

Pemanfaatan *Fly Ash* di Indonesia untuk Peningkatan Keberlanjutan di Sektor Energi, Lingkungan, dan Material Konstruksi: *Systematic Literature Review*

Setiyo Ferdi Yanuar¹, Hilfi Harisan Ahmad¹, Asroful Abidin^{2*}, Fitriana Dina Rizkina³

¹Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember
Jl. Karimata No. 49 Jember, Jawa Timur, Indonesia

²Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember
Jl. Karimata No. 49 Jember, Jawa Timur, Indonesia

³Bioresource Production Science Department, Ehime University
Matsuyama, Japan

*Corresponding author: asrofulabidinabidin@unmuhjember.ac.id

Abstract

The utilization of fly ash, a byproduct of coal combustion, has the potential to enhance sustainability in Indonesia's energy, environmental, and construction sectors. As a substitute for cement in geopolymer concrete, fly ash can reduce carbon emissions, improve material durability, and support energy efficiency. Additionally, its use helps mitigate the impact of unmanaged coal waste. However, key challenges include the presence of heavy metals, limitations in processing technology, and a lack of regulations. From an energy perspective, fly ash supports the transition toward an energy-efficient industry, while from an environmental standpoint, mitigation strategies are needed to reduce contamination risks. This study employs a Systematic Literature Review (SLR) based on the PRISMA framework, using data from Scopus to identify the potential and challenges of fly ash. The analysis results indicate a shift in research focus from physical characterization to its application in sustainable construction. The conclusion highlights the importance of stronger regulations, technological innovation, and collaboration among academia, industry, and the government. Recommendations include evidence-based policies, research on fly ash processing, and the implementation of Life Cycle Assessment (LCA) to evaluate environmental impact and energy efficiency.

Keywords: *fly ash, energy, environment, material, SLR*

Abstrak

Pemanfaatan *fly ash*, limbah pembakaran batu bara, berpotensi meningkatkan keberlanjutan sektor energi, lingkungan, dan konstruksi di Indonesia. Sebagai pengganti semen dalam beton *geopolimer*, *fly ash* dapat mengurangi emisi karbon, meningkatkan ketahanan material, serta mendukung efisiensi energi. Selain itu, penggunaannya membantu mengurangi dampak limbah batu bara yang tidak terkelola. Namun, tantangan utama meliputi kandungan logam berat, keterbatasan teknologi pengolahan, dan kurangnya regulasi. Dari sisi energi, *fly ash* mendukung transisi menuju industri hemat energi, sementara dari aspek lingkungan, diperlukan strategi mitigasi untuk mengurangi risiko pencemaran. Penelitian ini menggunakan *Systematic Literature Review* (SLR) berbasis PRISMA dengan data bersumber dari Scopus. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi potensi dan tantangan dalam pemanfaatan *fly ash*. Hasil analisis menunjukkan pergeseran fokus penelitian dari karakterisasi fisik ke aplikasinya dalam konstruksi berkelanjutan. Kesimpulan dari penelitian ini menekankan pentingnya regulasi yang lebih kuat, inovasi teknologi, serta kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah. Rekomendasi mencakup kebijakan berbasis bukti, penelitian pengolahan *fly ash*, serta Life Cycle Assessment (LCA) untuk menilai dampak lingkungan dan efisiensi energi.

Kata kunci: *fly ash, energi, lingkungan, material, SLR*

1. Pendahuluan

Fly ash merupakan produk sampingan dari pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang dihasilkan dalam jumlah besar di berbagai negara, termasuk Indonesia. Limbah ini ditangkap dari cerobong asap menggunakan

peralatan pengendalian polusi, seperti *electrostatic precipitators* atau *bag filters*, untuk mencegah pelepasannya ke atmosfer [1]–[3]. Secara komposisi, *fly ash* terdiri dari partikel halus yang mengandung kadar signifikan silikon dioksida (SiO₂) dan kalsium oksida (CaO), serta berbagai unsur beracun seperti arsenik, timbal, dan merkuri

[1], [4].

Pemanfaatan *fly ash* telah menjadi topik penting dalam berbagai sektor industri, terutama dalam konstruksi dan lingkungan. Salah satu aplikasi utama *fly ash* adalah sebagai bahan tambahan dalam produksi beton, di mana *fly ash* berperan sebagai *supplementary cementitious material* (SCM) yang dapat menggantikan sebagian semen dalam campuran beton [5]–[8]. Penggunaan *fly ash* dalam beton tidak hanya meningkatkan sifat mekanik material, seperti *compressive strength* dan ketahanan terhadap permeabilitas, tetapi juga berkontribusi dalam mengurangi emisi karbon yang dihasilkan dari produksi semen [9]. Studi menunjukkan bahwa substitusi semen dengan 10% *fly ash* mampu meningkatkan kekuatan tekan beton hingga 11,63% dan mengurangi permeabilitasnya hingga 78,3% [10].

Selain dalam industri konstruksi, *fly ash* juga memiliki manfaat dalam sektor lingkungan, terutama dalam pengolahan air limbah dan stabilisasi tanah. Sifat *adsorptifnya* memungkinkan *fly ash* digunakan untuk menghilangkan polutan dari air serta meningkatkan kualitas tanah yang terkontaminasi [11], [12]. Negara-negara seperti China telah berhasil memanfaatkan sekitar 70% dari total produksi *fly ash* mereka per tahun dengan dukungan kebijakan yang mendukung pemanfaatannya dalam sektor industri dan konstruksi [13], [14].

Di Indonesia, pemanfaatan *fly ash* masih menghadapi berbagai tantangan. Salah satunya adalah regulasi yang belum sepenuhnya mendukung pemanfaatan limbah ini dalam skala besar. Saat ini, standar yang digunakan masih merujuk pada standar internasional seperti ASTM C618, tanpa adanya regulasi nasional yang mengatur secara spesifik penerapan *fly ash* dalam industri konstruksi [15]. Ketidakjelasan regulasi ini menghambat optimalisasi pemanfaatan *fly ash* sebagai material alternatif yang lebih ramah lingkungan.

Selain aspek regulasi, tantangan lain dalam pemanfaatan *fly ash* di Indonesia adalah kandungan logam berat di dalamnya yang berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Studi yang dilakukan oleh Wang et al. (2022) menunjukkan bahwa keberadaan logam berat seperti kadmium (Cd),

kromium (Cr), dan timbal (Pb) dalam *fly ash* dapat menyebabkan kontaminasi lingkungan jika tidak dikelola dengan baik [16]. Oleh karena itu, diperlukan teknologi pengolahan yang efektif untuk mengurangi risiko tersebut sebelum *fly ash* dapat digunakan dalam aplikasi konstruksi yang lebih luas.

Dari perspektif keberlanjutan, pemanfaatan *fly ash* berkontribusi terhadap ekonomi sirkular dengan mengurangi volume limbah industri batu bara yang dibuang ke tempat pembuangan akhir serta meningkatkan efisiensi material dalam industri konstruksi [17]. Studi pada proyek jalan tol Yogyakarta-Bawen menunjukkan bahwa substitusi 40% semen Portland dengan *fly ash* mampu mengurangi total emisi CO₂ hingga 47% [17]. Hal ini menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki potensi besar dalam mendukung praktik konstruksi berkelanjutan di Indonesia.

Meskipun telah banyak penelitian yang membahas manfaat dan tantangan penggunaan *fly ash*, studi yang bersifat sistematis mengenai penerapannya di Indonesia masih terbatas [18], [19]. Sebagian besar penelitian yang ada masih bersifat fragmentaris dan belum menggunakan pendekatan berbasis *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi tren penelitian, teori yang digunakan, serta metode yang paling sering diterapkan dalam kajian terkait *fly ash* [20]. Dengan menggunakan pendekatan SLR, penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh dan berbasis bukti mengenai perkembangan penelitian terkait *fly ash* di Indonesia. Secara konseptual, pemanfaatan *fly ash* berkaitan erat dengan tiga sektor utama yang saling beririsan, yaitu sektor energi, lingkungan, dan material konstruksi. Di sektor energi, *fly ash* berperan dalam mendukung transisi menuju sistem energi rendah karbon melalui substitusi material penyumbang emisi tinggi seperti semen, serta mendukung efisiensi energi dalam proses produksi beton. Di sektor lingkungan, pemanfaatan *fly ash* sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular, yang menekankan pada pengurangan limbah dan pemanfaatan ulang material industri. Potensinya sebagai agen adsorben dan penstabil tanah juga menjadikannya relevan dalam upaya mitigasi pencemaran tanah dan air. Sementara itu, dalam sektor material konstruksi, *fly ash* telah terbukti

meningkatkan performa beton melalui peningkatan kekuatan mekanik, daya tahan terhadap lingkungan agresif, dan penurunan permeabilitas. Oleh karena itu, penelitian ini secara spesifik akan menelaah keterkaitan pemanfaatan *fly ash* terhadap ketiga sektor tersebut dalam konteks keberlanjutan di Indonesia, dengan memetakan potensi, tantangan, serta arah pengembangan teknologi dan regulasi yang dibutuhkan untuk implementasi optimalnya.

Penelitian ini akan mengidentifikasi tren utama dalam pemanfaatan *fly ash* di sektor konstruksi, lingkungan, dan energi di Indonesia. Selain itu, penelitian ini juga akan membahas tantangan dalam implementasi teknologi pengolahan *fly ash* agar lebih optimal dalam mendukung keberlanjutan. Dengan mengkaji literatur yang ada secara sistematis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi berbasis bukti yang dapat dimanfaatkan oleh akademisi, industri, dan pembuat kebijakan.

Selain itu, penelitian ini juga akan mengeksplorasi teknologi terbaru yang dapat meningkatkan kualitas *fly ash* agar lebih optimal dalam aplikasi berkelanjutan. Beberapa studi menunjukkan bahwa dengan teknik pengolahan tertentu, *fly ash* dapat diubah menjadi material yang lebih aman dan memiliki performa lebih baik dalam konstruksi [21]. Namun, belum ada kajian yang secara spesifik membahas bagaimana teknologi ini dapat diterapkan secara luas di Indonesia.

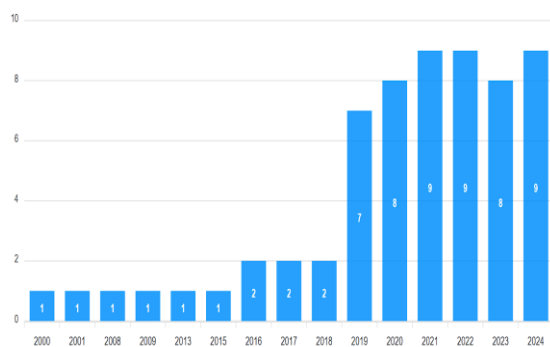
Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan dalam literatur terkait pemanfaatan *fly ash* di Indonesia melalui pendekatan *Systematic Literature Review*. Kajian ini juga memberikan wawasan strategis bagi pengembangan kebijakan yang lebih adaptif dalam mengelola *fly ash* serta mendorong inovasi teknologi pengolahan yang lebih efisien. Saat ini, ketidakjelasan pemanfaatan *fly ash* menjadi salah satu hambatan dalam implementasi *fly ash* sebagai material alternatif dalam konstruksi [20]. Oleh karena itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat menyediakan rekomendasi berbasis bukti yang bermanfaat bagi akademisi, industri, dan pembuat kebijakan untuk mengoptimalkan pemanfaatan *fly ash* di Indonesia.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian ini dirancang secara sistematis untuk mencapai tujuan yang telah ditetapkan dengan tahapan yang jelas, pertama dimulai dari proses pengumpulan data hingga analisis dan penyusunan rekomendasi. Pengumpulan data pada penelitian ini dimulai sejak bulan November 2024 hingga Januari 2025 dengan identifikasi kata kunci yang relevan, seperti "*Fly ash* Indonesia". Strategi ini sesuai dengan saran Lim et al. (2022) yang merekomendasikan penggunaan satu kata kunci dalam tinjauan global [22]. Kata kunci ini digunakan untuk mengumpulkan literatur yang relevan terkait potensi dan tantangan penggunaan *fly ash* di Indonesia. Setelah itu, metodologi *Systematic Literature Review* (SLR) dengan pendekatan PRISMA digunakan untuk memastikan seleksi literatur yang sistematis dan transparan yang diambil dari database Scopus.

Meskipun Google Scholar merupakan mesin pencari akademik berbasis web yang banyak digunakan, database tersebut masih memiliki beberapa kendala. Salah satu kendala utamanya adalah sering menampilkan jumlah hasil pencarian yang berlebihan, termasuk duplikasi artikel dari berbagai sumber atau variasi berbeda dari artikel yang sama. Scopus adalah basis data bibliografi yang memberikan akses ke literatur ilmiah dari jurnal yang telah melalui proses *peer review*. Basis data ini dianggap sebagai sumber terpercaya untuk pencarian literatur karena memiliki proses seleksi ketat dalam memasukkan jurnal ke dalam koleksinya. Sebelum menerapkan filter, ditemukan sebanyak 62 dokumen yang relevan dengan topik ini [23]–[53], [53]–[89]. Guna mempersempit ruang lingkup pencarian dalam Scopus, dilakukan seleksi berdasarkan beberapa kriteria, yaitu hanya mencakup artikel yang diterbitkan dalam jurnal akademik, berada dalam rentang waktu 2014 hingga 2024, serta termasuk dalam kategori Scopus Q1–Q4.

