

Pemanfaatan Abu Dasar Hasil Pembakaran Sampah Rumah Tangga untuk Produksi Blok Paving Berkelanjutan: Optimalisasi Kekuatan Tekan dan Imobilisasi Kromium

Siti Rachmawati^{1,2*}, Aulia Syah Hafiffah¹, Mohammad Masykuri³, Fathoni Firmansyah⁴, Sapta Suhardono¹, Iva Yeniseptiariva⁵, Maria Paskanita Widjanarti⁶, dan Iwan Suryadi⁷

¹Program Studi Ilmu Lingkungan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sebelas Maret, Indonesia; e-mail: siti.rachmawati@staff.uns.ac.id

²PPLH, LPPM UNS, Surakarta, Indonesia

³Pascasarjana Ilmu Lingkungan, Universitas Sebelas Maret, Indonesia

⁴Program Studi Keselamatan dan Kesehatan Kerja, STikes Mitra Husada Karanganyar, Indonesia

⁵Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Indonesia

⁶Program Studi Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Sekolah Vokasi, Universitas Sebelas Maret, Indonesia

⁷Program Studi Kesehatan Lingkungan, Poltekkes Kemenkes Makassar, Indonesia

ABSTRAK

Pembakaran sampah rumah tangga sebagai strategi pengurangan sampah menghasilkan residu, yang mungkin mengandung logam berat dan menimbulkan risiko lingkungan jika tidak dikelola dengan benar. Studi ini menilai kelayakan penggunaan abu dasar hasil pembakaran sampah rumah tangga sebagai pengganti sebagian agregat halus dalam produksi paving block melalui proses pemadatan berbasis semen. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi komposisi abu dasar yang optimal berdasarkan kinerja kekuatan tekan dan untuk mengevaluasi imobilisasi kromium (Cr) setelah pemadatan. Sampel abu dasar dikumpulkan dari insinerator sampah rumah tangga skala komunitas di Kabupaten Karanganyar, Indonesia. Paving block disiapkan dengan tingkat substitusi abu dasar sebesar 0%, 10%, 20%, dan 40% (w/w) dari agregat halus. Uji kekuatan tekan dilakukan setelah 28 hari pengeringan sesuai dengan SNI 03-0691-1996. Perbedaan statistik antar campuran dievaluasi menggunakan ANOVA *One Way* diikuti dengan analisis post hoc. Konsentrasi kromium dianalisis menggunakan metode TCLP-AAS sebelum dan sesudah proses pemadatan. Hasil menunjukkan bahwa penambahan 20% abu dasar menghasilkan kekuatan tekan rata-rata tertinggi memenuhi persyaratan untuk paving block Kategori A menurut standar Indonesia. ANOVA *One Way* mengungkapkan perbedaan signifikan dalam kekuatan tekan di antara variasi campuran ($p < 0,001$). Konsentrasi kromium menurun dari $0,53 \pm 0,01$ mg/kg pada abu dasar mentah menjadi $0,24 \pm 0,01$ mg/kg pada matriks paving block yang telah dipadatkan, yang sesuai dengan efisiensi imobilisasi sebesar 54,7%. Proses pemadatan berbasis semen berkontribusi untuk mengurangi mobilitas kromium dan mendukung praktik pengelolaan sampah berkelanjutan.

Kata kunci: Abu, Insinerasi, paving block, kromium, solidifikasi

ABSTRACT

The household waste incineration as a waste reduction strategy results in the production of residues, which may contain heavy metals and pose environmental risks if not properly managed. This study assessed the feasibility of using household waste incineration bottom ash as a partial substitute for fine aggregate in paving block production through a cement-based solidification process. The objectives were to identify the optimal bottom ash composition based on compressive strength performance and to evaluate chromium (Cr) immobilization following solidification. Bottom ash samples were collected from a community-scale household waste incinerator in Karanganyar Regency, Indonesia. Paving blocks were prepared with bottom ash substitution levels of 0%, 10%, 20%, and 40% (w/w) of fine aggregate. Compressive strength tests were conducted after 28 days of curing in accordance with SNI 03-0691-1996. Statistical differences among mixtures were evaluated using one-way ANOVA followed by post hoc analysis. Chromium concentration was analyzed using the TCLP-AAS method before and after the solidification process. The results indicated that the addition of 20% bottom ash yielded the highest average compressive strength, meeting the requirements for Category A paving blocks according to Indonesian standards. One-way ANOVA revealed significant differences in compressive strength among mixture variations ($p < 0.001$). Chromium concentration decreased from 0.53 ± 0.01 mg/kg in raw bottom ash to 0.24 ± 0.01 mg/kg in the solidified paving block matrix, corresponding to an immobilization efficiency of 54.7%. The cement-based solidification process contributes to reducing chromium mobility and supporting sustainable waste management practices.

