



## **Studi Awal Pemanfaatan Limbah Fly Ash dan Bottom Ash Sebagai Material Alternatif dalam Bidang Konstruksi**

**Buyung Mantap<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Universitas Ratu Samban Bengkulu Utara, Indonesia

email: [rezimunizar@gmail.com](mailto:rezimunizar@gmail.com)

### **Article Info :**

Received:  
18-11-2025  
Revised:  
19-12-2025  
Accepted:  
30-12-2025

### **Abstract**

*The utilization of fly ash and bottom ash as alternative materials in construction has expanded in response to sustainability imperatives and increasing volumes of industrial by-products. This study consolidates and critically organizes existing scientific knowledge to clarify the relationships between material characteristics, mechanical performance, and sustainability considerations associated with fly ash and bottom ash. The analysis demonstrates that their mechanical behavior is highly dependent on physical-chemical properties, mixture design, and environmental context, indicating that performance cannot be generalized across applications. Although environmental benefits are frequently emphasized, sustainability is often framed in a simplified manner, with limited integration of life cycle impacts, social dimensions, and institutional constraints. The findings also reveal methodological inconsistencies and conceptual gaps that hinder knowledge transfer and practical implementation. By structuring dispersed evidence into a coherent analytical perspective, this study contributes to a clearer understanding of the conditions under which fly ash and bottom ash can be responsibly utilized. The outcomes provide a foundation for guiding future experimental development and supporting more informed decision-making in sustainable construction systems.*

**Keywords:** Fly Ash, Bottom Ash, Sustainable Construction, Alternative Construction Materials, Material Sustainability.

### **Abstrak**

Pemanfaatan abu terbang dan abu dasar sebagai bahan alternatif dalam konstruksi telah berkembang pesat sebagai respons terhadap tuntutan keberlanjutan dan peningkatan volume limbah industri. Studi ini mengumpulkan dan mengorganisir secara kritis pengetahuan ilmiah yang ada untuk menjelaskan hubungan antara karakteristik material, kinerja mekanik, dan pertimbangan keberlanjutan yang terkait dengan abu terbang dan abu dasar. Analisis menunjukkan bahwa perilaku mekaniknya sangat bergantung pada sifat fisik-kimia, desain campuran, dan konteks lingkungan, menunjukkan bahwa kinerja tidak dapat digeneralisasi di berbagai aplikasi. Meskipun manfaat lingkungan sering ditekankan, keberlanjutan sering kali dipandang secara sederhana, dengan integrasi terbatas terhadap dampak siklus hidup, dimensi sosial, dan batasan institusional. Temuan juga mengungkapkan ketidakonsistenan metodologis dan celah konseptual yang menghambat transfer pengetahuan dan implementasi praktis. Dengan mengorganisir bukti yang tersebar menjadi perspektif analitis yang koheren, studi ini berkontribusi pada pemahaman yang lebih jelas tentang kondisi di mana abu terbang dan abu dasar dapat digunakan secara bertanggung jawab. Hasilnya menyediakan landasan untuk mengarahkan pengembangan eksperimental di masa depan dan mendukung pengambilan keputusan yang lebih terinformasi dalam sistem konstruksi berkelanjutan.

**Kata kunci:** Fly Ash, Bottom Ash, Konstruksi Berkelanjutan, Material Konstruksi Alternatif, Keberlanjutan Material.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## **PENDAHULUAN**

Perkembangan global dalam bidang konstruksi berkelanjutan menunjukkan pergeseran paradigma yang semakin kuat dari eksploitasi material primer menuju optimalisasi material sekunder berbasis limbah industri, seiring meningkatnya tekanan terhadap sumber daya alam, target penurunan emisi karbon, serta tuntutan ekonomi sirkular dalam sektor infrastruktur. Limbah hasil pembakaran batu bara berupa fly ash dan bottom ash, yang secara kuantitas terus meningkat sejalan dengan kebutuhan energi dunia, kini diposisikan bukan semata sebagai residu berbahaya, melainkan sebagai sumber

material potensial yang memiliki karakteristik pozzolan, sifat fisik-mekanik, serta stabilitas kimia yang relevan untuk aplikasi konstruksi modern (Amal & No, 2023; Ayuningtyas et al., 2023; Azmi et al., 2025). Dalam konteks ini, konstruksi tidak lagi dipahami hanya sebagai aktivitas teknis, tetapi sebagai arena strategis untuk integrasi prinsip keberlanjutan lintas sektor, termasuk pengelolaan limbah industri energi dan mineral kritis dalam kerangka siklus hidup material (Azmi et al., 2025; Indrawan & Setiawan, 2025).

Literatur mutakhir memperlihatkan bahwa pemanfaatan fly ash dan bottom ash telah dieksplorasi dalam berbagai bentuk aplikasi konstruksi, mulai dari mortar dan beton geopolimer, stabilisasi tanah, hingga lapisan perkerasan jalan dan material berpori ramah lingkungan, dengan hasil yang menunjukkan peningkatan kinerja mekanik maupun efisiensi lingkungan dalam kondisi tertentu (Akifa et al., 2025; Firda & Yulianti, 2022; Gazalie et al., 2023; Khairunnisa et al., 2026). Studi-studi geopolimer berbasis fly ash, misalnya, menegaskan bahwa rasio aktivator alkali, molaritas, serta kombinasi dengan limbah silika lain berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan dan workability material, namun sekaligus memperlihatkan sensitivitas performa terhadap variasi desain campuran yang relatif tinggi (Akifa et al., 2025; Azzahra & Wardhono, 2025). Di sisi lain, penelitian tentang substitusi material limbah dalam beton dan mortar konvensional menunjukkan bahwa peningkatan keberlanjutan material kerap dicapai melalui kompromi tertentu pada sifat mekanik atau durabilitas, yang menuntut pendekatan desain material yang lebih adaptif dan kontekstual (Hasir et al., 2025; Imran & Attamimi, 2024).

