3.28	82.00	55.36	1.66
B2			0.15	3.40	85.00	44.14	1.55
B3			0.14	3.45	86.33	39.58	1.52
A1	10	1.32	2.21	31.17	77.93	71.39	1.35
A2			1.55	33.81	84.53	45.78	1.40
A3			1.38	34.48	86.20	40.05	1.47
B1	10	1.32	2.19	31.23	78.07	71.17	1.65
B2			1.51	33.95	84.87	44.59	1.54
B3			1.48	34.08	85.20	43.44	1.48

A1			25.76	296.96	74.24	87.07	1.34
A2			15.90	336.40	84.10	47.28	1.40
A3			15.52	337.91	84.48	46.08	1.45
B1	100	1.30	25.03	299.87	74.97	85.19	1.59
B2			16.23	335.07	83.77	48.46	1.52
B3			15.50	338.00	84.50	45.86	1.47

Keterangan: BS = Batubara Sub-bituminus; BS--NaOH = Batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan NaOH; B-LKM = biochar limbah kelapa muda

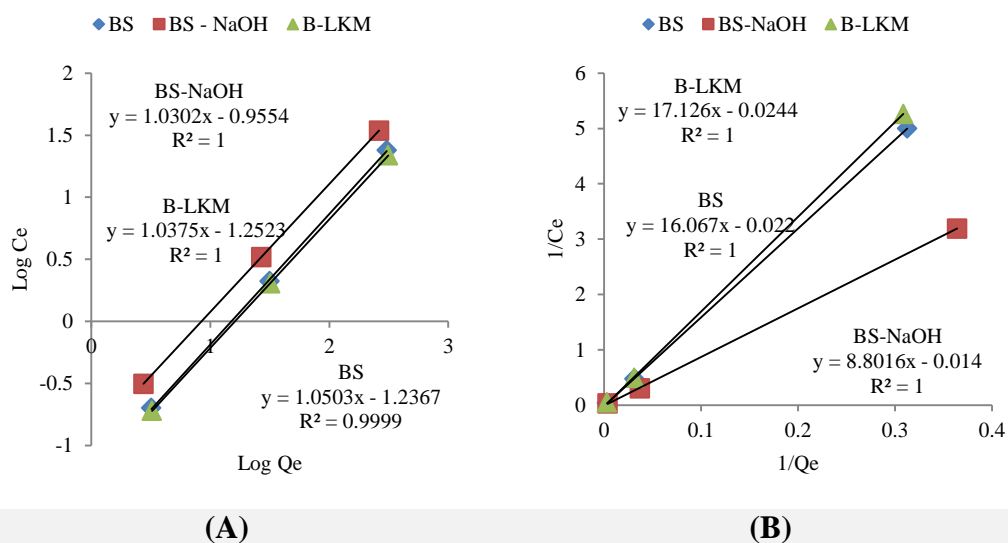
Konsentrasi kesetimbangan adsorpsi Hg meningkat dengan meningkatnya kapasitas adsorpsi Hg dengan formulasi amelioran batubara Sub-bituminus yang diaktivasi dengan NaOH dan biochar limbah kelapa muda. Namun, nilai pH adsorpsi menurun dengan meningkatnya konsentrasi Hg (Tabel 5.8). Kapasitas adsorpsi tertinggi terjadi pada konsentrasi 100 mg L⁻¹ sebesar 299.87 pada pH 1.59 (75% BS-NaOH + 25% B-LKM); 335.07 pada pH 1.52 (50% BS-NaOH + 50% B-LKM) dan 338.00 pada pH 1.47 (25% BS-NaOH + 75% B-LKM). Efisiensi penyisihan Hg pada tingkat konsentrasi yang berbeda mengalami penurunan masing – masing sebesar 74.97% (75% BS-NaOH + 25% B-LKM); 83.77% (50% BS-NaOH + 50% B-LKM) dan 84.50% (25% BS-NaOH + 75% B-LKM) pada konsentrasi 100 mg l⁻¹. Peningkatan konsentrasi Hg pada proses adsorpsi meningkatkan koefisien sorpsi Hg oleh masing-masing amelioran pada peningkatan konsentrasi. koefisien sorpsi tertinggi pada formulasi 75% BS + 25% B-LKM sebesar 85.19 L kg⁻¹, dibandingkan dengan formulasi yang lain 48.46 (50% BS-NaOH + 50% B-LKM) dan 45.86 L kg⁻¹ (25% BS-NaOH + 75% B-LKM).

