



Studi literatur: restorasi lahan pascatambang batu bara di Kalimantan Timur

ASSYIFA FAUZIA^{1*}, MUHAMMAD NABIL MAKARIM¹

¹ Magister Ilmu Lingkungan, Sekolah Ilmu Lingkungan, Universitas Indonesia, Jakarta Pusat, 10430, Indonesia;

*Korespondensi: assyifa.fauzia21@ui.ac.id

Diterima: 10 Januari 2024

Direvisi Akhir: 2 Februari 2024

Disetujui: 24 Februari 2024

ABSTRAK

Pendahuluan: Batu bara memainkan peran penting dalam bauran energi primer Indonesia, terutama dalam pembangkit listrik. Namun, penggunaannya yang signifikan mengakibatkan dampak lingkungan yang serius, terutama akibat metode penambangan terbuka yang merusak ekosistem dan mengurangi keanekaragaman hayati. Oleh karena itu, rehabilitasi lahan pascatambang menjadi penting untuk memulihkan ekosistem yang terganggu dan mengurangi dampak negatifnya. **Metode:** Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah systematic literature review (SLR). Data yang digunakan bersumber pada Badan Pusat Statistika dan outlook instansi terkait. **Hasil:** Undang-Undang Mineral dan Batu Bara menetapkan kewajiban reklamasi bagi perusahaan tambang, yang harus disertai dengan pembayaran dana jaminan reklamasi kepada bank pemerintah. Namun, masih ada tantangan dalam pelaksanaan reklamasi dan penutupan tambang, terutama di Kalimantan Timur, di mana pertambangan batu bara menjadi industri utama. Diperlukan manajemen lingkungan yang berkelanjutan dan perhatian terhadap rehabilitasi lahan pascatambang untuk memastikan bahwa dampak lingkungan dari industri pertambangan dapat dikelola dengan baik. Pemantauan yang cermat dan pembelajaran dari pengalaman negara lain, seperti Inggris dan Cina, dapat membantu pemerintah Indonesia dalam mengembangkan praktik terbaik dalam restorasi ekologi dan pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan.

KATA KUNCI: tambang batu bara; dampak lingkungan; rehabilitasi lahan.

ABSTRACT

Background: Coal plays a significant role in Indonesia's primary energy mix, particularly in electricity generation. However, its extensive use results in serious environmental impacts, primarily due to open-pit mining methods that damage ecosystems and reduce biodiversity. Therefore, post-mining land rehabilitation is crucial to restore disturbed ecosystems and mitigate their negative impacts. **Method:** The method used in this study is a systematic literature review (SLR). The data used are sourced from the Central Bureau of Statistics and the outlook of related agencies. **Results:** The Mineral and Coal Law establishes a reclamation obligation for companies. The Mineral and Coal Mining Law mandates reclamation obligations for mining companies, accompanied by the payment of reclamation security funds to government banks. However, challenges remain in implementing reclamation and mine closure, particularly in East Kalimantan, where coal mining is a major industry. Sustainable environmental management and attention to post-mining land rehabilitation are needed to ensure that the environmental impacts of the mining industry are effectively managed. Careful monitoring and learning from the experiences of other countries, such as the UK and China, can assist the Indonesian government in developing best practices in ecological restoration and sustainable natural resource management.

KEYWORDS: coal mining; environmental impact; land rehabilitation.

Cara Pengutipan:

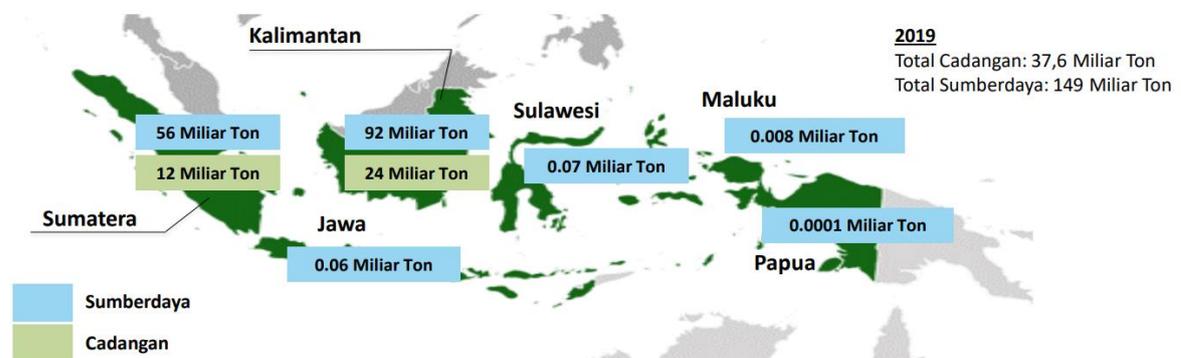
Fauzia, A. & Makarim, M.N. (2024) Studi literatur: restorasi lahan pascatambang batu bara di Kalimantan Timur. *Peatland Agriculture and Climate Change Journal*, 1(1), 52-70. <https://doi.org/10.61511/pacc.v1i1.2024.620>

Copyright: © 2024 dari Penulis. Dikirim untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan dari the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



1. Pendahuluan

Batu bara saat ini tetap menjadi komponen utama dalam bauran energi primer karena dianggap sebagai opsi yang paling ekonomis, terutama ketika mempertimbangkan biaya terendah, khususnya untuk memenuhi kebutuhan energi primer dalam pembangkit listrik (Afin & Kiono, 2021). Penggunaan batu bara dalam negeri terus mengalami pertumbuhan yang signifikan, mencapai tingkat pertumbuhan sekitar 12% per tahun. Penggunaan batu bara secara luas terjadi dalam berbagai sektor, termasuk sebagai sumber energi untuk pembangkit listrik, sektor industri semen, sektor industri baja, serta dalam industri-industri yang memerlukan energi panas dalam proses produksinya (Putra & Maulud, 2020). Jumlah produksi batu bara Indonesia pada tahun 2021 sebesar 614.058.577 ton dan total ekspor sebesar 345.453 ton (BPS, 2021). Indonesia memainkan peran penting dalam pasar batu bara global. Pada tahun 2018, Indonesia menduduki peringkat ke-5 produsen batu bara terbesar dan eksportir batu bara terbesar ke-2 di dunia. Sebaran cadangan dan sumber daya batu bara di Indonesia dapat dilihat pada Gambar 1, dapat dilihat Kalimantan memiliki sumber daya dan cadangan batu bara di Indonesia, yaitu sebesar 92 miliar ton dan 24 miliar ton (Sinadia, 2020).



Gambar 1. Persebaran Cadangan dan Sumber Daya Batu Bara di Indonesia tahun 2019 (Sinadia, 2020)

Tambang batu bara di Indonesia umumnya menggunakan metode penambangan terbuka (*open pit mining*), yang secara signifikan berkontribusi terhadap kerusakan lingkungan (Oktorina, 2018). Kerusakan ini terlihat dari berkurangnya tutupan hutan, gangguan terhadap flora dan fauna, dan degradasi lapisan tanah. Oleh karena itu, semua perusahaan tambang diwajibkan untuk melakukan reklamasi lahan di bekas lokasi pertambangan (Patiung *et al.*, 2011). Penggundulan tutupan hutan, pemindahan lapisan *top soil*, pembentukan timbunan tanah penutup (*overburden dump*) yang digunakan untuk menimbun lubang tambang, dan perubahan tata guna lahan akibat operasi penambangan (peningkatan mineralisasi, erosi, dan pencucian) menyebabkan penipisan keanekaragaman hayati global, siklus karbon, estetika visual, dan peningkatan emisi gas rumah kaca (del Mar Montiel-Rozas *et al.*, 2016; Fang *et al.*, 2020). Kandungan karbon dalam tanah di dunia sekitar tiga kali lipat dari karbon di vegetasi dan dua kali lipat dari atmosfer. Oleh karena itu, rehabilitasi tidak dapat dihindari untuk mempercepat pemulihan ekosistem pascatambang, stabilisasi geoteknik tempat pembuangan limbah (melalui pengembangan sistem perakaran yang ekstensif), menghasilkan barang dan jasa ekosistem, tutupan lahan yang berkelanjutan, dan memerangi pemanasan global dengan meningkatkan penyerapan CO₂ (Bandyopadhyay & Maiti, 2022).

2. Metode

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *systematic literature review* (SLR). Data yang digunakan bersumber pada Badan Pusat Statistika dan *outlook* instansi terkait.