Keywords: ash, incineration, paving blocks, chromium (Cr), solidification

Citation: Rachmawati, S., Hafiffah, A. S., Masykuri, M., Firmansyah, F., Suhardono, S., Septiariva, I. Y., Widjanarti, M. P., dan Suryadi, I. (2026). Pemanfaatan Abu Dasar Hasil Pembakaran Sampah Rumah Tangga untuk Produksi Blok Paving Berkelanjutan: Optimalisasi Kekuatan Tekan dan Imobilisasi Kromium. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(5), 1271-1279, doi:10.14710/jil.24.5.1271-1279

1. PENDAHULUAN

Secara global, produksi limbah padat perkotaan (MSW) meningkat, didorong oleh faktor-faktor seperti pertumbuhan perkotaan yang pesat, peningkatan populasi, dan perubahan kebiasaan konsumsi. Pengelolaan limbah ini telah menjadi masalah lingkungan yang signifikan, karena pengolahan dan pembuangan yang tidak tepat dapat mengakibatkan pencemaran tanah, air, dan udara (Abubakar et al, 2022). Pembakaran merupakan metode pengolahan limbah yang banyak digunakan karena dapat mengurangi volume limbah hingga 90% sekaligus memulihkan energi dari bahan limbah. Terlepas dari manfaatnya, pembakaran menghasilkan sejumlah besar residu padat, terutama abu dasar, yang harus dikelola dengan benar untuk menghindari kerusakan lingkungan (Chen et al, 2023; Ajorloo et al, 2022).

Abu dasar pembakaran limbah padat perkotaan (MSWIBA) adalah produk sampingan padat yang paling signifikan dari pembangkit listrik tenaga limbah, yang membentuk sekitar 15–25% dari massa limbah awal. Sifat fisik dan kimia abu dasar bergantung pada komposisi limbah dan kondisi pembakaran, biasanya termasuk fase mineral, pecahan kaca, keramik, karbon yang tidak terbakar, dan logam berat yang berpotensi berbahaya. Akibatnya, akumulasi dan pembuangan abu dasar telah menjadi masalah lingkungan yang mendesak, terutama karena potensi unsur-unsur beracun untuk menjadi mudah berpindah dan meresap ke lingkungan (Nan et al, 2026). Kromium (Cr) adalah salah satu logam berat yang sering ditemukan dalam abu dasar dan sangat mengkhawatirkan karena persistensi, toksisitas, dan kemungkinan dampak lingkungannya. Kromium dapat berasal dari barang-barang limbah rumah tangga seperti baterai, cat, plastik, perangkat elektronik, dan bahan-bahan yang mengandung logam. Setelah berada di lingkungan, kromium dapat menumpuk di ekosistem tanah dan air, mengganggu fungsi fisiologis tanaman, dan berpotensi memasuki rantai makanan, menimbulkan ancaman bagi kesehatan manusia dan sistem ekologi (Ghani et al, 2023). Kandungan Cr pada umumnya terkandung pada sampah B3 yang dihasilkan oleh teknologi insinerasi seperti kabel. Selain itu, kandungan Cr juga terkandung dalam sisa puntung rokok, menurut Koutela et al (2020) Cr ada didalam puntung rokok baik itu pada rokok utuh maupun rokok yang telah dihisap. Sampah anorganik seperti kemasan plastik berwarna dengan jenis polipropilena seperti botol plastik, gelas plastik, kemasan plastik, dan lain-lain juga mengandung Cr terutama kromium heksavalen.

Penelitian terbaru telah menggarisbawahi potensi penggunaan abu dasar pembakaran limbah padat kota (MSWIBA) sebagai sumber daya mineral alternatif dalam bahan konstruksi, seperti beton, mortar, paving block, bahan dasar jalan, dan produk semen. Aplikasi ini tidak hanya mengurangi permintaan agregat alami tetapi juga selaras dengan prinsip ekonomi sirkular

dengan memfasilitasi pemulihan dan valorisasi bahan-bahan yang berasal dari limbah. Tinjauan sebelumnya menunjukkan bahwa abu dasar yang diproses dengan benar dapat meningkatkan efisiensi sumber daya dan berkontribusi pada praktik konstruksi berkelanjutan. Namun, keberadaan logam berat menimbulkan tantangan signifikan terhadap penerapannya secara luas, sehingga memerlukan strategi stabilisasi dan imobilisasi yang efektif (Chen et al, 2023; Abramoy et al, 2018). Paving block berbahan dasar campuran abu dasar pembakaran sampah medis memenuhi SNI 03-0691-1996 dengan kategori mutu D yang peruntukannya untuk taman (Rachmawati et al, 2023).

Solidifikasi/stabilisasi (S/S) menggunakan pengikat semen merupakan salah satu teknologi yang paling umum digunakan untuk mengelola limbah yang mengandung logam berat. Selama hidrasi semen, gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) dan produk hidrasi lainnya membentuk matriks padat yang dapat secara fisik membungkus dan mengimobilisasi logam berat secara kimiawi. Proses ini mengurangi mobilitas kontaminan dan meminimalkan potensi pelarutan, sehingga meningkatkan keamanan lingkungan dari bahan konstruksi yang berasal dari limbah. Studi terbaru menunjukkan bahwa solidifikasi berbasis semen dapat secara efektif mengimobilisasi kromium dan logam berat lainnya sambil mempertahankan sifat mekanik yang dapat diterima dalam produk konstruksi (Gholizadeh et al, 2026; Lu et al, 2024).

