



Pemanfaatan Limbah Pertambangan dan Industri Mineral sebagai Material Geopolimer untuk Aplikasi Konstruksi Tambang Berkelanjutan: Kajian Literatur Berbasis Studi Eksperimental

Venty Lestari¹, Andrawina²

¹⁻²Departemen Teknik Pertambangan dan Geologi, Universitas Sriwijaya, Indonesia

Email Korespondensi: ventylestari@unsri.ac.id

Abstract. Mining and mineral processing wastes, such as tailings, fly ash, red mud, slag, and coal gangue, have the potential to be utilized as geopolimer materials to support sustainable mine construction. This article aims to review the utilization of mining and mineral processing wastes as geopolimer materials based on experimental research articles. The review was conducted by searching and analyzing 15 research articles that discuss material characteristics, compressive strength, microstructure, reaction products, heavy metal leaching, and the applications of waste-based geopolimers. The findings show that aluminosilicate-based wastes can be used as precursors, substitution materials, fillers, or supporting components in geopolimer systems. Reaction products such as N-A-S-H, C-S-H, and C-A-S-H play an important role in forming the binding matrix, increasing microstructural density, and improving material strength. Waste-based geopolimers also have potential applications as building materials, mortars, road subgrade materials, cemented paste backfill, and hazardous waste stabilization materials. In addition, the geopolimerization process can support heavy metal immobilization through physical encapsulation, chemical binding, adsorption, precipitation, and ion substitution mechanisms. However, its application in Indonesia still requires further studies related to local waste characterization, mix optimization, long-term durability, leaching behavior, technical standards, and economic and environmental feasibility.

Keywords: Geopolimer; Mining Waste; Red Mud; Sustainable Mine Construction; Tailings.

Abstrak. Limbah pertambangan dan industri mineral, seperti tailing, fly ash, red mud, slag, dan coal gangue, berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan geopolimer untuk mendukung konstruksi tambang berkelanjutan. Artikel ini bertujuan mengkaji pemanfaatan limbah pertambangan dan industri mineral sebagai material geopolimer berdasarkan artikel penelitian eksperimental. Kajian dilakukan melalui penelusuran dan analisis terhadap artikel penelitian yang membahas karakteristik bahan, kuat tekan, mikrostruktur, produk reaksi, pelindian logam berat, serta aplikasi geopolimer berbasis limbah. Hasil kajian menunjukkan bahwa limbah berbasis aluminosilikat dapat digunakan sebagai prekursor, bahan substitusi, filler, maupun bahan pendukung dalam sistem geopolimer. Produk reaksi seperti N-A-S-H, C-S-H, dan C-A-S-H berperan dalam pembentukan matriks pengikat, peningkatan kepadatan mikrostruktur, serta perkembangan kekuatan material. Geopolimer berbasis limbah juga berpotensi diterapkan sebagai material bangunan, mortar, road subgrade, cemented paste backfill, dan material stabilisasi limbah berbahaya. Selain itu, proses geopolimerisasi dapat membantu immobilisasi logam berat melalui enkapsulasi fisik, pengikatan kimia, adsorpsi, presipitasi, dan substitusi ion. Namun, penerapannya di Indonesia masih memerlukan kajian lanjutan terkait karakterisasi limbah lokal, optimasi campuran, durabilitas jangka panjang, uji pelindian, standar teknis, serta kelayakan ekonomi dan lingkungan.

Kata kunci: Geopolimer; Konstruksi Tambang Berkelanjutan; Limbah Pertambangan; Lumpur Merah; Tailing.

1. PENDAHULUAN

Kegiatan pertambangan memiliki peran penting dalam mendukung ketersediaan bahan baku mineral, energi, dan material industri. Namun, kegiatan ini juga menghasilkan limbah padat dalam jumlah besar yang dapat menimbulkan persoalan lingkungan. Jenis limbah yang umum dihasilkan antara lain tailing, batuan sisa, coal gangue, fly ash, bottom ash, slag metalurgi, red mud, serta residu pengolahan mineral lainnya. Di antara limbah tersebut, tailing merupakan salah satu limbah utama karena dihasilkan setelah mineral berharga dipisahkan dari

bijihnya. Apabila tidak dikelola dengan baik, *tailing* dapat menyebabkan kebutuhan lahan penimbunan yang luas, pencemaran air permukaan dan air tanah, serta potensi pelepasan unsur berbahaya melalui proses pelindian.

Permasalahan pengelolaan limbah pertambangan tidak hanya berkaitan dengan volume limbah, tetapi juga dipengaruhi oleh karakteristik fisik, kimia, dan mineraloginya. Beberapa jenis *tailing* dapat mengandung unsur berbahaya, seperti arsenik (As), timbal (Pb), kadmium (Cd), merkuri (Hg), besi (Fe), tembaga (Cu), seng (Zn), dan logam lainnya. Unsur-unsur tersebut berpotensi berpindah ke lingkungan apabila *tailing* mengalami pelindian, oksidasi mineral sulfida, atau kontak langsung dengan air hujan dan air tanah. Oleh karena itu, pengelolaan limbah pertambangan perlu diarahkan tidak hanya pada penimbunan, tetapi juga pada pemanfaatan limbah sebagai material bernilai guna untuk mendukung praktik pertambangan berkelanjutan.

Salah satu teknologi yang berpotensi digunakan untuk memanfaatkan limbah pertambangan dan industri mineral adalah geopolimerisasi. Geopolimer merupakan material pengikat anorganik yang terbentuk melalui reaksi aktivasi alkali terhadap bahan kaya silika dan alumina. Bahan baku geopolimer dapat berasal dari material alam maupun limbah industri, seperti *fly ash*, slag, metakaolin, *red mud*, *tailing* tambang, dan abu hasil pembakaran. Dalam proses geopolimerisasi, silika dan alumina larut dalam kondisi alkali, kemudian mengalami polimerisasi dan membentuk jaringan aluminosilikat yang berperan sebagai matriks pengikat serta memberikan sifat mekanik pada material.

Pemanfaatan limbah sebagai bahan dasar geopolimer memberikan dua manfaat utama. Pertama, teknologi ini dapat mengurangi jumlah limbah yang harus ditimbun di lingkungan. Kedua, geopolimer dapat dikembangkan sebagai material konstruksi alternatif yang berpotensi menggantikan sebagian penggunaan semen Portland. Hal ini relevan karena industri semen dikenal sebagai salah satu penyumbang emisi karbon yang cukup besar. Dalam konteks pertambangan, geopolimer berbasis limbah dapat diarahkan untuk berbagai aplikasi, seperti material bangunan, bata, *paving block*, mortar, agregat ringan, material *subgrade*, *cemented paste backfill*, material reklamasi, serta stabilisasi limbah berbahaya.