Literatur jurnal yang digunakan dalam penelitian ini dibatasi dari tahun 2013-2023, dengan kata kunci **coal mine, mine restoration, mine rehabilitation, mine reclamation, dan post mining ecosystem**. Studi kasus di luar negeri menggunakan kasus di negara United Kingdom dan Republik Rakyat Cina untuk analisis, sedangkan studi dalam negeri menggunakan provinsi Kalimantan Timur untuk dianalisis.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Restorasi pertambangan batu bara

Reklamasi merupakan tindakan pengelolaan tanah yang melibatkan upaya untuk memperbaiki keadaan fisik tanah (*overburden*) dengan tujuan mencegah terjadinya longsor, pembuatan waduk untuk mengatasi pencemaran air tambang yang beracun, dan tindakan berikutnya adalah melakukan revegetasi. Dalam esensinya, reklamasi dan revegetasi adalah langkah-langkah yang diambil untuk memperbaiki kondisi lahan setelah proses penambangan (Oktorina, 2018). Reklamasi dapat dilaksanakan dengan mengubah penggunaan lahan bekas tambang ke berbagai bentuk, seperti lahan fitoremediasi, revegetasi, reforestasi, aplikasi tanah *top soil*, serta pertanian tanaman pangan, melalui tiga tahap utama dalam proses reklamasi: pemulihan fungsi lahan, peningkatan fungsi lahan, dan pemeliharaan fungsi lahan (Bandyopadhyay & Maiti, 2022; de Groot *et al.*, 2012; Hermawan, 2011). Terdapat dua prinsip dalam kegiatan restorasi, yaitu harus diintegrasikan sebagai bagian yang tak terpisahkan dari proses penambangan dan harus dimulai secepat mungkin dan tidak perlu menunggu penambangan selesai sepenuhnya. Penerapan restorasi wajib dilakukan pada lahan yang terpengaruh oleh aktivitas pertambangan, baik itu di wilayah bekas tambang maupun di luar wilayah bekas tambang. Wilayah luar bekas tambang ini mencakup: penutupan timbunan tanah, penimbunan bahan baku, jaringan transportasi, fasilitas pengolahan dan pemurnian, bangunan kantor dan perumahan, serta pelabuhan/dermaga (Hermawan, 2011).

Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 tentang Mineral dan Batu bara mengamanatkan bahwa setiap perusahaan yang mengelola tambang harus melaksanakan tindakan reklamasi. Selanjutnya, untuk memastikan bahwa perusahaan yang mengelola tambang bertanggung jawab dalam melaksanakan reklamasi dengan sungguh-sungguh, setiap perusahaan harus menyetor dana jaminan reklamasi dalam bentuk deposito ke Bank Pemerintah yang telah ditunjuk. Hal ini sesuai dengan ketentuan dalam Peraturan Pemerintah Nomor 78 Tahun 2010 tentang reklamasi dan pasca tambang, yaitu pada Pasal 29 ayat (1), yang mengamanatkan bahwa pemegang Izin Usaha Pertambangan (IUP) dan Izin Usaha Pertambangan Khusus (IUPK) harus memberikan jaminan untuk reklamasi dan pasca tambang. Selain itu, ayat (2) dari Pasal tersebut menjelaskan bahwa jaminan reklamasi yang dimaksud dalam ayat (1) terdiri dari jaminan untuk tahap eksplorasi dan tahap operasi produksi. Jaminan pascatambang yang diperlukan dihitung berdasarkan biaya yang terbagi menjadi dua kategori, yaitu biaya langsung dan tidak langsung. Biaya langsung meliputi: (1) Pembongkaran bangunan dan fasilitas yang sudah tidak digunakan; (2) Proses reklamasi area bekas tambang, fasilitas pengolahan, fasilitas pendukung; (3) Penanganan bahan berbahaya dan beracun (B3) dan limbah B3; (4) Pemeliharaan dan perawatan; (5) Pemantauan; dan (6) Aspek sosial, ekonomi, dan budaya. Sedangkan biaya tidak langsung meliputi: (1) Biaya untuk mobilisasi dan demobilisasi; (2) Perencanaan kegiatan; (3) Administrasi dan keuntungan yang diperoleh oleh kontraktor pelaksana penutupan tambang dari pihak ketiga; dan (4) Supervisi.

Jaminan ini disetor setiap tahun dalam bentuk deposito berjangka di bank pemerintah, dan deposito tersebut tetap berlaku hingga seluruh kegiatan pascatambang dianggap selesai oleh gubernur. Pencairan deposito beserta bunganya hanya dilakukan setelah penyelesaian kegiatan pascatambang sesuai dengan tahapan yang telah disetujui dalam rencana pascatambang yang disetujui dan diterima oleh gubernur. Walaupun perusahaan

menempatkan jaminan pasca tambang, perusahaan tetap bertanggung jawab untuk melaksanakan kegiatan pascatambang. Jika perusahaan menghadapi kekurangan dana untuk perencanaan reklamasi, penempatan jaminan reklamasi, pelaksanaan reklamasi, pelepasan, atau pencairan jaminan reklamasi untuk menyelesaikan kegiatan pascatambang sesuai dengan jaminan yang telah ditetapkan, maka perusahaan masih harus menanggung biayanya sendiri. Reklamasi harus diterapkan pada lahan yang terganggu akibat pertambangan, baik itu di bekas tambang maupun di lahan di luar bekas tambang yang tidak lagi digunakan. Lahan di luar bekas tambang mencakup: (1) Timbunan *top soil*; (2) Timbunan bahan baku/produksi; (3) Jalan transportasi; (4) Pabrik/instalasi pengolahan/pemurnian; (5) Kantor dan perumahan; dan (6) Pelabuhan/dermaga.

Pelaksanaan reklamasi harus dimulai paling lambat satu bulan setelah kegiatan usaha pertambangan di lahan tersebut berakhir. Setiap tahun, laporan pelaksanaan reklamasi harus disampaikan kepada gubernur (Oktorina, 2018).

3.1.1 Sustainable development based environmental management (manajemen lingkungan berbasis pembangunan berkelanjutan)

Beberapa dekade terakhir, fokus penelitian global telah bergeser dari mengevaluasi keberhasilan reklamasi di ekosistem pascatambang yang telah dihijaukan menjadi menyediakan layanan ekosistem untuk lingkungan yang bersih dan berkelanjutan dengan mempercepat potensi penyeimbangan CO₂ dan mendapatkan kembali dinamika karbon dalam siklus C antara vegetasi, tanah, dan atmosfer. Manajemen lingkungan berbasis pembangunan berkelanjutan melalui pendekatan fitomanajemen (revegetasi atau aforestasi) yang efektif dan sukses untuk restorasi ekosistem pascatambang, untuk mencapai tujuan *Paris agreement* dan tujuan SDG ke-13, bergantung pada ketersediaan substrat tumbuh yang sesuai untuk pembentukan vegetasi yang akan bertindak sebagai "tempat lahirnya alam" di lahan tambang reklamasi (Bandyopadhyay & Maiti, 2022). Industri ini mewujudkan beberapa dari 17 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), seperti meningkatkan lapangan kerja SDG ke-8, berkontribusi terhadap pengentasan kemiskinan SDG ke-1 dan pengurangan kelaparan SDG ke-2 dengan menyediakan lapangan kerja. Permasalahan terbesar adalah implementasi Tujuan Pembangunan Berkelanjutan nomor 13 dalam memerangi perubahan iklim dan dampaknya. Penyebab utama kondisi ini adalah emisi metana dan kurangnya pemanfaatan ekonomi. Proses modernisasi berdasarkan model kerjasama antara pemerintah, perusahaan sains dan pertambangan, *Open Innovation*, serta prinsip ekonomi berkelanjutan, menciptakan peluang untuk membangun industri pertambangan modern yang kompetitif. Penting untuk bekerja sama dengan semua pemangku kepentingan yang, berkat potensi mereka, tidak hanya mampu memastikan pengembangan inovatif namun juga mempertahankan standar tinggi dalam kebijakan iklim dan social (Brodny & Tutak, 2022).

Aplikasi *top soil* (baik dengan cara penimbunan maupun bersamaan) sebagai bahan penutup lereng timbunan *overburden* yang belum direklamasi dengan kedalaman 40-60 cm diakui secara luas sebagai salah satu langkah penting untuk memastikan pembentukan vegetasi (Tripathi *et al.*, 2016). Fokus penelitian mengenai potensi penyerapan karbon pada ekosistem reklamasi berpusat pada peningkatan kemampuan alamiahnya untuk meningkatkan laju masukan bahan organik tanah dengan daya bertahan yang lama sehingga lahan bekas tambang yang terbengkalai dapat mengakumulasi karbon melalui pengembangan horizon tanah untuk mengimbangi emisi bahan bakar fosil. Oleh karena itu, pembentukan pool karbon di lokasi tambang batu bara yang direklamasi, baik dalam biomassa pohon hidup (biomassa di atas dan bawah tanah) maupun di dalam tanah, dengan daya bertahan yang lebih lama, membuat konversi ekosistem pascatambang menjadi ekosistem hutan dengan penyerap CO₂ yang lebih besar (Maiti, 2013).

3.1.2 Ecosystem goods and services based environmental management (manajemen lingkungan berbasis barang dan jasa ekosistem)

Ekosistem hutan memiliki potensi untuk menyediakan berbagai fungsi ekologi, barang dan jasa ekosistem, keuntungan sosial dan lingkungan seperti penyerapan karbon, pengaturan iklim, pemurnian air, produksi biomassa, siklus hara, penyediaan habitat, manfaat budaya dan estetika yang saat ini mengalami tekanan yang kuat akibat kegiatan pertambangan, ledakan infrastruktur lainnya, dan ekspansi pertanian (Carrasco *et al.*, 2014). Oleh karena itu, evaluasi nilai ekonomi barang dan jasa ekosistem akibat deforestasi wajib dilakukan untuk mendukung kebijakan pengambilan keputusan tata guna dan tutupan lahan yang tepat untuk restorasi lahan terdegradasi tambang batu bara yang dapat memahami pertukaran antara penyediaan jasa ekosistem, konservasi keanekaragaman hayati, penyerapan karbon, dan restorasi tambang. Sehingga, pendekatan revegetasi pada lokasi terdegradasi tambang batu bara akan menyediakan berbagai barang dan jasa ekosistem, tergantung pada kondisi sosial-ekonomi spesifik lokasi, dan karakteristik biofisik-kimia (de Groot *et al.*, 2012).