Banyak penelitian telah mengeksplorasi penggabungan abu dasar ke dalam bahan konstruksi. Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya telah berkonsentrasi pada sistem insinerasi skala kota, residu abu terbang, atau fasilitas pengolahan limbah menjadi energi skala besar. Selain itu, banyak penelitian telah mengevaluasi kinerja mekanik atau karakteristik lingkungan secara terpisah. Informasi mengenai penggunaan abu dasar insinerasi limbah rumah tangga yang dihasilkan dari fasilitas skala komunitas, khususnya di negara berkembang, masih terbatas. Lebih lanjut, penelitian yang secara simultan menilai tingkat substitusi abu optimal, perbedaan statistik dalam kekuatan tekan, dan kinerja imobilisasi kromium dalam satu kerangka eksperimental masih langka (Dutka et al, 2024; Jun et al, 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk menilai kelayakan penggunaan abu dasar insinerasi limbah rumah tangga sebagai pengganti sebagian agregat halus dalam produksi paving block melalui proses pemadatan berbasis semen. Tujuan spesifiknya adalah untuk: (1) mengidentifikasi komposisi abu dasar optimal berdasarkan kinerja kekuatan tekan, (2) mengevaluasi signifikansi statistik perbedaan kekuatan tekan di antara berbagai campuran, dan (3) memeriksa imobilisasi kromium setelah proses pemadatan. Temuan ini diharapkan dapat memberikan bukti ilmiah yang mendukung penggunaan residu pembakaran sampah rumah tangga secara berkelanjutan, sehingga mendorong

penggunaan bahan bangunan yang ramah lingkungan dan praktik pengelolaan sampah sirkular. Abu hasil pembakaran insinerator dari sampah rumah tangga yang dilakukan oleh komunitas alam predator sampah dimanfaatkan sebagai pupuk pada penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi menjadi paving block yang memiliki nilai ekonomi.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Abu dasar yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari fasilitas pembakaran sampah rumah tangga skala komunitas yang terletak di Kabupaten Karanganyar, Jawa Tengah, Indonesia. Fasilitas ini menggunakan sistem pembakaran kisi bergerak untuk memproses sampah rumah tangga campuran. Sampel abu dasar diperoleh melalui metode pengambilan sampel acak selama siklus pembakaran lengkap. Setelah pengumpulan, abu dibiarkan dingin dan stabil dalam kondisi lingkungan selama tujuh hari. Selanjutnya, material tersebut disaring untuk menghilangkan residu yang tidak terbakar dan partikel kasar sebelum disimpan dalam wadah kedap udara untuk analisis laboratorium.

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Material Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, dan Laboratorium Mutu Lingkungan FTSP, Universitas Islam Indonesia, dari November 2025 hingga Maret 2026.

2.2. Desain Penelitian

Dalam penelitian ini, pengaturan laboratorium eksperimental digunakan untuk menilai bagaimana substitusi abu dasar pembakaran sampah rumah tangga memengaruhi kekuatan tekan dan kemampuan imobilisasi kromium pada *paving block*. Empat campuran berbeda dibuat dengan mengganti agregat halus alami dengan abu dasar pada rasio 0%, 10%, 20%, dan 40% berdasarkan berat. Campuran kontrol, yang berfungsi sebagai dasar, tidak mengandung abu dasar sama sekali. Persentase substitusi yang dipilih bertujuan untuk mencerminkan skenario penggunaan abu rendah, sedang, dan tinggi, dengan tujuan menentukan komposisi optimal yang mencapai keseimbangan antara kinerja secara teknik dan aman terhadap lingkungan.

2.3. Persiapan Pembuatan Paving Block

Spesimen paving block dibuat sesuai dengan prosedur desain campuran yang diuraikan dalam SNI 03-2834-2000 untuk campuran beton standar. Bahan yang digunakan meliputi semen Portland Tipe I, pasir alam sebagai agregat halus, abu dasar sebagai pengganti sebagian pasir, dan air bersih.

Kandungan semen dipertahankan secara konsisten pada 600 kg/m³ di semua campuran, sementara proporsi abu dasar dan pasir disesuaikan berdasarkan desain eksperimental. Awalnya, bahan kering dicampur secara menyeluruh, setelah itu air

ditambahkan secara bertahap untuk mencapai campuran yang homogen. Campuran ini kemudian dicetak menjadi spesimen paving block dengan dimensi 200 mm × 100 mm × 60 mm dan dipadatkan menggunakan mesin pengepres hidrolik. Untuk setiap variasi campuran, lima spesimen disiapkan, sehingga totalnya menjadi 20 spesimen.

Dari jumlah tersebut, tiga spesimen dari setiap kelompok diuji kekuatan tekannya, satu spesimen dianalisis kandungan kromiumnya, dan satu spesimen disimpan sebagai sampel cadangan. Setelah dicetak, spesimen dikeluarkan dari cetakan setelah 24 jam dan kemudian diawetkan dalam kondisi lembap selama 28 hari.

2.4. Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kekuatan tekan dilakukan setelah masa pengeringan 28 hari menggunakan Mesin Uji Tekan (CTM) sesuai dengan SNI 03-0691-1996 tentang bata beton (*paving block*). Beban maksimum yang diterima oleh spesimen uji dicatat, dan kekuatan tekan dihitung menggunakan rumus berikut.

$$f'c = P/A$$

di mana $f'c$ adalah kekuatan tekan (MPa), P adalah beban maksimum (N), dan A adalah luas penampang spesimen uji (mm²). Nilai kekuatan tekan rata-rata dari setiap variasi kemudian dibandingkan untuk mengevaluasi pengaruh substitusi abu terhadap sifat mekanik paving block.

Pada setiap variasi campuran digunakan tiga spesimen untuk pengujian kekuatan tekan ($n = 3$), sehingga total terdapat 12 spesimen yang dianalisis untuk empat variasi campuran. Jumlah spesimen tersebut ditetapkan berdasarkan keterbatasan jumlah spesimen dan kapasitas pengujian yang tersedia dalam penelitian. Nilai rata-rata dan standar deviasi dihitung untuk masing-masing variasi campuran. Selanjutnya, data dianalisis menggunakan one-way ANOVA untuk mengevaluasi perbedaan kekuatan tekan antarvariasi campuran.