Sejumlah penelitian eksperimental menunjukkan bahwa *tailing* tambang dapat digunakan sebagai bahan dasar geopolimer. Opiso et al., (2021) meneliti pemanfaatan *tailing* tambang emas skala kecil yang dimodifikasi menggunakan *coal fly ash* dan *palm oil fuel ash*, serta memanfaatkan *sugar mill lime sludge* sebagai aktivator berbasis kalsium. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa geopolimerisasi mampu menstabilisasi *tailing* dan menurunkan pelindian As, Pb, dan Fe. Palma et al., (2024) juga melaporkan bahwa geopolimer berbasis

tailing dengan penambahan metakaolin dan pumice dapat meningkatkan kekuatan mekanik serta membantu immobilisasi logam berat seperti As, Cd, Pb, dan Hg. Temuan tersebut menunjukkan bahwa *tailing* tidak hanya dipandang sebagai limbah, tetapi juga berpotensi menjadi bahan baku alternatif dalam pengembangan material berkelanjutan.

Selain *tailing*, *fly ash* dan *red mud* juga banyak dikaji sebagai bahan penyusun geopolimer. Tang et al., (2024) mengembangkan *cemented paste backfill* berbasis *aeolian sand*, *red mud*, dan *fly ash*, yang menunjukkan bahwa variasi komposisi *red mud* dan *fly ash* memengaruhi sifat alir, kuat tekan, mikrostruktur, serta pelindian logam berat. Wang et al., (2023) juga meneliti *geopolymer backfill paste* berbasis berbagai limbah padat industri dan menunjukkan bahwa material tersebut dapat memenuhi kebutuhan kuat tekan minimum untuk aplikasi *backfill*. Hasil-hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa geopolimer berbasis limbah memiliki peluang besar untuk dikembangkan sebagai material fungsional dalam kegiatan pertambangan.

Berdasarkan uraian tersebut, artikel ini bertujuan untuk mengkaji pemanfaatan limbah pertambangan dan industri mineral sebagai material geopolimer dalam mendukung konstruksi tambang berkelanjutan. Kajian ini disusun berdasarkan artikel penelitian eksperimental, sehingga pembahasan difokuskan pada hasil pengujian langsung terkait karakteristik bahan, kuat tekan, mikrostruktur, pelindian logam berat, dan aplikasi material. Dengan demikian, kajian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai potensi geopolimer berbasis limbah sebagai salah satu pendekatan dalam pengelolaan limbah pertambangan yang lebih bernilai guna dan ramah lingkungan.

2. METODE KAJIAN LITERATUR

Artikel ini disusun menggunakan pendekatan kajian literatur yang berfokus pada artikel penelitian eksperimental. Literatur dipilih dari artikel jurnal yang membahas pembuatan, karakterisasi, dan pengujian geopolimer berbasis limbah pertambangan maupun limbah industri mineral. Penelusuran dilakukan dengan menggunakan kata kunci yang relevan, seperti “mine tailings geopolymer”, “gold mine tailings geopolymer”, “copper mine tailing geopolymer”, “molybdenum tailings fly ash geopolymer”, “red mud fly ash geopolymer”, “geopolymer backfill paste”, “cemented paste backfill red mud fly ash”, “geopolymer heavy metal immobilization”, “fly ash red mud geopolymer”, dan “road subgrade red mud fly ash”. Literatur yang digunakan berasal dari artikel penelitian yang dapat diakses melalui laman resmi jurnal dan berbasis data ilmiah kredibel.

Artikel yang digunakan dalam kajian ini merupakan artikel penelitian atau original research yang membahas pemanfaatan limbah pertambangan maupun limbah industri mineral sebagai bahan geopolimer atau material teraktivasi alkali. Artikel yang dipilih memuat hasil pengujian eksperimental, seperti kuat tekan, karakterisasi kimia dan mineralogi, analisis mikrostruktur, uji pelindian, uji toksikologi, reologi, atau durabilitas. Selain itu, artikel yang dianalisis memiliki relevansi dengan aplikasi konstruksi, backfill, subgrade, mortar, stabilisasi limbah, material bangunan, atau pengelolaan limbah tambang. Berdasarkan pertimbangan tersebut, sebanyak 15 artikel penelitian yang relevan dipilih dan dianalisis dalam kajian ini.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Konsep Dasar Geopolimer Berbasis Limbah Pertambangan

Geopolimer merupakan material pengikat anorganik yang terbentuk melalui reaksi antara bahan aluminosilikat dengan aktivator alkali. Dalam sistem geopolimer, kandungan silika dan alumina yang terdapat pada bahan baku akan larut dalam lingkungan alkali. Selanjutnya, komponen tersebut mengalami proses polikondensasi hingga membentuk jaringan aluminosilikat tiga dimensi. Produk reaksi yang dihasilkan dapat berupa gel N-A-S-H, C-A-S-H, C-S-H, atau kombinasi dari beberapa jenis gel tersebut. Jenis gel yang terbentuk sangat dipengaruhi oleh komposisi bahan baku, terutama kandungan kalsium dalam campuran.

Limbah pertambangan memiliki peluang untuk dimanfaatkan sebagai bahan geopolimer karena beberapa jenis *tailing* mengandung mineral silikat dan aluminosilikat. Namun, tingkat reaktivitas *tailing* tidak selalu sama. *Tailing* yang didominasi oleh mineral kristalin, seperti kuarsa, umumnya memiliki reaktivitas yang rendah sehingga kurang efektif dalam membentuk matriks geopolimer yang kuat apabila tidak diberi perlakuan tambahan. Oleh karena itu, berbagai penelitian menerapkan beberapa strategi untuk meningkatkan reaktivitas dan kinerja material, seperti proses penggilingan, perlakuan termal, pencampuran dengan metakaolin, *fly ash*, slag, *silica fume*, maupun penambahan bahan yang kaya kalsium.

Ilieva et al., (2024) mengkaji karakteristik *tailing* tembaga dari Bulgaria sebagai prekursor geopolimer. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *tailing* tembaga memiliki rasio Si/Al yang mendukung proses geopolimerisasi. Selain itu, sebagian besar logam berat pada *tailing* berada dalam fraksi residual sehingga mobilitasnya relatif rendah. Temuan ini menegaskan bahwa karakterisasi awal menjadi tahap penting sebelum *tailing* digunakan sebagai bahan geopolimer. Karakterisasi tersebut meliputi analisis ukuran partikel, komposisi kimia, mineralogi, reaktivitas terhadap alkali, serta potensi pelindian logam berat.

Mokhtari et al., (2025) menunjukkan bahwa tailing batubara sulfida dapat dimanfaatkan sebagai substitusi parsial metakaolin dalam sintesis geopolimer setelah melalui perlakuan mekanik dan termal. Dalam penelitian tersebut, tailing digiling hingga mencapai ukuran partikel kurang dari 5 μm , kemudian dipanaskan pada suhu 800 °C untuk meningkatkan reaktivitas aluminosilikat dan menurunkan kandungan sulfida berbahaya. Pada tingkat substitusi *tailing* sebesar 50%, geopolimer yang dihasilkan mampu mencapai kuat tekan 43,3 MPa dan kuat lentur 8,9 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa *tailing* yang awalnya memiliki reaktivitas rendah tetap berpotensi dimanfaatkan apabila melalui proses valorisasi yang tepat.