3.1.3 *Economic valuation of egs for sustainable development (nilai ekonomi dari barang dan jasa ekosistem untuk pembangunan berkelanjutan)*

Barang dan jasa ekosistem merupakan kontributor yang signifikan terhadap kesejahteraan manusia yang berkelanjutan. Karena perubahan penggunaan lahan antropogenik yang masif, nilai global barang dan jasa ekosistem telah berkurang sekitar USD 20 triliun/tahun antara tahun 1997 dan 2011 (Kubiszewski *et al.*, 2017). Pemeliharaan dan penguatan berbagai jasa ekosistem dari ekosistem yang dihilangkan di lokasi tambang batu bara yang direklamasi atau hutan yang ditanami, membutuhkan para peneliti dan pembuat kebijakan yang harus mahir dalam penilaian kualitatif dan kuantitatif yang menyeluruh, penilaian moneter, dan dokumentasi jasa ekosistem. Penilaian ekonomi jasa ekosistem merupakan alat penting yang tidak hanya mendorong kesadaran dan menjelaskan pentingnya keanekaragaman hayati bagi pembuat kebijakan dan pemangku kepentingan perusahaan, tetapi juga memungkinkan pemanfaatan dana yang terbatas secara lebih efisien dengan cara mengenali restorasi secara ekonomi paling signifikan (Baral *et al.*, 2016).

Terdapat beberapa ambiguitas tambahan dalam penilaian ekonomi jasa ekosistem karena perubahan tata guna dan tutupan lahan antropogenik yang terus menerus, eksploitasi sumber daya alam yang berlebihan, dan perubahan iklim yang terjadi pada skala lokal hingga global. Namun, sulit untuk mengukur secara tepat nilai ekonomi biofisik barang dan jasa ekosistem karena adanya under/overestimasi dan penghitungan ganda pada banyak jasa ekosistem tidak langsung. Baru-baru ini, beberapa metode telah diimplementasikan untuk memperkirakan secara kasar "*total economic value* (TEV)" dan "*net present value* (NPV)" dari barang dan jasa ekosistem termasuk pendekatan "harga pasar" dan "transfer manfaat" (Sannigrahi *et al.*, 2019). Metode penilaian adalah sebagai berikut: penetapan harga hedonis, penilaian kontinjensi, pendekatan produksi, analisis konjoin, dan pemodelan biofisik spasial (de Groot *et al.*, 2012).

3.1.4 *Sustainable mining (pertambangan berkelanjutan)*

Pertambangan berkelanjutan, sebagai sebuah konsep multi-dimensi, disertai dengan pendekatan konsolidatif yang memadukan pembangunan kelembagaan dan sosial-ekonomi dengan perbaikan lingkungan. Namun, untuk mengimplementasikan konsep strategis tersebut, perlu dibangun kerangka kerja pembangunan berkelanjutan yang terintegrasi dan holistik serta rekomendasi aksi. Sejak dimulainya pembangunan berkelanjutan, banyak organisasi internasional seperti *International Council on Mining and Minerals* (ICMM), *World Economic Forum* (WEF), dan *United Nations Development Programme* (UNDP) telah berupaya untuk menggambarkan konsep tersebut dalam konteks industri pertambangan untuk menyajikan kerangka kerja yang diakui secara luas untuk tindakan disipliner

(Bandyopadhyay & Maiti, 2022). Batu bara memasok bahan-bahan penting untuk pembangunan sosial. Namun dalam banyak kasus, perencanaan pemisahan penambangan batu bara bawah tanah (UCM) dan reklamasi tambang (MR) dan “penambangan dulu, reklamasi kemudian” menyebabkan akumulasi degradasi lahan. Oleh karena itu, perencanaan terpadu UCM dan MR perlu segera dikaji (G. Li et al., 2022)

Sektor pertambangan telah mengadopsi berbagai kebijakan yang dilegitimasi untuk memfungsikan transisi retorika menuju “pertambangan berkelanjutan”. Program *corporate social responsibilities* (CSR) berada di garis depan pendekatan berkelanjutan ini. Dasar pemikiran untuk penerimaan CSR sebagai pedoman untuk mencapai pembangunan berkelanjutan. Dengan semakin pentingnya perubahan iklim global dalam skenario SDG, sektor pertambangan secara bertahap mulai terlibat dalam isu ini (Gilberthorpe & Banks, 2012). Terdapat beberapa contoh skema pembayaran jasa ekosistem berbasis karbon, termasuk pengurangan emisi dari deforestasi dan degradasi (REDD+), mekanisme pembangunan bersih, dan pasar karbon sukarela. Warisan berbasis hutan, yang potensinya belum mendapat perhatian yang memadai, dapat menjadi penghubung langsung antara operasi pertambangan dan pasar karbon. Di bawah skema tersebut, lahan bekas tambang dapat dipulihkan menjadi ekosistem hutan dan kemudian dikembalikan kepada masyarakat setempat sehingga manfaatnya dapat diperoleh melalui pembayaran untuk penyerapan karbon (Hirons et al., 2014).

Inisiatif-inisiatif ini secara teoritis dapat mengintensifkan agenda CSR dengan berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim dan pembangunan lokal. Namun demikian, belum ada pertimbangan eksplisit mengenai kemungkinan skema pembayaran jasa ekosistem berbasis karbon dalam konteks pembangunan di lokasi bekas tambang. Para penambang dapat membantu dengan merencanakan investasi, mengidentifikasi bahaya, merancang kemungkinan, dan menyebarkan laporan yang transparan untuk memitigasi dampak perubahan iklim, khususnya dengan memantau lahan tambang dari berbagai kondisi iklim mikro yang berbeda sehingga para pengambil keputusan dapat mengambil langkah-langkah yang diperlukan (Bandyopadhyay & Maiti, 2022).

3.1.5 Fitoremediasi

Saat ini, solusi berbasis alam sebagai strategi pembersihan yang efisien sumber daya dan meningkatkan ketahanan remediasi terhadap perubahan lingkungan global merupakan tren yang sedang berkembang (O'Connor et al., 2019). Dibandingkan dengan metode konvensional, pendekatan berbasis alam untuk remediasi, seperti fitoremediasi, menawarkan beberapa manfaat lingkungan, sosial, dan ekonomi. Restorasi dengan bantuan tanaman (fitoremediasi) pada ekosistem pasca tambang yang ditinggalkan merupakan pilihan yang efektif untuk mencegah erosi tanah, memperbaiki senyawa beracun (seperti logam berat), dan memulihkan kesuburan tanah dan struktur vegetasi (Ahirwal & Pandey, 2021). Pendekatan fitoremediasi tidak hanya harus mempertimbangkan akumulasi senyawa beracun tetapi juga sering kali digabungkan dengan pelemahan alami untuk mencapai lintasan pemulihan dalam kondisi iklim asli. Oleh karena itu, spesies tanaman asli sering dipilih untuk mendapatkan pertumbuhan yang paling efisien dan juga sifat akumulasi logam karena kemampuan beradaptasi mereka terhadap kondisi dan kadang-kadang diperlukan oleh badan pengatur lokal karena kekhawatiran atas spesies invasif (Maiti, 2013).

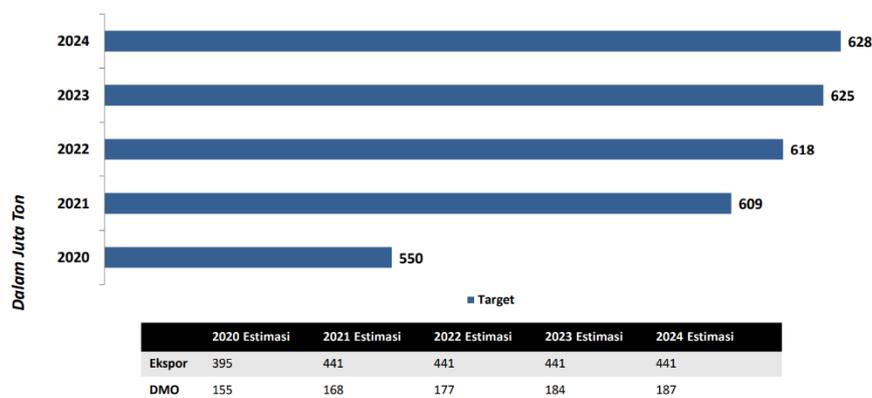
Bioremediasi dengan bantuan tanaman atau rizoremediasi mengacu pada interaksi antara rizosfer dan mikroba tanah yang menghasilkan transformasi polutan menjadi senyawa yang tidak terlalu berbahaya. Keanekaragaman mikroba rizosfer dirangsang oleh akar tanaman melalui substrat (glukosa, fruktosa), aerasi tanah, sekresi eksozyme, dan serapan hara dan mineral melalui eksudasi akar. Dengan memfiksasi nitrogen, memobilisasi dan melarutkan fosfor (nutrisi), menghasilkan senyawa pengatur pertumbuhan, mengurangi hormon stres, dan melindungi tanaman dari organisme patogen, mikroba ini mendorong pertumbuhan tanaman (Bandyopadhyay & Maiti, 2022).