Mengingat jumlah spesimen pada setiap kelompok relatif terbatas, hasil analisis statistik digunakan sebagai evaluasi eksploratif terhadap perbedaan antarvariasi campuran dan ditafsirkan dengan mempertimbangkan nilai rata-rata, standar deviasi, serta hasil pemeriksaan asumsi statistik.

2.5. Analisis Kromium dan Penilaian Solidifikasi

Konsentrasi Kromium (Cr) dalam abu dasar mentah dan spesimen paving block yang telah dipadatkan dinilai menggunakan Prosedur Pelindian Karakteristik Toksisitas (TCLP) sesuai dengan SNI 8808:2019. Ekstraksi TCLP melibatkan penggunaan cairan ekstraksi di bawah kondisi pengadukan terkontrol yang difasilitasi oleh pengaduk putar. Setelah ekstraksi, cairan hasil pelindian disaring dan konsentrasi kromium dianalisis melalui Spektrofotometri Serapan Atom (AAS). Efektivitas

proses pemadatan ditentukan dengan membandingkan konsentrasi kromium dalam abu dasar mentah dengan konsentrasi kromium dalam spesimen paving block yang dihasilkan menggunakan komposisi campuran optimal.

Pengujian kromium dilakukan terhadap dua jenis sampel, yaitu abu dasar hasil pembakaran sampah rumah tangga sebelum digunakan dalam pembuatan paving block dan paving block dengan nilai kuat tekan tertinggi. Masing-masing sampel diuji menggunakan metode TCLP sesuai SNI 8808:2019, kemudian ekstrak hasil TCLP dianalisis menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) untuk menentukan konsentrasi kromium yang terlindi. Pengujian dilakukan pada masing-masing sampel terpilih dan hasil analisis kromium dilaporkan dalam bentuk nilai konsentrasi sebagaimana diperoleh dari pengujian laboratorium.

2.6. Analisis Data Statistik

Perangkat lunak IBM SPSS Statistics digunakan untuk analisis data. Statistik deskriptif memfasilitasi perhitungan rata-rata dan deviasi standar nilai kekuatan tekan untuk setiap variasi campuran. Analisis varians satu arah (ANOVA) dilakukan untuk memeriksa perbedaan kekuatan tekan di antara variasi campuran. Setelah mengidentifikasi perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$), perbandingan post hoc Bonferroni digunakan untuk memastikan perbedaan berpasangan di antara kelompok perlakuan. Konsentrasi kromium sebelum dan sesudah pemadatan dibandingkan secara deskriptif untuk menilai kinerja imobilisasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengelolaan Sampah di Desa Tawangmangu Menggunakan Teknologi Pembakaran

Tabel 1. Inventarisasi Input dan Output Perendaman

Sampah Organik	Sampah Anorganik	Sampah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3)
1. Sisa makanan	1. Kertas	1. Kabel
2. Kulit buah	2. Karton	2. Kemasan
3. Sisa sayuran	3. Kemasan plastik	pembersih lantai
4. Daun kering	4. Logam	3. Kemasan cat
	5. Botol kaca	
	6. Botol plastik	
	7. Kain	
	8. Pecahan kaca	
	9. Puntung rokok	

Komunitas Sahabat Alam menerapkan sistem insinerasi kisi bergerak untuk pengelolaan sampah rumah tangga di Desa Tawangmangu. Proses pengelolaan sampah dimulai dengan pengumpulan sampah menggunakan truk pikap, diikuti dengan pemilahan sampah menjadi tiga kategori: sampah organik, sampah anorganik, dan sampah berbahaya. Sampah organik dimanfaatkan untuk produksi kompos dan budidaya belatung, sedangkan sampah anorganik yang dapat didaur ulang dijual kepada pengumpul lokal. Sisa sampah dimasukkan ke dalam

insinerator melalui sistem konveyor dan menjalani pengolahan termal, menghasilkan abu dasar, energi listrik, uap, dan air penangkap asap sebagai produk sampingan. Jenis-jenis sampah rumah tangga telah disajikan pada Tabel 1.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sampah rumah tangga yang diproses di fasilitas insinerasi terdiri dari tiga kategori utama: sampah organik, sampah anorganik, dan sampah berbahaya. Sampah organik terutama meliputi sisa makanan, kulit buah, sisa sayuran, dan daun kering, sedangkan sampah anorganik didominasi oleh kertas, kardus, kemasan plastik, logam, dan bahan kaca. Sampah berbahaya meliputi kabel, kemasan pembersih lantai, dan wadah cat.



Gambar 1. Abu Dasar Insinerasi Sampah

Pengamatan visual menunjukkan bahwa abu dasar yang dihasilkan dari proses pembakaran berwarna abu-abu kehitaman dengan tekstur kasar dan berpori. Abu dasar yang terkumpul kemudian dimanfaatkan sebagai pengganti sebagian agregat halus dalam produksi paving block.

Proses pembakaran sampah rumah tangga menghasilkan abu dasar sebagai residu padat utama. Pengamatan menunjukkan bahwa abu dasar ini memiliki tekstur berpori dan heterogen, sesuai dengan karakteristik abu dasar pembakaran sampah padat perkotaan yang didokumentasikan dalam penelitian sebelumnya. Sifat berpori terutama timbul dari pelepasan senyawa volatil dan peleburan konstituen mineral yang tidak sempurna selama pembakaran. Akibatnya, abu dasar biasanya menunjukkan kepadatan yang lebih rendah dan kapasitas penyerapan air yang lebih tinggi dibandingkan dengan agregat alami (Sivayogara & Elavenil, 2025; Al-Kindi, 2019; Alam et al, 2019).