Dengan demikian, pemanfaatan limbah pertambangan sebagai bahan geopolimer tidak dapat diterapkan secara seragam pada semua jenis limbah. Setiap *tailing* memiliki komposisi kimia dan mineralogi yang berbeda sehingga membutuhkan pendekatan desain campuran yang berbeda pula. Hal ini menjadi sangat penting, terutama untuk aplikasi konstruksi tambang yang menuntut kekuatan mekanik, stabilitas volume, serta keamanan lingkungan.

***Tailing* Tambang sebagai Prekursor, Substitusi, dan Material Stabilisasi**

Tailing tambang dapat dimanfaatkan dalam sistem geopolimer sebagai prekursor utama, bahan substitusi, agregat halus, maupun *filler*. Pemanfaatan *tailing* sebagai bahan baku geopolimer berpotensi mengurangi jumlah limbah yang harus ditimbun di permukaan. Meskipun demikian, keberhasilan pemanfaatannya sangat bergantung pada kandungan aluminosilikat reaktif serta kemampuan tailing dalam membentuk gel pengikat setelah mengalami aktivasi alkali.

Opiso et al., (2021) meneliti *tailing* tambang emas skala kecil yang dimodifikasi menggunakan *coal fly ash* dan *palm oil fuel ash*. *Tailing* yang digunakan dalam penelitian tersebut mengandung mineral sulfida besi yang berasosiasi dengan unsur As, Cd, Cu, Pb, dan Zn. Setelah diproses menjadi geopolimer, material yang dihasilkan memiliki kuat tekan sebesar 7,58–7,7 MPa pada umur 14 hari. Walaupun nilai kuat tekan tersebut belum tergolong tinggi untuk aplikasi struktural berat, material ini tetap menunjukkan potensi untuk digunakan pada aplikasi konstruksi tertentu dan sebagai media stabilisasi limbah.

Salah satu aspek penting dalam penelitian Opiso et al., (2021) adalah pengujian pelindian. Hasil uji TCLP menunjukkan bahwa pelindian As, Pb, dan Fe dari material geopolimer berada pada tingkat yang rendah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa matriks geopolimer mampu mengenkapsulasi unsur-unsur berbahaya sehingga dapat menurunkan potensi pelepasannya ke lingkungan. Dengan demikian, geopolimerisasi dapat dipandang sebagai teknologi yang memiliki fungsi ganda, yaitu sebagai metode pemanfaatan limbah dan sebagai teknologi stabilisasi unsur berbahaya.

Palma et al., (2024) juga melakukan penelitian mengenai optimasi geopolimer berbasis *tailing* tambang dengan variasi persentase *binder* berupa metakaolin dan pumice. Penelitian tersebut mengevaluasi kuat tekan pada umur 7, 14, 28, dan 56 hari, serta dilengkapi dengan karakterisasi menggunakan FTIR, XRD, SEM/EDS, TGA/DTA, dan uji TCLP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa geopolimer dengan kandungan *binder* sebesar 30–50% mampu menghasilkan perkembangan kuat tekan yang baik dan berperan dalam immobilisasi logam berat. Konsentrasi As, Cd, Pb, dan Hg dalam *leachate* tercatat berada di bawah ambang batas yang digunakan dalam penelitian tersebut.

Tailing et al., (2022) membandingkan komposit geopolimer berbasis *volcanic ash* yang dikombinasikan dengan *fly ash*, pozzolan, metakaolin, dan *mining tailing*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi serta karakteristik mineralogi bahan baku sangat memengaruhi proses geopolimerisasi dan kuat tekan material. Campuran *volcanic ash*–pozzolan mampu menghasilkan kuat tekan hingga 35 MPa, sedangkan campuran dengan bahan lain menunjukkan hasil yang bervariasi bergantung pada tingkat reaktivitas dan kandungan aluminosilikatnya. Temuan ini memperkuat bahwa *tailing* tambang perlu dikombinasikan dengan material lain apabila memiliki reaktivitas yang terbatas.

Peran *Fly Ash* dalam Sistem Geopolimer Berbasis Limbah

Fly ash merupakan salah satu limbah industri yang paling banyak dimanfaatkan dalam sistem geopolimer karena memiliki kandungan silika dan alumina dalam bentuk yang relatif reaktif. Pada sistem geopolimer berbasis *tailing*, *fly ash* dapat berfungsi sebagai sumber aluminosilikat tambahan, memperbaiki rasio Si/Al, mendukung pembentukan gel pengikat, serta meningkatkan kepadatan mikrostruktur. Selain itu, keberadaan *fly ash* juga dapat membantu menurunkan porositas dan meningkatkan kuat tekan material.

Opiso et al., (2021) menggunakan *coal fly ash* dan *palm oil fuel ash* dalam sintesis geopolimer berbasis *tailing* tambang emas. Penambahan *fly ash* berperan dalam mendukung terbentuknya produk reaksi yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan dan stabilitas material. Dalam penelitian tersebut, *palm oil fuel ash* turut berperan dalam pembentukan produk C-A-S-H yang mendukung perkembangan kuat tekan. Temuan ini menunjukkan bahwa *fly ash* maupun abu industri lainnya dapat digunakan sebagai bahan tambahan untuk meningkatkan performa geopolimer berbasis *tailing*.

Li et al., (2024) meneliti geopolimer berbasis *tailing* molibdenum yang dikombinasikan dengan *fly ash*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa produk reaksi utama yang terbentuk adalah gel N-A-S-H, yang berfungsi sebagai pengikat antarpartikel. Aktivasi mekanik pada *tailing* molibdenum juga membantu memperbaiki struktur pori dan

meningkatkan kinerja material. Selain itu, penelitian tersebut mengevaluasi emisi CO₂ dan menunjukkan bahwa geopolimer berbasis tailing molibdenum dan *fly ash* berpotensi menghasilkan emisi yang lebih rendah dibandingkan *slurry* berbasis semen Portland.

Bajpai et al., (2020) mengkaji geopolimer berbasis *fly ash* yang dimodifikasi dengan *red mud* dan *silica fume*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *red mud* dan *silica fume* memengaruhi *workability*, *setting time*, densitas, penyerapan air, dan kuat tekan. *Red mud* berkontribusi terhadap peningkatan densitas pada komposisi tertentu, sedangkan *silica fume* mampu meningkatkan kuat tekan. Namun, pada kadar yang tinggi, *silica fume* dapat menurunkan *workability* dan mempercepat *setting time*. Hal ini menunjukkan bahwa rancangan campuran geopolimer perlu mempertimbangkan keseimbangan antara kekuatan, kemudahan pengerjaan, dan waktu ikat.