Meskipun demikian, sintesis kritis atas penelitian terdahulu mengungkapkan adanya keterbatasan konseptual dan empiris yang cukup mendasar, terutama terkait fragmentasi fokus kajian dan kurangnya integrasi antara karakteristik material, konteks lingkungan, serta skenario pemanfaatan aktual di lapangan. Sebagian besar studi masih terjebak pada pengujian laboratorium dengan parameter terbatas dan kondisi ideal, tanpa mengaitkan hasilnya dengan variasi sumber fly ash dan bottom ash, heterogenitas sifat kimia-mineralogi, maupun implikasi jangka panjang terhadap kinerja struktur dan lingkungan (Amal & No, 2023; Ayuningtyas et al., 2023). Inkonsistensi temuan antarpelitian, khususnya terkait hubungan antara proporsi limbah dan peningkatan performa mekanik, mengindikasikan belum matangnya kerangka evaluasi awal yang mampu memetakan batas kelayakan material secara sistematis sebelum diarahkan pada aplikasi spesifik (Firda & Yulianti, 2022; Gazalie et al., 2023).

Celah tersebut mempertegas urgensi ilmiah dan praktis untuk melakukan studi awal yang bersifat komprehensif dan diagnostik, bukan sekadar eksperimental parsial, guna membangun pemahaman mendasar mengenai potensi dan keterbatasan fly ash serta bottom ash sebagai material alternatif konstruksi. Ketidakpastian mengenai variabilitas mutu, interaksi material dengan sistem pengikat, serta implikasi keberlanjutan pada skala sistem telah menjadi penghambat utama adopsi yang lebih luas di industri konstruksi, meskipun tekanan regulatif dan sosial untuk memanfaatkan limbah industri terus meningkat (Alghifary & Sihombing, 2022; Indrawan & Setiawan, 2025). Dalam konteks negara berkembang dengan intensitas produksi limbah batu bara yang tinggi, absennya kerangka studi awal yang terstruktur berpotensi memperlebar kesenjangan antara inovasi akademik dan implementasi praktis.

Berangkat dari kondisi tersebut, penelitian ini menempatkan diri dalam lanskap keilmuan sebagai upaya menjembatani pendekatan material science, teknik sipil, dan prinsip keberlanjutan melalui pemetaan awal pemanfaatan fly ash dan bottom ash secara sistematis. Alih-alih langsung mengklaim performa unggul pada aplikasi tertentu, studi ini memosisikan fly ash dan bottom ash sebagai objek kajian awal yang dievaluasi dari sisi karakteristik dasar, potensi sinergi dengan sistem konstruksi eksisting, serta batasan teknis yang menentukan arah pemanfaatan lanjutan. Pendekatan ini sejalan dengan kebutuhan akan riset tahap awal yang mampu berfungsi sebagai fondasi konseptual bagi pengembangan material alternatif yang tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga relevan secara lingkungan dan sosial.

Penelitian ini bertujuan untuk menyusun pemahaman awal yang terintegrasi mengenai potensi pemanfaatan limbah fly ash dan bottom ash sebagai material alternatif dalam bidang konstruksi melalui analisis karakteristik, kecenderungan performa, serta implikasi aplikatifnya. Kontribusi teoretis diharapkan terletak pada penguatan kerangka konseptual studi awal material limbah konstruksi, sementara kontribusi metodologis diarahkan pada penyediaan dasar evaluasi yang dapat digunakan

sebagai rujukan bagi penelitian lanjutan maupun pengambilan keputusan teknis dalam praktik konstruksi berkelanjutan.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dirancang sebagai penelitian kepustakaan (library research) dengan pendekatan kualitatif-sistematis yang berlandaskan paradigma interpretatif-kritis, dipilih untuk memungkinkan penelusuran, pemetaan, dan sintesis konseptual atas perkembangan pengetahuan ilmiah terkait pemanfaatan limbah fly ash dan bottom ash dalam bidang konstruksi tanpa intervensi eksperimental langsung. Justifikasi epistemologis pendekatan ini bertumpu pada asumsi bahwa pemahaman awal (early-stage understanding) mengenai material alternatif lebih tepat dibangun melalui konsolidasi temuan empiris dan teoretis yang telah ada, sehingga pola, kecenderungan, serta batasan pengetahuan dapat diidentifikasi secara reflektif dan argumentatif. Ruang lingkup kajian dibatasi secara operasional pada literatur yang membahas fly ash dan/atau bottom ash sebagai material konstruksi atau material pendukung konstruksi, baik dalam bentuk beton, mortar, geopolimer, stabilisasi tanah, perkerasan jalan, maupun material berpori, dengan horizon waktu publikasi sepuluh tahun terakhir untuk menjaga relevansi ilmiah. Batasan ini ditetapkan guna menghindari bias historis dan memastikan bahwa kerangka analisis mencerminkan perkembangan mutakhir dalam teknologi material dan diskursus keberlanjutan.

Sumber data diperoleh secara eksklusif dari basis data ilmiah bereputasi internasional dan nasional terindeks, meliputi Scopus, Web of Science, ScienceDirect, serta Google Scholar sebagai pelengkap, dengan kriteria inklusi berupa artikel jurnal peer-reviewed, prosiding ilmiah bereputasi, dan publikasi akademik yang menyajikan data empiris, kerangka teoretis, atau tinjauan kritis terkait topik penelitian. Kriteria eksklusi mencakup artikel non-ilmiah, laporan teknis tanpa proses penelaahan sejawat, serta publikasi yang tidak secara eksplisit mengkaji aspek material konstruksi. Instrumen penelusuran menggunakan kombinasi kata kunci terkontrol dan bebas seperti *fly ash*, *bottom ash*, *construction materials*, *sustainable construction*, dan *alternative materials*, yang disusun dalam skema Boolean untuk meningkatkan presisi dan keterulangan pencarian. Prosedur seleksi artikel dilakukan melalui tahapan penyaringan judul, abstrak, dan teks penuh secara berurutan, dengan validitas seleksi dijaga melalui konsistensi kriteria dan pemeriksaan silang antarartikel. Data yang terpilih diekstraksi dan diorganisasikan secara kronologis dan tematik, mencakup konteks penelitian, metode, temuan utama, serta keterbatasan yang dilaporkan, kemudian dianalisis menggunakan teknik sintesis naratif-kritis dengan kerangka analisis tematik dan komparatif guna mengidentifikasi pola hubungan, inkonsistensi, dan celah pengetahuan yang relevan bagi perumusan posisi riset dan agenda penelitian lanjutan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Material dan Kinerja Mekanik Fly Ash dan Bottom Ash dalam Literatur Konstruksi

Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa fly ash dan bottom ash secara konsisten diposisikan sebagai material sekunder dengan potensi mekanik yang ditentukan oleh karakteristik fisik, kimia, dan mineraloginya. Sejumlah studi menegaskan bahwa kandungan silika dan alumina pada fly ash berperan sentral dalam reaksi pozzolan maupun polimerisasi alkali yang memengaruhi kekuatan tekan material berbasis semen dan geopolimer (Akifa et al., 2025; Suranto et al., 2024). Bottom ash, meskipun memiliki reaktivitas kimia yang lebih rendah, memperlihatkan kontribusi struktural yang signifikan ketika dimanfaatkan sebagai substitusi agregat halus atau filler (Krisdiansyah et al., 2024). Variasi ukuran butir dan porositas kedua material tersebut memunculkan rentang performa mekanik yang luas dalam berbagai aplikasi konstruksi. Temuan ini mengindikasikan bahwa kinerja mekanik fly ash dan bottom ash tidak bersifat inheren, melainkan dikonstruksi melalui konfigurasi material dan sistem pengikat yang digunakan.

Analisis komparatif antarstudi memperlihatkan bahwa fly ash lebih dominan diteliti dalam konteks mortar dan beton geopolimer karena kemampuannya membentuk matriks pengikat alternatif yang kuat. Variasi rasio aktivator alkali, sebagaimana ditunjukkan dalam studi mortar geopolimer, menghasilkan fluktuasi kuat tekan yang tajam sehingga menegaskan sensitivitas sistem terhadap parameter desain (Akifa et al., 2025; Azzahra & Wardhono, 2025). Dalam kerangka teori material berkelanjutan, sensitivitas ini mencerminkan transisi dari material konvensional yang robust menuju

material rekayasa yang sangat kontekstual. Bottom ash, sebaliknya, lebih sering dimanfaatkan pada aplikasi non-struktural hingga semi-struktural seperti paving block dan lapis perkerasan jalan (Gazalie et al., 2023; Krisdiansyah et al., 2024). Pola ini menunjukkan adanya pembagian peran material yang belum sepenuhnya didasarkan pada evaluasi mekanik komparatif yang sistematis.

Literatur juga mengungkap bahwa performa mekanik fly ash dan bottom ash tidak dapat dilepaskan dari interaksi material tersebut dengan limbah lain dalam sistem campuran. Penambahan limbah marmer, abu sekam padi, maupun material organik dan anorganik lainnya dilaporkan mampu meningkatkan atau menurunkan kuat tekan tergantung pada kompatibilitas mikrostrukturalnya (Azzahra & Wardhono, 2025; Hasir et al., 2025; Imran & Attamimi, 2024). Dalam perspektif teori komposit, interaksi ini merefleksikan pentingnya kesesuaian modulus elastisitas dan mekanisme ikatan antar-fase. Namun, sebagian besar studi masih menilai kinerja secara parsial tanpa mengaitkan hasil mekanik dengan model mikrostruktur yang eksplisit. Akibatnya, generalisasi temuan sering kali bersifat lokal dan sulit ditransfer ke konteks aplikasi yang berbeda.

Pada aplikasi beton dan mortar konvensional, fly ash kerap diposisikan sebagai substitusi parsial semen dengan tujuan meningkatkan keberlanjutan tanpa degradasi signifikan pada kuat tekan. Studi-studi stabilisasi tanah dan beton berpori menunjukkan bahwa kontribusi mekanik fly ash bersifat tidak linear terhadap proporsi campuran, sehingga ambang optimum menjadi isu krusial (Firda & Yulianti, 2022; Khairunnisa et al., 2026). Bottom ash dalam konteks ini lebih banyak berfungsi sebagai elemen struktural pasif yang memengaruhi kepadatan dan distribusi tegangan. Kerangka mekanika material granular membantu menjelaskan mengapa bottom ash lebih efektif pada aplikasi tertentu dibandingkan pada sistem pengikat reaktif. Pola ini menegaskan bahwa klasifikasi aplikasi berdasarkan fungsi mekanik material lebih relevan dibandingkan sekadar asal limbahnya.

Sintesis temuan lintas studi memperlihatkan bahwa evaluasi kinerja mekanik fly ash dan bottom ash sering kali tidak disertai dengan pembahasan implikasi jangka panjang terhadap durabilitas dan stabilitas struktural. Beberapa penelitian mulai mengaitkan kinerja mekanik dengan kondisi lingkungan spesifik seperti lingkungan gambut dan kondisi lembab ekstrem (Larici et al., 2025). Temuan tersebut menunjukkan bahwa porositas dan interaksi kimia lingkungan dapat mengubah respons mekanik material secara signifikan. Dalam kerangka teori ketahanan material, faktor lingkungan seharusnya diposisikan sebagai variabel intrinsik, bukan eksternal. Ketidakhadiran perspektif ini dalam banyak studi awal membatasi daya jelajah konseptual pemanfaatan fly ash dan bottom ash.

**Tabel 1. Pemetaan Tematik Literatur terkait Karakteristik dan Kinerja Mekanik Fly Ash dan Bottom Ash**

Kategori Aplikasi	Jenis Material	Indikator Mekanik Utama	Pola Temuan Dominan	Sumber Literatur
Mortar/Beton Geopolimer	Fly Ash	Kuat tekan, workability	Sensitif terhadap rasio aktivator	Akifa et al. (2025); Azzahra & Wardhono (2025)
Beton Konvensional	Fly Ash	Kuat tekan, porositas	Optimum pada substitusi parsial	Suranto et al. (2024); Hasir et al. (2025)
Paving Block & Perkerasan	Bottom Ash	Kuat tekan, stabilitas	Efektif sebagai agregat halus	Gazalie et al. (2023); Krisdiansyah et al. (2024)
Aplikasi Khusus Lingkungan	Fly Ash & Bottom Ash	Porositas, ketahanan	Dipengaruhi kondisi lingkungan	Larici et al. (2025); Khairunnisa et al. (2026)

Tabel sintesis menunjukkan bahwa indikator mekanik yang digunakan dalam literatur relatif konsisten, namun kerangka interpretasinya sangat bervariasi antarpelitian. Ketergantungan pada kuat tekan sebagai indikator utama sering kali mengaburkan pemahaman tentang mekanisme kegagalan material. Studi tentang aspal dan lapisan aus mulai memperluas indikator ke arah stabilitas dan kinerja

fungsional jangka panjang (Mulyawati et al., 2025; Rosida & Widayanti, 2025). Pendekatan ini lebih selaras dengan teori performa material berbasis fungsi dibandingkan pendekatan kekuatan semata. Perbedaan ini mengindikasikan fragmentasi epistemik dalam penilaian kinerja mekanik material limbah.