Gambar 1. menunjukkan Perkembangan Jumlah Hasil Pencarian Kata Kunci per Tahun dari tahun 2000 hingga 2024. Pada grafik tersebut, terlihat bahwa jumlah hasil pencarian relatif rendah dan stabil antara tahun 2000 hingga 2018, dengan angka yang berkisar antara 1 hingga 2 hasil per tahun. Namun, mulai tahun 2019, terjadi peningkatan yang signifikan dengan jumlah pencarian melonjak ke angka 7 dan terus meningkat hingga mencapai angka tertinggi yaitu 9 pada beberapa tahun berikutnya. Tren ini menunjukkan peningkatan minat atau relevansi kata kunci yang dicari dalam beberapa tahun terakhir.

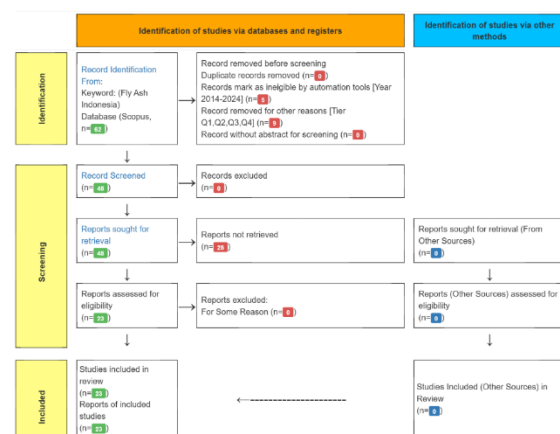


Gambar 1. Perkembangan Jumlah Hasil Pencarian Kata Kunci per Tahun

Terdapat beberapa alasan utama peneliti sering membatasi periode pencarian dalam tinjauan sistematis. Salah satunya adalah untuk memastikan bahwa studi yang dikaji mencerminkan temuan paling mutakhir serta perkembangan terbaru dalam bidang yang diteliti. Alasan lain adalah untuk memperbarui tinjauan literatur yang telah ada sebelumnya. Dengan membatasi pencarian dalam rentang waktu tertentu, penelitian dapat mengidentifikasi studi terbaru yang diterbitkan sejak tinjauan terakhir dan memasukkannya ke dalam analisis yang diperbarui. Selain itu, pembatasan periode pencarian juga membantu mengurangi risiko menyertakan penelitian yang sudah ketinggalan zaman atau tidak lagi relevan.

Pada tahap kedua dilakukan ekstraksi, data yang terkumpul dianalisis menggunakan alat VOSviewer untuk memvisualisasikan jaringan penelitian, perkembangan tren penelitian, serta kepadatan hubungan antar istilah dalam penelitian terkait *fly ash* di Indonesia. Tahap ini terdiri dari *network visualization*, *overlay visualization*, dan *density visualization*.

Network visualization dilakukan untuk mengidentifikasi keterkaitan utama antara *fly ash* dengan berbagai konsep lainnya, seperti *geopolymer*, *compressive strength*, *coal ash*, dan *particle size*.



Gambar 2. Identifikasi, penyaringan, dan tahap inklusi

Selanjutnya, proses klasifikasi dilakukan untuk mengelompokkan data berdasarkan kategori utama yang relevan dengan tujuan penelitian, termasuk aspek material konstruksi berkelanjutan, sektor energi, dan lingkungan.

Overlay visualization digunakan untuk memahami perkembangan studi dari tahun ke tahun, dengan membandingkan fokus penelitian dari periode sebelumnya hingga yang terbaru. Hasil analisis ini membantu mengidentifikasi bagaimana tren penelitian terkait *fly ash* mengalami pergeseran dari studi karakteristik fisik menuju aplikasi konstruksi berkelanjutan.

Density visualization dilakukan untuk mengukur frekuensi dan kepadatan hubungan antar istilah dalam penelitian, yang memberikan gambaran mengenai area studi yang telah mendapat perhatian besar

serta aspek yang masih kurang diteliti. Setelah itu, data yang telah dianalisis divisualisasikan menggunakan berbagai alat representasi data, seperti tabel, grafik, dan diagram menggunakan perangkat lunak Watase UAKE. Visualisasi ini mempermudah pemahaman temuan serta memungkinkan penyampaian informasi yang lebih efektif terkait hasil penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini membahas secara mendalam dari 23 artikel penelitian yang telah diidentifikasi dalam bidang *Fly ash* di Indonesia. Artikel-artikel tersebut dikategorikan berdasarkan beberapa aspek, seperti tahun publikasi, keterkaitan penelitian, lokasi penelitian, metode yang digunakan, jurnal akademik terkemuka yang menerbitkannya, material konstruksi berkelanjutan yang dikaji, sektor energi, lingkungan, dasar teori yang digunakan, serta analisis kutipan yang dilakukan.

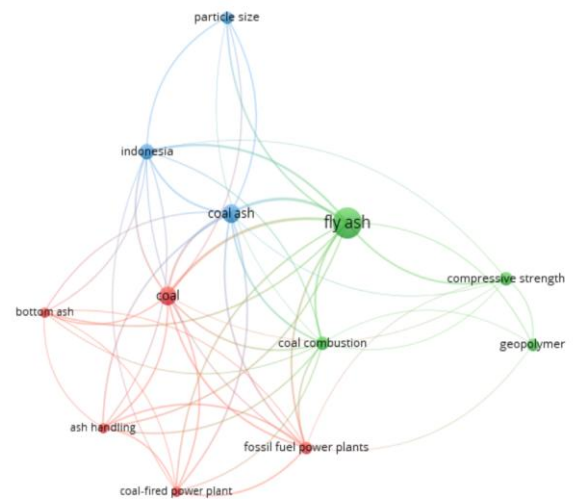
Selanjutnya, akan diberikan pemaparan mendalam mengenai temuan yang dihasilkan dari analisis profil atau studi penelitian. Selain itu, artikel ini juga menyoroti keterbatasan teori yang digunakan dan melakukan analisis menggunakan kerangka kerja TMC untuk memberikan perspektif baru bagi penelitian mendatang.

3.1. Network Visualization

Berdasarkan hasil analisis data yang disajikan pada Gambar 3, terlihat bahwa *fly ash* (abu terbang) menjadi pusat utama dalam penelitian terkait pembakaran batu bara.

Fly ash memiliki keterkaitan kuat dengan *geopolymer* dan *compressive strength* yang menunjukkan potensinya sebagai bahan alternatif dalam industri konstruksi terutama untuk beton ramah lingkungan. Selain itu, *coal ash* dan *particle size* juga menjadi faktor penting dalam karakterisasi abu batu bara yang dapat mempengaruhi aplikasinya dalam berbagai sektor. Penelitian mengenai *coal-fired power plants* dan *ash handling* menyoroti aspek pengelolaan limbah batu bara yang

menjadi perhatian utama terutama di negara seperti Indonesia yang muncul sebagai salah satu fokus penelitian dalam jaringan ini.



Gambar 3. Network visualization

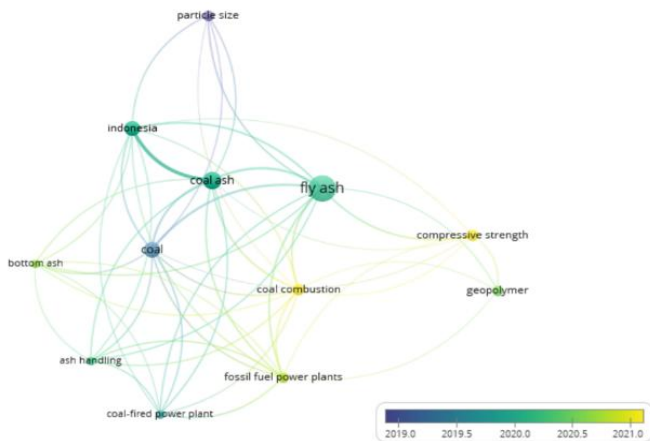
Hubungan erat antara *coal combustion* dan berbagai jenis abu, seperti *bottom ash*, menunjukkan bahwa aspek pembakaran dan pengolahan limbah masih menjadi tantangan dalam industri energi. Hal ini mengindikasikan perlunya penelitian lebih lanjut mengenai strategi pemanfaatan limbah batu bara, baik dalam material konstruksi maupun dalam manajemen lingkungan yang lebih berkelanjutan. Dengan demikian, pemanfaatan *fly ash* untuk material bangunan dapat menjadi solusi inovatif dalam mengurangi dampak lingkungan dari pembakaran batu bara, sekaligus meningkatkan keberlanjutan industri konstruksi.

3.2. Overlay visualization

Overlay visualization ini menggambarkan perkembangan penelitian terkait *fly ash* dalam kurun waktu 2019 hingga 2021 yang mana warna biru menunjukkan penelitian yang lebih lama, sementara kuning menandakan penelitian yang lebih baru (Gambar 4).

Berdasarkan visualisasi ini, terlihat bahwa fokus awal penelitian (2019-2020) lebih banyak membahas *coal ash*, *particle size*, serta pengelolaan limbah batubara yang terkait dengan *coal-fired power plants* dan

ash handling. Hal ini menunjukkan bahwa penelitian awal lebih banyak berfokus pada karakteristik fisik dan manajemen limbah abu batu bara dalam sektor energi. Istilah Indonesia juga muncul dengan keterkaitan kuat terhadap *coal ash* yang menandakan bahwa penelitian mengenai limbah batu bara banyak dilakukan dalam konteks industri energi di Indonesia.



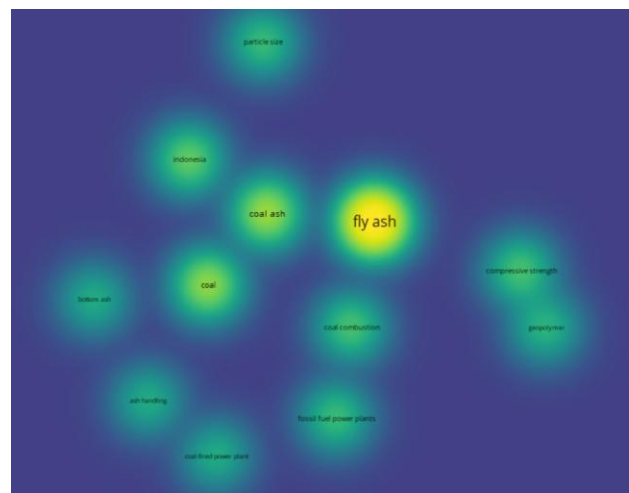
Gambar 4. *Overlay visualization*

Seiring waktu, penelitian mulai bergeser ke arah pemanfaatan *fly ash* dalam material konstruksi, sebagaimana terlihat dari kemunculan istilah *geopolymer* dan *compressive strength* yang lebih dominan pada tahun 2020-2021 (kuning). Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak penelitian yang mengeksplorasi penggunaan *fly ash* sebagai bahan alternatif dalam pembuatan beton *geopolimer* dengan kekuatan tekan tinggi. Pergeseran ini selaras dengan tren global dalam pencarian solusi bahan bangunan berkelanjutan yang bertujuan mengurangi ketergantungan pada semen konvensional dan menekan dampak lingkungan dari pembakaran batu bara. Dengan demikian, *Overlay visualization* ini memperjelas bahwa arah penelitian *fly ash* telah mengalami transformasi dari sekadar studi tentang karakteristik fisik dan limbah industri menuju aplikasi inovatif dalam konstruksi berkelanjutan.

3.3. *Density visualization*

Density visualization ini menggambarkan kepadatan hubungan antar

istilah dalam penelitian terkait *fly ash*, dengan intensitas warna yang lebih terang menunjukkan frekuensi dan keterkaitan yang lebih kuat (Gambar 5.). *Fly ash* terlihat sebagai pusat utama dengan densitas paling tinggi, menegaskan bahwa penelitian dalam bidang ini sangat berfokus pada abu terbang sebagai elemen penting dalam studi material dan lingkungan. Selain itu, istilah *coal ash* dan *coal* juga memiliki kepadatan tinggi yang mengindikasikan bahwa studi tentang *fly ash* masih erat kaitannya dengan sumber utama abu, yaitu batu bara dan pembakaran batu bara.

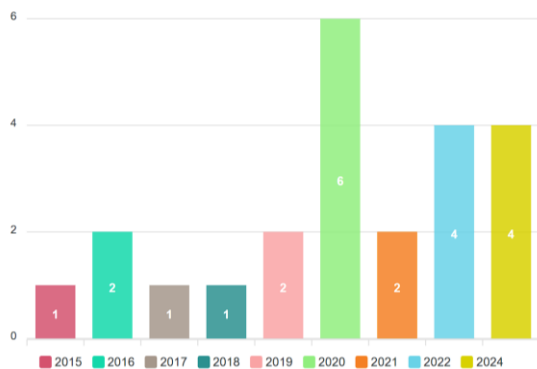


Gambar 5. *Density visualization*

Sementara itu, istilah seperti *compressive strength* dan *geopolymer* juga memiliki densitas yang cukup tinggi, meskipun lebih tersebar. Hal ini menunjukkan bahwa penelitian mengenai pemanfaatan *fly ash* dalam material konstruksi, terutama dalam pembuatan beton *geopolimer*, semakin berkembang. Selain itu, keterkaitan dengan Indonesia mengindikasikan bahwa kajian *fly ash* dalam konteks industri energi dan kebijakan lingkungan di negara tersebut menjadi salah satu fokus penelitian. Secara keseluruhan, visualisasi ini menunjukkan bahwa penelitian *fly ash* berkembang dari sekadar studi tentang karakteristik dan pengelolaan limbah batubara menuju aplikasi inovatif dalam bahan konstruksi berkelanjutan.