Dengan demikian, *fly ash* memiliki peran penting dalam pengembangan geopolimer berbasis limbah pertambangan. Meskipun demikian, kinerja *fly ash* tetap dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti komposisi kimia, kadar kalsium, ukuran partikel, kandungan fase amorf, rasio aktivator, dan kondisi *curing*. Untuk aplikasi di lapangan, *fly ash* lokal perlu dikarakterisasi terlebih dahulu sebelum digunakan dalam campuran geopolimer.

Red Mud sebagai Bahan Geopolimer dan Aktivator Alternatif

Red mud merupakan limbah yang dihasilkan dari proses Bayer pada industri alumina. Material ini umumnya mengandung Fe₂O₃, Al₂O₃, SiO₂, TiO₂, CaO, serta senyawa alkali. Kandungan alumina, silika, dan alkali di dalam *red mud* menjadikannya berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan geopolimer. Namun, pemanfaatan *red mud* juga memiliki tantangan tersendiri karena sifat alkalinitasnya yang tinggi serta adanya kandungan unsur tertentu yang berpotensi menimbulkan risiko lingkungan. Oleh karena itu, penggunaan *red mud* dalam sistem geopolimer perlu disertai dengan evaluasi terhadap aspek mekanik dan lingkungan.

Luo et al., (2026) meneliti geopolimer berbasis *red mud* dan *fly ash*. Penelitian tersebut mengevaluasi pengaruh modulus *sodium silicate* dan kadar *red mud* terhadap kuat tekan serta mikrostruktur material. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi kimia bahan baku, terutama kandungan SiO₂, Al₂O₃, dan CaO, berpengaruh terhadap perkembangan kuat tekan. Selain itu, proses polimerisasi juga terbukti mampu mengubah bentuk logam berat menjadi lebih stabil, termasuk menurunkan konsentrasi Hg. Temuan ini menunjukkan bahwa geopolimer berbasis *red mud* tidak hanya berpotensi dari sisi mekanik, tetapi juga dapat mendukung aspek keamanan lingkungan.

Yin et al., (2024) mengkaji pemanfaatan *red mud* bersama *lime-fly ash* untuk memodifikasi *silty sand* sebagai material *subgrade filling*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan meningkat seiring bertambahnya waktu curing. Nilai kuat tekan maksimum mencapai 4,72 MPa pada campuran 20% *lime-fly ash* dan 23% *red mud* setelah 90 hari curing. Selain itu, konsentrasi toksik dan indeks radionuklida mengalami penurunan dibandingkan *red mud* murni. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi *red mud* dan *fly ash* dapat meningkatkan kinerja mekanik sekaligus memperbaiki aspek lingkungan material.

Soğancı et al., (2024) meneliti penggunaan *red mud* dan *fly ash* sebagai material *road subgrade*. *Red mud* yang distabilisasi dengan *fly ash* menunjukkan peningkatan kuat tekan, modulus elastisitas, dan *California Bearing Ratio* (CBR). Hasil analisis SEM memperlihatkan terbentuknya produk sementasi, seperti gel C-S-H dan C-A-H, yang berkontribusi terhadap peningkatan sifat mekanik material. Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi *red mud* dan *fly ash* tidak hanya relevan untuk pengembangan material geopolimer, tetapi juga berpotensi diterapkan pada konstruksi jalan tambang maupun infrastruktur pendukung kegiatan pertambangan.

Gao et al., (2025) meneliti *cemented paste backfill* berbasis *coal gangue*, *fly ash*, dan semen dengan memanfaatkan *red mud* sebagai pengganti aktivator alkali. Hasil penelitian menunjukkan bahwa formulasi optimum mampu menghasilkan kuat tekan sebesar 8,23 MPa pada umur 7 hari dan 10,5 MPa pada umur 28 hari. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa *red mud* dapat berperan dalam proses aktivasi alkali. Namun, pengendalian terhadap arsenik tetap diperlukan karena kandungan As dalam bahan baku dapat memengaruhi hasil pelindian. Hal ini menegaskan bahwa pemanfaatan *red mud* harus selalu disertai dengan pengujian lingkungan yang teliti dan menyeluruh.

Geopolimer untuk *Cemented Paste Backfill*

Cemented paste backfill merupakan material pengisi yang digunakan dalam tambang bawah tanah untuk mengisi rongga bekas penambangan. Material ini berfungsi meningkatkan stabilitas massa batuan, mengurangi risiko penurunan permukaan, serta membantu pengelolaan limbah padat hasil kegiatan pertambangan. Secara konvensional, material *backfill* umumnya menggunakan semen Portland sebagai bahan pengikat. Namun, penggunaan semen Portland dapat meningkatkan biaya produksi dan berkontribusi terhadap emisi karbon. Oleh karena itu, geopolimer berbasis limbah menjadi salah satu alternatif yang menarik untuk dikembangkan dalam aplikasi *backfill*.

Tang et al., (2024) mengembangkan *cemented paste backfill* berbasis *aeolian sand*, *red mud*, dan *fly ash*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa rasio *fly ash* terhadap *red mud*

berpengaruh terhadap sifat reologi, *slump*, kuat tekan, mikrostruktur, serta pelindian logam berat. Pada komposisi tertentu, material *backfill* yang dihasilkan mampu memenuhi kebutuhan kuat tekan untuk aplikasi *backfill* dan menunjukkan hasil pelindian yang masih berada dalam batas standar yang digunakan pada penelitian tersebut. Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi beberapa limbah padat dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan material *backfill* yang fungsional.

Wang et al., (2023) meneliti *geopolymer backfill paste* berbasis berbagai limbah industri, seperti *fly ash*, *red mud*, *carbide slag*, *soda residue*, *briquette residue slag*, *granulated blast furnace slag*, *gypsum powder*, dan *lime powder*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material *backfill* tersebut memiliki kuat tekan sebesar 2,1 MPa pada umur 28 hari dengan nilai *fluidity* 201 mm. Nilai kuat tekan ini lebih tinggi dibandingkan kebutuhan minimum sebesar 0,6 MPa yang digunakan dalam studi tersebut. Produk pengikat yang terbentuk dalam sistem ini meliputi gel (N,C)-A-S-H, C-S-H, dan C-A-S-H, yang berperan dalam pembentukan struktur dan kekuatan material.

Zhao et al., (2023) juga mengkaji *backfill geopolymer paste* yang dibuat dari berbagai waste slags. Penelitian tersebut mengevaluasi stabilitas, mikrostruktur, penyusutan kering, permeabilitas, serta ketahanan terhadap serangan kimia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sampel optimum memiliki *fluidity* sebesar 201 mm dan kuat tekan 2,1 MPa pada umur 28 hari. Selain itu, material tersebut menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap penyusutan, permeabilitas, serta serangan larutan Na_2SO_4 dan NaCl dibandingkan pasta semen Portland biasa. Hal ini menunjukkan bahwa geopolimer berbasis limbah memiliki potensi untuk menggantikan sebagian material *backfill* konvensional.