Terlepas dari sifat-sifat ini, abu dasar telah menarik minat yang signifikan sebagai bahan konstruksi alternatif karena kandungan silika, alumina, kalsium, dan fase mineral lainnya yang dapat meningkatkan sistem semen. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa abu dasar yang diproses dengan baik dapat sebagian menggantikan agregat alami dalam beton, paving block, bahan dasar jalan, dan produk konstruksi lainnya, sehingga mengurangi ekstraksi sumber daya mentah dan mendorong

pemulihan sumber daya dari aliran limbah (Zuraida et al, 2023; Chen et al, 2022).

Penggunaan abu dasar semakin diakui sebagai strategi penting dalam kerangka ekonomi sirkular. Alih-alih dibuang ke tempat pembuangan sampah, residu pembakaran dapat diubah menjadi bahan bangunan bernilai tambah, sehingga mengurangi dampak lingkungan dan biaya pengelolaan limbah. Pendekatan ini sangat relevan untuk destinasi wisata seperti Desa Tawangmangu, di mana variasi musiman dalam produksi limbah memberikan tekanan tambahan pada sistem pengelolaan limbah lokal (Ferronato & Torretta, 2019).

3.2. Kekuatan Tekan Paving block yang Mengandung Abu Dasar

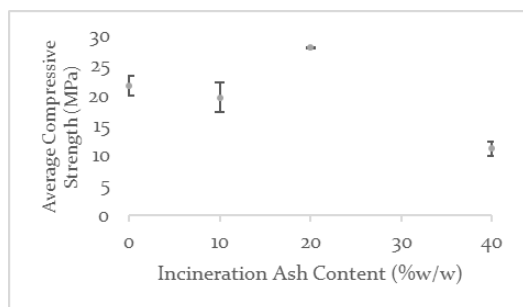
Pengujian kekuatan tekan dilakukan setelah 28 hari pengeringan menggunakan Mesin Uji Tekan (CTM). Setiap variasi campuran diuji sebanyak tiga kali. Hasil kekuatan tekan rata-rata dan deviasi standar untuk sampel paving block disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Rata-Rata Kekuatan Tekan dan Deviasi Standar Sampel Paving Blok

Komposisi Abu (%) b/b)	Komposisi Pasir (%) b/b)	Komposisi Semen (kg/m ³)	Kekuatan Tekan Rata-rata (MPa)	Kode Sampel
0	100	600	21.67	1.56
10	90	600	19.70	2.48
20	80	600	28.07	0.06
40	60	600	11.13	1.19

Hasil uji kekuatan tekan menunjukkan bahwa penambahan abu dasar memengaruhi kinerja mekanik paving block. Kekuatan tekan tertinggi dicapai pada substitusi abu dasar 20%, mencapai 28,07 MPa, sedangkan nilai terendah diamati pada substitusi 40%, dengan kekuatan tekan 11,13 MPa. Grafik hubungan antara variasi abu dan kekuatan tekan disajikan pada Gambar 2.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, kekuatan tekan meningkat seiring dengan peningkatan kandungan abu dasar hingga 20%, setelah itu terjadi penurunan yang signifikan pada substitusi 40%. Campuran abu dasar 20% juga menunjukkan deviasi standar terendah (0,06 MPa), yang menunjukkan konsistensi yang sangat baik di antara pengukuran berulang.



Gambar 2. Rata-rata Kekuatan Tekan Paving Block dengan Kandungan Abu Dasar yang Berbeda

Berdasarkan SNI 03-0691-1996, paving block yang mengandung 20% abu dasar memenuhi persyaratan untuk paving block Kategori A, sedangkan campuran kontrol (0%) memenuhi persyaratan Kategori B, campuran 10% memenuhi persyaratan Kategori C, dan campuran 40% memenuhi persyaratan Kategori D.

Hasil uji kekuatan tekan menunjukkan bahwa penambahan abu dasar secara signifikan memengaruhi kinerja mekanik paving block. Kekuatan tekan maksimum diamati pada tingkat substitusi abu dasar 20%, sedangkan penurunan yang nyata terlihat pada tingkat penggantian 40%. Peningkatan pada substitusi 20% dapat dikaitkan dengan efek pengisi partikel abu dasar halus. Pada tingkat penggantian moderat, partikel-partikel ini mengisi ruang kosong di antara butiran agregat, yang menyebabkan susunan partikel yang lebih padat dan peningkatan kepadatan pengemasan. Peningkatan kepadatan pengemasan ini mengurangi porositas internal dan memperkuat zona transisi antarmuka (ITZ) antara pasta semen dan partikel agregat, sehingga meningkatkan kekuatan tekan (Hafez et al, 2020).

Selain efek pengisi, komponen mineral tertentu dalam abu dasar dapat berkontribusi pada reaksi hidrasi sekunder. Partikel kaya silika dapat berinteraksi dengan kalsium hidroksida yang dihasilkan selama hidrasi semen, mendorong pembentukan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan. Pembentukan C-S-H sangat penting untuk pengembangan kekuatan karena mengikat agregat bersama dan meningkatkan integritas matriks (Scrivener et al, 2018; Reis et al, 2021; Marandi & Shirzad, 2025). Namun, ketika kandungan abu dasar meningkat hingga 40%, kekuatan tekan menurun secara signifikan. Tingkat penggantian yang berlebihan dapat memasukkan lebih banyak partikel berpori ke dalam campuran, meningkatkan kebutuhan air dan menciptakan rongga tambahan di dalam matriks yang mengeras. Studi sebelumnya telah melaporkan temuan serupa, menunjukkan bahwa proporsi abu dasar yang tinggi berdampak negatif pada kinerja mekanik karena peningkatan porositas dan penurunan efisiensi ikatan dalam material semen (Bahrami et al, Wei et al, 2026).