3.2 Kajian kondisi restorasi ekosistem pertambangan batu bara

3.2.1 Kondisi restorasi ekosistem pertambangan batu bara di Indonesia

Istilah tanah tambang secara umum mengacu pada bahan-bahan sisa tambang, baik tercampur atau tidak dengan bahan tanah yang tersebar di permukaan tanah yang telah direklamasi untuk berfungsi sebagai substrat tanaman dan mendukung pertumbuhan tanaman. Di Indonesia, berdasarkan peraturan pemerintah SNI 6621:2016, bahan tanah yang dapat digunakan sebagai media tanam pada permukaan reklamasi sebaiknya terdiri dari bahan yang berasal dari horizon A dan B, dan jika sifat-sifatnya sesuai, dari horizon C. (Iskandar *et al.*, 2022). Indonesia merupakan negara produsen batu bara terbesar ke lima di dunia dengan jumlah produksi batu bara pada tahun 2021 sebesar 614.058.577 ton dan total ekspor sebesar 345.453 ton (BPS, 2021). Indonesia memainkan peran penting dalam pasar batu bara global. Pada tahun 2018, Indonesia menduduki peringkat ke-5 produsen batu bara terbesar dan eksportir batu bara terbesar ke-2 di dunia. Namun, hanya 21% dari volume produksi yang dimanfaatkan untuk pasar dalam negeri. Kedepannya, produksi batu bara Indonesia diperkirakan akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya kebutuhan batu bara untuk pembangkit listrik (Baskoro *et al.*, 2021). Indonesia merupakan negara kepulauan yang memiliki sumber daya alam melimpah seperti mineral, minyak bumi dan gas alam, logam, dan batu bara. Di antara sumber daya alam tersebut, batu bara menjadi komoditas yang paling digemari di Indonesia. Produksi batu bara Indonesia semakin meningkat setiap tahunnya. Indonesia merupakan pengguna batu bara terbesar ketiga di dunia setelah Amerika Serikat dan Cina (Kurniawan *et al.*, 2022).

Produksi batu bara di Indonesia akan terus meningkat di masa depan. Skenario *Environmentally Oriented* akan menjadi alternatif terbaik untuk kebijakan energi masa depan di Indonesia karena kemampuannya memenuhi target pertumbuhan ekonomi dan target intensitas rendah karbon. Lebih lanjut, skenario *Environmentally Oriented* juga mampu mencapai target pemerintah dalam bauran energi primer pada tahun 2030 dengan komposisi batu bara sebesar 33,5%, minyak bumi sebesar 19,4%, gas sebesar 7,8%, dan energi terbarukan sebesar 39,3% (Baskoro *et al.*, 2021). Indonesia mempunyai pertumbuhan produksi batu bara sebesar 18,94% pada tahun 2018 dan merupakan yang tertinggi dibandingkan negara lain. Selanjutnya, tingkat pertumbuhan tahunan produksi batu bara Indonesia dalam 10 tahun terakhir adalah sekitar 7,83% per tahun, yang merupakan negara ke-3 dengan pertumbuhan produksi batu bara paling signifikan di dunia setelah Mongolia dan Uzbekistan. Pada tahun 2018, Indonesia memproduksi sekitar 548,6 juta ton batu bara, dimana hanya 114,55 juta ton yang digunakan untuk pemanfaatan dalam negeri (Baskoro *et al.*, 2021). Estimasi produksi dan ekspor batu bara di Indonesia hingga tahun 2024 dapat dilihat pada Gambar 2. Dapat dilihat terjadi kenaikan yang cukup tinggi pada tahun 2021 dibandingkan tahun lainnya, namun estimasi besaran ekspor batu bara bernilai stagnan sejak tahun 2021 (Sinadia, 2020).



Gambar 2. Estimasi produksi dan ekspor batu bara di Indonesia hingga tahun 2024 (Sinadia, 2020)

Penebangan kayu yang eksploitatif, kebakaran hutan, penambangan terbuka, dan konversi hutan menjadi lahan pertanian seperti perkebunan kelapa sawit dan karet, merupakan penyebab utama deforestasi di negara-negara tropis. Di Indonesia, penambangan terbuka dilakukan untuk batu bara, nikel, timah, dan bauksit karena bahan bakunya disimpan di lapisan permukaan hutan alam. Proses penambangan terbuka terdiri dari penebangan pohon, pengupasan tanah lapisan atas, pemindahan lapisan penutup, dan eksploitasi mineral (Ghose & Majee, 2000). Penambangan terbuka merupakan faktor utama yang berkontribusi terhadap deforestasi di Indonesia (Resosudarmo et al., 2009). Selain penggundulan hutan, penambangan terbuka juga mengakibatkan pembuangan limbah, seperti batu tambang atau batuan sisa batu bara termasuk butiran halus yang dihasilkan selama proses penambangan (Bian et al., 2009), tailing tambang (Dowarah et al., 2009), erosi tanah, dan penurunan kesuburan tanah (Ghose & Majee, 2000).

Perusahaan pertambangan mempunyai tanggung jawab untuk melakukan reboisasi di wilayah setelah penambangan, namun sebagian besar perusahaan gagal dalam melakukan reboisasi. Hutan alam yang terdegradasi di Indonesia memerlukan reboisasi segera, komprehensif, dan sistematis. Restorasi lahan pertambangan terbuka memerlukan waktu beberapa ratus tahun dan terdiri dari tahap awal, tengah, dan klimaks (Burger & Zipper, 2018). Lahan tambang pasca terbuka merupakan habitat yang tidak subur secara fisik, kimia, dan biologis sehingga menghambat perkembangan vegetasi (Sheoran et al., 2010). Pemanfaatan mikroorganisme tanah yang bermanfaat telah diusulkan sebagai pendekatan yang memungkinkan untuk restorasi lahan tambang pasca terbuka (Juwarkar & Jambhulkar, 2008; Taheri & Bever, 2010).

Inokulasi jamur *Arbuscular mycorrhizal* telah dilaporkan meningkatkan pertumbuhan dan serapan hara spesies pohon tropis di ruang pertumbuhan dan pembibit (Tawaraya & Turjaman, 2014). Jamur *Arbuscular mycorrhizal* terpilih yang dikumpulkan dari kawasan terdegradasi yang berasosiasi dengan spesies tanaman asli terpilih dapat membantu kelangsungan hidup dan pertumbuhan tanaman di tanah terdegradasi dan tidak subur di kawasan tambang batu bara pasca-*opencast*. Hasilnya menunjukkan bahwa inokulasi jamur *Arbuscular mycorrhizal* mempunyai dampak yang kuat dalam memulai revegetasi yang dimulai hanya tujuh bulan setelah transplantasi di bawah lingkungan yang keras di lahan tambang batu bara pasca-*opencast*. Metode ini dapat diadopsi untuk produksi hutan lestari dan kelestarian ekosistem pasca penambangan batu bara di Indonesia (Wulandari et al., 2016).

3.2.1.2 Kondisi restorasi ekosistem pertambangan batu bara di Kalimantan Timur

Pada bagian ini dijabarkan kontestasi mengenai makna, aturan dan praktik reklamasi dan penutupan tambang batu bara dalam konteks Kalimantan Timur, provinsi penghasil batu bara terbesar di Indonesia. Seiring dengan semakin intensifnya penambangan di provinsi tersebut, dan berkurangnya penambangan batu bara, konsesi-konsesi tersebut hanya menyisakan lubang-lubang tambang besar yang tidak diisi ulang dan ditinggalkan tanpa penutupan – banyak di antaranya berada di sekitar pemukiman manusia (Toumbourou et al., 2020). Kalimantan Timur merupakan penyumbang terbesar produksi batu bara Indonesia. Terlebih lagi, aktivitas pertambangan batu bara selama ini menjadi industri terbesar di Kalimantan Timur yang menopang perekonomian dan menyumbang Produk Domestik Regional Bruto yang tinggi. Oleh karena itu, Kalimantan Timur dipilih sebagai wilayah fokus studi kami (Kurniawan et al., 2022). Kalimantan Timur merupakan penyumbang terbesar produksi batu bara Indonesia. Terlebih lagi, aktivitas pertambangan batu bara selama ini menjadi industri terbesar di Kalimantan Timur yang menopang perekonomian dan menyumbang Produk Domestik Regional Bruto yang tinggi. Oleh karena itu, Kalimantan Timur dipilih sebagai wilayah fokus studi kami (Kurniawan et al., 2022).