Pemanfaatan geopolimer untuk aplikasi *backfill* memiliki relevansi yang tinggi dalam mendukung pertambangan berkelanjutan. Di satu sisi, teknologi ini dapat membantu mengurangi konsumsi semen Portland. Di sisi lain, geopolimer memungkinkan pemanfaatan berbagai limbah, seperti *red mud*, *fly ash*, slag, dan *coal gangue*, sebagai material pengisi tambang. Meskipun demikian, penerapan di lapangan tetap memerlukan pengujian lanjutan, terutama terkait *pumpability*, *setting time*, stabilitas volume, kuat tekan jangka panjang, serta interaksi material dengan air tanah.

Mikrostruktur dan Produk Reaksi Geopolimer

Sifat mekanik geopolimer sangat dipengaruhi oleh mikrostruktur serta jenis produk reaksi yang terbentuk selama proses geopolimerisasi. Pada sistem geopolimer berbasis *fly ash* dan tailing, produk reaksi utama yang umumnya terbentuk adalah gel N-A-S-H. Sementara itu,

pada sistem yang mengandung bahan kaya kalsium, seperti slag, *lime sludge*, *carbide slag*, atau jenis *red mud* tertentu, produk reaksi dapat berupa C-S-H, C-A-S-H, maupun kombinasi dengan gel N-A-S-H. Produk-produk reaksi tersebut berperan sebagai pengikat antarpartikel, pengisi pori, serta penentu tingkat kepadatan mikrostruktur material.

Li et al., (2024) menunjukkan bahwa gel N-A-S-H merupakan produk reaksi utama pada geopolimer berbasis *tailing* molibdenum dan *fly ash*. Gel ini berfungsi menghubungkan partikel sisa bahan baku sehingga membentuk struktur material yang lebih padat. Penelitian juga menunjukkan bahwa aktivasi mekanik mampu memperbaiki struktur pori, sehingga turut berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan material. Selain itu, hasil analisis emisi karbon menunjukkan bahwa sistem geopolimer ini memiliki potensi untuk menurunkan emisi dibandingkan material berbasis semen Portland.

Wang et al., (2023) dan Zhao et al., (2023) menunjukkan bahwa pada sistem *backfill* berbasis berbagai limbah padat, produk reaksi yang terbentuk meliputi gel (N,C)-A-S-H, C-S-H, dan C-A-S-H. Gel-gel tersebut berperan sebagai pengikat kimia, sedangkan partikel yang tidak bereaksi berfungsi sebagai kerangka pengisi secara fisik. Kombinasi antara ikatan kimia dan pengisian fisik inilah yang mendukung terbentuknya kekuatan serta stabilitas pada material *backfill*.

Long et al., (2024) meneliti perilaku antarmuka mortar geopolimer berbasis slag, *fly ash*, dan *red mud* terhadap substrat beton. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa mortar geopolimer dengan variasi komposisi slag, *fly ash*, dan *red mud* pada kondisi tertentu memiliki kuat tekan yang lebih baik dibandingkan mortar semen. Selain itu, kekuatan ikatan antarmuka meningkat seiring bertambahnya kandungan slag. Namun, peningkatan kandungan *fly ash* dan *red mud* hanya menunjukkan peningkatan performa hingga batas tertentu, kemudian mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan bahwa keseimbangan komposisi bahan menjadi faktor penting dalam menghasilkan geopolimer dengan performa yang optimal.

Bajpai et al., (2020) menunjukkan bahwa modifikasi geopolimer berbasis *fly ash* menggunakan *red mud* dan *silica fume* memengaruhi struktur mikro dan kuat tekan material. Hasil analisis XRD dan SEM memperlihatkan bahwa proses geopolimerisasi mengalami perubahan seiring dengan penambahan bahan modifikasi. Dengan demikian, karakterisasi mikrostruktur menjadi tahapan penting untuk memahami hubungan antara komposisi bahan, produk reaksi yang terbentuk, dan kinerja mekanik geopolimer.

Immobilisasi Logam Berat dan Keamanan Lingkungan

Keamanan lingkungan merupakan salah satu aspek penting dalam pemanfaatan limbah pertambangan dan industri mineral. Beberapa jenis limbah, terutama *tailing* dan *red mud*, dapat

mengandung unsur berbahaya yang berpotensi terlepas ke lingkungan melalui proses pelindian. Geopolimerisasi memiliki potensi untuk menurunkan mobilitas unsur-unsur tersebut melalui beberapa mekanisme, seperti enkapsulasi fisik, pengikatan kimia, adsorpsi pada gel, presipitasi, serta substitusi ion dalam struktur aluminosilikat.

Opiso et al., (2021) menunjukkan bahwa proses geopolimerisasi mampu menurunkan pelindian As, Pb, dan Fe dari *tailing* tambang emas skala kecil. Palma et al., (2024) juga melaporkan bahwa geopolimer berbasis *tailing* dengan penambahan *binder* dapat mengimmobilisasi logam berat seperti As, Cd, Pb, dan Hg. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa matriks geopolimer berpotensi digunakan sebagai media stabilisasi bagi limbah yang mengandung unsur berbahaya.

Luo et al., (2026) menunjukkan bahwa pada geopolimer berbasis *red mud* dan *fly ash*, proses polimerisasi dapat mengubah logam berat menjadi bentuk yang lebih stabil. Yin et al., (2024) juga melaporkan bahwa pemanfaatan *red mud* bersama *lime-fly ash* mampu menurunkan konsentrasi toksik dan indeks radionuklida dibandingkan *red mud* murni. Temuan ini menjadi penting karena *red mud* umumnya dikaitkan dengan sifat alkalinitas yang tinggi serta kandungan unsur logam tertentu yang perlu dikendalikan.

Gao et al., (2025) menegaskan bahwa material *backfill* berbasis *red mud* dapat menunjukkan kemampuan immobilisasi logam berat melalui mekanisme enkapsulasi, adsorpsi, presipitasi, dan substitusi. Namun, penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa arsenik masih perlu menjadi perhatian, terutama apabila kandungannya cukup tinggi dalam bahan baku. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah sebagai bahan geopolimer perlu selalu diawali dengan karakterisasi bahan dan dilengkapi dengan uji pelindian.