Nilai optimum yang diamati pada substitusi 20% menunjukkan bahwa efek menguntungkan dari pengemasan partikel dan densifikasi mikrostruktur lebih besar daripada efek negatif yang terkait dengan porositas abu. Melebihi ambang batas ini, efek negatif menjadi dominan, yang mengakibatkan penurunan kapasitas menahan beban.

Suhu pengeringan juga memengaruhi perkembangan kekuatan tekan karena proses hidrasi bersifat eksotermik dan berpotensi menyebabkan tegangan termal pada tahap awal beton (Burhanuddin, 2020). Paving block yang dicampur dengan abu pembakaran rumah tangga ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Sampel Paving Block

Inspeksi visual menunjukkan bahwa semua spesimen paving block berhasil diproduksi dan mempertahankan bentuk geometris yang seragam selama periode pengeringan. Analisis ANOVA One Way digunakan untuk mengevaluasi signifikansi pengaruh variasi persentase abu insinerasi terhadap kuat tekan. Setiap variasi komposisi diuji menggunakan tiga replikasi independen ($n = 3$) dengan jumlah replikasi yang sama pada seluruh kelompok, sehingga membentuk rancangan seimbang (balanced design). Tiga replikasi pada setiap kelompok menghasilkan estimasi variabilitas intra-kelompok (within-group variability) yang digunakan sebagai komponen galat eksperimental dalam analisis ANOVA ((NIST/SEMATECH, 2013). Konsistensi hasil antar replikasi tercermin dari Mean Square Error intra-kelompok sebesar 2,500, yang jauh lebih rendah dibandingkan Mean Square antar kelompok sebesar 146,476 sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengujian ANOVA *One Way*

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig
Between Groups	439.429	3	146.476	58.591	<.001
Within Groups	20.000	8	2.500		
Total	459.429	11			

Berdasarkan Tabel 3, nilai kekuatan tekan yang dianalisis menggunakan analisis statistik ANOVA *One Way* menunjukkan nilai signifikansi $<0,05$, yang berarti terdapat perbedaan signifikan pada kekuatan tekan rata-rata antara variasi komposisi abu. Uji lanjutan, yaitu uji *post hoc Bonferroni*, tidak menunjukkan perbedaan signifikan antara variasi 0% dan 10% ($p = 0,997$), sedangkan perbedaan signifikan ditemukan pada kombinasi variasi lainnya ($p < 0,05$). Uji normalitas menunjukkan bahwa sebagian besar kelompok memenuhi asumsi ($p > 0,05$), meskipun satu kelompok tidak terdistribusi normal ($< 0,001$). Analisis dilanjutkan karena ANOVA kuat terhadap pelanggaran normalitas minor dan ukuran sampel sama untuk setiap kelompok. Uji homogenitas Levene menunjukkan homogenitas varians ($p = 0,051 > 0,05$) (Blanca et al., 2017). Hasil ANOVA menunjukkan perbedaan signifikan antarvariasi ($F = 58,591$; $p <$

0,001), sedangkan hasil *post hoc Bonferroni* disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Uji *Bonferroni* dan *post hoc*

Comparison	Mean Difference	95% Confidence Interval	p-value
0% vs 10%	1.97	-2.52 to 6.46	0.997
0% vs 20%	-6.40	-10.89 to -1.91	0.007
0% vs 40%	10.53	6.04 to 15.02	<0.001
10% vs 20%	-8.37	-12.86 to -3.88	0.001
10% vs 40%	8.57	4.08 to 13.06	<0.001
20% vs 40%	16.93	12.44 to 21.42	<0.001

Tabel 4 menyajikan hasil analisis *post hoc Bonferroni*. Tidak ada perbedaan signifikan yang diamati antara campuran kontrol (0% abu dasar) dan campuran 10% abu dasar ($p = 0,997$). Namun, perbedaan signifikan diidentifikasi antara campuran 20% abu dasar dan semua kelompok perlakuan lainnya ($p < 0,05$). Demikian pula, campuran 40% abu dasar berbeda secara signifikan dari semua campuran lainnya ($p < 0,001$). Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan 20% abu dasar menghasilkan kekuatan tekan yang secara signifikan lebih tinggi daripada tingkat substitusi lainnya yang diuji.

Kekuatan tekan optimum pada 20% abu terjadi karena keseimbangan tercapai antara fungsi agregat dan pengisi. Abu bertindak sebagai pengisi, mengisi rongga di antara butiran, meningkatkan pemadatan, memperbaiki zona transisi antarmuka, dan menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata. Pada konsentrasi 40%, dominasi partikel abu yang lebih berpori meningkatkan rongga internal dan mengurangi kohesivitas matriks semen, sehingga mengakibatkan penurunan kekuatan tekan yang signifikan.