Di Kalimantan Timur, penambangan batu bara terbuka atau terbuka merupakan bentuk penggunaan lahan industri yang dominan. Provinsi ini merupakan rumah bagi sebagian besar cadangan batu bara di Indonesia, dan dalam rencana zonasi lahan tata ruang

saat ini, 5,2 juta hektar wilayah provinsi tersebut telah dialokasikan untuk pertambangan, terutama batu bara. Setelah kampanye panjang yang dipimpin oleh beragam kelompok pelaku gerakan sosial, dengan memanfaatkan berbagai strategi advokasi dan litigasi, DPRD Kalimantan Timur mengadopsi peraturan provinsi pada tahun 2013, yang memperkuat peraturan tingkat tinggi yang mewajibkan perusahaan pertambangan batu bara untuk melakukan reklamasi dan pembersihan pascatambang. ke atas. Peraturan tersebut merupakan kali pertama para aktivis memberikan pengaruh langsung terhadap kebijakan pengaturan pertambangan di tingkat daerah di Indonesia. Namun hasil dari kebijakan ini saja belum cukup untuk mendorong perubahan: diperkirakan terdapat 1.735 lubang tambang batu bara yang belum terisi kembali di Kalimantan Timur, dan jumlah korban jiwa akibat kematian di lubang tambang terus bertambah. Remediasi lokasi tambang jarang dilakukan untuk mengembalikan lahan ke kondisi sebelum penambangan (Toumbourou et al., 2020). Perubahan penggunaan lahan dan tutupan lahan dalam skala besar dapat berdampak besar terhadap ekosistem alam, seperti hilangnya keanekaragaman hayati dan karbon. Para peneliti menemukan bahwa dalam skenario pengembangan terbatas, proyeksi penurunan biomassa di atas permukaan tanah pada tahun 2030 tidak signifikan, kekayaan spesies tanaman diproyeksikan menurun secara signifikan sebesar ~3%, dan petak-petak hutan dengan kanopi tertutup yang sebagian besar berukuran 100–1000 hektar diproyeksikan menjadi terfragmentasi. Dampak zonasi tidak signifikan pada skenario ini. Perbedaan antara skenario pembangunan terbatas dan tidak terbatas sangatlah signifikan, dan dampak yang diproyeksikan dalam skenario pembangunan tidak terbatas jauh lebih tinggi: biomassa di atas permukaan tanah diproyeksikan menurun 4–30%, kekayaan spesies tanaman 10–40%, dan hutan dengan kanopi tertutup diperkirakan menurun. diproyeksikan akan benar-benar kehilangan distribusi ukuran patch pada umumnya. Dampak zonasi pada skenario ini adalah positif dan signifikan. Hasil-hasil ini menunjukkan bahwa cara yang paling berkelanjutan untuk Kalimantan Timur, berdasarkan indikator-indikator kami, adalah dengan membatasi pengembangan lahan, terutama budidaya tanaman komersial skala besar. Jika pengembangan lahan tidak dapat dibatasi, penerapan zona pengembangan terbatas disarankan. Kebaruan metodologis dari pendekatan kami adalah kami menyebarkan ketidakpastian dari model perubahan penggunaan lahan ke penilaian dampak dan menguji signifikansi perbedaan antara skenario masa depan, dengan kata lain kami menguji apakah instrumen kebijakan potensial mempunyai dampak signifikan (positif) terhadap perubahan penggunaan lahan. mempelajari indikator-indikator tersebut dan mungkin layak untuk diterapkan (Verstegen *et al.*, 2019).

Dengan menggunakan visualisasi indeks kerentanan lingkungan pada peta sebaran spasial, peneliti menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah Kalimantan Timur memiliki kondisi yang dapat diterima dengan tingkat kerentanan indeks kerentanan lingkungan yang sangat rendah. Sebaliknya, di wilayah sekitar pertambangan batu bara serta perkotaan dan pesisir, tingkat indeks kerentanan lingkungan tergolong tinggi atau sangat tinggi. Daerah dengan kerentanan lingkungan yang tinggi dan sangat tinggi tersebut patut mendapat perhatian dan memerlukan kebijakan lebih lanjut yang dapat ditindaklanjuti. Pemerintah, masyarakat, dan perusahaan pertambangan besar diharapkan memberikan perhatian yang cermat terhadap keadaan darurat lingkungan ini karena tingkat kerentanan tahunan cenderung meningkat dan perubahan antar kategori bersifat fluktuatif. Selain itu, bagi kawasan pascatambang, perlu dilakukan rehabilitasi lingkungan ekologisnya dengan prosedur yang benar, karena dapat merugikan dan memberikan dampak negatif terhadap kawasan pemukiman di sekitarnya. Dengan upaya mitigasi yang tepat dari pemerintah serta dukungan masyarakat dan perusahaan pertambangan, diharapkan kerentanan lingkungan ekologis dapat dikurangi (Kurniawan *et al.*, 2022).

3.2.2 Kondisi restorasi ekosistem pertambangan batu bara di negara lain

3.2.2.1 Restorasi pertambangan batu bara di United Kingdom

Di United Kingdom, batu bara melimpah di Inggris, Skotlandia dan Wales. Inggris memiliki cadangan batu bara terbesar karena kondisi geologinya yang unik, oleh karena itu Inggris merupakan wilayah industri yang paling cepat berkembang di United Kingdom, terutama sejak revolusi industri. Beberapa kota besar seperti London, Manchester, dan Birmingham telah mengembangkan ekonomi industrinya dengan cepat dengan sumber daya batu bara yang melimpah (Wu, 2019). Kawasan tengah Inggris kaya akan sumber daya batu bara, dengan lokasi geografis yang unggul, cadangan sumber daya yang melimpah, dan sumber daya air, yang secara bersama-sama membuat kawasan ini berkembang pesat menjadi basis industri berat yang penting di Inggris selama Revolusi Industri (Lin & Zhu, 2017). Berbagai wilayah di Inggris, Skotlandia, dan Wales memiliki cadangan sumber daya batu bara yang berbeda, di antaranya Inggris memiliki cadangan batu bara terkaya, yang juga telah menyebabkan kebangkitan dan perkembangan kota-kota besar industri seperti London dan Manchester. Batu bara, sebagai bahan bakar utama pengembangan industri Inggris, juga telah membawa dunia ke era ekonomi energi baru. Namun, eksploitasi batu bara yang berlebihan berdampak negatif terhadap sumber daya air. Hal ini dapat mengurangi jumlah air bawah tanah, merusak sistem siklus air dan mempengaruhi ketinggian air (Wu, 2019).

Meskipun pemerintah Inggris telah berjanji untuk menghentikan penggunaan listrik tenaga batu bara pada tahun 2025 dan tambang bawah tanah terakhir di Inggris ditutup di Kellingley, North Yorkshire, pada tahun 2015, penambangan terbuka masih terus berlanjut di beberapa wilayah di Inggris dan Wales, dan rencana perluasan tambang terbukti masih diperdebatkan. Batu bara tetap menjadi penanda penting bagi budaya, wilayah, dan sejarah; batu bara lah yang melahirkan gerakan buruh dan menopang serikat pekerja (Brown & Spiegel, 2017). Produksi batu bara di berbagai wilayah di Inggris telah meningkat dari tahun ke tahun dalam periode yang berbeda. Eksploitasi sumber daya batu bara yang efektif telah memainkan peran penting dalam meletusnya revolusi industri, dan juga menambah dorongan besar bagi perkembangan ekonomi di area-area ini. Batu bara, sebagai bahan bakar utama pengembangan industri Inggris, juga telah membawa dunia ke era ekonomi energi baru. Namun, eksploitasi batu bara yang berlebihan berdampak negatif terhadap sumber daya air. Hal ini dapat mengurangi jumlah air bawah tanah, merusak sistem siklus air dan mempengaruhi ketinggian air (Wu, 2019). Otoritas batu bara UK telah mengembangkan metode yang berkelanjutan untuk mengolah sebagian besar limbah tambang batu bara, tetapi masih ada peluang untuk membuat metode ini menjadi lebih efisien. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan metode dalam upaya pemulihan lahan bekas tambang batu bara yang lebih berkelanjutan di beberapa institusi di United Kingdom. Banyak substrat dan teknik yang telah diujicobakan termasuk alginat rumput laut, pupuk kandang, kompos, saluran pembuangan batu kapur yang bersifat anoksik, sistem RAPS (*Reducing and Alkalinity Producing System*), konversi oker drainase tambang batu bara, dan lahan basah buatan (Johnston *et al.*, 2008).

3.2.2.2 Restorasi pertambangan batu bara di Republik Rakyat Cina

Batu bara merupakan sumber energi utama di Cina, dan posisi mendominasinya tidak akan berubah dalam dalam jangka pendek. Penambangan terbuka adalah metode penambangan batu bara yang umum di Cina. Sebagian besar tambang batu bara terbuka di Cina terkonsentrasi di wilayah utara yang gersang dan semi-gersang. Kondisi latar belakang lingkungan ekologi di daerah-daerah ini sebagian besar buruk, dan erosi tanah yang serius di sana akan menyebabkan serangkaian bencana sekunder, yang akan membawa banyak dampak buruk terhadap keselamatan orang dan properti di daerah pertambangan. Namun, tantangan restorasi ekologi yang dihadapi tambang batu bara terbuka di wilayah

pegunungan di Cina utara bahkan lebih parah, dan efek restorasi ekologi dari tambang-tambang di daerah ini akan secara langsung mempengaruhi keamanan ekologi Cina (Yuan *et al.*, 2022).