Semakin tinggi konsentrasi Hg yang diinjeksikan, semakin tidak efisien adsorben dalam mengadsorpsi Hg. Pada konsentrasi rendah, efisiensi adsorpsi meningkat karena lebih banyak situs adsorpsi pada permukaan adsorben yang tersedia untuk Hg, sedangkan pada konsentrasi tinggi, situs adsorpsi pada adsorben menjadi jenuh dan tidak lagi memiliki tempat untuk adsorpsi, serta adanya potensi kompetisi antara Hg yang memperebutkan situs adsorpsi yang sama pada adsorben. Massa adsorben yang digunakan, di sisi lain, tetap berada dalam kesetimbangan dinamis dengan meningkatnya konsentrasi (Ledema et al., 2023). Kapasitas tertinggi adsorben dalam mengadsorpsi ion Hg terjadi pada

waktu kesetimbangan, yang mempengaruhi kapasitas dan koefisien sorpsi Hg. Koefisien adsorpsi dapat menjelaskan mengapa suatu zat menarik atau mengadsorpsi ion dari larutan oleh permukaan bahan tertentu (Raji et al., 2023). Adsorpsi dapat gagal pada tingkat pH yang sangat asam karena adanya kompetisi untuk tempat penyerapan dalam larutan antara ion H_3O^+ dan kation Hg^{2+} , serta berkurangnya permukaan yang tersedia (Allwin et al., 2022).