Analisis ANOVA dan *post hoc Bonferroni* memberikan bukti statistik yang mendukung pengamatan eksperimental. Bukti statistik dari analisis ANOVA dan *post hoc Bonferroni* menguatkan pengamatan eksperimental. Perbedaan signifikan yang diidentifikasi di antara kelompok perlakuan mengkonfirmasi bahwa kandungan abu dasar merupakan faktor kritis yang memengaruhi kinerja kekuatan tekan. Kurangnya perbedaan signifikan antara campuran kontrol dan tingkat substitusi 10% menunjukkan bahwa tingkat penggantian abu dasar yang rendah tidak secara signifikan mengubah struktur internal matriks paving block.

Sebaliknya, peningkatan signifikan yang diamati pada tingkat substitusi 20% menunjukkan keseimbangan optimal antara penggantian agregat dan efek pengisi. Temuan statistik ini meningkatkan keandalan penelitian, karena komposisi optimum ditentukan melalui perbandingan deskriptif dan analisis statistik inferensial. Metodologi serupa telah dianjurkan dalam studi material konstruksi baru-baru ini untuk meningkatkan kekokohan dan reproduksi temuan eksperimental (Tram et al, 2025; Kabbo et al, 2025).

3.3. Kandungan Kromium Total dalam Abu Dasar dari Pembakaran Sampah Rumah Tangga dan Paving block

Abu dasar dapat digunakan untuk aplikasi konstruksi sipil seperti beton, pasir, semen, pengisi jalan, dan produk lainnya. Namun, potensi risiko lingkungan dapat muncul karena adanya kontaminan logam berat, terutama Cr, dalam kandungan abu dasar. Hasil pengujian kandungan total logam berat Cr dalam abu dasar insinerasi menggunakan metode TCLP AAS disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Kandungan Total Cr dalam Abu Hasil Pembakaran

Parameter	Hasil Uji (mg/kg)	Metode Pengujian
Chrom (Cr)	0,53 ± 0,01	SNI 8808:2019

Tabel 6. Hasil Pengujian Kandungan Kromium Total pada Paving Block

Parameter	Hasil Uji (mg/kg)	Metode Pengujian
Chrom (Cr)	0,24 ± 0,01	SNI 8808:2019

Produk konstruksi paving block yang dipadatkan secara efektif mengikat senyawa beracun dalam abu, sehingga mengurangi pelarutan kontaminan logam berat. Hasil uji Cr total disajikan pada Tabel 6. Kandungan Cr total menurun dari 0,53 ± 0,01 mg/kg dalam abu menjadi 0,24 ± 0,01 mg/kg, menghasilkan pengurangan 54,72%. Namun, nilai tersebut tidak dapat secara langsung diinterpretasikan sebagai efisiensi imobilisasi Cr karena paving block tersusun atas abu dasar, semen, agregat, dan air. Proses solidifikasi cukup efektif membantu penurunan konsentrasi Cr. solidifikasi merupakan teknik mereduksi limbah beracun menjadi suatu massa yang dapat dibuang dengan aman di tempat pembuangan akhir limbah B3 dikarenakan kuat secara mekanis, mempunyai daya pelindian yang kecil, dan bersifat inert secara fisik (Trihadiningrum, 2016).

Salah satu kekhawatiran lingkungan utama yang terkait dengan pemanfaatan abu dasar adalah keberadaan logam berat yang berpotensi beracun, seperti kromium. Hasil penelitian menunjukkan pengurangan konsentrasi kromium yang signifikan setelah proses solidifikasi, yang menunjukkan imobilisasi yang efektif di dalam matriks semen. Beberapa mekanisme berkontribusi pada imobilisasi logam berat selama hidrasi semen. Mekanisme pertama adalah enkapsulasi fisik, di mana produk hidrasi membungkus dan menjebak partikel logam berat di dalam mikrostruktur yang padat. Mekanisme kedua melibatkan stabilisasi kimia melalui adsorpsi pada permukaan kalsium silikat hidrat (C-S-H). Selain itu, logam berat dapat mengendap sebagai hidroksida yang tidak larut atau dimasukkan ke dalam produk hidrasi melalui reaksi substitusi ion (Al-Kindi, 2019; Luhar et al, 2023; Li et al, 2025).

Keefektifan mekanisme ini telah didokumentasikan secara luas dalam studi yang

membahas pengolahan bahan limbah yang terkontaminasi. Penelitian telah menunjukkan bahwa pemadatan berbasis semen secara signifikan mengurangi mobilitas dan pelarutan kromium dan logam berat lainnya, sehingga mengurangi risiko lingkungan yang terkait dengan aplikasi penggunaan kembali limbah (Petrillo et al, 2025; Belebchouche et al, 2023; He et al, 2025).

Namun, nilai kromium yang dilaporkan dalam penelitian ini diperoleh dari analisis TCLP, yang mencerminkan perilaku pelarutan daripada konsentrasi unsur total. Oleh karena itu, pengurangan yang diamati harus diinterpretasikan sebagai bukti penurunan mobilitas kromium dan ketersediaan lingkungan.

3.4. Implikasi Lingkungan dan Perspektif Ekonomi Sirkuler

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa abu dasar pembakaran limbah rumah tangga dapat digunakan secara efektif sebagai pengganti sebagian pasir alami dalam produksi paving block. Penggantian ini mempertahankan kinerja mekanik yang dapat diterima dan mengurangi pelarutan kromium. Dari sudut pandang lingkungan, metode ini membantu mengurangi volume residu pembakaran yang memerlukan pembuangan akhir dan mengurangi permintaan ekstraksi agregat alami, yang sering dikaitkan dengan degradasi lahan dan gangguan ekosistem. Keunggulan ini sejalan dengan tujuan keberlanjutan internasional yang menganjurkan valorisasi limbah, efisiensi sumber daya, dan implementasi ekonomi sirkular dalam sektor konstruksi (Chimenos et al, 2025; Embong, 2025; Zhang et al, 2021; Sarkar & Ghosh, 2026). Akibatnya, integrasi pemanfaatan abu dasar dengan teknologi solidifikasi berbasis semen menghadirkan pendekatan yang menjanjikan untuk pengelolaan limbah berkelanjutan di negara berkembang, terutama di daerah yang mengalami peningkatan produksi limbah dan kapasitas TPA yang terbatas.