Cina bagian Timur adalah wilayah yang berkembang dengan baik secara ekonomi, dengan tambang batu bara industri skala besar yang paling awal berada. Setelah lebih dari 50 tahun menambang batu bara, wilayah ini berada di ambang kehabisan sumber daya. Oleh karena itu, di Cina Timur, sejumlah besar tambang batu bara telah atau akan ditutup sehingga mengakibatkan lebih banyak lahan tambang terbengkalai. Bahaya pertambangan ini dapat menyebabkan polusi udara, air asam, degradasi tanah, penurunan keanekaragaman hayati, dan perusakan lanskap (Shao *et al.*, 2023). Penambangan terbuka secara langsung merusak lapisan permukaan tanah dan vegetasi, penambangan bawah tanah menyebabkan runtuhnya formasi tanah, dan timbunan limbah selama proses penambangan bersifat asam dan beracun dengan logam berat yang merusak tanah, hidrologi, dan udara di sekitarnya. Untuk melakukan pemulihan lahan, pemerintah Cina berhasil menyelenggarakan sesi pertama Konferensi Reklamasi Lahan Internasional dan Pemulihan Ekologis atau *Land Reclamation and Ecological Recovery Conference* (LCER) di Beijing pada tahun 2014, diikuti dengan sesi kedua di Xi'an pada tahun 2017. Jelas bahwa Cina telah memulai berbagai langkah pemulihan lahan, upaya-upaya pemulihan lahan tersebut memberikan perhatian yang lebih besar terhadap peraturan reklamasi lahan dan pemulihan ekologi (Chiu *et al.*, 2021). Sejak perumusan Rencana Lima Tahun ke-13, Cina telah beralih dari pembangunan pesat ke pembangunan berkualitas tinggi. Secara khusus, investasi industri seperti pertambangan telah menurun, sementara kebutuhan perlindungan lahan untuk pengembangan sumber daya telah meningkat. Karena aktivitas pertambangan batu bara menyebabkan kerusakan lahan yang parah (Li *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020), kebijakan pemerintah telah meningkatkan kawasan restorasi industri pertambangan sebesar lebih dari 80% selama tahun 2016 –2017, dan jumlah lahan yang rusak atau ditempati oleh pertambangan semakin berkurang di Cina (Chiu *et al.*, 2021).

Menurut statistik pada tahun 2016, penambangan batu bara telah merusak lahan pertanian seluas sekitar 439.720 hm² dan lahan padang rumput seluas sekitar 263.000 hm² di Cina (B. H. Zhang & Xu, 2012). Perubahan antropogenik dalam struktur vegetasi tanah ini sangat mempengaruhi pembangunan berkelanjutan ekosistem, terutama di wilayah padang rumput gersang-semiarid dengan lingkungan yang rapuh (Li *et al.*, 2012). Kawasan restorasi Perusahaan tambang Datong, Huainan merupakan kawasan perbukitan di antara dataran rendah dan kaya akan sumber daya air. Oleh karena itu, area ini berpotensi untuk direstorasi menjadi area yang ramah lingkungan, misalnya, sebagai habitat hewan, atau tempat rekreasi yang menarik bagi warga setempat. Selain itu, restorasi sangat penting untuk perbaikan lingkungan hidup di kota Huainan. Ada 4 tujuan utama dalam program restorasi, yaitu kualitas tanah yang tinggi tanpa polutan, sistem air yang ramah lingkungan, sistem vegetasi dengan keanekaragaman hayati, ekosistem yang sehat dengan kemampuan restorasi alami. Untuk mencapai tujuan akhir, telah dibuat perencanaan remediasi tanah, restorasi sistem air, dan revegetasi (Hu *et al.*, 2015).

Kawasan pertambangan Pingshuo Cina merupakan basis produksi batu bara terbuka terbesar pada akhir abad ke-20. Luas wilayah ini adalah 517,48 km², yang sebagian besar mencakup tiga tambang batu bara besar yaitu wilayah pertambangan Antaibao, Anjialing, dan East Opencast. Sebagai kawasan tambang batu bara terbuka terbesar di Cina, kawasan ini merupakan kawasan yang rentan secara ekologis di Dataran Tinggi Loess, dan kemampuan ekosistem untuk melawan kesulitan sangat buruk (Shrestha & Lal, 2010; Zhou *et al.*, 2017). Kawasan pertambangan Pingshuo Cina menerapkan banyak kebijakan dan tindakan reklamasi dari tahun 1986 hingga 2015, yang meningkatkan cakupan vegetasi lokal secara signifikan. Setelah tahun 2011, tutupan vegetasi di kawasan pertambangan Pingshuo Cina mengalami peningkatan yang signifikan akibat restorasi dengan revegetasi. Pada saat yang sama, periode reklamasi yang panjang juga mendukung restorasi vegetasi. Kegiatan reklamasi mempunyai arti langsung dan penting bagi pemulihan lingkungan ekologis di wilayah pertambangan. Setelah tahun 2009, wilayah pertambangan Pingshuo

akan mereklamasi wilayah yang rusak akibat penambangan dengan laju 200 hm² per tahun. Pada tahun 2011, total lahan yang direklamasi di area pertambangan Pingshuo adalah 2.400 hm², yang mencakup lebih dari 50% luas lahan yang rusak. lahan garapan yang direklamasi dan 200 hm² lahan garapan yang akan direklamasi. Pada akhir tahun 2016, Perusahaan Pingshuo telah menginvestasikan total 2,095 miliar yuan untuk penghijauan dan reklamasi, dan 920 juta yuan untuk penghijauan di area pertambangan dan sekitarnya, dan area penghijauan yang telah selesai seluas sekitar 4000 hm²; Area penambangan terbuka telah menginvestasikan 665 juta yuan dalam reklamasi, dan luas lahan reklamasi sekitar 2667 hm², dimana 1667 hm² hutan dan padang rumput serta 1000 hm² lahan budidaya telah dipulihkan. Tingkat reklamasi lahan di area pertambangan telah mencapai lebih dari 90%, pemulihan ekologi melalui kombinasi pepohonan, semak dan rerumputan, dan tingkat tutupan vegetasi di lahan bekas tambang batu bara di Pingshuo Cina mencapai lebih dari 95% (M. Zhang et al., 2023). Hal ini menunjukkan salah satu upaya restorasi lahan bekas tambang batu bara yang dilakukan oleh Cina cukup berhasil.

3.3 Analisis

Penambangan batu bara *opencast* mempunyai serangkaian konsekuensi terhadap sumber daya lahan dan memberikan tekanan yang sangat besar terhadap lingkungan ekologis. Pengupasan, penggalian, pengangkutan dan pembuangan mempunyai pengaruh yang berbeda-beda terhadap sifat fisik, kimia dan biologi tanah. Selain itu, bentang alam yang direkonstruksi menghasilkan peningkatan heterogenitas spasial skala kecil pada tanah bekas tambang. Saat ini, meningkatnya kekhawatiran terhadap dampak negatif pertambangan telah menyoroti pentingnya reklamasi dalam studi tanah tambang. Tinjauan ini telah mengkaji mekanisme penambangan batu bara dan reklamasi yang mempengaruhi sifat-sifat tanah (fisik, kimia, biologi) dan menjelaskan perkembangan tanah dalam reklamasi, dengan penekanan pada sifat-sifat tanah tambang yang direklamasi (RMS) di lokasi reklamasi. Proses penambangan yang sangat mekanis banyak digunakan dalam penambangan permukaan karena umumnya memberikan pendekatan yang efisien untuk mencapai produksi yang tinggi. Namun produksi yang tinggi juga berhubungan dengan produksi sampah dalam jumlah besar. Selama penambangan permukaan, bahan galian dari kedalaman 0-200 m dikupas dan sifat fisik dan kimianya sangat bervariasi, seperti kepadatan tanah, kapasitas menahan air, dan kapasitas menyerap air (Feng et al., 2019).

Pemulihan tanah tambang adalah topik dunia yang telah menarik perhatian para ilmuwan selama beberapa dekade. Proses penambangan batu bara permukaan pasti menyebabkan degradasi tanah tambang. Faktor-faktor seperti pemadatan tanah, kontaminasi, pelapukan dan bioturbasi mengakibatkan perubahan drastis pada horizon tanah, tekstur, sifat hidrolik, dan produktivitas. Tindakan penambangan dan reklamasi yang tidak tepat dapat memperburuk kerusakan fungsi tanah tambang. Kompleksitas dan kerentanan wilayah pertambangan membuat studi dan praktik reklamasi menjadi sulit; oleh karena itu, diperlukan penelitian yang lebih komprehensif. Di sebagian besar lokasi pertambangan, tujuan pemulihan RMS adalah untuk menghasilkan sistem kehutanan atau pertanian. Sistem RMS, sistem alam, dan sistem antropogenik saling terkait. Kombinasi sistem pengelolaan yang berbeda ini memberikan banyak manfaat, terutama di wilayah pertambangan yang rusak parah. Hasil ekonomi dan perlindungan lingkungan didorong dalam praktik reklamasi modern. Selain itu, perhatian lebih harus diberikan pada dampak alami dan buatan terhadap proses penambangan dan reklamasi secara menyeluruh.