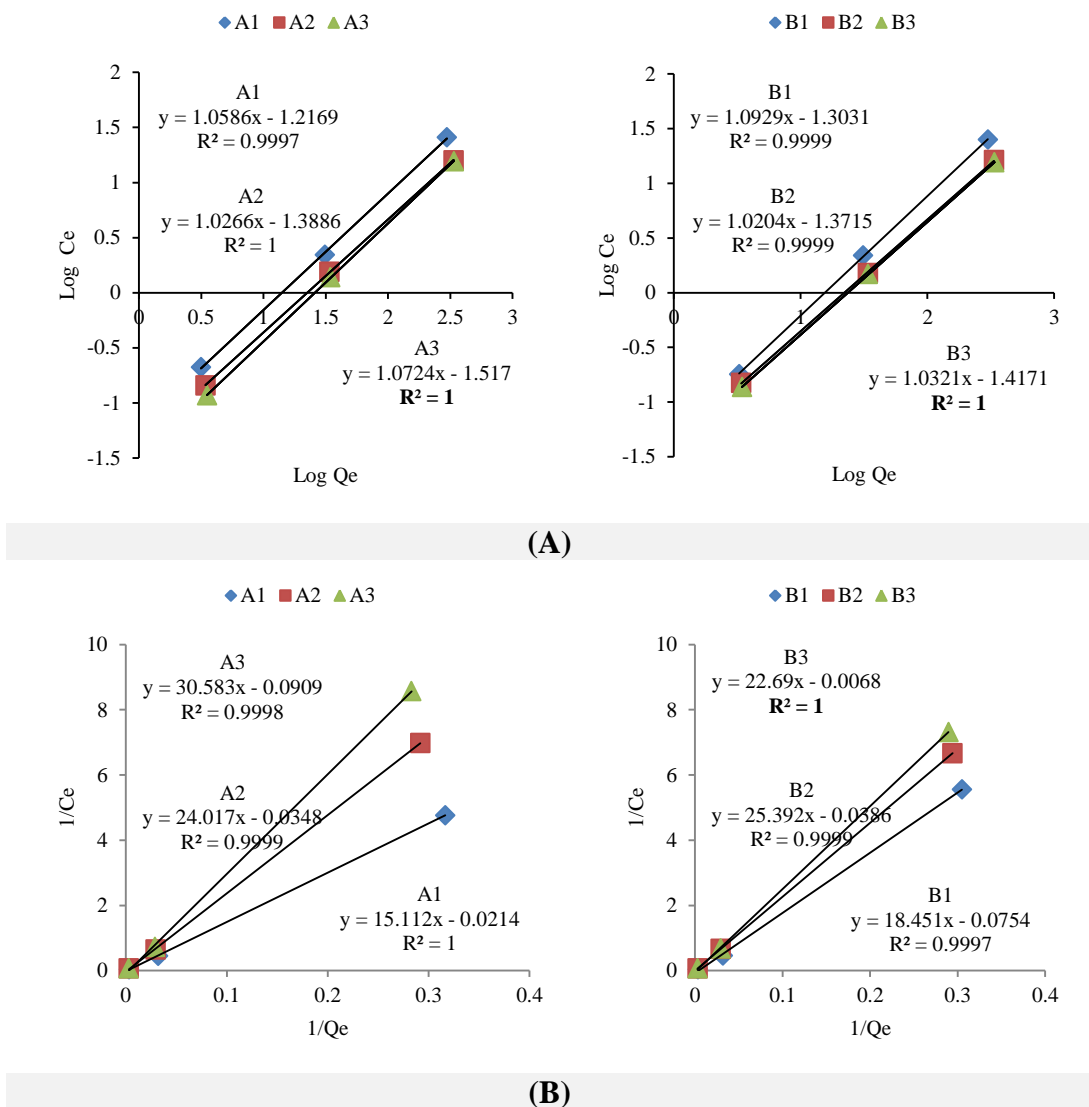
2. Adsorpsi Isotermal Hg^{2+}

Berdasarkan nilai R^2 yang tinggi, model isoterm digunakan dalam adsorpsi Hg untuk mengevaluasi prosedur adsorpsi terbaik (Chilev et al., 2022). Model isoterm Freundlich menggambarkan proses adsorpsi yang dapat dibalik. Model Freundlich, yang dapat digunakan untuk adsorpsi multilayer, juga tidak terbatas pada generasi monolayer. Heterogenitas permukaan dan distribusi eksponensial situs aktif adalah dua ekspresi dari model isoterm Freundlich (Kalam et al., 2021). Pada berbagai konsentrasi larutan, rasio Hg terhadap zat terlarut tidak konstan, di mana jumlah yang teradsorpsi mewakili total adsorpsi pada setiap situs. Hal ini menunjukkan bahwa setelah proses adsorpsi selesai, Hg terikat pada situs pengikatan yang lebih kuat, dan kapasitas adsorpsi turun secara eksponensial. Model isoterm Freundlich adsorpsi Hg dengan amelioran dan formulasinya yang digunakan dalam sistem heterogen.



Gambar 5.6 Plot linier model isoterm Freundlich (A) dan Langmuir (B) pada adsorpsi Hg dengan amelioran

Persamaan linier adsorpsi Hg dalam model Freundlich: $y = 1.0302x - 0.9554$; $R^2 = 1$ (BS - NaOH); $y = 1,0375x - 1,2523$; $R^2 = 1$ (B-LKM) dan $y = 1.0503x - 1.2367$; $R^2 = 0.9999$ (BS). Sedangkan, persamaan linier adsorpsi Hg terhadap formulasi amelioran dalam model Freundlich: $y = 1.0586x - 1.2169$ $R^2 = 0.9997$; (75% BS + 25% B-LKM) dan $y = 1.0929x - 1.3031$; $R^2 = 0.9999$ (75% BS-NaOH + 25% B-LKM); $y = 1.0266x - 1.3886$; $R^2 = 1$ (50% BS + 50% B-LKM) dan $y = 1.0204x - 1.3715$; $R^2 = 0.9999$ (50% BS-NaOH + 50% B-LKM); $y = 1.0724x - 1.517$; $R^2 = 1$ (25% BS + 75% B-LKM) dan $y = 1.0321x - 1.4171$; $R^2 = 1$ (25% BS-NaOH + 75% B-LKM).



Gambar 5.7 Plot linier model isoterm Freundlich (A) dan Langmuir (B) pada adsorpsi Hg dengan formulasi amelioran

Model isoterm Langmuir adsorpsi pada amelioran dan formulasinya didasarkan pada prinsip kinetik dan memiliki durasi kontak 24 jam. Model ini juga menggambarkan interaksi antarmolekul yang terjadi secara konstan di permukaan dengan laju akumulasi nol (Kalam et al., 2021). Model isoterm Langmuir mencoba menilai dan membandingkan kemampuan adsorpsi Hg dengan amelioran dan formulasinya sebagai fungsi dari perubahan kimia permukaan dan geometri struktural amelioran dan formulasinya. Model Langmuir menggambarkan akumulasi lapisan dalam lapisan molekul tunggal (adsorpsi monolayer) dan proses adsorpsi pada lingkungan yang sama dan berbeda. Model isoterm Langmuir juga menyoroiti adsorpsi homogen, dengan setiap molekul Hg mencakup berbagai energi aktivasi dan konstanta entalpi. Setiap lokasi harus memiliki afinitas yang sama terhadap Hg, dan tidak boleh ada pergerakan Hg di dalam bidang pengembangan. Peningkatan jarak menyebabkan penurunan karakteristik molekul dengan cepat. Persamaan linier adsorpsi Hg dengan amelioran pada model Langmuir: $y = 17.126x - 0.0244$; $R^2 = 1$ (B-LKM); $y = 16.067x - 0.022$; $R^2 = 1$ (BS) dan $y = 8.8016x - 0.014$; $R^2 = 1$ (BS-NaOH). Sedangkan, persamaan linier adsorpsi Hg terhadap formulasi amelioran dalam model Freundlich: $y = 15.112x - 0.0214$; $R^2 = 1$ (75% BS + 25% B-LKM) dan $y = 18.451x - 0.0754$; $R^2 = 0.9997$ (75% BS-NaOH + 25% B-LKM); $y = 24.017x - 0.0348$; $R^2 = 0.9999$ (50% BS + 50% B-LKM) dan $y = 25.392x - 0.0386$; $R^2 = 0.9999$ (50% BS-NaOH + 50% B-LKM); $y = 30.583x - 0.0909$; $R^2 = 0.9998$ (25% BS + 75% B-LKM) dan $y = 22.69x - 0.0068$; $R^2 = 1$ (25% BS-NaOH + 75% B-LKM).