Jika dibandingkan dengan kajian material limbah non-batubara, seperti slag nikel, abu boiler sawit, dan sludge kertas, fly ash dan bottom ash menunjukkan pola adopsi yang lebih mapan namun tidak selalu lebih komprehensif secara analitik. Studi literatur pada slag nikel dan abu boiler menekankan pentingnya studi awal sebagai landasan pemilihan aplikasi (Munizar, 2025; Rambak et al., 2025). Pendekatan tersebut relatif jarang diterapkan secara eksplisit pada fly ash dan bottom ash meskipun volume dan variasinya lebih besar. Perbandingan ini mengungkap paradoks antara kematangan empiris dan kedalaman konseptual dalam literatur fly ash dan bottom ash. Implikasi konseptualnya adalah perlunya reposisi studi awal sebagai fase krusial, bukan sekadar pendahuluan.

Integrasi fly ash dan bottom ash dalam kerangka keberlanjutan juga menunjukkan bahwa kinerja mekanik sering dijadikan justifikasi tunggal bagi klaim ramah lingkungan. Padahal, literatur LCA dan praktik pertambangan berkelanjutan menegaskan bahwa performa mekanik harus dibaca bersama dampak siklus hidup material (Azmi et al., 2025). Beberapa studi sosial dan kebijakan menunjukkan bahwa adopsi material limbah sangat dipengaruhi oleh persepsi risiko teknis dan sosial (Indrawan & Setiawan, 2025). Ketika kinerja mekanik tidak dipetakan secara sistematis sejak tahap awal, risiko tersebut cenderung dibesar-besarkan. Hal ini menunjukkan keterkaitan langsung antara kualitas kajian mekanik awal dan keberterimaan inovasi material.

Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, fly ash dan bottom ash juga dipertimbangkan sebagai bagian dari sistem infrastruktur yang lebih luas, bukan sekadar material individual. Kajian infrastruktur berkelanjutan menekankan pentingnya konsistensi kinerja material terhadap tuntutan fungsi dan umur layanan (Ayuningtyas et al., 2023; Premana & Kerdiati, 2022). Literatur beton ringan dan material alternatif lain menunjukkan bahwa optimasi mekanik sering kali dicapai melalui kompromi dengan parameter lain seperti berat jenis dan kemudahan produksi (Lase & Gulo, 2024). Fly ash dan bottom ash berada dalam spektrum kompromi serupa, namun jarang dianalisis dalam kerangka trade-off yang eksplisit. Ketiadaan analisis ini membatasi pemahaman tentang posisi strategis kedua material dalam ekosistem material konstruksi.

Karakteristik dan kinerja mekanik fly ash dan bottom ash telah dibuktikan secara empiris, tetapi belum sepenuhnya terartikulasikan dalam kerangka konseptual yang terpadu. Dominasi pendekatan eksperimental parsial menghasilkan akumulasi data yang kaya namun terfragmentasi. Pendekatan studi awal berbasis sintesis kritis memungkinkan data tersebut diorganisasikan menjadi peta pengetahuan yang lebih operasional. Dalam perspektif teori pengembangan material, tahap ini krusial untuk menentukan arah riset lanjutan yang lebih terfokus dan efisien. Dengan demikian, pemanfaatan fly ash dan bottom ash memerlukan reposisi dari objek uji individual menjadi entitas material yang dipahami secara sistemik.

### **Dimensi Keberlanjutan, Lingkungan, dan Konteks Sistemik Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash**

Sintesis literatur menunjukkan bahwa pemanfaatan fly ash dan bottom ash dalam konstruksi secara dominan dibingkai dalam diskursus keberlanjutan lingkungan sebagai respons terhadap akumulasi limbah industri energi. Sejumlah studi menempatkan kedua material tersebut sebagai instrumen mitigasi dampak lingkungan melalui pengurangan kebutuhan material primer dan penurunan volume limbah yang berakhir di landfill (Amal & No, 2023; Ayuningtyas et al., 2023). Dalam kerangka teori ekonomi sirkular, pendekatan ini mencerminkan pergeseran dari logika linear ekstraksi–konsumsi–pembuangan menuju pemanfaatan ulang berbasis nilai tambah. Namun, literatur juga memperlihatkan bahwa klaim keberlanjutan sering kali bersifat normatif dan tidak selalu ditopang oleh analisis sistemik yang memadai. Kondisi ini menuntut pembacaan kritis terhadap bagaimana keberlanjutan dikonstruksi dan diukur dalam studi pemanfaatan fly ash dan bottom ash.

Beberapa penelitian mulai mengaitkan pemanfaatan fly ash dan bottom ash dengan pendekatan penilaian siklus hidup material, meskipun implementasinya masih terbatas pada level konseptual. Studi tentang Life Cycle Assessment dalam praktik pertambangan dan material kritis menegaskan bahwa manfaat lingkungan suatu material tidak dapat dinilai hanya dari tahap penggunaan, melainkan harus mencakup seluruh siklus hidupnya (Azmi et al., 2025). Ketika fly ash dan bottom ash diposisikan

sebagai material alternatif tanpa evaluasi siklus hidup yang komprehensif, potensi dampak laten seperti emisi tambahan dari proses pengolahan sering terabaikan. Literatur konstruksi menunjukkan kecenderungan untuk memusatkan perhatian pada fase aplikasi dan mengabaikan fase pra- dan pasca-penggunaan. Pola ini mengindikasikan adanya ketidakseimbangan analitik dalam penilaian keberlanjutan material limbah.