3.4. Tahun publikasi

Gambar 6. menunjukkan klasifikasi artikel berdasarkan tahun publikasi, dengan jumlah artikel yang diterbitkan setiap tahun dari 2015 hingga 2024. Dari visualisasi, terlihat bahwa jumlah publikasi mengalami fluktuasi dengan peningkatan signifikan pada tahun 2020, di mana terdapat 6 artikel, menjadikannya tahun dengan jumlah publikasi tertinggi. Lonjakan ini kemungkinan mencerminkan meningkatnya perhatian terhadap penelitian terkait pada periode tersebut, yang mungkin dipicu oleh kebijakan baru, tren akademik, atau perkembangan teknologi dalam bidang yang diteliti.

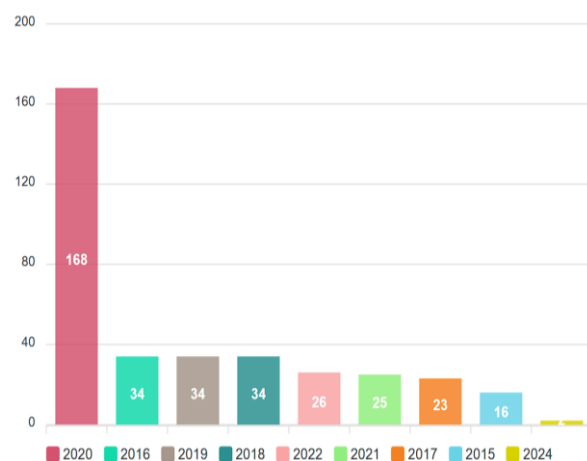


Gambar 6. Klasifikasi artikel berdasarkan tahun publikasi

Setelah 2020, jumlah artikel menurun pada tahun 2021 (2 artikel), tetapi kembali meningkat pada 2022 dan 2024 (masing-masing 4 artikel), menunjukkan stabilisasi minat penelitian dalam beberapa tahun terakhir. Sementara itu, publikasi pada tahun-tahun sebelumnya (2015-2019) relatif lebih sedikit, berkisar antara 1 hingga 2 artikel per tahun, yang menandakan bahwa topik ini mungkin belum menjadi perhatian utama sebelum tahun 2020. Secara keseluruhan, tren ini mengindikasikan bahwa penelitian dalam bidang terkait mengalami peningkatan signifikan dalam beberapa tahun terakhir, dengan potensi untuk terus berkembang ke depannya.

Gambar 7. menunjukkan klasifikasi sitasi artikel berdasarkan tahun publikasi,

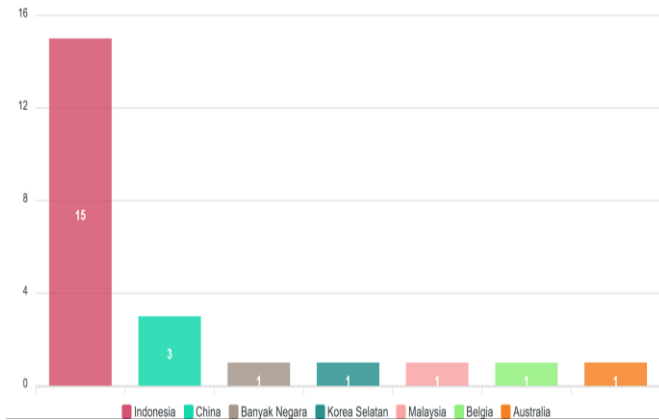
dengan jumlah sitasi yang diperoleh artikel dari berbagai tahun. Tahun 2020 mencatat jumlah sitasi tertinggi, mencapai 168 sitasi, jauh melampaui tahun-tahun lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa artikel yang diterbitkan pada tahun 2020 memiliki dampak akademik yang signifikan, kemungkinan karena meningkatnya minat penelitian pada topik terkait selama periode tersebut. Lonjakan ini bisa disebabkan oleh munculnya tren baru, kebijakan akademik, atau relevansi yang meningkat terhadap tantangan global.



Gambar 7. Klasifikasi sitasi artikel berdasarkan tahun publikasi

Selain itu, tahun-tahun seperti 2016, 2018, dan 2019 memiliki jumlah sitasi yang sama, yaitu 34 sitasi menunjukkan bahwa artikel dari periode tersebut tetap memiliki pengaruh yang stabil meskipun tidak sepopuler tahun 2020. Tahun 2022 (26 sitasi), 2021 (25 sitasi), dan 2017 (23 sitasi) menunjukkan tren penurunan sitasi yang bisa disebabkan oleh faktor seperti kurangnya waktu untuk akumulasi sitasi atau berkurangnya relevansi penelitian dibandingkan dengan tahun-tahun sebelumnya. Sementara itu, tahun 2024 memiliki jumlah sitasi yang sangat rendah, kemungkinan karena artikel yang diterbitkan tahun ini masih baru dan belum memiliki cukup waktu untuk dikutip oleh penelitian lain. Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa artikel dari tahun

2020 memiliki dampak akademik yang sangat besar, sementara artikel dari tahun-tahun lain tetap mendapatkan sitasi tetapi dalam jumlah yang lebih rendah dan lebih stabil.



Gambar 8. Klasifikasi artikel berdasarkan negara

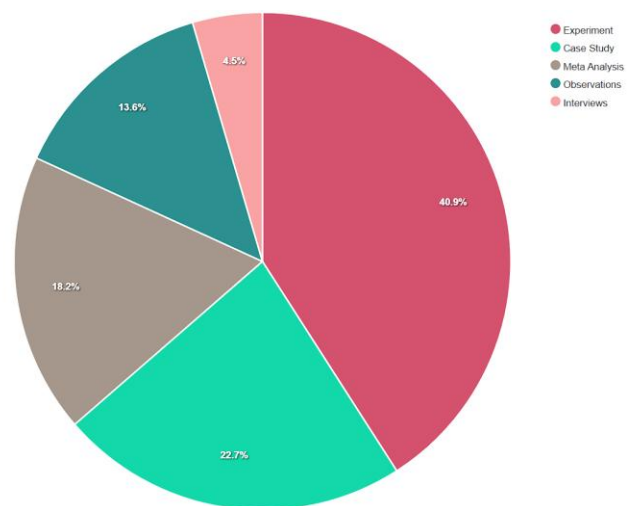
Gambar 8. menunjukkan klasifikasi artikel berdasarkan negara yang mana Indonesia mendominasi dengan 15 artikel, jauh lebih banyak dibandingkan negara lain. Hal ini menunjukkan bahwa penelitian terkait topik yang dianalisis memiliki fokus utama di Indonesia, kemungkinan besar karena tingginya penggunaan batu bara sebagai sumber energi serta perhatian terhadap pengelolaan limbah batu bara dan pemanfaatannya dalam berbagai aplikasi, seperti konstruksi dan lingkungan.

Selain Indonesia, China berada di posisi kedua dengan 3 artikel, menandakan bahwa negara ini juga memiliki perhatian terhadap penelitian dalam bidang yang sama, meskipun dalam skala yang lebih kecil dibandingkan Indonesia. Negara-negara lain seperti Korea Selatan, Malaysia, Belgia, dan Australia masing-masing hanya memiliki 1 artikel, serta ada kategori "Banyak Negara" yang menunjukkan penelitian kolaboratif antarnegara. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun penelitian ini dilakukan di berbagai negara, Indonesia menjadi pusat utama dalam pengkajian dan publikasi ilmiah terkait topik ini, mungkin karena kebijakan energi nasional dan

tantangan lingkungan yang lebih mendesak dibandingkan negara lain.

3.5. Jenis metode yang digunakan

Grafik pie yang disajikan pada Gambar 9. menunjukkan klasifikasi metode penelitian yang digunakan dalam artikel ilmiah, dengan lima kategori utama: Eksperimen (40,9%), Studi Kasus (22,7%), Meta-analisis (18,2%), Observasi (13,6%), dan Wawancara (4,5%). Metode eksperimen menjadi yang paling dominan (40,9%), menunjukkan bahwa mayoritas penelitian menggunakan pendekatan berbasis uji coba laboratorium atau pengujian langsung terhadap variabel tertentu. Hal ini mengindikasikan bahwa penelitian dalam bidang ini sangat bergantung pada pengujian empiris untuk mengukur variabel secara langsung, seperti pengaruh *fly ash* dalam bahan konstruksi atau karakteristik fisiknya. Studi kasus (22,7%) juga cukup banyak digunakan, yang berarti ada banyak penelitian yang berfokus pada analisis spesifik di lokasi tertentu, seperti dampak *fly ash* pada infrastruktur atau lingkungan di negara tertentu.



Gambar 9. Klasifikasi metode penelitian dalam artikel

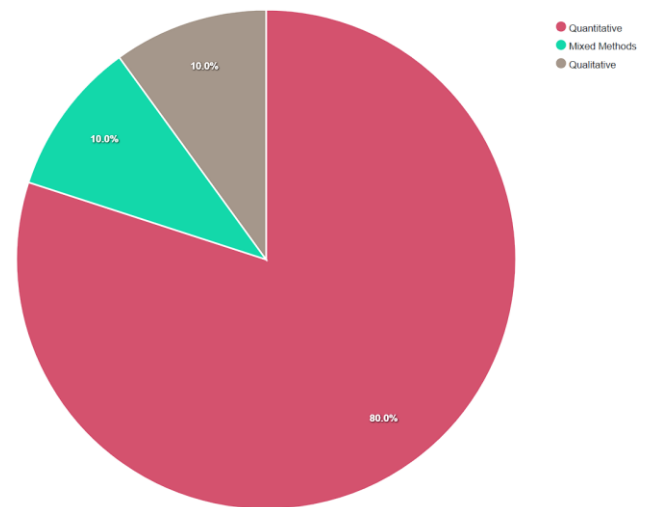
Selain itu, meta-analisis (18,2%) menunjukkan adanya kajian sistematis terhadap berbagai penelitian sebelumnya untuk menarik kesimpulan yang lebih luas. Sementara observasi (13,6%) lebih banyak digunakan dalam studi yang mengamati

fenomena tanpa intervensi langsung, seperti dampak jangka panjang dari penggunaan *fly ash*. Metode wawancara (4,5%) adalah yang paling sedikit digunakan, menandakan bahwa pendekatan kualitatif seperti pengumpulan data dari para ahli atau pelaku industri kurang dominan dibandingkan metode eksperimental dan studi kasus. Secara keseluruhan, pola ini menunjukkan bahwa penelitian dalam bidang ini lebih condong pada metode kuantitatif berbasis eksperimen dan studi kasus dibandingkan pendekatan kualitatif atau berbasis data sekunder.

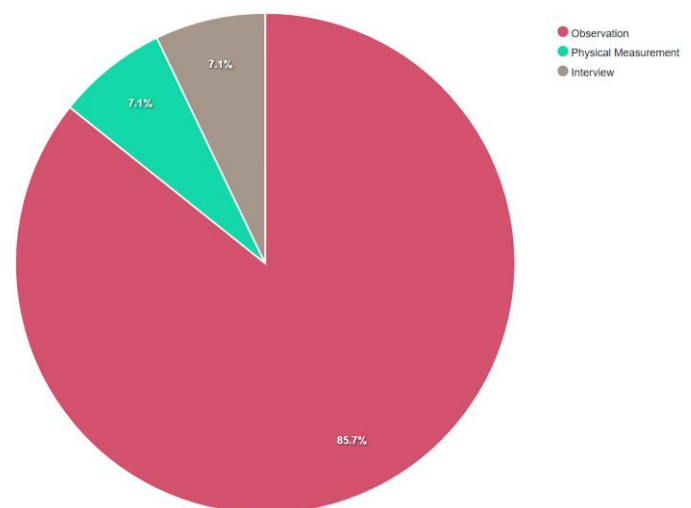
Gambar 10. menunjukkan klasifikasi desain penelitian berdasarkan pendekatan metodologis yang digunakan dalam artikel ilmiah. Dari visualisasi, terlihat bahwa pendekatan kuantitatif mendominasi dengan 80%, sementara *mixed methods* dan kualitatif masing-masing hanya menyumbang 10% dari total penelitian. Dominasi metode kuantitatif menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian dalam bidang ini berfokus pada pengukuran numerik, analisis statistik, dan pengujian empiris terhadap variabel-variabel tertentu. Hal ini sejalan dengan hasil sebelumnya yang menunjukkan bahwa metode eksperimental dan studi kasus memiliki proporsi yang lebih besar dalam penelitian. *Mixed methods*, yang menggabungkan pendekatan kuantitatif dan kualitatif, hanya digunakan dalam 10% penelitian, menandakan bahwa integrasi kedua pendekatan ini masih terbatas dalam studi yang dianalisis. Sedangkan metode kualitatif, yang lebih mengandalkan wawancara, observasi mendalam, dan analisis deskriptif, juga hanya digunakan dalam 10% penelitian, menunjukkan bahwa penelitian berbasis eksploratif atau interpretatif kurang dominan dalam bidang ini.

Secara keseluruhan, pola ini mengindikasikan bahwa penelitian dalam bidang ini lebih banyak menggunakan pendekatan berbasis data dan eksperimen, dengan sedikit fokus pada pendekatan kualitatif atau kombinasi metode. Ini

mungkin disebabkan oleh kebutuhan akan validasi empiris dan bukti kuantitatif dalam studi terkait, terutama dalam kajian sains, teknik, atau lingkungan yang memerlukan analisis berbasis data.