Model Freundlich akan mendeskripsikan nilai $1/n$, dimana menunjukkan intensitas adsorpsi atau heterogenitas permukaan, Ketika $1/n$ lebih besar dari nol ($0 < 1/n < 1$), adsorpsi menguntungkan; ketika $1/n$ lebih besar dari satu, adsorpsi tidak menguntungkan; dan tidak dapat dipulihkan ketika $1/n = 1$ (Chiliv et al., 2022). Adsorpsi Hg dengan amelioran dan formulasinya, menunjukkan nilai $1/n$ adalah > 1 , menunjukkan adsorpsi yang tidak menguntungkan atau fenomena adsorpsi kooperatif. Menurut Kwakye-awuah et al., (2019); Munawar et al., (2023), $1/n$ yang lebih besar dari satu mengindikasikan fenomena adsorpsi kooperatif. Persamaan model isoterm Freundlich bersifat empiris dengan

heterogenitas permukaan dimana energi adsorpsi tersebar di seluruh topografi permukaan. Hal ini mengindikasikan semua situs permukaan dan energi adsorpsi yang sama berada di patch yang sama. Energi adsorpsi dihasilkan oleh interaksi antara amelioran dan formulasinya terhadap Hg.

Tabel 5.8. Karakteristik adsorpsi Isotermal model Langmuir Hg²⁺ formulasi amelioran

Model	Formulasi Ameliorasi	Isotermal			Persamaan Linear
		n	K _F (mg g ⁻¹) (L mg ⁻¹) ⁿ	1/n	
Freundlich	BS	0,952	17,246	1,050	y = 1.0503x - 1.2367; R ² = 0.9999
	BS-NaOH	0,971	9,024	1,029	y = 1.0302x - 0.9554; R² = 1
	B-LKM	0,964	17,877	1,037	y = 1.0375x - 1.2523; R² = 1
	A1	0.945	16.478	1.058	y = 1.0586x - 1.2169; R ² = 0.9997
	A2	0.974	24.468	1.027	y = 1.0266x - 1.3886; R² = 1
	A3	0.933	32.885	1.072	y = 1.0724x - 1.517; R² = 1
	B1	0.915	20.096	1.093	y = 1.0929x - 1.3031; R ² = 0.9999
	B2	0.980	23.523	1.020	y = 1.0204x - 1.3715; R ² = 0.9999
	B3	0.969	26.128	1.032	y = 1.0321x - 1.4171; R² = 1
		Q _m (mg g ⁻¹)	K _L (L mg ⁻¹)	*R _L	Linear Equation
Langmuir	BS	45,455	0.0014	0.97	y = 16.067x - 0.022; R² = 1
	BS-NaOH	71,429	0.0016	0.94	y = 8.8016x - 0.014; R² = 1
	B-LKM	40,984	0.0014	0.95	y = 17.126x - 0.0244; R² = 1
	A1	46.728	0.0014	0.95	y = 15.112x - 0.0214; R² = 1
	A2	28.735	0.0015	0.95	y = 24.017x - 0.0348; R ² = 0.9999
	A3	11.001	0.0029	0.91	y = 30.583x - 0.0909; R ² = 0.9998
	B1	13.263	0.0041	0.89	y = 18.451x - 0.0754; R ² = 0.9997
	B2	25.907	0.0015	0.95	y = 25.392x - 0.0386; R ² = 0.9999
	B3	147.059	0.0003	0.99	y = 22.69x - 0.0068; R² = 1