Aspek lingkungan lain yang menonjol dalam literatur adalah potensi interaksi fly ash dan bottom ash dengan kondisi lingkungan spesifik, termasuk tanah asam, lingkungan gambut, dan sistem air. Studi pada beton kombinasi FABA di lingkungan gambut menunjukkan bahwa kondisi lingkungan ekstrem dapat memodifikasi porositas dan stabilitas material secara signifikan (Larici et al., 2025). Dalam perspektif teori interaksi material–lingkungan, temuan ini menegaskan bahwa keberlanjutan material bersifat kontekstual dan tidak universal. Beberapa penelitian remediasi lingkungan bahkan memanfaatkan karakteristik kimia abu untuk fungsi non-struktural seperti barrier reaktif (Alghifary & Sihombing, 2022). Hal ini memperluas spektrum pemanfaatan fly ash dan bottom ash dari sekadar material konstruksi menuju komponen sistem lingkungan terpadu.

Literatur stabilisasi tanah dan perkerasan jalan menempatkan fly ash dan bottom ash sebagai solusi keberlanjutan berbasis lokasi, khususnya pada proyek infrastruktur dengan keterbatasan sumber daya material konvensional. Studi stabilisasi tanah menunjukkan bahwa peningkatan daya dukung melalui penambahan fly ash dapat mengurangi kebutuhan material impor dan energi konstruksi (Firda & Yulianti, 2022). Dalam kerangka teori pembangunan berkelanjutan, pendekatan ini menghubungkan performa teknis dengan efisiensi sumber daya lokal. Namun, efektivitas lingkungan dari strategi tersebut sangat bergantung pada konsistensi kualitas limbah dan kontrol implementasi. Literatur jarang membahas risiko lingkungan jangka panjang dari variasi kualitas fly ash dan bottom ash antar sumber.

Dimensi keberlanjutan sosial juga mulai muncul dalam kajian pemanfaatan fly ash dan bottom ash, meskipun masih bersifat implisit. Studi tentang inovasi sosial dan CSR di sektor energi menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah industri memiliki implikasi terhadap penerimaan masyarakat dan legitimasi operasional perusahaan (Indrawan & Setiawan, 2025). Dalam konteks ini, material konstruksi berbasis limbah tidak hanya dinilai dari performa teknisnya, tetapi juga dari persepsi risiko dan manfaat sosial. Literatur konstruksi cenderung memisahkan dimensi teknis dan sosial, sehingga peluang integrasi analisis menjadi terlewatkan. Padahal, teori sistem sosio-teknis menegaskan bahwa keberhasilan adopsi teknologi material sangat ditentukan oleh interaksi kedua dimensi tersebut.

**Tabel 2. Sintesis Dimensi Keberlanjutan dalam Literatur Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash**

<b>Dimensi Keberlanjutan</b>	<b>Fokus Analisis dalam Literatur</b>	<b>Indikator yang Digunakan</b>	<b>Pola Temuan Utama</b>	<b>Sumber Literatur</b>
Lingkungan	Reduksi limbah, substitusi material	Volume limbah, porositas	Manfaat kontekstual	Amal & No (2023); Ayuningtyas et al. (2023)
Siklus Hidup	LCA konseptual	Emisi, energi	Minim integrasi penuh	Azmi et al. (2025)
Lingkungan Spesifik	Tanah asam, gambut	Porositas, stabilitas	Sensitif kondisi	Larici et al. (2025); Alghifary & Sihombing (2022)
Sosial	Penerimaan, CSR	Persepsi risiko	Jarang dianalisis	Indrawan & Setiawan (2025)

Tabel sintesis memperlihatkan bahwa dimensi keberlanjutan yang dianalisis dalam literatur masih terfragmentasi dan jarang diperlakukan secara integratif. Fokus dominan pada aspek lingkungan fisik menyebabkan dimensi sosial dan ekonomi hanya muncul sebagai implikasi tidak langsung. Dalam teori keberlanjutan multidimensi, pendekatan semacam ini berpotensi menghasilkan solusi parsial yang rapuh secara sistemik. Beberapa studi material alternatif lain menunjukkan bahwa kegagalan integrasi dimensi keberlanjutan sering berujung pada resistensi implementasi di lapangan (Rambak et al., 2025).

Hal ini menegaskan perlunya reposisi analisis keberlanjutan fly ash dan bottom ash ke dalam kerangka sistem yang lebih holistik.

Perbandingan dengan literatur material limbah non-batubara memperkuat temuan bahwa fly ash dan bottom ash relatif tertinggal dalam integrasi analisis keberlanjutan komprehensif. Kajian abu boiler kelapa sawit dan sludge industri kertas, misalnya, secara eksplisit membahas keterbatasan lingkungan dan skenario pemanfaatan non-struktural sejak tahap awal (Munizar, 2025; Rodhi, 2025). Pendekatan ini memungkinkan penilaian risiko yang lebih realistis dan adaptif. Dalam konteks fly ash dan bottom ash, literatur cenderung mengasumsikan keberlanjutan sebagai atribut inheren akibat statusnya sebagai limbah. Asumsi ini berpotensi menutupi kompleksitas dampak lingkungan yang sebenarnya.

Kajian pada material perkerasan dan aspal menunjukkan bahwa keberlanjutan juga berkaitan erat dengan kinerja fungsional jangka panjang dan kebutuhan pemeliharaan. Studi nano fly ash dan filler fly ash pada campuran aspal mengindikasikan bahwa peningkatan kinerja awal tidak selalu berbanding lurus dengan penurunan dampak lingkungan sepanjang umur layanan (Mulyawati et al., 2025; Rosida & Widayanti, 2025). Dalam teori durability-based sustainability, umur layanan material menjadi parameter kunci yang sering diabaikan dalam studi awal. Fly ash dan bottom ash memiliki potensi besar dalam konteks ini, namun literatur masih minim dalam mengaitkan performa jangka panjang dengan manfaat lingkungan bersih. Kekosongan ini menunjukkan arah penting bagi penelitian lanjutan.

Integrasi fly ash dan bottom ash ke dalam sistem infrastruktur berkelanjutan juga menuntut konsistensi dengan prinsip desain dan konstruksi ramah lingkungan. Studi tentang ashcrete dan beton ramah lingkungan menekankan bahwa keberlanjutan tidak hanya ditentukan oleh material, tetapi juga oleh metode produksi dan aplikasi (Premana & Kerdianti, 2022; Suranto et al., 2024). Literatur fly ash dan bottom ash sering kali mengisolasi material dari sistem konstruksi secara keseluruhan. Pendekatan terfragmentasi ini membatasi kemampuan penelitian untuk menjelaskan dampak nyata di tingkat sistem. Implikasi konseptualnya adalah perlunya pergeseran dari evaluasi material-sentris menuju evaluasi sistem-sentris.