Gambar 10. Klasifikasi desain penelitian



Gambar 11. Klasifikasi metode pengumpulan data

Grafik pie yang ditampilkan pada Gambar 11. menunjukkan klasifikasi metode pengumpulan data dalam penelitian, dengan tiga kategori utama: Observasi (85,7%), Pengukuran Fisik (7,1%), dan Wawancara (7,1%). Dominasi metode observasi menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian dalam bidang ini mengandalkan pengamatan langsung terhadap fenomena atau objek penelitian

tanpa melakukan intervensi yang signifikan. Ini dapat mencakup studi tentang karakteristik *fly ash*, dampaknya pada lingkungan, atau perilaku material dalam aplikasi tertentu. Sementara itu, pengukuran fisik (7,1%) digunakan dalam studi yang melibatkan pengujian laboratorium atau analisis eksperimental, yang mungkin berkaitan dengan properti mekanis dan kimia *fly ash* dalam berbagai aplikasi teknik. Metode wawancara (7,1%) memiliki proporsi yang sangat kecil, menunjukkan bahwa pendekatan berbasis pendapat ahli atau pengalaman praktis jarang digunakan dibandingkan dengan metode berbasis observasi dan pengukuran.

Secara keseluruhan, pola ini mengindikasikan bahwa penelitian dalam bidang ini lebih mengutamakan pengumpulan data berbasis pengamatan dan eksperimen dibandingkan pendekatan kualitatif seperti wawancara. Hal ini masuk akal mengingat sifat penelitian yang lebih bersifat ilmiah dan teknis, yang memerlukan validasi empiris melalui pengukuran langsung.

3.6. Jurnal terkemuka yang menerbitkan

Dalam dunia akademik, publikasi di jurnal ilmiah merupakan indikator penting bagi kredibilitas dan dampak suatu penelitian. Jurnal yang menerbitkan artikel dalam suatu bidang studi mencerminkan tingkat keahlian, relevansi, serta kontribusi ilmiah dari penelitian tersebut. Pada sub-bab ini, akan dibahas berbagai jurnal terkemuka yang telah mempublikasikan penelitian terkait, diklasifikasikan berdasarkan tier (Q1-Q4), jumlah sitasi, dan jumlah artikel yang diterbitkan. Analisis ini bertujuan untuk memberikan gambaran mengenai jurnal dengan pengaruh terbesar dalam bidang yang diteliti, serta bagaimana distribusi sitasi dapat menjadi tolok ukur penting dalam menilai kualitas dan dampak suatu penelitian. Dengan memahami tren publikasi dalam jurnal-jurnal ini, diharapkan dapat memberikan wawasan lebih dalam mengenai arah perkembangan penelitian di bidang terkait dan membantu dalam

pemilihan jurnal yang sesuai untuk publikasi akademik di masa mendatang.

Berdasarkan data klasifikasi jurnal berdasarkan tier, jumlah sitasi, dan jumlah artikel, terlihat bahwa jurnal dengan Tier Q1 memiliki kecenderungan mendapatkan lebih banyak sitasi dibandingkan jurnal dalam Tier Q2, Q3, dan Q4. Misalnya, *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Q2) memiliki jumlah sitasi tertinggi (62) dengan hanya 2 artikel, yang menunjukkan bahwa meskipun berada di Q2, jurnal ini memiliki dampak yang signifikan. Sebaliknya, jurnal *International Journal of Coal Geology* (Q1) memiliki 34 sitasi dengan 1 artikel, menegaskan bahwa meskipun jurnal Q1 umumnya lebih prestisius, jumlah sitasi juga sangat dipengaruhi oleh relevansi topik dan tingkat keterbacaan dalam komunitas ilmiah. Di sisi lain, beberapa jurnal dalam Tier Q1 seperti *Journal of Cleaner Production* dan *Construction and Building Materials* memiliki jumlah sitasi yang relatif rendah atau nol, yang dapat menunjukkan bahwa artikel dalam jurnal ini masih tergolong baru dan belum banyak dikutip dalam penelitian lain.

Sementara itu, jurnal dalam Tier Q4 seperti *Particulate Science and Technology* (37 sitasi) dan *Advances in Materials Science and Engineering* (17 sitasi) tetap memperoleh jumlah sitasi yang cukup tinggi meskipun berada di peringkat lebih rendah, yang bisa disebabkan oleh topik penelitian yang sangat spesifik dan relevan dengan kebutuhan industri atau akademisi tertentu.

Secara keseluruhan, jurnal dengan tier lebih tinggi (Q1 dan Q2) cenderung memiliki lebih banyak pengaruh, tetapi jumlah sitasi tidak selalu bergantung pada tier jurnal, melainkan juga pada topik penelitian, jaringan akademik yang mengutip, dan tingkat urgensi masalah yang dibahas dalam artikel tersebut. Artikel dalam jurnal-jurnal Q2 seperti *Journal of Sustainable Metallurgy*, *Powder Technology*, dan *Chemical Engineering Research and Design* juga menunjukkan daya tarik yang cukup tinggi dalam komunitas ilmiah, dengan sitasi di atas 10,

menunjukkan bahwa penelitian dalam bidang ini masih cukup aktif dan mendapatkan perhatian luas.

Tabel 1. Klasifikasi jurnal berdasarkan tier, sitasi, dan jumlah artikel

Nama Jurnal	Tier	Sitasi	Aritkel
<i>Journal of Environmental Chemical Engineering</i>	Q2	62	2
<i>Applied Clay Science</i>	Q2	40	1
<i>Particulate Science and Technology</i>	Q4	37	1
<i>International Journal of Coal Geology</i>	Q1	34	1
<i>Applied Geochemistry</i>	Q1	23	1
<i>Atmospheric Chemistry and Physics</i>	Q1	21	1
<i>Materials</i>	Q2	20	1
<i>Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry</i>	Q2	17	1
<i>Advances in Materials Science and Engineering</i>	Q4	17	1
<i>Powder Technology</i>	Q2	16	1
<i>Journal of Sustainable Metallurgy</i>	Q2	16	1
<i>Chemical Engineering Research and Design</i>	Q2	14	1
<i>International Journal of Coal Science & Technology</i>	Q1	12	1
<i>Environmental Technology & Innovation</i>	Q3	10	1
<i>Journal of Cleaner Production</i>	Q1	9	1
<i>Journal of The Institution of Engineers (India): Series D</i>	Q3	8	1
<i>South African Journal of Chemical Engineering</i>	Q2	4	1
<i>Results in Engineering Resources</i>	Q2	2	1
<i>Resources</i>	Q2	0	1
<i>Construction and Building Materials</i>	Q1	0	1

3.7. Dasar teori yang digunakan

Dalam penelitian ilmiah, teori menjadi landasan utama yang membantu menjelaskan fenomena yang diamati serta memberikan kerangka konseptual dalam analisis data. Teori-teori yang digunakan dalam penelitian ini mencakup berbagai bidang, mulai dari pengayaan elemen tanah jarang (Rare Earth Element Enrichment Theory), teori pozzolan dan material pengganti semen dalam konstruksi berkelanjutan, hingga teori pembakaran batu bara dengan Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC). Setiap teori memiliki peran penting dalam memahami berbagai aspek ilmiah dan teknologi yang mendasari penelitian yang telah dilakukan.

Analisis terhadap teori-teori ini tidak hanya membantu dalam mengkaji keterkaitan antar konsep, tetapi juga menunjukkan bagaimana teori-teori tersebut telah diterapkan dan dikembangkan dalam berbagai studi sebelumnya. Dengan melihat jumlah sitasi yang diperoleh, peneliti dapat menilai sejauh mana suatu teori telah digunakan dan diakui dalam komunitas ilmiah. Pada sub-bab ini, akan dibahas teori-teori utama yang digunakan dalam penelitian, serta bagaimana teori-teori tersebut mendukung pendekatan metodologis yang digunakan dalam studi ini.

Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 2. terlihat bahwa Rare Earth Element (REE) Enrichment Theory memiliki 76 sitasi dengan 2 artikel, menjadikannya teori dengan dampak akademik tertinggi dalam daftar ini. Teori ini menjelaskan bagaimana elemen tanah jarang (REE) mengalami proses pengayaan dalam berbagai lingkungan geokimia, seperti dalam formasi batuan granit dan laterit [90]. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa proses migrasi dan pengayaan REE memainkan peran penting dalam eksplorasi sumber daya mineral strategis, terutama dalam industri teknologi tinggi seperti energi terbarukan dan elektronik [91].

Selain REE, Pozzolan dan SCM dalam Konstruksi Berkelanjutan juga

menjadi teori yang cukup sering dikutip dengan 40 sitasi dalam 1 artikel. Teori ini berkaitan dengan penggunaan material pozzolan dan Supplementary Cementitious Materials (SCM) sebagai bahan tambahan dalam beton untuk meningkatkan keberlanjutan industri konstruksi [92]. Peningkatan penggunaan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen juga banyak dikaji dalam konteks ini. Sementara itu, Nanofluid Theory (37 sitasi) membahas peran fluida nano dalam meningkatkan efisiensi perpindahan panas dalam berbagai aplikasi teknik, terutama dalam sistem energi dan pendinginan.

Dalam konteks pembakaran batu bara, Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) Theory menempati posisi penting dengan 30 sitasi dalam 2 artikel. Teori ini menjelaskan efisiensi pembakaran dalam sistem fluidized bed yang lebih bersih dibandingkan metode pembakaran konvensional, mengurangi emisi polutan seperti sulfur dan nitrogen oksida [93].

Selain itu, Mercury Isotope Fractionation Theory (23 sitasi) menjadi perhatian dalam studi lingkungan, karena mempelajari perbedaan isotop merkuri dalam berbagai kondisi lingkungan untuk menelusuri sumber polusi merkuri [94].

Teori-teori lain seperti Aerosol Source Apportionment Theory, Cenospheres Formation and Characterization, dan Hydration and Pozzolanic Reaction Theory in High-Volume *Fly ash* Concrete memiliki tingkat sitasi yang moderat (20-21 sitasi). Hal ini menunjukkan bahwa penelitian terkait aerosol, karakterisasi material cenosphere dari *fly ash*, serta reaksi hidrasi dan pozzolanik dalam beton volume tinggi *fly ash* masih menjadi bidang penelitian yang aktif. Sementara itu, teori yang memiliki 0 sitasi, seperti Biomass Gasification Theory, Self-Healing Concrete dengan MICP, dan Acid-Sulfate Soil Management Theory, kemungkinan masih dalam tahap awal pengembangan atau belum banyak dikaji dalam komunitas akademik.

Tabel 2. Klasifikasi teori berdasarkan jumlah sitasi dan artikel

Teori	Sitasi	Artikel
<i>Rare Earth Element (REE) Enrichment Theory</i>	76	2
<i>Pozzolan Dan SCM Dalam Konstruksi Berkelanjutan</i>	40	1
<i>Nanofluid Theory</i>	37	1
<i>Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) Theory</i>	30	2
<i>Mercury Isotope Fractionation Theory</i>	23	1
<i>Aerosol Source Apportionment Theory</i>	21	1
<i>Cenospheres Formation And Characterization</i>	20	1
<i>Hydration And Pozzolanic Reaction Theory In High-Volume Fly ash Concrete</i>	20	1
<i>Soil Erosion And Soil Stabilization Theory</i>	17	1
<i>Trace Element Analysis And Speciation In Coal Fly ash</i>	17	1
<i>Acid Leaching Theory For Rare Earth Element (REE) Extraction</i>	16	1
<i>Urban Heavy Metal Pollution And Bioaccessibility Theory</i>	14	2
<i>Geochemical And Mineralogical Theory Of Fly And Bottom Ash (FABA)</i>	12	1
<i>Cleaner Production Theory In Heavy Industry</i>	9	1
<i>Tribology Of Phenolic Resin-Based Composite Brake Pads</i>	8	1
<i>Shrinking Reactive Core Model In Coal Combustion</i>	2	1
<i>Biomass Gasification Theory</i>	0	1
<i>Self-Healing Concrete Dengan MICP</i>	0	1
<i>Acid-Sulfate Soil Management Theory</i>	0	1
<i>Risk Management Theory In Energy Sector</i>	0	1

Secara keseluruhan, jumlah sitasi dalam teori-teori ini menunjukkan tren penelitian yang lebih berfokus pada

eksplorasi sumber daya mineral, keberlanjutan dalam konstruksi, teknologi pembakaran batu bara yang lebih bersih, serta studi lingkungan mengenai polusi logam berat dan partikel aerosol. Studi-studi ini memainkan peran penting dalam mengembangkan strategi teknologi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk berbagai sektor industri.

3.8. Analisis sitasi penulis

Sitasi merupakan indikator penting dalam menilai dampak akademik suatu penelitian dan kontribusi seorang penulis dalam bidang keilmuannya. Analisis sitasi penulis memberikan gambaran mengenai sejauh mana karya ilmiah mereka diakui dan digunakan oleh komunitas akademik lainnya. Melalui analisis ini, dapat diketahui penulis-penulis dengan jumlah sitasi tertinggi, jurnal tempat mereka mempublikasikan penelitian, serta tren penyebaran hasil penelitian dalam literatur ilmiah.

Pada penelitian ini, akan dibahas jumlah sitasi yang diterima oleh berbagai penulis dalam publikasi mereka, termasuk jurnal tempat artikel tersebut diterbitkan. Dengan memahami distribusi sitasi ini, peneliti dapat mengidentifikasi peneliti yang memiliki kontribusi signifikan dalam bidang studi tertentu, serta melihat bagaimana pengaruh penelitian mereka berkembang dari waktu ke waktu. Analisis ini juga dapat memberikan wawasan bagi peneliti lain dalam memilih strategi publikasi dan membangun jaringan akademik yang lebih luas.

Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 3. terlihat bahwa penelitian yang dipublikasikan dalam *Journal of Environmental Chemical Engineering* memiliki dampak akademik yang signifikan, dengan artikel oleh Rosita et al. memperoleh 42 sitasi, dan artikel oleh Petrus et al. memperoleh 20 sitasi. Ini menunjukkan bahwa jurnal ini menjadi salah satu sumber utama dalam studi lingkungan dan teknik kimia, yang kemungkinan berkaitan dengan isu-isu terkini seperti pengolahan limbah

industri, pemanfaatan material alternatif, dan analisis lingkungan.

Selain itu, *Applied Clay Science* juga memiliki pengaruh kuat, dengan artikel oleh Haw et al. meraih 40 sitasi, yang kemungkinan besar membahas aplikasi tanah liat dalam berbagai sektor, termasuk konstruksi dan lingkungan.

Jurnal lain yang memiliki dampak tinggi adalah *International Journal of Coal Geology*, di mana artikel oleh Anggara et al. memperoleh 34 sitasi, yang menunjukkan bahwa penelitian dalam bidang geologi batu bara masih menjadi perhatian utama, terutama dalam konteks eksplorasi, pemanfaatan, dan dampak lingkungan dari pembakaran batubara. Selain itu, artikel dalam *Applied Geochemistry* (23 sitasi) dan *Atmospheric Chemistry and Physics* (21 sitasi) menegaskan bahwa bidang geokimia lingkungan dan analisis atmosfer terus berkembang, dengan penelitian mengenai komposisi kimia material geologi serta dampaknya terhadap polusi udara.

Menariknya, jurnal yang berfokus pada material dan rekayasa, seperti *Materials*, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, dan *Advances in Materials Science and Engineering*, juga memiliki kontribusi signifikan dengan 17–20 sitasi.

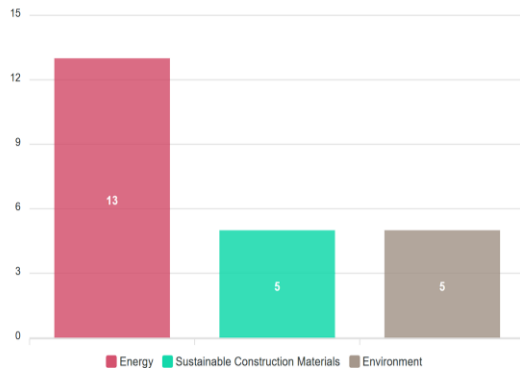
Hal ini menunjukkan bahwa penelitian terkait penggunaan material baru dalam industri konstruksi, energi, dan teknologi nuklir tetap menjadi topik yang relevan dan banyak dikutip dalam komunitas ilmiah. Secara keseluruhan, tren sitasi ini menunjukkan bahwa penelitian mengenai lingkungan, material, dan energi masih menjadi fokus utama dalam publikasi akademik, dengan jurnal-jurnal tertentu menjadi pusat penyebaran informasi ilmiah yang memiliki dampak tinggi dalam bidangnya masing-masing.

Tabel 3. Klasifikasi sitasi berdasarkan penulis dan jurnal publikasi

Referensi	Jurnal	Sitasi
Rosita, Widya; Bendiyasa, I Made; Perdana, Indra; Anggara, Ferian	<i>Journal of Environmental Chemical Engineering</i>	42
Haw, Tan Tze; Hart, Frank; Rashidi, Ali; Pasbakhsh, Pooria	<i>Applied Clay Science</i>	40
Kanti, Praveen; Sharma, Korada Viswanatha; C. G., Ramachandra; Azmi, W. H.	<i>Particulate Science and Technology</i>	37
Anggara, Ferian; Amijaya, D. Hendra; Harijoko, Agung; Tambaria, Theodora Noely; Sahri, Amanda Ayudia; Asa, Zain Andrian Nur	<i>International Journal of Coal Geology</i>	34
Huang, Shuyuan; Yuan, Dongxing; Lin, Haiying; Sun, Lumin; Lin, Shanshan	<i>Applied Geochemistry</i>	23
Hilario, Miguel Ricardo A.; Cruz, Melliza T.; Cambaliza, Maria Obiminda L.; Reid, Jeffrey S.; Xian, Peng; Simpas, James B.; Lagrosas, Nofel D.; Uy, Sherdon Niño Y.; Cliff, Steve; Zhao, Yongjing	<i>Atmospheric Chemistry and Physics</i>	21
Petrus, Himawan Tri Bayu Murti; Olvianas, Muhammad; Suprpta, Wisnu; Setiawan, Felix Arie; Prasetya, Agus; Sutijan, ; Anggara, Ferian	<i>Journal of Environmental Chemical Engineering</i>	20
Zhou, Zhiyuan; Sofi, Massoud; Lumantarna, Elisa; San Nicolas, Rackel; Hadi Kusuma, Gideon; Mendis, Priyan	<i>Materials</i>	20
Santoso, Muhayatun; Lestiani, Diah Dwiana; Damastuti, Endah; Kurniawati, Syukria; Bennett, John W.; Leani, Juan Jose; Czyzycki, Mateusz; Migliori, Alessandro; Osán, János; Karydas, Andreas Germanos	<i>Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry</i>	17
Matsumoto, Shinji; Ogata, Shunta; Shimada, Hideki; Sasaoka, Takashi; Kusuma, Ginting J.; Gautama, Rudy S.	<i>Advances in Materials Science and Engineering</i>	17
Prihutami, Pramesti; Prasetya, Agus; Sediawan, Wahyudi Budi; Petrus, Himawan Tri Bayu Murti; Anggara, Ferian	<i>Journal of Sustainable Metallurgy</i>	16
Ding, Ruifeng; Dong, Jingjing; Zhang, Man; Yang, Hairui; Lv, Junfu	<i>Powder Technology</i>	16
Li, Dongfang; Ke, Xiwei; Yang, Hairui; Ahn, Seok-Gi; Lyu, Junfu; Jeon, Chung-Hwan; Zhang, Man	<i>Chemical Engineering Research and Design</i>	14
Besari, Dea Anisa Ayu; Anggara, Ferian; Rosita, Widya; Petrus, Himawan T. B. M.	<i>International Journal of Coal Science and Technology</i>	12
Wijaya, Anugrah Ricky; Kusumaningrum, Irma Kartika; Hakim, Lukmannul; Francová, Anna; Chrastný, Vladislav; Vítková, Martina; Vařková, Zuzana; Komárek, Michael	<i>Environmental Technology and Innovation</i>	10
Panjaitan, Togar W.S.; Dargusch, Paul; Wadley, David; Aziz, Ammar A.	<i>Journal of Cleaner Production</i>	9
Praveenkumar, B.; Darius Gnanaraj, S.	<i>Journal of The Institution of Engineers (India): Series D</i>	8
Arita, Susila; Kristianti, Devi; Komariah, Leily Nurul	<i>South African Journal of Chemical Engineering</i>	4

3.9. Material konstruksi berkelanjutan, Sektor Energi, dan Lingkungan

Dalam upaya mencapai pembangunan yang berkelanjutan, tiga sektor utama material konstruksi berkelanjutan, sektor energi, dan lingkungan memegang peranan penting dalam mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem global. Material konstruksi berkelanjutan, seperti geopolymer, *fly ash*, dan bahan pengganti semen, telah menjadi alternatif yang banyak diteliti untuk mengurangi emisi karbon dari industri konstruksi. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan infrastruktur yang ramah lingkungan, inovasi dalam bahan bangunan terus berkembang guna meningkatkan efisiensi energi serta mengurangi limbah industri. Dalam sub-bab ini, akan dibahas lebih lanjut bagaimana ketiga sektor ini saling berhubungan serta bagaimana penelitian terkini berkontribusi dalam menciptakan solusi berkelanjutan bagi masa depan.



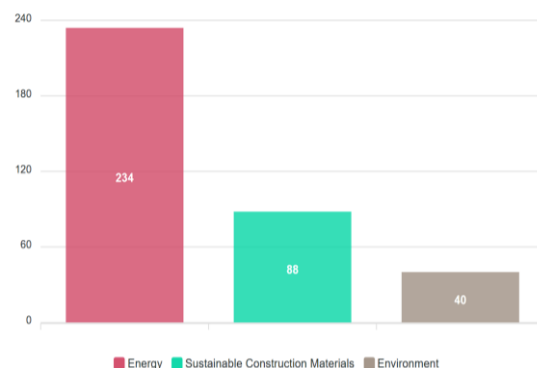
Gambar 12. Klasifikasi kategori penelitian

Grafik pada Gambar 12. menunjukkan klasifikasi kategori penelitian berdasarkan bidang utama, yaitu Energi, Bahan Konstruksi Berkelanjutan, dan Lingkungan. Dari hasil visualisasi, dapat dilihat bahwa kategori Energi memiliki jumlah penelitian tertinggi, yaitu 13 artikel, dibandingkan dengan kategori Bahan Konstruksi Berkelanjutan dan Lingkungan, yang masing-masing memiliki 5 artikel. Dominasi kategori energi menunjukkan bahwa penelitian dalam bidang ini masih

menjadi prioritas utama, kemungkinan besar karena peningkatan kebutuhan akan energi terbarukan, efisiensi pembakaran, dan teknologi energi berkelanjutan.

Sementara itu, kategori Bahan Konstruksi Berkelanjutan dan Lingkungan memiliki jumlah yang sama, masing-masing 5 artikel. Hal ini menunjukkan bahwa penelitian tentang penggunaan material yang lebih ramah lingkungan dalam konstruksi, seperti *fly ash*, geopolymer, dan material alternatif lainnya, terus berkembang, tetapi masih belum sebanyak penelitian di sektor energi. Begitu pula dengan penelitian di bidang lingkungan, yang kemungkinan besar berfokus pada analisis dampak polusi, keberlanjutan sumber daya alam, dan strategi mitigasi terhadap perubahan iklim serta pencemaran industri.

Secara keseluruhan, grafik ini menggambarkan bahwa penelitian dalam bidang Energi masih menjadi perhatian utama, sementara penelitian terkait konstruksi berkelanjutan dan lingkungan juga terus mendapatkan perhatian yang cukup besar. Ke depannya, tren ini dapat berubah seiring dengan meningkatnya kesadaran global terhadap pengurangan emisi karbon, efisiensi energi, dan keberlanjutan dalam berbagai sektor industri.



Gambar 13. Klasifikasi sitasi

Grafik 13. menunjukkan klasifikasi sitasi berdasarkan bidang penelitian, yaitu Energi, Material Konstruksi Berkelanjutan, dan Lingkungan. Dari data yang

ditampilkan, terlihat bahwa kategori Energi memiliki jumlah sitasi tertinggi, yaitu 234 sitasi, jauh lebih besar dibandingkan dengan kategori Material Konstruksi Berkelanjutan (88 sitasi) dan Lingkungan (40 sitasi). Hal ini menunjukkan bahwa penelitian dalam bidang energi memiliki dampak akademik yang paling besar, kemungkinan karena isu-isu terkait efisiensi energi, energi terbarukan, dan pengelolaan sumber daya energi menjadi perhatian utama dalam berbagai studi ilmiah dan kebijakan global.

Sementara itu, kategori Material Konstruksi Berkelanjutan memperoleh 88 sitasi, yang menunjukkan bahwa penelitian terkait penggunaan material alternatif, seperti *fly ash*, geopolimer, dan material rendah karbon lainnya, masih cukup banyak dikutip. Ini menandakan bahwa studi dalam bidang ini berkembang, terutama dalam upaya mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi. Kategori Lingkungan, dengan 40 sitasi, memiliki dampak akademik yang lebih rendah dibandingkan dua kategori lainnya. Namun, angka ini tetap menunjukkan bahwa penelitian terkait polusi, pengelolaan limbah, dan keberlanjutan ekosistem masih memiliki relevansi dalam komunitas ilmiah.

Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa bidang energi memiliki dampak akademik tertinggi dalam hal jumlah sitasi, yang kemungkinan besar karena urgensi penelitian terkait transisi energi, efisiensi pembangkit listrik, dan solusi energi hijau. Meskipun kategori Material Konstruksi Berkelanjutan dan Lingkungan memiliki jumlah sitasi yang lebih rendah, tren ini dapat berubah seiring dengan meningkatnya kesadaran global terhadap konstruksi ramah lingkungan dan mitigasi dampak industri terhadap ekosistem.

Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 4. menunjukkan bahwa sebagian besar studi berada dalam kategori Energi, Material Konstruksi Berkelanjutan, dan Lingkungan, dengan fokus utama pada pemanfaatan *fly ash*, pengelolaan limbah batu bara, dan dampaknya terhadap

keberlanjutan konstruksi. Salah satu teori yang paling relevan dengan tujuan penelitian ini adalah teori Pozzolan dan SCM dalam Konstruksi Berkelanjutan, yang menjelaskan bagaimana material tambahan seperti *fly ash* dapat digunakan untuk menggantikan semen konvensional dalam beton [95]. Hal ini sejalan dengan tujuan pertama penelitian, yaitu menganalisis potensi penggunaan *fly ash* sebagai bahan alternatif dalam mendukung konstruksi berkelanjutan di Indonesia. Studi ini menguatkan bahwa *fly ash* tidak hanya mampu meningkatkan performa beton, tetapi juga mengurangi dampak lingkungan dari industri semen, yang merupakan salah satu penyumbang emisi karbon terbesar.

Selain itu, beberapa penelitian dalam kategori Lingkungan juga menunjukkan tantangan dalam pemanfaatan *fly ash*, terutama terkait polusi logam berat dan karakteristik kimiawi *fly ash* yang dapat berdampak negatif terhadap lingkungan. Teori Urban Heavy Metal Pollution and Bioaccessibility yang dikaji dalam penelitian oleh [96] dan [24] menyoroti risiko kandungan logam berat dalam *fly ash* yang dapat menjadi hambatan dalam pemanfaatannya sebagai bahan konstruksi. Temuan ini berkaitan langsung dengan tujuan kedua penelitian, yaitu mengidentifikasi tantangan yang dihadapi dalam pemanfaatan *fly ash* di sektor konstruksi Indonesia.