Keterangan: Freundlich [n = 1/b; K_F = 10^a] and Langmuir [Q_m = 1/a; K_L = a/b]; *R_L = 1/[1+(K_L*Co)]. A = Formulasi amelioran dari batubara sub-bituminus dan biochar limbah kelapa muda; A.1 = 75% BS + 25% B-LKM; A.2 = 50% BS

+ 50% B-LKM; A.3 = 25% BS + 75% B-LKM; B = Formulasi ameliorant batubara sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan biochar limbah kelapa muda; B.1 = 75% BS-NaOH + 25% B-LKM; B.2 = 50% BS-NaOH + 50% B-LKM; dan B.3 = 25% BS-NaOH + 75% B-LKM.

Model Langmuir juga mendefinisikan faktor pemisahan (R_L), yang dihubungkan dengan konstanta K_L sebagai konstanta tak berdimensi yang dinyatakan sebagai variasi luas dan porositas adsorben yang relevan, yang mengindikasikan bahwa luas permukaan dan volume pori yang lebih besar dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi. Adsorpsi diklasifikasikan sebagai linier ($R_L = 1$), irreversibel ($R_L = 0$), tidak menguntungkan ($R_L > 1$), atau menguntungkan ($0 < R_L < 1$) berdasarkan faktor pemisahan (Chilev et al., 2022). Pada adsorpsi Hg dengan amelioran dan formulasinya, nilai R_L adalah < 1 . Hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi Hg oleh amelioran dan formulasinya menguntungkan. Model Langmuir didasarkan pada asumsi permukaan adsorben yang homogen dengan energi adsorpsi yang sama di semua lokasi. Model dan koefisiennya, di sisi lain, digunakan untuk menganalisis distribusi polutan dalam air dan tanah. Persamaan Langmuir hanya dapat membandingkan adsorben yang berbeda untuk menjelaskan variasi permukaan adsorpsi dan distribusi energi situs (SED) yang ditetapkan. Adsorben menjelaskan distribusi area situs adsorpsi sebagai bukti perubahan isotermal.

BAB 7. PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa:

1. Geokimia batubara Sub-bituminus didominasi atom C (43,60%), dan O (40,64%), sedangkan aktivasi batubara Sub-bituminus dengan 10% NaOH terjadinya penurunan C (27,58%) dan peningkatan O (52,61%). Berbeda dengan biochar limbah kelapa muda didominasi atom C (67,77%) dan N (22,93%). Komposisi oksida pada batubara Sub-bituminus didominasi oleh SiO₂ (57,07%) dan terjadi peningkatan SiO₂ (64,38%) setelah terjadi aktivasi batubara Sub-bituminus dengan 10% NaOH. Biochar limbah kelapa muda didominasi oleh oksida CaO (33,37%). Formulasi amelioran dari keduanya

didominasi oleh oksida CaO (28.46%) pada 25% batubara sub-bituminus dan 75% biochar limbah kelapa muda dan K₂O (45.65) pada 25% batubara sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan 75% biochar limbah kelapa muda.

2. Identifikasi gugus fungsi batubara Sub-bituminus terdiri dari O-H dan N-H; C-H≡C-H; C=C-H; C=O, dan C=C-H serta mineral, Namun, munculnya -C-H pada aktivasi batubara Sub-bituminus dengan 10% NaOH. Sedangkan pada biochar limbah kelapa muda yang berbeda dari Batubara Sub-bituminus adalah -C≡C; C≡N. Sedangkan, perbedaan formulasi amelioran dari 25% batubara sub-bituminus dan 75% biochar limbah kelapa muda dan 25% batubara sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan 75% biochar limbah kelapa muda yaitu C-H dari O-H; N-H; -C≡C-H; C=C-H dan -C-H.
3. Karakteristik formulasi amelioran batubara Sub-bituminus; batubara sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan biochar limbah kelapa muda signifikan terhadap komposisi proksimat dan sifat kimia pH, DHL, KTK, OC, dan N total.
4. Kapasitas adsorpsi dan koefisien Hg²⁺ oleh formulasi amelioran batubara Sub-bituminus; batubara sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan biochar limbah kelapa muda masing - masing sebesar adalah 304.32 mg kg⁻¹ dan 78.67 L kg⁻¹; 262.51 mg kg⁻¹ dan 131.12 L kg⁻¹; 312.88 mg kg⁻¹ dan 69.64 L kg⁻¹ pada pH 1.26; 1.68 dan 1.55 dan konsentrasi Hg²⁺ 100 mg L⁻¹ dengan efisiensi penyisihan 76,08%; 65.63% dan 78.22%. Sedangkan formulasi amelioran 25% batubara sub-bituminus dan 75% biochar limbah kelapa muda memiliki kapasitas adsorpsi 337.91 mg kg⁻¹; efisiensi penyisihan 84.48%; koefisien adsorpsi 46.08 L kg⁻¹ dan pH 1.45 dan 25% batubara sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan 75% biochar limbah kelapa muda memiliki kapasitas adsorpsi 338.00 mg kg⁻¹; efisiensi penyisihan 84.50%; koefisien adsorpsi 45.86 L kg⁻¹ dan pH 1.47.
5. Isoterm adsorpsi Hg²⁺ pada batubara Sub-bituminus (Langmuir > Freundlich); batubara sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH (Langmuir = Freundlich) dan biochar limbah kelapa muda (Langmuir = Freundlich). Sedangkan formulasi amelioran 25% batubara sub-bituminus