Dimensi keberlanjutan pemanfaatan fly ash dan bottom ash telah diakui secara luas, namun belum dikembangkan secara analitik dan integratif. Literatur memberikan bukti empiris tentang manfaat lingkungan potensial, tetapi masih lemah dalam mengartikulasikan batasan dan risiko sistemik. Pendekatan studi awal berbasis sintesis kritis memungkinkan identifikasi ketidakseimbangan tersebut secara lebih tajam. Dalam kerangka teori keberlanjutan konstruksi, tahap ini krusial untuk mencegah simplifikasi berlebihan atas konsep material ramah lingkungan. Dengan demikian, pemanfaatan fly ash dan bottom ash perlu dipahami sebagai intervensi sistemik yang melampaui sekadar substitusi material.

### **Implikasi Konseptual, Keterbatasan Literatur, dan Arah Pengembangan Riset Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash**

Sintesis kritis atas literatur menunjukkan bahwa pemanfaatan fly ash dan bottom ash dalam konstruksi masih didominasi oleh pendekatan aplikatif yang berorientasi pada hasil teknis jangka pendek. Sebagian besar penelitian menempatkan material ini sebagai solusi substitusi langsung tanpa membangun fondasi konseptual yang memadai mengenai posisi epistemiknya dalam ilmu material konstruksi (Akifa et al., 2025; Amal & No, 2023). Dalam perspektif teori pengembangan material, kondisi ini mencerminkan kecenderungan *solution-driven research* yang mendahului *problem-framing* secara sistematis. Akibatnya, pengetahuan yang dihasilkan bersifat akumulatif tetapi tidak selalu progresif secara konseptual. Pola ini membatasi kemampuan literatur untuk menjelaskan mengapa dan dalam kondisi apa fly ash dan bottom ash layak diadopsi secara luas.

Keterbatasan konseptual tersebut tercermin dalam inkonsistensi hasil empiris antarpencapaian, khususnya terkait parameter performa yang digunakan sebagai dasar evaluasi. Studi mortar dan beton geopolimer menunjukkan variasi kuat tekan yang signifikan antar desain campuran, namun jarang diikuti dengan model konseptual yang menjelaskan mekanisme dasar variasi tersebut (Akifa et al., 2025; Azzahra & Wardhono, 2025). Dalam kerangka teori konstruksi pengetahuan ilmiah, inkonsistensi ini bukan sekadar masalah teknis, melainkan indikasi belum matangnya paradigma riset. Penelitian cenderung memperlakukan fly ash dan bottom ash sebagai material homogen meskipun literatur sendiri mengakui heterogenitas sumber dan karakteristiknya. Hal ini menghambat replikasi dan generalisasi temuan lintas konteks.

Literatur stabilisasi tanah, perkerasan, dan aplikasi non-struktural memperlihatkan masalah serupa dalam bentuk keterbatasan transferabilitas hasil. Temuan peningkatan daya dukung atau

stabilitas sering kali bergantung pada kondisi lokal yang tidak dirumuskan secara eksplisit sebagai variabel konseptual (Firda & Yulianti, 2022; Gazalie et al., 2023). Dalam perspektif teori sistem terbuka, material konstruksi selalu berinteraksi dengan konteks lingkungan dan operasional yang dinamis. Ketika konteks tersebut tidak dimodelkan secara eksplisit, hasil penelitian kehilangan daya prediktifnya. Kondisi ini menegaskan perlunya kerangka studi awal yang memetakan batasan sejak tahap konseptual.

Keterbatasan lain yang menonjol adalah minimnya integrasi antara kajian teknis dan kerangka kebijakan serta tata kelola sumber daya. Beberapa literatur keberlanjutan menekankan bahwa pemanfaatan limbah industri tidak dapat dilepaskan dari regulasi, standar mutu, dan mekanisme insentif (Azmi et al., 2025). Namun, sebagian besar studi fly ash dan bottom ash berhenti pada rekomendasi teknis tanpa membahas implikasi kebijakan. Dalam teori inovasi berkelanjutan, kesenjangan antara bukti teknis dan kerangka institusional sering menjadi penghambat adopsi. Dengan demikian, keterbatasan literatur bukan hanya bersifat metodologis, tetapi juga struktural.

Dimensi sosial dan persepsi risiko juga masih menjadi area yang kurang dieksplorasi dalam literatur teknis fly ash dan bottom ash. Studi inovasi sosial di sektor energi menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah sangat dipengaruhi oleh kepercayaan publik dan legitimasi sosial (Indrawan & Setiawan, 2025). Ketika penelitian konstruksi mengabaikan dimensi ini, rekomendasi teknis berisiko tidak diimplementasikan. Dalam kerangka teori sosio-teknis, material bukan sekadar entitas fisik, tetapi bagian dari jaringan aktor, institusi, dan nilai. Kekosongan analisis sosial ini mempersempit makna keberlanjutan yang seharusnya bersifat multidimensional.

**Tabel 3. Keterbatasan Literatur dan Implikasi Konseptual Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash**

Aspek Analisis	Pola Keterbatasan Literatur	Dampak terhadap Pengetahuan	Implikasi Riset	Sumber Literatur
Konseptual	Material diperlakukan homogen	Generalisasi lemah	Perlu kerangka awal	Akifa et al. (2025); Amal & No (2023)
Metodologis	Parameter parsial	Replikasi terbatas	Standarisasi awal	Firda & Yulianti (2022); Gazalie et al. (2023)
Sistemik	Minim integrasi LCA	Klaim keberlanjutan parsial	Analisis siklus hidup	Azmi et al. (2025)
Sosial	Persepsi publik diabaikan	Implementasi rendah	Integrasi sosio-teknis	Indrawan & Setiawan (2025)

Tabel sintesis menegaskan bahwa keterbatasan literatur bersifat saling terkait dan tidak dapat dipisahkan secara terisolasi. Ketika kerangka konseptual lemah, pendekatan metodologis cenderung parsial dan berujung pada klaim keberlanjutan yang tidak utuh. Studi pada material alternatif lain menunjukkan bahwa pemetaan awal keterbatasan justru mempercepat pengembangan riset yang lebih terarah (Rambak et al., 2025). Pendekatan ini masih jarang diterapkan secara eksplisit pada fly ash dan bottom ash. Implikasi konseptualnya adalah perlunya reposisi studi awal sebagai fase reflektif, bukan sekadar inventarisasi hasil.