Dalam praktiknya, pengolahan *fly ash* yang tidak tepat dapat menyebabkan pencemaran lingkungan yang mengharuskan adanya regulasi dan standar keamanan yang ketat sebelum penggunaannya dalam konstruksi. Lebih lanjut, penelitian dalam kategori Energi yang berfokus pada teori ekstraksi elemen tanah jarang dari *fly ash* (REE Enrichment Theory) dan pengelolaan limbah dari pembakaran batu bara (Geochemical and Mineralogical Theory of Fly and Bottom Ash) menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki nilai ekonomi tambahan yang dapat dioptimalkan [97], [98].

Tabel 4. Klasifikasi penelitian berdasarkan penulis, konteks area, negara, teori, dan kategori

Penulis	Konteks Area	Negara	Teori	Kategori
Anggara et al. (2024)	<i>Coal-fired Power Plants</i>	Indonesia	<i>Shrinking Reactive Core Model In Coal Combustion</i>	<i>Energy</i>
Risdanareni et al. (2024)	<i>Construction Materials, Specifically Self-healing Mortar</i>	Belgia	<i>Self-Healing Concrete Dengan MICP</i>	<i>Sustainable Construction Materials</i>
Sulaeman et al. (2024)	<i>Coastal acid-sulfate soils</i>	Indonesia	<i>Acid-Sulfate Soil Management Theory</i>	<i>Environment</i>
Tangke et al. (2024)	<i>Gasification Of Biomass (specifically Sago Dregs)</i>	Indonesia	<i>Biomass Gasification Theory</i>	<i>Energy</i>
Arita et al. (2022)	<i>Indonesia Pulp And Paper Industry Wastewater Treatment</i>	Indonesia	<i>Urban Heavy Metal Pollution And Bioaccessibility Theory</i>	<i>Environment</i>
Besari et al. (2022)	<i>Coal-fired Power Plants</i>	Indonesia	<i>Geochemical And Mineralogical Theory Of Fly And Bottom Ash (FABA)</i>	<i>Energy</i>
Kesuma et al. (2022)	<i>Electric Utility Industry And Renewable Energy</i>	Indonesia	<i>Risk Management Theory In Energy Sector</i>	<i>Energy</i>
Wijaya et al. (2022)	<i>Specifically Industrial And Traffic Areas</i>	Indonesia	<i>Urban Heavy Metal Pollution And Bioaccessibility Theory</i>	<i>Environment</i>
Panjaitan et al. (2021)	<i>Cement Production Industry</i>	Indonesia	<i>Cleaner Production Theory In Heavy Industry</i>	<i>Environment</i>
Prihutami et al. (2021)	<i>Sustainable Mineral Processing And Resource Recovery</i>	Indonesia	<i>Acid Leaching Theory For Rare Earth Element (REE) Extraction</i>	<i>Energy</i>
Haw et al. (2020)	<i>Construction And Building Applications</i>	Malaysia	<i>Pozzolan Dan SCM Dalam Konstruksi Berkelanjutan</i>	<i>Sustainable Construction Materials</i>
Hilario et al. (2020)	<i>Size-segregated sources of elemental composition of particulate matter (PM)</i>	China	<i>Aerosol Source Apportionment Theory</i>	<i>Energy</i>
Kanti et al. (2020)	<i>Heat Transfer Applications Using Nanofluids</i>	Indonesia	<i>Nanofluid Theory</i>	<i>Energy</i>
Petrus et al. (2020)	<i>Characterization of cenospheres</i>	Indonesia	<i>Cenospheres Formation And Characterization</i>	<i>Sustainable Construction Materials</i>
Praveenkumar and Darius (2020)	<i>Development Of Eco-friendly Brake Pads Using Phenolic Resin-based Composites</i>	Banyak Negara	<i>Tribology Of Phenolic Resin-Based Composite Brake Pads</i>	<i>Sustainable Construction Materials</i>
Rosita et al. (2020)	<i>Coal Fly ash Characterization And Rare-earth Element Recovery</i>	Indonesia	<i>Rare Earth Element (REE) Enrichment Theory</i>	<i>Energy</i>

Li et al. (2019)	<i>Ultra-supercritical Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler Operation</i>	Korea Selatan	Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) Theory	Energy
Zhou et al. (2019)	<i>Infrastructure Engineering And Materials Science</i>	Australia	Hydration And Pozzolanic Reaction Theory In High-Volume <i>Fly ash</i> Concrete Rare Earth Element (REE) Enrichment Theory	Sustainable Construction Materials Energy
Anggara et al. (2018)	<i>Investigates the rare earth element and yttrium (REY) content in coal from the Banko coalfield</i>	Indonesia		
Huang et al. (2017)	<i>The fractionation of mercury stable isotopes during coal combustion and seawater flue gas desulfurization (SFGD) in a coal-fired power plant</i>	China	Mercury Isotope Fractionation Theory	Energy
Matsumoto et al. (2016)	<i>Postmine Land Rehabilitation</i>	Indonesia	Soil Erosion And Soil Stabilization Theory	Environment
Santoso et al. (2016)	<i>Analyzes trace elements and arsenic (As) speciation in fly ash</i>	Indonesia	Trace Element Analysis And Speciation In Coal <i>Fly ash</i>	Energy
Ding et al. (2015)	<i>Thermal Power Generation Using Circulating Fluidized Bed (CFB) Boilers</i>	China	Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) Theory	Energy

Berdasarkan hasil ini, rekomendasi strategis yang dapat dirumuskan mencakup penguatan kebijakan pemanfaatan *fly ash*, pengembangan teknologi pengolahan, serta peningkatan kesadaran industri dan pemerintah terhadap potensi material ini. Dengan demikian, penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata terhadap tujuan ketiga, yaitu merumuskan rekomendasi strategis untuk mendukung optimalisasi pemanfaatan *fly ash* di sektor konstruksi Indonesia. Secara keseluruhan, analisis ini menunjukkan bahwa pemanfaatan *fly ash* dalam konstruksi berkelanjutan memiliki potensi besar, tetapi juga menghadapi berbagai tantangan, terutama dalam aspek lingkungan dan regulasi. Oleh karena itu, pendekatan multi-disiplin yang mencakup aspek teknik, ekonomi, dan kebijakan diperlukan untuk mengoptimalkan penggunaannya di sektor konstruksi Indonesia.

3.10. Arah untuk penelitian di masa depan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah diuraikan, penelitian terkait pemanfaatan *fly ash* dalam konstruksi berkelanjutan di Indonesia masih memiliki peluang besar untuk dikembangkan lebih lanjut. Terdapat beberapa aspek utama yang dapat menjadi arah penelitian di masa depan, yaitu kontribusi teoritis, metodologi, dan konteks penerapan dalam industri.

a. Kontribusi Teoritis

Penelitian selanjutnya dapat memperdalam pengembangan teori Pozzolan dan *Supplementary Cementitious Materials* (SCM) dengan meninjau lebih lanjut mekanisme reaksi kimia dan mineraloginya saat *fly ash* digunakan sebagai bahan pengganti semen dalam beton. Selain itu, Rare Earth Element (REE) Enrichment Theory juga dapat dikaji lebih lanjut untuk menilai kelayakan ekonomis ekstraksi REE dari *fly ash* secara lebih luas. Kajian lebih dalam terhadap Urban Heavy Metal Pollution and Bioaccessibility Theory juga diperlukan guna memahami risiko pencemaran logam berat dari *fly ash* dalam lingkungan perkotaan serta bagaimana

strategi mitigasi dapat diterapkan dalam sektor konstruksi.

b. Metodologi

Dari segi metodologi, penelitian ke depan dapat mengintegrasikan pendekatan eksperimental dengan model prediktif berbasis kecerdasan buatan (AI) dan machine learning untuk menganalisis performa *fly ash* dalam berbagai aplikasi konstruksi. Selain itu, pendekatan mixed-methods yang menggabungkan eksperimen laboratorium dengan studi kualitatif melalui wawancara dengan pemangku kepentingan industri dan regulator dapat memberikan perspektif yang lebih komprehensif mengenai tantangan dalam penerapan *fly ash*. *Life Cycle Assessment* (LCA) juga menjadi metodologi yang penting untuk dikembangkan lebih lanjut guna mengukur dampak lingkungan dari *fly ash* secara holistik, mulai dari produksi, penggunaan, hingga daur ulang.

c. Konteks

Dalam konteks penerapan industri, penelitian masa depan dapat lebih fokus pada pengembangan regulasi dan kebijakan nasional terkait pemanfaatan *fly ash* dalam konstruksi di Indonesia. Studi komparatif antara kebijakan di Indonesia dengan negara lain yang lebih maju dalam pemanfaatan *fly ash*, seperti Tiongkok dan Amerika Serikat, dapat memberikan wawasan baru mengenai strategi terbaik dalam penerapannya. Selain itu, eksplorasi mengenai penerapan *fly ash* dalam infrastruktur hijau dan smart cities juga menjadi area penelitian yang potensial, terutama dalam rangka mendukung pembangunan berkelanjutan dan pengurangan emisi karbon di sektor konstruksi.

Dengan mengembangkan penelitian pada aspek teoritis, metodologi, dan konteks penerapan ini, diharapkan pemanfaatan *fly ash* dalam industri konstruksi Indonesia dapat dioptimalkan, baik dari segi teknis, ekonomi, maupun keberlanjutan lingkungan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki potensi besar sebagai material alternatif dalam konstruksi berkelanjutan di Indonesia, khususnya sebagai bahan tambahan pengganti semen (SCM). Namun, pemanfaatannya masih terbatas karena tantangan lingkungan, ketidakjelasan regulasi, dan risiko terkait kandungan logam berat di dalamnya. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan regulasi yang lebih jelas dan pengolahan *fly ash* yang lebih aman untuk meningkatkan kualitas dan keberlanjutan penggunaannya dalam konstruksi.

Ke depan, integrasi *fly ash* dalam praktik konstruksi ramah lingkungan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam mengurangi emisi karbon industri. Penelitian ini menekankan pentingnya kolaborasi antara sektor industri, kebijakan, dan riset untuk menciptakan solusi yang lebih efektif dalam mengoptimalkan pemanfaatan *fly ash*. Dengan pendekatan yang multidisipliner, *fly ash* dapat menjadi bahan yang berperan penting dalam mendukung pembangunan berkelanjutan dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan di Indonesia.

Ucapan terimakasih

Penelitian ini mendapatkan dukungan pendanaan melalui Hibah Internal yang disediakan oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Muhammadiyah Jember. Bantuan tersebut berperan penting dalam mendukung seluruh tahapan penelitian, mulai dari perencanaan hingga penyelesaian. Penulis menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya atas dukungan finansial yang diberikan melalui hibah ini.

Referensi

[1] P. H. Telone, *Fly ash: Reuse, environmental problems and related issues*. Nova Science Publishers, Inc., 2010. [Online]. Available:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84895243526&partnerID=40&md5=1da5b63a62b0235d845e3b48895972a6>

- [2] R. Siddique and M. Iqbal Khan, "Fly Ash," *Eng. Mater.*, vol. 37, pp. 1 – 66, 2011, doi: 10.1007/978-3-642-17866-5_1.
- [3] A. Marmandiu, R. Popescu, I. Nicolae, M. P. Carstea, and C. Bancila, "Equipment to capturing fly ash particles in electro-filters area from CET Brasov," *Metal. Int.*, vol. 14, no. SPEC. ISS. 2, pp. 203 – 206, 2009, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-62949150569&partnerID=40&md5=115aa0e23bf2c9ae54c044b42a7084fb>
- [4] A. Ilgün, Ü. S. Yilmaz, S. K. Akin, M. T. Çöğürçü, and M. S. Döndüren, "Fly ash and usage in Turkey," in *9th International Multidisciplinary Scientific Geoconference and EXPO - Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection, SGEM 2009*, 2009, vol. 2, pp. 751 – 756. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84890337915&partnerID=40&md5=97e37d979134434f7249e2811ef47814>
- [5] M. Mahoutian, V. Bindiganavile, and A. Lubell, "Characteristics of concrete containing fly ash with HG-adsorbent: Preliminary results," 2010. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85013886783&partnerID=40&md5=d0379bf4f708b1c8b7a97c68cd4205b7>
- [6] H. Dinesh and P. S. Aravind Raj, "Mechanical Properties of Concrete with Partial Replacement of Natural Sand by Fly Ash," *Adv. Sci. Technol.*