dan 75% biochar limbah kelapa muda (Langmuir < Freundlich) dan 25% batubara sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan 75% biochar limbah kelapa muda (Langmuir = Freundlich).

B. Saran

Berdasarkan disimpulkan yang telah didapatkan maka disarankan menggunakan formulasi amelioran 25% batubara sub-bituminus dan 75% biochar limbah kelapa muda (Langmuir < Freundlich) dan 25% batubara sub-bituminus yang diaktivasi dengan 10% NaOH dan 75% biochar limbah kelapa muda (Langmuir = Freundlich) yang mempunyai efisiensi penyisihan pada larutan Hg masing – masing sebesar 84.48% dan 84.50%. Sehingga, dapat diaplikasikan dengan teknik inaktivasi terhadap pertumbuhan tanaman *Tithonia diversifolia* pada tanah bekas tambang emas pada Tahun III (2024).

DAFTAR PUSTAKA

- Alloway, B. J., (2012). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability, 3rd. Ed. Blackie Academic & Professional.
- Allwin Mages Raj, A. F. P., Bauman, M., Lakić, M., Dimitrušev, N., Lobnik, A., & Košak, A. (2022). Removal of Pb²⁺, CrT, and Hg²⁺ Ions from Aqueous Solutions Using Amino-Functionalized Magnetic Nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(24), 28. <https://doi.org/10.3390/ijms232416186>
- Álvarez, M. L., Gascó, G., Palacios, T., Paz-Ferreiro, J., & Méndez, A. (2020). Fe oxides-biochar composites produced by hydrothermal carbonization and pyrolysis of biomass waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 151, 38. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104893>
- Amalina, F., Razak, A. S. A., Krishnan, S., Zularisam, A. W., & Nasrullah, M. (2022). A comprehensive assessment of the method for producing biochar, its characterization, stability, and potential applications in regenerative economic sustainability – A review. *Cleaner Materials*, 3, 18. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100045>
- Amriansyah, M. A., & Sihombing, F. M. H. (2021). Study of Ash and Total Moisture Effects on Calorific Value in Coal Seam at West Banko Field, PT. Bukit Asam, Tbk., Tanjung Enim, South Sumatra. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 830(1), 9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/830/1/012044>
- Arif, M., Jones, F., Barifcani, A., & Iglauer, S. (2017). Influence of surface chemistry on interfacial properties of low to high rank coal seams. *Fuel*, 194, 211–221. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.027>
- 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.