Perbandingan dengan kajian abu boiler kelapa sawit dan sludge industri memperlihatkan bahwa penelitian tahap awal yang jelas batasannya menghasilkan rekomendasi pemanfaatan yang lebih realistis. Studi-studi tersebut secara eksplisit membedakan aplikasi struktural dan non-struktural berdasarkan risiko teknis dan lingkungan (Munizar, 2025; Rodhi, 2025). Dalam konteks fly ash dan bottom ash, pembedaan semacam ini masih kabur. Literatur cenderung mendorong aplikasi luas tanpa klasifikasi risiko yang memadai. Hal ini berpotensi menimbulkan kegagalan implementasi dan penurunan kepercayaan terhadap material limbah.

Arah pengembangan riset selanjutnya menuntut pergeseran dari pengujian performa menuju pembangunan kerangka konseptual berbasis sintesis lintas studi. Penelitian beton berpori, ashcrete, dan HVFA-SCC menunjukkan bahwa integrasi konsep desain, lingkungan, dan fungsi dapat menghasilkan



inovasi material yang lebih robust (Khairunnisa et al., 2026; Premana & Kerdiati, 2022; Suranto et al., 2024). Fly ash dan bottom ash memiliki potensi serupa jika diposisikan dalam kerangka tersebut. Namun, hal ini mensyaratkan adanya studi awal yang secara eksplisit memetakan ruang kemungkinan dan batasannya. Tanpa tahap ini, riset lanjutan berisiko mengulang pola fragmentasi yang sama.

Implikasi metodologis dari temuan ini adalah pentingnya pendekatan library research yang tidak sekadar deskriptif, tetapi bersifat sintesis kritis dan reflektif. Studi literatur yang terstruktur memungkinkan identifikasi pola, inkonsistensi, dan kekosongan pengetahuan secara sistemik. Dalam teori metodologi riset konstruksi, pendekatan ini berfungsi sebagai mekanisme validasi epistemik sebelum eksplorasi eksperimental lanjutan. Fly ash dan bottom ash, sebagai material dengan variabilitas tinggi, sangat membutuhkan fondasi epistemik semacam ini. Dengan demikian, studi awal bukan pelengkap, melainkan prasyarat pengembangan riset eksperimental yang bermakna.

Tantangan utama pemanfaatan fly ash dan bottom ash bukan terletak pada ketiadaan bukti empiris, melainkan pada lemahnya integrasi konseptual dan sistemik dalam literatur. Keterbatasan tersebut membuka ruang strategis bagi penelitian yang berfokus pada pemetaan awal dan sintesis pengetahuan. Pendekatan ini memungkinkan pergeseran dari sekadar pembuktian teknis menuju pengembangan kerangka ilmiah yang lebih matang. Dalam konteks konstruksi berkelanjutan, kontribusi semacam ini menjadi kunci untuk memastikan bahwa inovasi material tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga relevan secara sistemik. Oleh karena itu, studi awal berbasis penelitian kepustakaan memiliki posisi sentral dalam lanskap keilmuan pemanfaatan fly ash dan bottom ash.

## KESIMPULAN

Fly ash dan bottom ash memiliki potensi signifikan sebagai material alternatif konstruksi, namun pemanfaatannya masih didominasi oleh pendekatan teknis parsial yang belum terintegrasi secara konseptual dan sistemik. Literatur secara konsisten membuktikan bahwa kinerja mekanik kedua material sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisik-kimia, konfigurasi campuran, serta konteks lingkungan aplikasi, sehingga performanya tidak bersifat inheren melainkan dikonstruksi melalui sistem material yang digunakan. Di sisi lain, klaim keberlanjutan yang melekat pada pemanfaatan fly ash dan bottom ash sering kali dibangun secara normatif tanpa dukungan analisis siklus hidup, dimensi sosial, dan kerangka infrastruktur yang komprehensif. Fragmentasi ini diperkuat oleh minimnya integrasi antara hasil empiris, model konseptual, dan konteks kebijakan, yang pada akhirnya membatasi replikasi dan generalisasi temuan. Oleh karena itu, studi awal berbasis sintesis kritis menjadi fase epistemik yang krusial untuk memetakan batasan, risiko, dan ruang kemungkinan pemanfaatan fly ash dan bottom ash secara lebih realistis, sekaligus menyediakan fondasi konseptual yang diperlukan bagi pengembangan riset eksperimental dan implementasi berkelanjutan di masa depan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Akifa, S. N., Tikara, M., Adam, A. A., Ramadhan, B. R., & Wahidin, S. A. N. (2025). Performa Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbasis Fly Ash Dengan Variasi Rasio Alkali Aktivator: Performa Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbasis Fly Ash Dengan Variasi. *Paulus Civil Engineering Journal*, 7(3), 370-380. <https://doi.org/10.52722/3y5tev29>
- Alghifary, A., & Sihombing, Y. I. (2022). Permeable Reactive Barrier Sebagai Inovasi Remediasi Air Asam Tambang Yang Berkelanjutan Dan Ramah Lingkungan Di Indonesia. *Jurnal Himasapta*, 6(3), 159-170. <https://doi.org/10.20527/Jhs.V6i3.4680>
- Amal, A., & No, J. D. R. (2023). Pemanfaatan Fly Ash Batu Bara Untuk Kebutuhan Rantai Pasok Bahan Konstruksi. *Journal Of Sustainable Civil Engineering (Josce)*, 5(02). <https://doi.org/10.47080/Josce.V5i02.2857>
- Ayuningtyas, U., Rosmeika, R., & Firdaus, A. (2023, December). Fly Ash Dan Bottom Ash Sebagai Material Infrastruktur Untuk Mendukung Pembangunan Yang Berkelanjutan. In *Proceedings Of National Colloquium Research And Community Service* (Vol. 7, Pp. 47-52). <https://doi.org/10.33019/Snppm.V7i0.4828>
- Azmi, U., Murtiana, S., Sasongko, N. A., & Yanto, S. (2025). Critical Minerals Life Cycle Assessment (LCA): Sustainable Mining Practices. *Formosa Journal Of Applied Sciences*, 4(3), 883-902. <https://doi.org/10.55927/Fjas.V4i3.71>