Dalam konteks penerapan di Indonesia, pengujian pelindian sangat penting karena karakteristik limbah tambang dapat berbeda-beda antarjenis komoditas. Limbah dari tambang emas, tembaga, timah, nikel, dan bauksit memiliki komposisi kimia dan mineralogi yang berbeda. Selain itu, kondisi lingkungan tropis dengan curah hujan tinggi dapat memengaruhi intensitas pelindian unsur berbahaya. Oleh sebab itu, sebelum material geopolimer berbasis limbah digunakan, diperlukan pengujian jangka panjang, seperti uji siklus basah-kering, uji pH, uji air asam tambang, dan uji pelindian berulang.

Potensi Aplikasi untuk Konstruksi Tambang Berkelanjutan

Berdasarkan hasil kajian, geopolimer berbasis limbah pertambangan dan industri mineral memiliki potensi yang cukup luas untuk diterapkan dalam konstruksi tambang. Aplikasi pertama adalah sebagai *cemented paste backfill*. Gao et al., (2025); Tang et al., (2024); Wang et al., (2023); Zhao et al., (2023) menunjukkan bahwa kombinasi *red mud*, *fly ash*, slag,

coal gangue, serta berbagai limbah padat lainnya dapat menghasilkan material *backfill* dengan kuat tekan dan sifat alir yang memadai. Aplikasi ini relevan untuk tambang bawah tanah karena dapat membantu meningkatkan stabilitas rongga bekas penambangan dan mengurangi jumlah limbah yang harus ditimbun di permukaan.

Aplikasi kedua adalah sebagai material *subgrade* dan jalan tambang. Yin et al., (2024) menunjukkan bahwa *red mud* yang dikombinasikan dengan *lime-fly ash* mampu meningkatkan kuat tekan *silty sand* untuk aplikasi *subgrade filling*. Soğancı et al., (2024) juga melaporkan bahwa *red mud* yang distabilisasi menggunakan *fly ash* berpotensi digunakan sebagai material *road subgrade* karena dapat meningkatkan kuat tekan, modulus elastisitas, dan *California Bearing Ratio* (CBR). Dalam kegiatan pertambangan, jalan tambang merupakan infrastruktur penting untuk mendukung mobilitas operasional. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah sebagai material jalan dapat memberikan manfaat teknis sekaligus mengurangi beban lingkungan.

Aplikasi ketiga adalah sebagai material bangunan dan mortar. Long et al., (2024) menunjukkan bahwa mortar geopolimer berbasis slag, *fly ash*, dan *red mud* memiliki kuat tekan yang baik serta perilaku ikatan antarmuka yang menjanjikan terhadap substrat beton. Bajpai et al., (2020) juga menunjukkan bahwa geopolimer berbasis *fly ash* yang dimodifikasi dengan *red mud* dan *silica fume* dapat meningkatkan kuat tekan pada komposisi tertentu. Material seperti ini berpotensi dikembangkan menjadi bata, *paving block*, mortar perbaikan, panel, maupun elemen non-struktural lainnya.

Aplikasi keempat adalah sebagai material stabilisasi limbah berbahaya. Luo et al., (2026); Opiso et al., (2021); Palma et al., (2024) menunjukkan bahwa proses geopolimerisasi mampu menurunkan pelindian logam berat. Dengan demikian, geopolimer dapat dimanfaatkan untuk menstabilisasi tailing atau limbah industri mineral sebelum material tersebut digunakan kembali atau ditempatkan pada lingkungan tertentu.

Aplikasi kelima adalah sebagai material rendah karbon. Li et al., (2024) menunjukkan bahwa geopolimer berbasis tailing molibdenum dan *fly ash* berpotensi menghasilkan emisi CO₂ yang lebih rendah dibandingkan sistem berbasis semen Portland. Mokhtari et al., (2025) juga menunjukkan bahwa tailing yang telah melalui proses valorisasi dapat menggantikan sebagian metakaolin dan tetap menghasilkan kekuatan mekanik yang tinggi. Temuan ini mendukung arah pengembangan material konstruksi yang lebih berkelanjutan, efisien, dan sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular.

Matriks Literatur Penelitian**Tabel 1.** Matriks literatur penelitian.

No.	Peneliti	Bahan Limbah	Fokus Penelitian	Temuan Utama
1	(Opiso et al., 2021)	Tailing emas, <i>fly ash</i> , <i>lime sludge</i>	Geopolimer dan TCLP	Menurunkan pelindian As, Pb, dan Fe.
2	(Tang et al., 2024)	<i>Red mud</i> , <i>fly ash</i> , <i>aeolian sand</i>	<i>Cemented paste backfill</i>	Komposisi memengaruhi sifat alir, kuat tekan, mikrostruktur, dan pelindian.
3	(Li et al., 2024)	Tailing molibdenum, <i>fly ash</i>	Mikrostruktur dan emisi CO ₂	Gel N-A-S-H terbentuk dan berpotensi menurunkan emisi.
4	(Palma et al., 2024)	Tailing, metakaolin, pumice	Optimasi geopolimer	<i>Binder</i> 30–50% meningkatkan kuat tekan dan immobilisasi logam berat.
5	(Tailing et al., 2022)	<i>Volcanic ash</i> , <i>fly ash</i> , pozzolan, tailing	Komposit geopolimer	Komposisi dan mineralogi memengaruhi kuat tekan.
6	(Ilieva et al., 2024)	Tailing tembaga	Karakterisasi prekursor	Rasio Si/Al dan reaktivitas mendukung geopolimerisasi.
7	(Mokhtari et al., 2025)	Tailing batubara sulfida, metakaolin	Valorisasi tailing	Perlakuan termal meningkatkan potensi tailing sebagai bahan geopolimer.
8	(Wang et al., 2023)	<i>Fly ash</i> , <i>red mud</i> , <i>carbide slag</i> , GBFS	<i>Geopolymer backfill paste</i>	Kuat tekan 2,1 MPa dan <i>fluidity</i> 201 mm.
9	(Zhao et al., 2023)	<i>Fly ash</i> , slag, <i>red mud</i> , kapur	<i>Backfill</i> dan durabilitas	Stabil terhadap penyusutan, permeabilitas, dan serangan kimia.
10	(Luo et al., 2026)	<i>Red mud</i> , <i>fly ash</i>	Kuat tekan dan immobilisasi	Logam berat berubah menjadi bentuk lebih stabil.
11	(Yin et al., 2024)	<i>Red mud</i> , <i>lime-fly ash</i> , <i>silty sand</i>	<i>Subgrade filling</i>	Kuat tekan maksimum 4,72 MPa dan toksisitas menurun.
12	(Long et al., 2024)	Slag, <i>fly ash</i> , <i>red mud</i>	Mortar geopolimer	Kuat tekan dan ikatan antarmuka baik pada komposisi tertentu.
13	(Gao et al., 2025)	<i>Coal gangue</i> , <i>fly ash</i> , semen, <i>red mud</i>	<i>Cemented paste backfill</i>	<i>Red mud</i> berperan sebagai aktivator alternatif.
14	(Sogancı et al., 2024)	<i>Red mud</i> , <i>fly ash</i>	<i>Road subgrade</i>	Meningkatkan UCS, modulus elastisitas, dan CBR.
15	(Bajpai et al., 2020)	<i>Fly ash</i> , <i>red mud</i> , <i>silica fume</i>	<i>Geopolymer paste</i>	Memengaruhi <i>workability</i> , <i>setting time</i> , densitas, dan kuat tekan.