Lahan pertambangan batu bara yang mengintegrasikan kawasan lindung lokal seperti perlindungan sungai, anak sungai dan danau, konservasi keanekaragaman hayati, dan kawasan budidaya dalam satu lanskap dapat diterapkan. Melalui beragam penggunaan lahan, lahan bekas tambang dapat dimanfaatkan sebagai kawasan alam utuh yang dapat dimanfaatkan untuk 'agroekowisata'. Berbagai usaha di bidang budidaya, seperti hutan tanaman, budidaya tanaman kayu putih, budidaya perikanan, dan peternakan sapi, harus dikembangkan dan menghasilkan keuntungan. Potensi keuntungan sebelum pajak hingga

penutupan tambang pada tahun 2043 berjumlah USD 91.295.530. Beragamnya bentuk budidaya pada lahan bekas tambang batu bara dapat menjadi sumber perekonomian baru pada lahan bekas tambang untuk menjaga kondisi sosial dan memberikan keseimbangan masyarakat dan lingkungan dalam jangka panjang (Kodir *et al.*, 2017).

4. Kesimpulan

Manajemen lingkungan berbasis pembangunan berkelanjutan, manajemen lingkungan berbasis barang dan jasa ekosistem, menerapkan nilai ekonomi dari barang dan jasa ekosistem untuk pembangunan berkelanjutan di industri pertambangan, menerapkan pertambangan berkelanjutan, dan remediasi lahan pasca tambang secara ramah lingkungan dengan fitoremediasi adalah beberapa upaya yang dapat dilakukan pemerintah dalam mengelola sumber daya alam dalam industri pertambangan batu bara dengan memperhatikan lingkungan sehingga terwujud konsep berkelanjutan. Pemerintah dapat belajar dari kasus pengelolaan sumber daya berupa pertambangan batu bara di negara lain seperti Inggris dan Cina supaya dapat terhindar dari masalah lingkungan yang dapat ditimbulkan dari industri pertambangan batu bara. Dengan belajar dari kasus pengelolaan sumber daya alam berupa pertambangan batu bara di negara lain, pemerintah dapat melakukan upaya restorasi lahan pascatambang yang lebih terkendali dan berkelanjutan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim IASSSF karena telah mendukung penulisan penelitian ini.

Kontribusi Penulis

Semua penulis berkontribusi penuh atas penulisan artikel ini.

Pendanaan

Penelitian ini tidak menggunakan pendanaan eksternal.

Pernyataan Dewan Peninjau Etis

Tidak berlaku.

Pernyataan *Informed Consent*

Tidak berlaku.

Pernyataan Ketersediaan Data

Tidak berlaku.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

Akses Terbuka

©2024. Artikel ini dilisensikan di bawah Lisensi Internasional Creative Commons Attribution 4.0, yang mengizinkan penggunaan, berbagi, adaptasi, distribusi, dan reproduksi dalam media atau format apa pun. selama Anda memberikan kredit yang sesuai kepada penulis asli dan sumbernya, berikan tautan ke lisensi Creative Commons, dan tunjukkan jika

ada perubahan. Gambar atau materi pihak ketiga lainnya dalam artikel ini termasuk dalam lisensi Creative Commons artikel tersebut, kecuali dinyatakan lain dalam batas kredit materi tersebut. Jika materi tidak termasuk dalam lisensi Creative Commons artikel dan tujuan penggunaan Anda tidak diizinkan oleh peraturan perundang-undangan atau melebihi penggunaan yang diizinkan, Anda harus mendapatkan izin langsung dari pemegang hak cipta. Untuk melihat salinan lisensi ini, kunjungi: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Daftar Pustaka

- Afin, A. P., & Kiono, B. F. T. (2021). Potensi Energi Batubara serta Pemanfaatan dan Teknologinya di Indonesia Tahun 2020 – 2050 : Gasifikasi Batubara. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 2(2), 144–122. <https://doi.org/10.14710/jebt.2021.11429>
- Ahirwal, J., & Pandey, V. C. (2021). Restoration of mine degraded land for sustainable environmental development. *Restoration Ecology*, 29(4). <https://doi.org/10.1111/rec.13268>
- Bandyopadhyay, S., & Maiti, S. K. (2022). Steering restoration of coal mining degraded ecosystem to achieve sustainable development goal-13 (climate action): United Nations decade of ecosystem restoration (2021–2030). *Environmental Science and Pollution Research*, 29(59), 88383–88409. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23699-x>
- Baral, H., Guariguata, M. R., & Keenan, R. J. (2016). A proposed framework for assessing ecosystem goods and services from planted forests. *Ecosystem Services*, 22(December 2015), 260–268. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.10.002>
- Baskoro, F. R., Takahashi, K., Morikawa, K., & Nagasawa, K. (2021). System dynamics approach in determining coal utilization scenario in Indonesia. *Resources Policy*, 73, 102209. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102209>
- Bian, Z., Dong, J., Lei, S., Leng, H., Mu, S., & Wang, H. (2009). The impact of disposal and treatment of coal mining wastes on environment and farmland. *Environmental Geology*, 58(3), 625–634. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1537-0>
- Brodny, J., & Tutak, M. (2022). Challenges of the polish coal mining industry on its way to innovative and sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 375, 134061. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134061>
- Brown, B., & Spiegel, S. J. (2017). Resisting coal: Hydrocarbon politics and assemblages of protest in the UK and Indonesia. *Geoforum*, 85(June), 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.07.015>
- Burger, J. A., & Zipper, C. E. (2018). *How to restore forests on surface-mined land*.
- Carrasco, L. R., Nghiem, T. P. L., Sunderland, T., & Koh, L. P. (2014). Economic valuation of ecosystem services fails to capture biodiversity value of tropical forests. *Biological Conservation*, 178, 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.08.007>
- Chiu, Y., Huang, K.-Y., Chang, T.-H., & Lin, T.-Y. (2021). Efficiency assessment of coal mine use and land restoration: Considering climate change and income differences. *Resources Policy*, 73, 102130. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102130>
- de Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., Christie, M., Crossman, N., Ghermandi, A., Hein, L., Hussain, S., Kumar, P., McVittie, A., Portela, R., Rodriguez, L. C., ten Brink, P., & van Beukering, P. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 1(1), 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005>

- del Mar Montiel-Rozas, M., Panettieri, M., Madejón, P., & Madejón, E. (2016). Carbon Sequestration in Restored Soils by Applying Organic Amendments. *Land Degradation and Development*, 27(3), 620–629. <https://doi.org/10.1002/ldr.2466>
- Dowarah, J., Deka Boruah, H. P., Gogoi, J., Pathak, N., Saikia, N., & Handique, A. K. (2009). Eco-restoration of a high-sulphur coal mine overburden dumping site in northeast India: A case study. *Journal of Earth System Science*, 118(5), 597–608. <https://doi.org/10.1007/s12040-009-0042-5>
- Fang, Y., Singh, B. P., Collins, D., Armstrong, R., Van Zwieten, L., & Tavakkoli, E. (2020). Nutrient stoichiometry and labile carbon content of organic amendments control microbial biomass and carbon-use efficiency in a poorly structured sodic-subsoil. *Biology and Fertility of Soils*, 56(2), 219–233. <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01413-3>
- Feng, Y., Wang, J., Bai, Z., & Reading, L. (2019). Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review. *Earth-Science Reviews*, 191, 12–25. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.015>
- Ghose, M. K., & Majee, S. R. (2000). Assessment of dust generation due to opencast coal mining - An Indian case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 61(2), 255–263. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0034104763&partnerID=40&md5=1a650f061e7bbc7df995339332b75f89>
- Gilberthorpe, E., & Banks, G. (2012). Development on whose terms?: CSR discourse and social realities in Papua New Guinea's extractive industries sector. *Resources Policy*, 37(2), 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2011.09.005>
- Hermawan, B. (2011). Peningkatan Kualitas Lahan Bekas Tambang melalui Revegetasi dan Kesesuaiannya Sebagai Lahan Pertanian Tanaman Pangan. *Prosiding Seminar Nasional Budidaya Pertanian*, 60–70. <https://core.ac.uk/download/pdf/35319567.pdf>
- Hirons, M., Hilson, G., Asase, A., & Hodson, M. E. (2014). Mining in a changing climate: What scope for forestry-based legacies? *Journal of Cleaner Production*, 84(1), 430–438. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.025>
- Hu, Z., Fu, Y., Xiao, W., Zhao, Y., & Wei, T. (2015). Ecological restoration plan for abandoned underground coal mine site in Eastern China. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 29(4), 316–330. <https://doi.org/10.1080/17480930.2014.1000645>
- Iskandar, I., Suryaningtyas, D. T., Baskoro, D. P. T., Budi, S. W., Gozali, I., Saridi, S., Masyhuri, M., & Dultz, S. (2022). The regulatory role of mine soil properties in the growth of revegetation plants in the post-mine landscape of East Kalimantan. *Ecological Indicators*, 139, 108877. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108877>
- Johnston, D., Potter, H., Jones, C., Rolley, S., Watson, I., & Pritchard, J. (2008). Abandoned mines and the water environment. In *Science Report* (Issue SC030136/SR41\rSCHO0508BNZS-E-P). http://mwen.info/docs/imwa_2008/IMWA2008_128_Johnston.pdf
- Juwarkar, A. A., & Jambhulkar, H. P. (2008). Phytoremediation of coal mine spoil dump through integrated biotechnological approach. *Bioresource Technology*, 99(11), 4732–4741. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.060>
- Kodir, A., Hartono, D. M., Haeruman, H., & Mansur, I. (2017). Integrated post mining landscape for sustainable land use: A case study in South Sumatera, Indonesia. *Sustainable Environment Research*, 27(4), 203–213. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.03.003>
- Kubiszewski, I., Costanza, R., Anderson, S., & Sutton, P. (2017). The future value of ecosystem services: Global scenarios and national implications. *Ecosystem Services*, 26, 289–301. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.05.004>