- Innov.*, pp. 67 – 76, 2024, doi: 10.1007/978-3-031-50024-4_7.
- [7] B. K. Shukla, A. Gupta, S. Gowda, and Y. Srivastav, “Constructing a greener future: A comprehensive review on the sustainable use of fly ash in the construction industry and beyond,” in *Materials Today: Proceedings*, 2023, vol. 93, pp. 257 – 264. doi: 10.1016/j.matpr.2023.07.179.
- [8] M. A. Nawaz *et al.*, “Effect of sulfate activator on mechanical and durability properties of concrete incorporating low calcium fly ash,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 13, 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00407.
- [9] D. K. Nayak, P. P. Abhilash, R. Singh, R. Kumar, and V. B. Kumar, “Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies,” *Clean. Mater.*, 2022, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:252583587>
- [10] M. O. Mohsen *et al.*, “Fly Ash and Natural Pozzolana Impacts on Sustainable Concrete Permeability and Mechanical Properties,” *Buildings*, vol. 13, no. 8, 2023, doi: 10.3390/buildings13081927.
- [11] M. Usman, I. Anastopoulos, Y. Hamid, and A. Wakeel, “Recent trends in the use of fly ash for the adsorption of pollutants in contaminated wastewater and soils: Effects on soil quality and plant growth,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 60, pp. 124427 – 124446, 2023, doi: 10.1007/s11356-022-19192-0.
- [12] J. Zhang, P. Su, K. Wen, Y. Li, and L. Li, “Environmental impact and mechanical improvement of microbially induced calcium carbonate precipitation-treated coal fly ash-soil mixture,” *Environ. Geotech.*, vol. 11, no. 1, pp. 29 – 39, 2020, doi: 10.1680/jenge.19.00125.
- [13] L. Jiang, “Comprehensive utilization situation of fly ash in coal-fired power plants and its development suggestions,” *Clean Coal Technol.*, vol. 26, no. 4, pp. 31 – 39, 2020, doi: 10.13226/j.issn.1006-6772.F19062501.
- [14] S. Jin, Z. Zhao, S. Jiang, J. Sun, H. Pan, and L. Jiang, “Comparison and summary of relevant standards for comprehensive utilization of fly ash at home and abroad,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 621, no. 1. doi: 10.1088/1755-1315/621/1/012006.
- [15] D. Darmansyah and Y. F. Wang, “Advancements of coal fly ash and its prospective implications for sustainable materials in Southeast Asian countries: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2023, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123007530>
- [16] C. Wang, K. Liu, D. Huang, Q. Chen, and K. Wu, “Utilization of fly ash as building material admixture: Basic properties and heavy metal leaching,” *Elsevier Constr. Stud.*, 2022, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221450952200554X>
- [17] R. L. Rohmah, “Sustainable Infrastructure Development in Indonesia: A Quantitative Evaluation of CO2 Emission Reduction from Fly Ash-Cement Substitution in Ready-Mix Concrete,” in *E3S Web of Conferences*, 2024, vol. 530. doi: 10.1051/e3sconf/202453004005.
- [18] M. A. Rusdi and N. N. N. Daud, “Fly Ash Stabilized Lateritic Soil As Subbase Material: A Review,” *Earth Sci. Malaysia*, 2022, [Online]. Available: <https://earthsciencesmalaysia.com/archives/ESMY/1esmy2022/1esmy2022-15-23.pdf>
- [19] M. Asof, W. Andalia, and M. Naswir,

- “Potensi dan Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash PLTU Industri Pupuk,” *J. Tek. Kim.*, 2022, [Online]. Available: <https://www.academia.edu/download/101677808/705.pdf>
- [20] H. Fansuri, R. Ediati, W. P. Utomo, and others, “Immobilization and leaching behavior of Cd²⁺ and Pb²⁺ heavy metal ions in Indonesian fly ash-based geopolymers,” *Environ. Res.*, 2024, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666765724000280>
- [21] K. Wu, M. Tu, and Q. Chen, “Systematic evaluation of fly ash utilization in construction materials,” *Constr. Build. Mater.*, 2022, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221450952200554X>
- [22] W. M. Lim, T. Rasul, S. Kumar, and M. Ala, “Past, present, and future of customer engagement,” *J. Bus. Res.*, vol. 140, no. May 2021, pp. 439–458, 2022, doi: 10.1016/j.jbusres.2021.11.014.
- [23] F. Anggara, W. Rosita, and D. A. A. Besari, “Characterization and mode of occurrence of rare earth elements and yttrium in fly and bottom ash from coal-fired power plants in Java, Indonesia,” *Int. J. Coal Sci. Technol.*, 2022, [Online]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40789-022-00476-2.pdf>
- [24] A. R. Wijaya, I. K. Kusumaningrum, and L. Hakim, “Road-side dust from central Jakarta, Indonesia: Assessment of metal (loid) content, mineralogy, and bioaccessibility,” *Environ. Technol. & Innov.*, 2022, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186422003571>
- [25] R. Afriansya, P. Astuti, V. S. Ratnadewati, J. Randisyah, T. Y. Ramadhona, and E. A. Anisa, “Investigation Of Setting Time And Flowability Of Geopolymer Mortar Using Local Industry And Agriculture Waste As Precursor In Indonesia,” *Int. J. GEOMATE*, vol. 21, no. 87, pp. 64 – 69, 2021, doi: 10.21660/2021.87.j2325.
- [26] Y. K. Firmansyah, R. A. A. Soemitro, D. D. Warnana, and J. J. Ekaputri, “Cracked Soil Behaviour Treated With Geopolymer For River Embankment Using A Fuzzy C-Means Method,” *J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 1, pp. 508 – 522, 2022, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85124588066&partnerID=40&md5=c5e912a1e82d11d8b20c67d0ac26dd98>
- [27] I. Febijanto *et al.*, “Municipal Solid Waste (MSW) Reduction through Incineration for Electricity Purposes and Its Environmental Performance: A Case Study in Bantargebang, West Java, Indonesia,” *Evergreen*, vol. 11, no. 1, pp. 32 – 45, 2024, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85188620536&partnerID=40&md5=4bc991e7e18be9a2e95d38659846d6ab>
- [28] R. I. Khasanah *et al.*, “Growth rate of acropora formosa coral fragments transplanted on different composition of faba kerbstone artificial reef,” *Biodiversitas*, vol. 20, no. 12, pp. 3593 – 3598, 2019, doi: 10.13057/biodiv/d201218.
- [29] A. E. Lianasari, A. Lisantono, and J. J. Sudjati, “Shear behavior of fly ash-based geopolymer R/C beam with bauxites as coarse aggregates: Experimental program,” *Int. J. GEOMATE*, vol. 20, no. 79, pp. 155 – 160, 2021, doi: 10.21660/2021.79.j2039.
- [30] P. R. Rangan and M. Tumpu, “Marshall Test Characteristics Of Ac-Bc Mixture To Determination Of Optimum Asphalt Content And

- Marshall Immersion Index Using Portland Composite Cement As Filler,” *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 17, no. 18, pp. 1666 – 1673, 2022, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85164822335&partnerID=40&md5=be3e30b342e9367efe6e56f33470cddc>
- [31] H. Hardjasaputra, E. Ekawati, Victor, M. Cornelia, and Rachmansyah, “Evaluation of high strength fly ash based geopolymer concrete technology with steam curing,” *Malaysian Constr. Res. J.*, vol. 6, no. Special issue 1, pp. 1 – 12, 2019, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85076478695&partnerID=40&md5=bfe5807ddeb7c3b4c85bf143021d22cc>
- [32] R. M. Rachman, A. S. Bahri, and Y. Trihadiningrum, “Stabilization/solidification of tailings on traditional gold mining in Kulon Progo using fly ash,” *J. Ecol. Eng.*, vol. 19, no. 3, pp. 178 – 184, 2018, doi: 10.12911/22998993/86145.
- [33] F. S. Handayani, F. P. Pramesti, M. A. Wibowo, and A. Setyawan, “Estimating and reducing the release of Greenhouse Gases in local road pavement constructions,” *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 1709 – 1715, 2019, doi: 10.18517/ijaseit.9.5.9705.
- [34] E. Bachtiar *et al.*, “The development of compressive strength on geopolymer mortar using fly ash as based material in South Sulawesi,” *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 10, pp. 1465 – 1472, 2018, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85056135860&partnerID=40&md5=565c181330df185862a5f57f3fda085b>
- [35] “5th KKKU International Engineering Conference 2014, KKKU-IENC 2014,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 931–932, 2014, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84901724860&partnerID=40&md5=c4dcf2256e17b5af7fec6e24d2a91398>
- [36] M. Santoso *et al.*, “Trace elements and As speciation analysis of fly ash samples from an Indonesian coal power plant by means of neutron activation analysis and synchrotron based techniques,” *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 309, no. 1, pp. 413 – 419, 2016, doi: 10.1007/s10967-016-4755-z.
- [37] A. Firda, A. Saggaff, Hanafiah, and Saloma, “Characteristic of Polymeric Lightweight Aggregate with Coal Fly Ash and Epoxy Resin for Manufacturing the Lightweight Concrete,” *Civ. Eng. Archit.*, vol. 11, no. 1, pp. 473 – 485, 2023, doi: 10.13189/cea.2023.110136.
- [38] P. Kanti, K. V. Sharma, C. G. Ramachandra, and W. H. Azmi, “Experimental determination of thermophysical properties of Indonesian fly-ash nanofluid for heat transfer applications,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 5, pp. 597 – 606, 2021, doi: 10.1080/02726351.2020.1806971.
- [39] A. Antoni, A. Yonathan, H. E. Suryo, C. Felio, K. E. Ghozali, and D. Hardjito, “Exploring the Potential of Low Cement Concrete through a Student Concrete Competition,” *Int. J. Constr. Educ. Res.*, vol. 17, no. 1, pp. 37 – 51, 2021, doi: 10.1080/15578771.2019.1650140.
- [40] H. Fansuri, Subaer, W. Supriadi, D. Hartanto, and N. Widiastuti, “The kinetics of Cd 2+ and Pb 2+ leaching from fly ash geopolymers,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 72, pp. 235 – 240, 2019, doi: 10.3303/CET1972040.

- [41] C. Chen *et al.*, “VOCs emission characteristics of coal-fired units; [燃煤机组烟气挥发性有机物排放特征],” *Clean Coal Technol.*, vol. 30, no. 3, pp. 161 – 169, 2024, doi: 10.13226/j.issn.1006-6772.23100201.
- [42] D. C. V. Simarmata, T. Satomi, and H. Takahashi, “Study on Mechanical Properties of Cemented Soil Reinforced by Empty Fruit Bunch (EFB),” *Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour.*, vol. 25, no. 1, pp. 109 – 114, 2022, doi: 10.5188/IJSMER.25.109.
- [43] Mujiono and F. Tanuwijaya, “Formulasi Korporasi sebagai Subjek Hukum Pidana dalam Regulasi Lingkungan Hidup di Indonesia,” *Lentera Huk.*, vol. 6, no. 1, pp. 55 – 70, 2019, doi: 10.19184/ejhl.v6i1.9590.
- [44] F. Anggara *et al.*, “Understanding FABA composition in coal-fired power plants: Impact of operating conditions and combustion efficiency on ash characteristics – A case study in PT Bukit Asam, South Sumatra, Indonesia,” *Results Eng.*, vol. 23, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102590.
- [45] D. Li *et al.*, “The ash formation and attrition characteristics of an Indonesia lignite coal ash for a 550 MWe ultra supercritical CFB boiler,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 147, pp. 579 – 586, 2019, doi: 10.1016/j.cherd.2019.05.027.
- [46] H. Petrus, M. Olvianas, and W. Suprapta, “Cenospheres characterization from Indonesian coal-fired power plant fly ash and their potential utilization,” *J. Clean. Prod.*, 2020, [Online]. Available: https://repository.unej.ac.id/bitstream/handle/123456789/105383/FT_FELIX_JURNAL_Cenospheres_characterization_from_Indonesian_coal-fired_power_plant_fly_ash.pdf?sequence=1
- [47] Priyadi, R. Taisa, and N. Kurniawati, “The Effects of Fly Ash and Cow Manure on Water Spinach Grown on An Ultisol of Lampung, Indonesia,” *Agrivita*, vol. 45, no. 2, pp. 209 – 219, 2023, doi: 10.17503/agrivita.v45i2.3023.
- [48] Y. Wirani, D. I. Sensuse, D. S. Hidayat, E. H. Purwaningsih, and Y. G. Sucahyo, “Enhancing Waste Management Decisions: A Group Dss Approach Using Ssm And Ahp In Indonesia,” *Interdiscip. J. Information, Knowledge, Manag.*, vol. 19, 2024, doi: 10.28945/5373.
- [49] S. Saputro *et al.*, “Modification of Coal Fly Ash Waste into Manganese-Oxide-Coated-Zeolite (MOCZ) to Adsorb Heavy Metal Ions Ni²⁺,” *J. Kim. Val.*, vol. 10, no. 1, pp. 133 – 144, 2024, doi: 10.15408/JKV.V10I1.35794.
- [50] J. S. Adiansyah, “Environmental Performance of Three Coal Ash Management Strategies in a Copper Mine Site Using Endpoint Impact Category,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 106, pp. 289 – 294, 2023, doi: 10.3303/CET23106049.
- [51] S. Arita, D. Kristianti, and L. N. Komariah, “Effectiveness of biomass-based fly ash in pulp and paper liquid waste treatment,” *South African J. Chem. Eng.*, vol. 41, pp. 79 – 84, 2022, doi: 10.1016/j.sajce.2022.05.004.
- [52] N. Nurmaliita, S. N. Madjid, A. Setiawan, R. Idroes, and Z. Jalil, “Characteristics of Silica Powder Extracted from Fly Ash of Coal Fired Power Plant – Effect of Heat Treatment Process,” *J. Ecol. Eng.*, vol. 24, no. 9, pp. 282 – 292, 2023, doi: 10.12911/22998993/169289.
- [53] “No Title”.
- [54] N. Sutra, R. A. A. Soemitro, D. D. Warnana, J. J. Ekaputri, T. Mukunoki, and Ardiansah, “Influence of Fly Ash-Based Geopolymers on Treated-Contaminated Soil Properties,” *Int. J.*

- Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 11, no. 6, pp. 2240 – 2246, 2021, doi: 10.18517/ijaseit.11.6.14407.
- [55] Y. Tajunnisa, R. Bayuaji, N. A. Husin, Y. N. Wibowo, and M. Shigeishi, “Characterization alkali-activated mortar made from fly ash and sandblasting,” *Int. J. GEOMATE*, vol. 17, no. 60, pp. 183 – 189, 2019, doi: 10.21660/2019.60.24636.
- [56] Z. Vincevica-Gaile *et al.*, “On the Way to Sustainable Peat-Free Soil Amendments,” *Sarhad J. Agric.*, vol. 37, no. Special Issue 1, pp. 122 – 135, 2021, doi: 10.17582/JOURNAL.SJA/2021.37.S1.122.135.
- [57] A. Susanto, Abdullah, M. Elma, and M. D. Putra, “Characteristics of Heterogeneous Catalysts Fly Ash Fraction of Light Shell and Fiber of Palm Oil Mill Solid Waste Grown on Peatlands,” *J. Adv. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 28, no. 3, pp. 85 – 104, 2022, doi: 10.37934/araset.28.3.85104.
- [58] Darmawi, I. Bizzy, Ellyanie, and J. D. Nasution, “Improving The Efficiency Of Vesa-2 To Maximize The Energy Utilization,” *ARPJ J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 17, no. 18, pp. 1659 – 1665, 2022, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85164820802&partnerID=40&md5=b8ccf87b1fa7c19768adad8310e08b98>
- [59] P. Risdanareni, J. Wang, N. Boon, and N. De Belie, “Performance of self-healing mortar containing bacteria immobilized in alginate coated alkali activated lightweight aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 429, 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136351.
- [60] Y. B. Pratiknyo, W. Hadi, and M. N. Kusuma, “Alternative optimization of ash waste utilization of steam power plant (2 x 1,000 MW) in terms of production, environmental and economic aspects,” *Pollut. Res.*, vol. 39, no. 1, pp. 33 – 36, 2020, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85088252303&partnerID=40&md5=e53627ad00cf7c95d8bfb4c1c08ac1>
- [61] A. T. Sudjianto, A. Halim, O. Gembiranto, and S. H. Susilo, “Comparison of Fly Ash With Lapindo Mud as a Land Stabilizer for Landfill in Pasuruan-Indonesia,” *Eastern-European J. Enterp. Technol.*, vol. 3, pp. 19 – 26, 2021, doi: 10.15587/1729-4061.2021.234518.
- [62] H.-X. Zhang, W.-W. Liu, K.-S. Yu, Z.-P. Zhu, X.-W. Guo, and Q.-G. Lü, “High sodium blended coal gasification in an industrial circulating fluidized bed,” *Meitan Xuebao/Journal China Coal Soc.*, vol. 42, no. 4, pp. 1021 – 1027, 2017, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0939.
- [63] W. Sutrisno, Triwulan, P. Aji, Faimun, Y. Tajunnisa, and K. D. Wulandari, “A Case Study of Concrete Incorporating High Volume Fly Ash and Bottom Ash for Sustainable Housing,” *Civ. Eng. Archit.*, vol. 12, no. 5, pp. 3179 – 3192, 2024, doi: 10.13189/cea.2024.120505.
- [64] Z. Zhou, M. Sofi, E. Lumantarna, R. S. Nicolas, G. H. Kusuma, and P. Mendis, “Strength development and thermogravimetric investigation of high-volume fly ash binders,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 20, 2019, doi: 10.3390/ma12203344.
- [65] “No Title.” Elsevier Ltd.
- [66] A. Antoni, I. J. Yugiarto, R. J. S. Hadi, A. Kuncoro, and D. Hardjito, “INFLUENCE OF CFBC FLY ASH CHEMICAL COMPOSITION AND MECHANICAL ACTIVATION ON

- THE PROPERTIES OF GEOPOLYMER,” *Arch. Metall. Mater.*, vol. 69, no. 4, pp. 1431 – 1437, 2024, doi: 10.24425/amm.2024.151411.
- [67] M. Muntaha, R. H. A. Fitrie, F. Wahyuni, and Y. Tajunnisa, “The Use Of Alkaline Activators With High Calcium Fly Ash As Soft Clay Stabilization Materials,” *Int. J. GEOMATE*, vol. 25, no. 109, pp. 9 – 17, 2023, doi: 10.21660/2023.109.3286.
- [68] A. Lisantono, J. J. Sudjati, and A. E. Lianasari, “Flexural behavior of fly ash-based geopolymer R/C beam with bauxite material as coarse aggregates,” *Int. J. GEOMATE*, vol. 18, no. 65, pp. 80 – 85, 2020, doi: 10.21660/2020.65.43211.
- [69] T. Pahlawan, J. Tarigan, J. J. Ekaputri, and A. Nasution, “Effect of Borax on Very High Calcium Geopolymer Concrete,” *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 1387 – 1392, 2023, doi: 10.18517/ijaseit.13.4.18291.
- [70] T. W. S. Panjaitan, P. Dargusch, D. Wadley, and A. A. Aziz, “Toward the best practice emissions reduction in an emerging economy: An analysis of cement manufacturing in indonesia,” *Entrep. Sustain. Issues*, vol. 8, no. 1, pp. 103 – 122, 2020, doi: 10.9770/jesi.2020.8.1(7).
- [71] F. Anggara, D. H. Amijaya, A. Harijoko, T. N. Tambaria, A. A. Sahri, and Z. A. N. Asa, “Rare earth element and yttrium content of coal in the Banko coalfield, South Sumatra Basin, Indonesia: Contributions from tonstein layers,” *Int. J. Coal Geol.*, vol. 196, pp. 159 – 172, 2018, doi: 10.1016/j.coal.2018.07.006.
- [72] J. S. Adiansyah, “Carbon Emission Reduction using Waste Management Strategy Approach for Improving a Mine Site Environmental Performance,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 97, pp. 157 – 162, 2022, doi: 10.3303/CET2297027.
- [73] I. Sholichin and D. A. Utama, “Variations in the addition of polypropylene fiber, fly ash and immersion in asphalt mixtures on stability and flow,” *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 2032 – 2039, 2019, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85063560417&partnerID=40&md5=8b378995a12165af74d67eb7a17ee4c8>
- [74] B. Praveenkumar and S. Darius Gnanaraj, “Case Studies on the Applications of Phenolic Resin-Based Composite Materials for Developing Eco-Friendly Brake Pads,” *J. Inst. Eng. Ser. D*, vol. 101, no. 2, pp. 327 – 334, 2020, doi: 10.1007/s40033-020-00231-4.
- [75] M. R. A. Hilario *et al.*, “Investigating size-segregated sources of elemental composition of particulate matter in the South China Sea during the 2011 Vasco cruise,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 20, no. 3, pp. 1255 – 1276, 2020, doi: 10.5194/acp-20-1255-2020.
- [76] S. S. Moersidik, N. E. Yulianita, S. U. Hasanah, A. E. Hidayat, M. A. Pratama, and C. R. Priadi, “The Performance Of Fly Ash-Based Coagulants To Remove Heavy Metals From Acid Mine Drainage,” *Rasayan J. Chem.*, vol. 15, no. 3, pp. 2016 – 2025, 2022, doi: 10.31788/RJC.2022.1536996.
- [77] P. Prihutami, A. Prasetya, W. B. Sediawan, H. T. B. M. Petrus, and F. Anggara, “Study on Rare Earth Elements Leaching from Magnetic Coal Fly Ash by Citric Acid,” *J. Sustain. Metall.*, vol. 7, no. 3, pp. 1241 – 1253, 2021, doi: 10.1007/s40831-021-00414-7.
- [78] I. Kitta, S. Manjang, W. Tjaronge, and R. Irmawaty, “Effect of coal fly ash filler in silicone rubber and epoxy resin as insulating material in wet

- environmental conditions,” *Int. J. Mech. Mechatronics Eng.*, vol. 16, no. 2, pp. 48 – 53, 2016, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84969204034&partnerID=40&md5=9af0a7de8368b625dac865c023b425ae>
- [79] H. A. Nugraha, D. Setyawan, and E. Saleh, “Acid Mine Drainage Prevention through the Dry Coating Method Using Fly Ash and Bottom Ash,” *Ecol. Eng. Environ. Technol.*, vol. 25, no. 2, pp. 102 – 111, 2024, doi: 10.12912/27197050/175860.
- [80] D. I. Prihandono and E. P. Widiati, “Political Capture in the Exclusion of FABA and Slag from Hazardous Waste List Regulation in Indonesia,” *World J. Entrep. Manag. Sustain. Dev.*, vol. 19, no. 1–2, pp. 15 – 25, 2023, doi: 10.47556/J.WJEMSD.19.1-2.2023.2.
- [81] N. H. Febriyani and Hartiwiningsih, “Corporate Criminal Liability Post Elimination Of Coal Faba Waste Status From B3 Waste Category In,” *J. Huk. Unissula*, vol. 38, no. 1, pp. 12 – 31, 2022, doi: 10.26532/jh.v38i1.20971.
- [82] R. H. Suwarno, A. S. Yuwono, and Erizal, “On the Performance Analysis and Environmental Impact of Concrete with Coal Fly Ash and Bottom Ash,” *Int. J. Eng. Technol. Innov.*, vol. 13, no. 1, pp. 86 – 97, 2023, doi: 10.46604/ijeti.2023.10229.
- [83] S. Huang, D. Yuan, H. Lin, L. Sun, and S. Lin, “Fractionation of mercury stable isotopes during coal combustion and seawater flue gas desulfurization,” *Appl. Geochemistry*, vol. 76, pp. 159 – 167, 2017, doi: 10.1016/j.apgeochem.2016.12.002.
- [84] S. Matsumoto, S. Ogata, H. Shimada, T. Sasaoka, G. J. Kusuma, and R. S. Gautama, “Application of Coal Ash to Postmine Land for Prevention of Soil Erosion in Coal Mine in Indonesia: Utilization of Fly Ash and Bottom Ash,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/8386598.
- [85] W. Rosita, I. M. Bendiyasa, I. Perdana, and F. Anggara, “Sequential particle-size and magnetic separation for enrichment of rare-earth elements and yttrium in Indonesia coal fly ash,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 1, 2020, doi: 10.1016/j.jece.2019.103575.
- [86] T. T. Haw, F. Hart, A. Rashidi, and P. Pasbakhsh, “Sustainable cementitious composites reinforced with metakaolin and halloysite nanotubes for construction and building applications,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 188, 2020, doi: 10.1016/j.clay.2020.105533.
- [87] M. Keintjem, R. Suwondo, L. Cunningham, and H. Razak, “Embodied Carbon in Concrete: Insights from Indonesia and Comparative Analysis with UK and USA,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 14, no. 6, pp. 17737 – 17742, 2024, doi: 10.48084/etasr.8781.
- [88] P. E. Kesuma, Y.-B. Yoon, and S.-J. Park, “Risk Analysis and Mitigation Measures of Co-firing: Case Study from Indonesia,” *Trans. Korean Inst. Electr. Eng.*, vol. 71, no. 4, pp. 592 – 607, 2022, doi: 10.5370/KIEE.2022.71.4.592.
- [89] R. Ding, J. Dong, M. Zhang, H. Yang, and J. Lv, “Field test of coal type adaptability on a 300MW CFB boiler,” *Powder Technol.*, vol. 274, pp. 180 – 185, 2015, doi: 10.1016/j.powtec.2015.01.027.
- [90] X. Xiao, G. Li, S. Dong, L. Qian, and L. Ou, “Sources and Enrichment Mechanisms of Rare Earth Element in the Mosuoying Granites, Sichuan Province, Southwest China,” *Preprints*, 2024, [Online]. Available:

- https://www.preprints.org/frontend/manuscript/758e5cb2d3011c92342fd94c0670aa5c/download_pub
- [91] Z. Bian, W. Dong, X. Li, Y. Song, and H. Huang, "Enrichment of Terbium(III) under synergistic effect of biosorption and biomineralization by *Bacillus* sp. DW015 and *Sporosarcina pasteurii*," *Microbiol. Spectr.*, 2024, [Online]. Available: <https://journals.asm.org/doi/abs/10.1128/spectrum.00760-24>
- [92] J. Xie, C. Wang, Q. Zhang, and F. Min, "Occurrence state, occupying sites and coordination structure of rare earth elements in phosphorite," *J. Rare Earths*, 2024, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002072124003089>
- [93] D. Wei, H. U. Hongli, and Y. Guoqiang, "Post-collisional metallogenic response in Eastern Junggar, Xinjiang: geological characteristics of the Songkalsu copper-gold deposit and geochemical evidence," *China Min. Mag.*, 2024, [Online]. Available: <http://www.chinaminingmagazine.com/en/article/doi/10.12075/j.issn.1004-4051.20242128>
- [94] G. Wen, J. Qiu, A. H. Hofstra, D. E. Harlov, and Z. Ren, "Revealing the role of crystal chemistry in REE fractionation in skarn garnets: insights from lattice-strain theory," *Contrib. to Mineral. Petrol.*, 2024, [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00410-024-02095-3>
- [95] T. T. Haw, F. Hart, A. Rashidi, and P. Pasbakhsh, "Pozzolan and SCM in sustainable construction materials," *Appl. Clay Sci.*, 2020, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016913172030156X>
- [96] S. Arita and et al., "Heavy metal pollution and bioaccessibility in urban environments," *Environ. Res.*, 2022, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935122004458>
- [97] W. Rosita, I. M. Bendiyasa, I. Perdana, and F. Anggara, "Leaching characteristics of cerium and yttrium from non-magnetic coal fly ash after silicate digestion using acetic acid," *J. Environ. Chem. Eng.*, 2022, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343722016918>
- [98] D. A. A. Besari, F. Anggara, D. Timotius, and D. H. Amijaya, "Understanding FABA composition in coal-fired power plants: Impact of operating conditions and combustion efficiency on ash characteristics—A case study in Indonesia," *Results Eng.*, 2022, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024008454>