4. TANTANGAN PENERAPAN DI INDONESIA

Penerapan geopolimer berbasis limbah pertambangan dan industri mineral di Indonesia memiliki peluang yang besar, terutama karena ketersediaan limbah tambang dan limbah industri yang cukup melimpah. Namun, pemanfaatan material tersebut pada skala lapangan masih menghadapi berbagai tantangan yang perlu diperhatikan. Tantangan ini tidak hanya berkaitan dengan aspek teknis material, tetapi juga mencakup ketersediaan data karakteristik limbah, keamanan lingkungan, biaya produksi, standar teknis, serta kesiapan penerapan pada skala industri.

Tantangan pertama adalah karakteristik limbah yang sangat bervariasi antar lokasi. Tailing emas, tailing tembaga, tailing timah, slag nikel, *fly ash*, dan *red mud* memiliki komposisi kimia serta mineralogi yang berbeda-beda. Perbedaan tersebut dapat memengaruhi reaktivitas bahan, kebutuhan aktivator, jenis produk reaksi yang terbentuk, serta kuat tekan

akhir material. Oleh karena itu, karakterisasi awal menjadi tahap penting yang harus dilakukan sebelum merancang campuran geopolimer. Karakterisasi tersebut perlu mencakup komposisi kimia, mineralogi, ukuran partikel, kandungan unsur berbahaya, serta potensi pelindian.

Tantangan kedua berkaitan dengan aspek lingkungan, terutama potensi pelindian logam berat dari limbah yang digunakan. Beberapa jenis limbah tambang dapat mengandung unsur seperti As, Pb, Cd, Hg, Fe, Cu, dan Zn yang berpotensi terlepas ke lingkungan apabila tidak distabilisasi dengan baik. Kondisi lingkungan tropis di Indonesia, yang ditandai dengan curah hujan tinggi dan kelembapan besar, juga dapat mempercepat interaksi material dengan air. Oleh karena itu, pengujian pelindian, stabilitas kimia, uji pH, serta uji ketahanan terhadap siklus basah-kering perlu dilakukan sebelum material digunakan di lapangan.

Tantangan ketiga adalah penggunaan aktivator alkali, seperti NaOH dan *sodium silicate*, yang masih menjadi kendala dari aspek biaya, keselamatan kerja, dan dampak lingkungan. Aktivator alkali bersifat korosif sehingga penerapannya pada skala industri harus disertai prosedur keselamatan yang ketat. Selain itu, harga aktivator dapat memengaruhi kelayakan ekonomi produk geopolimer, terutama apabila digunakan dalam jumlah besar. Oleh karena itu, pengembangan aktivator alternatif berbasis limbah, seperti *red mud*, *lime sludge*, atau *carbide slag*, menjadi salah satu arah penelitian yang penting untuk mendukung penerapan geopolimer yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan.

Tantangan keempat adalah belum tersedianya standar teknis yang secara khusus mengatur penggunaan geopolimer berbasis limbah tambang. Standar tersebut diperlukan untuk memastikan bahwa material yang dihasilkan memenuhi persyaratan kuat tekan, durabilitas, stabilitas volume, permeabilitas, serta keamanan lingkungan. Selain itu, standar juga perlu mencakup batas pelindian logam berat dan kelayakan penggunaan material pada kondisi lapangan. Tanpa adanya standar yang jelas, penerapan geopolimer berbasis limbah akan sulit diterima oleh industri pertambangan maupun sektor konstruksi.

Tantangan kelima adalah perlunya kajian pada skala pilot untuk membuktikan bahwa teknologi geopolimer tidak hanya berhasil pada skala laboratorium, tetapi juga layak diterapkan di lapangan. Kajian skala pilot perlu mencakup proses produksi, kebutuhan energi, transportasi bahan, biaya operasional, risiko lingkungan, serta performa material dalam kondisi aktual pertambangan. Untuk aplikasi *backfill*, beberapa aspek seperti *pumpability*, *setting time*, *bleeding*, kuat tekan jangka panjang, stabilitas volume, dan interaksi dengan air tanah perlu dikaji secara lebih mendalam. Dengan demikian, pengembangan geopolimer berbasis limbah di Indonesia memerlukan pendekatan yang terintegrasi antara penelitian material, evaluasi lingkungan, analisis ekonomi, dan kesiapan regulasi.

5. ARAH PENELITIAN LANJUTAN

Berdasarkan hasil kajian yang telah dilakukan, terdapat beberapa arah penelitian lanjutan yang dapat dikembangkan untuk mendukung pemanfaatan geopolimer berbasis limbah pertambangan dan industri mineral. Pertama, diperlukan karakterisasi limbah lokal Indonesia secara menyeluruh. Beberapa jenis limbah yang potensial untuk dikaji meliputi tailing emas, tailing tembaga, tailing timah, slag nikel, *fly ash*, *bottom ash*, *red mud*, dan *coal gangue*. Karakterisasi tersebut perlu mencakup analisis XRF, XRD, SEM-EDS, FTIR, ukuran partikel, kandungan fase amorf, reaktivitas terhadap alkali, serta uji pelindian awal. Tahapan ini penting untuk mengetahui kesesuaian setiap jenis limbah sebagai bahan baku geopolimer.

Kedua, penelitian lanjutan perlu difokuskan pada optimasi komposisi campuran geopolimer. Beberapa variabel yang dapat dikaji antara lain rasio *tailing* terhadap *fly ash*, rasio *red mud* terhadap *fly ash*, kandungan slag, kadar aktivator, molaritas NaOH, rasio *sodium silicate* terhadap NaOH, suhu dan waktu *curing*, kadar air, dan ukuran partikel. Optimasi ini diperlukan untuk memperoleh material geopolimer dengan kuat tekan yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi serta kemampuan menekan pelindian logam berat.

Ketiga, pengembangan aplikasi geopolimer perlu diarahkan pada kebutuhan nyata dalam kegiatan pertambangan. Beberapa aplikasi yang potensial meliputi *cemented paste backfill*, material jalan tambang, bata, *paving block*, mortar perbaikan, material reklamasi, serta stabilisasi limbah berbahaya. Fokus pada aplikasi pertambangan akan membuat penelitian lebih relevan dengan bidang teknik pertambangan, sekaligus tetap sejalan dengan dasar keilmuan teknik material dan metalurgi.