- Azzahra, Z. H., & Wardhono, A. (2025). Pengaruh Penambahan Limbah Marmer Pada Mortar Geopolimer Fly Ash Dan Abu Sekam Padi Dengan Molaritas Naoh 12M. *AGREGAT*, 10(1), 1242-1250. <https://doi.org/10.30651/Ag.V10i1.25163>
- Firda, A., & Yulianti, D. (2022). Pengaruh Penggunaan Limbah Fly Ash Dan Epoxy Resin Sebagai Bahan Stabilisasi Tanah Terhadap Daya Dukung Tanah Di Jalan Irigas Palembang. *Jurnal Deformasi*, 7(1), 10-20. <https://doi.org/10.31851/Deformasi.V7i1.7795>
- Gazalie, R., Fauzi, M., Hawinuti, R., & Helmi, M. (2023). Pemanfaatan Limbah Abu Batu Bara Sebagai Filler Pada Lataston Lapis Aus (HRS-WC). *Jurnal Gradasi Teknik Sipil*, 7(1), 71-85. <https://doi.org/10.31961/Gradasi.V7i1.1434>
- Hasir, H., Simatupang, M., Mokui, H. T., Arsyad, F., Alson, M. W. B., & Pratiwi, N. A. (2025). Pengaruh Substitusi Abu Sekam Padi Terhadap Kuat Tekan Dan Workability Beton Self-Compacting Concrete (Scc) Sebagai Upaya Pemanfaatan Limbah Ramah Lingkungan. *Sultra Civil Engineering Journal (Sciej)*, 6(2), 640-649. <https://doi.org/10.54297/Sciej.V6i2.1322>
- Imran, I., & Attamimi, A. (2024). Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Dan Cangkang Telur Pada Beton Geopolimer. *Jurnal Informasi, Sains Dan Teknologi*, 7(2), 112-124. <https://doi.org/10.55606/Isaintek.V7i2.240>
- Indrawan, R., & Setiawan, F. (2025). Kerangka Penghidupan Berkelanjutan (Sla) Melalui Inovasi Sosial: Studi Kasus Program Csr/harvest Moon/pt Pln Indonesia Power Unit Bisnis Pembangkitan (Ubp) Banten 3 Lontar. *Learning Society: Jurnal Csr, Pendidikan Dan Pemberdayaan Masyarakat*, 6(2), 688-700. <https://doi.org/10.30872/Ls.V6i2.5702>
- Khairunnisa, H., Fadhil, A., & Kurnia, R. D. I. (2026). Studi Awal Permeabilitas Dan Kuat Tekan Beton Berpori Ramah Lingkungan Dengan Pemanfaatan Limbah Industri. *Jurnal Teknik Sipil Dan Arsitektur*, 31(1), 133-143. <https://doi.org/10.36728/Jtsa.V31i1.5823>
- Krisdiansyah, G., Simanihuruk, B., Handika, N., Dewanti, D. P., & Mutiara, A. (2024). Pemanfaatan Bottom Ash Pembakaran Pltsa Sebagai Substitusi Pasir Penyusun Paving Block. *Construction And Material Journal*, 6(1), 43-52. <https://doi.org/10.32722/Cmj.V6i1.6089>
- Larici, R., Revolisi, M., Nesya, B. H., Agistin, V., & Wahab, W. (2025). Pengaruh Lingkungan Gambut Terhadap Porositas Beton Kombinasi Remah Karet Dan Faba (Fly Ash Bottom Ash). *Media Konstruksi*, 10(4), 545-551. <https://doi.org/10.33772/Jmk.V10i4.193>
- Lase, H. M. P., & Gulo, M. J. (2024). Analisa Kuat Tekan Beton Dengan Penambahan Limbah Plastik Hdpe Dalam Campuran Beton. *Jurnal Dunia Pendidikan*, 4(3), 1783-1791. <https://doi.org/10.55081/Jur DIP.V4i3.2159>
- Mulyawati, F. J., Hanifah, W. S., & Syafier, S. (2025). Peningkatan Karakteristik Aspal Menggunakan Bahan Tambah Nano Fly Ash. *Jurnal Teknik Sipil Dan Teknologi Konstruksi*, 10(2). <https://doi.org/10.35308/Jts-Utu.V10i2.10397>
- Munizar, R. (2025). Kajian Awal Pemanfaatan Limbah Abu Boiler Kelapa Sawit Sebagai Material Konstruksi Non-Struktural. *Journal Of Science, Technology, And Innovation*, 1(2), 258-267. <https://doi.org/10.65310/S2aa0v21>
- Premana, I. P. A., & Kerdianti, N. L. K. R. (2022). Ashcrete Sebagai Material Bangunan Ramah Lingkungan. *Jurnal Vastukara: Jurnal Desain Interior, Budaya, Dan Lingkungan Terbangun*, 2(2), 203-211. <https://doi.org/10.59997/Vastukara.V2i2.1743>
- Rambak, E. P., Wardani, A., Darwis, M., Rahman, L., Simanjutak, R. A. H., Badia, B. A., & Idris, M. (2025). Studi Literatur: Potensi Pemanfaatan Slag Nikel Sebagai Material Alternatif Ramah Lingkungan Dalam Konstruksi Berkelanjutan. *Media Konstruksi*, 10(1), 140-148. <https://doi.org/10.33772/Jmk.V10i1.155>
- Rodhi, N. N. (2025). Kajian Karakteristik Batako Ringan Dengan Campuran Sludge Kertas. *Infomanpro*, 14(1), 1-8. <https://doi.org/10.36040/Infomanpro.V14i1.12763>
- Rosida, A., & Widayanti, A. (2025). Karakteristik Limbah Keramik, Agregat Alam, Dan Filler Fly Ash Untuk Campuran Lapis Aus Asphalt Concrete–Wearing Course (Ac-Wc). *Jurnal Media Publikasi Terapan Transportasi*, 61-69. <https://doi.org/10.26740/Mitrans.V3n1.P61-69>
- Suranto, M., Darupratomo, D., & Saputro, H. (2024). Pengembangan Teknologi Bahan Mendukung Pembangunan Berkelanjutan Bidang Teknik Sipil (High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete/Hvfa-Scc). *Jurnal Sipil Terapan*, 2(1), 30-47. <https://doi.org/10.58169/Jusit.V2i1.382>