- Bardet, M., & Pournou, A. (2017). NMR Studies of Fossilized Wood. In *Annual Reports on NMR Spectroscopy* (1st ed., Vol. 90, pp. 41–83). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/bs.arnmr.2016.07.002>
- 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
- Chew, T. W., Ng, P. S. H., Chuah, B., Guan, T., Chuah, L., Chin, K. L., Lee, C. L., Mohd, B., Mohd, S., Hafizuddin, N., & Taungmai, L. (2023). A Review of Bio-Based Activated Carbon Properties Produced from Different Activating Chemicals during Chemicals Activation Process on Biomass and Its Potential for Malaysia. *Materials*, 16(7365), 15.
- Chilev, C., Dicko, M., Langlois, P., & Lamari, F. (2022). Modelling of Single-Gas Adsorption Isotherms. *Metals*, 12(10), 16. <https://doi.org/10.3390/met12101698>
- Dai, S., Finkelman, R. B., French, D., Hower, J. C., Graham, I. T., & Zhao, F. (2021). Modes of occurrence of elements in coal: A critical evaluation. *Earth-Science Reviews*, 222(103815), 76. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103815>
- Duba, A. G. (1977). Electrical conductivity of coal and coal char. *Fuel*, 56(4), 441–443. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(77\)90074-6](https://doi.org/10.1016/0016-2361(77)90074-6)
- 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>
- Fikri, H. N., Sachsenhofer, R. F., Bechtel, A., & Gross, D. (2022). Organic geochemistry and petrography in Miocene coals in the Barito Basin (Tutupan Mine, Indonesia): Evidence for astronomic forcing in kerapah type peats. *International Journal of Coal Geology*, 256(103997), 27. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.103997>
- Fryda, L., & Visser, R. (2015). Biochar for Soil Improvement: Evaluation of Biochar from Gasification and Slow Pyrolysis. *Agriculture (Switzerland)*, 5(4), 1076–1115. <https://doi.org/10.3390/agriculture5041076>
- Guo, H., Li, X., Zhang, J., Huang, Z., Urynowicz, M. A., & Liang, W. (2020). The effect of NaOH pretreatment on coal structure and biomethane production. *PLoS ONE*, 15(4), 1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231623>
- 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>
- Hidayat, B. 2015. *Remediasi Tanah Tercemar Logam Berat dengan Menggunakan Biochar*. Jurnal Pertanian Tropik. Vol. 2. No. 1 : 51-61.
- Huang, H., Reddy, N. G., Huang, X., Chen, P., Wang, P., Zhang, Y., Huang, Y., Lin, P., & Garg, A. (2021). Effects of pyrolysis temperature, feedstock type and compaction on water retention of biochar amended soil. *Scientific Reports*, 11(1), 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86701-5>
- 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>
- Kalam, S., Abu-Khamsin, S. A., Kamal, M. S., & Patil, S. (2021). Surfactant Adsorption Isotherms: A Review. *ACS Omega*, 6(48), 32342–32348. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04661>
- Keboletse, K. P., Ntuli, F., & Oladijo, O. P. (2021). Influence of coal properties on coal conversion processes-coal carbonization, carbon fiber production, gasification and liquefaction technologies: a review. *International Journal of Coal Science and Technology*, 8(5), 817–843. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00401-5>
- Kwakyewuah, B., Sefa-ntiri, B., Von-kiti, E., & Nkrumah, I. (2019). Groundwater Samples in Ghana by Zeolite Y Synthesized from Bauxite and Kaolin. *Water*, 11(1912), 19.
- Ledesma, B., Sabio, E., González-García, C. M., Román, S., Fernandez, M. E., Bonelli, P., & Cukierman, A. L. (2023). Batch and Continuous Column Adsorption of p-Nitrophenol onto Activated Carbons with Different Particle Sizes. *Processes*, 11(7), 1–22. <https://doi.org/10.3390/pr11072045>
- Lei, Z., Liu, M., Shui, H., Wang, Z., & Wei, X. (2010). Study on the liquefaction of Shengli lignite with NaOH/methanol. *Fuel Processing Technology*, 91(7), 783–788. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.02.014>
- Li, Q., An, L., Wu, P., Wang, S., Gu, S., Yuan, Y., & Fu, Y. (2023). The introduction of nitrogen from coal into the surface watershed nitrogen cycle due to coal mining activity. *Science of the Total Environment*, 900(165822), 12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165822>
- Li, Y., & Yuan, S. (2021). Influence of addition of KOH on the yield and characteristics of humic acids extracted from lignite using NaOH. *SN Applied Sciences*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04087-x>
- 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>
- Munawar, A., Mulyanto, D., & Asrifah, R. R. D. (2023). Equilibrium studies for the removal of manganese (Mn) from aqueous solution using natural zeolite from West Java, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 10(2), 4191–4198. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2023.102.4191>
- 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.
- Novananda, A., Rahmawati, I., Sani, S., Astuti, D. H., & Suprianti, L. (2020). Karbon Aktif Dari Batubara Lignite Dengan Proses Aktivasi Menggunakan Hidrogen Flourida. *Jurnal Teknik Kimia*, 15(1), 7. https://doi.org/10.33005/jurnal_tekkim.v15i1.2297
- Nurida, N.L. 2014. *Potensi Pemanfaatan Biochar Untuk Rehabilitasi Lahan Kering di Indonesia*. Jurnal Sumberdaya Lahan. Edisi Khusus (2014) 57-68.