Keempat, perlu dilakukan pengujian durabilitas jangka panjang untuk memastikan kinerja material dalam kondisi lingkungan tambang. Pengujian tersebut dapat meliputi siklus basah-kering, siklus asam-basa, ketahanan terhadap sulfat, permeabilitas, stabilitas volume, uji pelindian berulang, serta ketahanan terhadap air asam tambang. Pengujian ini menjadi penting karena material geopolimer yang digunakan di lingkungan pertambangan berpotensi terpapar kondisi kimia dan fisik yang agresif.

Kelima, penelitian lanjutan juga perlu dilengkapi dengan kajian ekonomi dan lingkungan. Kajian tersebut dapat mencakup analisis biaya bahan baku, biaya aktivator, kebutuhan energi, emisi CO₂, transportasi limbah, serta perbandingan dengan material berbasis semen Portland. Dengan adanya kajian ini, kelayakan geopolimer berbasis limbah dapat dinilai secara lebih komprehensif, baik dari aspek teknis, ekonomi, maupun keberlanjutan lingkungan.

6. KESIMPULAN

Limbah pertambangan dan industri mineral memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan geopolimer dalam mendukung konstruksi tambang berkelanjutan. Berdasarkan kajian terhadap 15 artikel penelitian eksperimental, *tailing*, *fly ash*, *red mud*, slag, dan limbah padat industri lainnya dapat digunakan sebagai bahan penyusun geopolimer untuk aplikasi material bangunan, mortar, *road subgrade*, *cemented paste backfill*, serta stabilisasi limbah berbahaya. Kinerja material tersebut sangat dipengaruhi oleh karakteristik bahan baku, jenis aktivator, komposisi campuran, dan kondisi *curing*.

Geopolimer berbasis limbah menunjukkan potensi sebagai material konstruksi alternatif dan teknologi stabilisasi limbah melalui immobilisasi logam berat dalam matriks aluminosilikat. Namun, penerapannya di Indonesia masih memerlukan kajian lanjutan yang lebih komprehensif, terutama terkait karakterisasi limbah lokal, optimasi campuran, durabilitas jangka panjang, uji pelindian, standar teknis, serta kelayakan ekonomi dan lingkungan. Dengan demikian, teknologi geopolimer berbasis limbah dapat menjadi salah satu pendekatan material berkelanjutan yang relevan untuk mendukung pengelolaan limbah dan konstruksi tambang di masa depan.

DAFTAR REFERENSI

- Bajpai, R., Srivastava, A., & Singh, M. (2020). Properties of fly ash geopolymer modified with red mud and silica fume: A comparative study. *SN Applied Sciences*, 2. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03665-3>
- Churata, R., Almirón, J., Vargas, M., Tupayachy-Quispe, D., Torres-Almirón, J., Ortiz-Valdivia, Y., & Velasco, F. (2022). Study of geopolymer composites based on volcanic ash, fly ash, pozzolan, metakaolin and mining tailing. *Buildings*, 12(8), 1118. <https://doi.org/10.3390/buildings12081118>
- Gao, L., Zhao, H., Guo, N., Jiang, X., & Zhang, Y. (2025). Mechanical and environmental properties of cemented paste backfill prepared with Bayer red mud as an alkali-activator substitute. *Materials*, 18(20), 4712. <https://doi.org/10.3390/ma18204712>
- Ilieva, D., Angelova, L., Radoykova, T., Surleva, A., Chernev, G., Vizureanu, P., Burduhos-Nergis, D., & Sandu, A. (2024). Characterization of Bulgarian copper mine tailing as a precursor for obtaining geopolymers. *Materials*, 17(3), 542. <https://doi.org/10.3390/ma17030542>
- Li, J., Liu, X., Cai, C., Li, F., Jin, H., Zhang, S., Sheng, N., Wang, T., & Ngo, T. (2024). Microstructure, strength development mechanism and CO₂ emission assessments of molybdenum tailings collaborative fly ash geopolymers. *Case Studies in Construction Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03608>

- Long, Q., Zhao, Y., Zhang, B., Yang, H., Luo, Z., Li, Z., Zhang, G., & Liu, K. (2024). Interfacial behavior of slag, fly ash, and red mud-based geopolymer mortar with concrete substrate: Mechanical properties and microstructure. *Buildings*, 14(3), 652. <https://doi.org/10.3390/buildings14030652>
- Luo, D., Du, Y., Zhang, J., Chen, F., & Song, Y. (2026). Synergistic effects of high-temperature curing and elemental conditioning on red mud-based geopolymer: Compressive strength and immobilization. *PLOS ONE*, 21, e0343975. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0343975>
- Mokhtari, P., Lin, J., Numkiatsakul, P., Koohestani, B., & Kriven, W. (2025). Valorization of mine tailings for sustainable geopolymer production. *International Journal of Ceramic Engineering & Science*. <https://doi.org/10.1002/ces2.70014>
- Opiso, E., Tabelin, C., Maestre, C. V., Aseniero, J. P. J., Park, I., & Villacorte-Tabelin, M. (2021). Synthesis and characterization of coal fly ash and palm oil fuel ash modified artisanal and small-scale gold mine (ASGM) tailings based geopolymer using sugar mill lime sludge as Ca-based activator. *Heliyon*, 7, e06654. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06654>
- Palma, G., Bolaños, H., Huamani, R., Clements, C., & Hedayat, A. (2024). Optimization of geopolymers for sustainable management of mine tailings: Impact on mechanical, microstructural, and toxicological properties. *Minerals*, 14(10), 997. <https://doi.org/10.3390/min14100997>
- Soğancı, A., Yenginar, Y., Özkan, I., Güzel, Y., & Özdemir, A. (2024). Waste management of red mud and fly ash to utilize in road subgrade material. *Sustainability*, 16(7), 2987. <https://doi.org/10.3390/su16072987>
- Tang, R., Zhao, B., Xin, J., Sun, J., Xu, B., Tian, C., Ning, J., Li, L., Shao, X., & Ren, W. (2023). Multisolid waste collaborative production of aeolian sand-red mud-fly ash cemented paste backfill. *Case Studies in Construction Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02843>
- Wang, H., Zhao, X., Wang, J., He, L., Zhang, A., Gao, H., Yang, J., & Liang, L. (2023). Properties and cementation mechanism of geopolymer backfill paste incorporating diverse industrial solid wastes. *Materials*, 16(2), 480. <https://doi.org/10.3390/ma16020480>
- Yin, S., Yan, P., Li, X., Wang, Y., Zhang, X., Sun, Y., & Chen, C. (2024). Experimental study on the strength and microstructure of red mud-based silty sand modified with lime-fly ash. *Buildings*, 14(5), 1336. <https://doi.org/10.3390/buildings14051336>
- Zhao, X., Wang, H., Gao, H., Liang, L., & Yang, J. (2023). Synthesis, stability and microstructure of a one-step mixed geopolymer backfill paste derived from diverse waste slags. *Sustainability*, 15(8), 6708. <https://doi.org/10.3390/su15086708>