- Kurniawan, R., Saputra, A. M. W., Wijayanto, A. W., & Caesarendra, W. (2022). Eco-environment vulnerability assessment using remote sensing approach in East Kalimantan, Indonesia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27, 100791. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100791>
- Li, G., Hu, Z., Li, P., Yuan, D., Feng, Z., Wang, W., & Fu, Y. (2022). Innovation for sustainable mining: Integrated planning of underground coal mining and mine reclamation. *Journal of Cleaner Production*, 351, 131522. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131522>
- Li, H., Shao, H., Li, W., Bi, R., & Bai, Z. (2012). Improving Soil Enzyme Activities and Related Quality Properties of Reclaimed Soil by Applying Weathered Coal in Opencast-Mining Areas of the Chinese Loess Plateau. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 40(3), 233–238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/clen.201000579>
- Li, Y., Chiu, Y., & Lin, T.-Y. (2019). Coal production efficiency and land destruction in China's coal mining industry. *Resources Policy*, 63, 101449. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101449>
- Li, Y., Chiu, Y., Liu, Y., Lin, T.-Y., & Chang, T.-H. (2020). The impact of the media and environmental pollution on the economy and health using a modified meta 2-stage EBM Malmquist model. *INQUIRY: The Journal of Health Care Organization, Provision, and Financing*, 57, 0046958020921070. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0046958020921070>
- Li, Y., Chiu, Y., Wang, L., Zhou, Y., & Lin, T.-Y. (2020). Dynamic and network slack-based measure analysis of China's regional energy and air pollution reduction efficiencies. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119546. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119546>
- Lin, B., & Zhu, J. (2017). Energy and carbon intensity in China during the urbanization and industrialization process: A panel VAR approach. *Journal of Cleaner Production*, 168(2017), 780–790. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.013>
- Maiti, S. K. (2013). Ecorestoration of the coalmine degraded lands. *Ecorestoration of the Coalmine Degraded Lands*. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-0851-8>
- O'Connor, D., Zheng, X., Hou, D., Shen, Z., Li, G., Miao, G., O'Connell, S., & Guo, M. (2019). Phytoremediation: Climate change resilience and sustainability assessment at a coastal brownfield redevelopment. *Environment International*, 130(April). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104945>
- Oktorina, S. (2018). Kebijakan Reklamasi Dan Revegetasi Lahan Bekas Tambang (Studi Kasus Tambang Batubara Indonesia). *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*, 4(1), 16–20. <https://doi.org/10.29080/alard.v4i1.411>
- Patiung, O., Sinukaban, N., Tarigan, S. D., & Darusman, D. (2011). Pengaruh Umur Reklamasi Lahan Bekas Tambang Batubara Terhadap Fungsi Hidrologis. *Hidrolitan*, 2(2), 60–73.
- Putra, G., & Maulud, A. R. (2020). Peramalan Kebutuhan Batubara Menggunakan Metode Single Exponential Smoothing di PT . Solusi Bangun Andalas. *Jurnal Optimalisasi*, 6, 131–141. <https://core.ac.uk/download/pdf/336875966.pdf>
- Resosudarmo, B. P., Resosudarmo, I. A. P., Sarosa, W., & Subiman, N. L. (2009). Socioeconomic conflicts in Indonesia's mining industry. *Exploiting Natural Resources: Growth, Instability, and Conflict in the Middle East and Asia*, Washington, DC: The Henry L. Stimson Center, 33–48. <https://www.jstor.org/stable/pdf/resrep10917.8.pdf>
- Sannigrahi, S., Chakraborti, S., Joshi, P. K., Keesstra, S., Sen, S., Paul, S. K., Kreuter, U., Sutton, P. C., Jha, S., & Dang, K. B. (2019). Ecosystem service value assessment of a natural reserve region for strengthening protection and conservation. *Journal of Environmental Management*, 244(November 2018), 208–227. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.095>

- Shao, Y., Xu, Q., & Wei, X. (2023). Progress of Mine Land Reclamation and Ecological Restoration Research Based on Bibliometric Analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/su151310458>
- Sheoran, V., Sheoran, A. S., & Poonia, P. (2010). Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, 3(2), 13. <https://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1107&context=intljssw>
- Shrestha, R. K., & Lal, R. (2010). Carbon and nitrogen pools in reclaimed land under forest and pasture ecosystems in Ohio, USA. *Geoderma*, 157(3), 196–205. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.013>
- Sinadia, H. (2020). *Outlook Industri Pertambangan Batubara Nasional ditengah Transisi Energi*. 1–27.
- Taheri, W. I., & Bever, J. D. (2010). Adaptation of plants and arbuscular mycorrhizal fungi to coal tailings in Indiana. *Applied Soil Ecology*, 45(3), 138–143. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.03.004>
- Tawaraya, K., & Turjaman, M. (2014). Use of arbuscular mycorrhizal fungi for reforestation of degraded tropical forests. In *Mycorrhizal Fungi: Use in Sustainable Agriculture and Land Restoration* (pp. 357–373). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-45370-4_22
- Toumbourou, T., Muhdar, M., Werner, T., & Bebbington, A. (2020). Political ecologies of the post-mining landscape: Activism, resistance, and legal struggles over Kalimantan's coal mines. *Energy Research and Social Science*, 65(September 2019), 101476. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101476>
- Tripathi, N., Singh, R. S., & Hills, C. D. (2016). Soil carbon development in rejuvenated Indian coal mine spoil. *Ecological Engineering*, 90, 482–490. <https://doi.org/10.1016/j.ECOLENG.2016.01.019>
- Verstegen, J. A., van der Laan, C., Dekker, S. C., Faaij, A. P. C., & Santos, M. J. (2019). Recent and projected impacts of land use and land cover changes on carbon stocks and biodiversity in East Kalimantan, Indonesia. *Ecological Indicators*, 103, 563–575. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.053>
- Wu, Y. (2019). Coal Resources Distribution and Its Influence on Industrial Development and Underground Water in UK. *Journal of Coastal Research*, 93(sp1), 97–101. <https://doi.org/10.2112/SI93-014.1>
- Wulandari, D., Saridi, Cheng, W., & Tawaraya, K. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungal inoculation improves Albizia saman and Paraserianthes falcataria growth in post-opencast coal mine field in East Kalimantan, Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 376, 67–73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.008>
- Yuan, M., Ouyang, J., Zheng, S., Tian, Y., Sun, R., Bao, R., Li, T., Yu, T., Li, S., Wu, D., Liu, Y., Xu, C., & Zhu, Y. (2022). Research on Ecological Effect Assessment Method of Ecological Restoration of Open-Pit Coal Mines in Alpine Regions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13). <https://doi.org/10.3390/ijerph19137682>
- Zhang, B. H., & Xu, Y. T. (2012). Analyzing ecological environmental effect of coal mine closure. *Applied Mechanics and Materials*, 209, 1183–1189. <https://www.scientific.net/AMM.209-211.1183>
- Zhang, M., Wang, J., Zhang, Y., & Wang, J. (2023). Ecological response of land use change in a large opencast coal mine area of China. *Resources Policy*, 82, 103551. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103551>
- Zhou, W., Yang, K., Bai, Z., Cheng, H., & Liu, F. (2017). The development of topsoil properties under different reclaimed land uses in the Pingshuo opencast coalmine of Loess

Plateau of China. *Ecological Engineering*, 100, 237–245.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.12.028>

Biografi Penulis

ASSYIFA FAUZIA, Magister Ilmu Lingkungan, Sekolah Ilmu Lingkungan, Universitas Indonesia.

- Email: assyifa.fauzia21@ui.ac.id
- ORCID: -
- Web of Science ResearcherID: -
- Scopus Author ID: -
- Homepage: -

MUHAMMAD NABIL MAKARIM, Magister Ilmu Lingkungan, Sekolah Ilmu Lingkungan, Universitas Indonesia

- Email: muhammad.nabil28@ui.ac.id
- ORCID: -
- Web of Science ResearcherID: -
- Scopus Author ID: -
- Homepage: -