- Parsa, M. R., & Chaffee, A. L. (2019). The effect of densification with alkali hydroxides on brown coal self-heating behaviour and physico-chemical properties. *Fuel*, 240, 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.098>
- Pawlicka, A., & Doczekalska, B. (2013). Determination of surface oxygen functional groups of active carbons according to the Boehm's titration method. *Life Sciences-SGGW Forestry and Wood Technology №*, 84, 11–14.
- Prasetyo, T. B., Ahmad, F., & Saidi, A. (2019). Humic acid and water management to decrease Ferro (Fe²⁺) 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>
- 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.
- Raji, Z., Karim, A., Karam, A., & Khalloufi, S. (2023). Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation—A Review. *Waste*, 1(3), 775–805. <https://doi.org/10.3390/waste1030046>
- 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
- 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>
- Sadaka, S., Sharara, M. A., Ashworth, A., Keyser, P., Allen, F., & Wright, A. (2014). Characterization of biochar from switchgrass carbonization. *Energies*, 7(2), 548–567. <https://doi.org/10.3390/en7020548>
- Saletnik, B., Zagula, G., Bajcar, M., Tarapatsky, M., Bobula, G., & Puchalski, C. (2019). Biochar as a multifunctional component of the environment-a review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(6), 20. <https://doi.org/10.3390/app9061139>
- Sardi, B., Uno, I., Pasila, F., Altway, A., & Mahfud, M. (2023). Low rank coal for fuel production via microwave-assisted pyrolysis: A review. *FirePhysChem*, 3(2), 106–120. <https://doi.org/10.1016/j.fpc.2023.02.002>
- 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>
- Skodras, G., Kokorotsikos, P., & Serafidou, M. (2014). Cation exchange capability and reactivity of low-rank coal and chars. *Central European Journal of Chemistry*, 12(1), 33–43. <https://doi.org/10.2478/s11532-013-0346-9>
- Tan, K. H. (2010). *Principles of Soil Chemistry*. CRC Press Taylor and Francis Group. 362 pp.

- Tang, Q., Zhang, H., Zhao, X., Zheng, L., Miao, C., Liu, Y., Liu, G., Chen, L., & Fu, B. (2023). Chromium in Chinese coals: geochemistry and environmental impacts associated with coal-fired power plants. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(5), 2241–2262. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01337-2>
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 19(1), 191–215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
- Ukalska-Jaruga, A., Bejger, R., Smreczak, B., & Podlasiński, M. (2023). Sorption of Organic Contaminants by Stable Organic Matter Fraction in Soil. *Molecules*, 28(1), 18. <https://doi.org/10.3390/molecules28010429>
- Ussiri, D. A. N., Jacinthe, P. A., & Lal, R. (2014). Methods for determination of coal carbon in reclaimed minesoils: A review. *Geoderma*, 214–215(2014), 155–167. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.09.015>
- Utescher, T., Ashraf, A. R., Kern, A. K., & Mosbrugger, V. (2021). Diversity patterns in microfloras recovered from Miocene brown coals of the lower Rhine Basin reveal distinct coupling of the structure of the peat-forming vegetation and continental climate variability. *Geological Journal*, 56(2), 768–785. <https://doi.org/10.1002/gj.3801>
- Vendra Singh, S., Chaturvedi, S., Dhyani, V. C., & Kasivelu, G. (2020). Pyrolysis temperature influences the characteristics of rice straw and husk biochar and sorption/desorption behaviour of their biourea composite. *Bioresource Technology*, 314, 123674. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123674>
- Wang, Z., Liu, K., Xie, L., Zhu, H., Ji, S., & Shu, X. (2019). Effects of residence time on characteristics of biochars prepared via co-pyrolysis of sewage sludge and cotton stalks. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 142, 104659. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104659>
- 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.
- Wiśniewska, M., Sadłowska, A., Herda, K., Urban, T., & Nowicki, P. (2023). Production of Mineral-Carbon Composites and Activated Carbons as a Method of Used Gear Oil, Ashes, and Low-Quality Brown Coals Management. *Molecules*, 28(19), 16. <https://doi.org/10.3390/molecules28196919>
- Wu, P., Li, J., Zhuang, X., Querol, X., Moreno, N., Li, B., Ge, D., Zhao, S., Ma, X., Cordoba, P., & Shanguan, Y. (2019). Mineralogical and environmental geochemistry of coal combustion products from Shenhua and Yihua Power Plants in Xinjiang Autonomous Region, Northwest China. *Minerals*, 9(8), 19. <https://doi.org/10.3390/min9080496>
- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Varjani, S., & Saravanan, A. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, 28, e00570. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>
- 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, 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, 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>