Studi ini memiliki beberapa keterbatasan yang harus diakui. Pertama, abu dasar yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari satu fasilitas pembakaran limbah rumah tangga di Desa Tawangmangu dengan demikian, sifat fisikokimianya mungkin tidak sepenuhnya mewakili abu dasar yang dihasilkan oleh sistem pembakaran lain dengan komposisi limbah dan kondisi operasional yang berbeda. Kedua, penilaian lingkungan terbatas pada imobilisasi kromium (Cr), sedangkan logam berat berbahaya lainnya seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), tembaga (Cu), seng (Zn), dan nikel (Ni) tidak diperiksa. Ketiga, penelitian ini terutama berfokus pada kekuatan tekan dan kelarutan kromium jangka pendek setelah 28 hari pengeringan, tanpa mengeksplorasi sifat daya tahan jangka panjang seperti penyerapan air, ketahanan abrasi, ketahanan terhadap pembekuan-pencairan, serangan sulfat, atau perilaku pelarutan jangka panjang. Yang kedua jumlah

spesimen pengujian kekuatan tekan yang relatif terbatas, yaitu tiga spesimen pada setiap variasi campuran ($n = 3$). Ukuran sampel yang kecil dapat membatasi kekuatan inferensi statistik dan kemampuan hasil penelitian untuk digeneralisasikan pada populasi paving block yang lebih luas.

4. KESIMPULAN

Studi ini menunjukkan kelayakan penggunaan abu dasar hasil pembakaran sampah rumah tangga sebagai pengganti sebagian pasir alami dalam produksi paving block melalui teknologi solidifikasi berbasis semen. Hasil kekuatan tekan menunjukkan bahwa penambahan abu dasar secara signifikan memengaruhi kinerja mekanik paving block, dengan komposisi optimal dicapai pada substitusi abu dasar 20%. Campuran ini menghasilkan kekuatan tekan tertinggi sebesar 28,07 MPa, memenuhi persyaratan paving block Kategori A menurut SNI 03-0691-1996. Analisis statistik mengkonfirmasi bahwa tingkat substitusi 20% memberikan kinerja kekuatan tekan yang jauh lebih baik daripada variasi campuran lainnya, menunjukkan keseimbangan optimal antara efek pengisi yang bermanfaat dari abu dasar dan efek buruk yang terkait dengan penambahan abu yang berlebihan. Selain itu, proses solidifikasi secara efektif mengurangi kemampuan pelarutan kromium, menghasilkan penurunan konsentrasi kromium sebesar 54,72% setelah dimasukkan ke dalam matriks semen. Hasil pengujian TCLP menunjukkan adanya penurunan konsentrasi Cr yang terlindi setelah proses solidifikasi. Temuan ini menunjukkan bahwa proses solidifikasi berpotensi mengurangi pelepasan Cr pada kondisi pengujian TCLP. Kemampuan solidifikasi berbasis semen dapat meningkatkan kinerja secara teknik dan aman terhadap lingkungan dari bahan konstruksi yang berasal dari campuran abu dasar pembakaran sampah rumah tangga. Secara keseluruhan, studi ini menyoroti potensi abu dasar hasil pembakaran sampah rumah tangga sebagai bahan konstruksi sebagai salah satu alternatif berkelanjutan yang mendukung pemanfaatan sampah, mengurangi ketergantungan pada agregat alami, dan berkontribusi pada pengelolaan sampah berbasis ekonomi sirkular. Penelitian selanjutnya dapat mengevaluasi imobilisasi logam berat tambahan, dan melakukan analisis mikrostruktural, serta mengkuantifikasi potensi pengurangan penggunaan sumber daya, emisi, dan manfaat ekonomi untuk lebih mendukung penilaian keberlanjutan dan implementasi skala besar abu dasar hasil pembakaran sampah rumah tangga dalam aplikasi konstruksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abramov, S., He, J., Wimmer, D., Lemloh, M. L., Muehe, E. M., Gann, B., et al. (2018). Heavy metal mobility and valuable contents of processed municipal solid waste incineration residues from Southwestern Germany. *Waste Management*, 79, 735–743. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.010>
- Abubakar, I. R., Maniruzzaman, K. M., Dano, U. L., AlShihri, F. S., AlShammari, M. S., Ahmed, S. M. S., Al-Gehlani, W. A. G., & Alrawaf, T. I. (2022). Environmental sustainability impacts of solid waste management practices in the Global South. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12717. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912717>
- Ajorloo, M., Ghodrati, M., Scott, J., et al. (2022). Heavy metals removal/stabilization from municipal solid waste incineration fly ash: A review and recent trends. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24, 1693–1717. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01459-w>
- Al-Kindi, G. Y. (2019). Evaluation the solidification/stabilization of heavy metals by Portland cement. *Journal of Ecological Engineering*, 20(3), 91–100. <https://doi.org/10.12911/22998993/99739>
- Alam, Q., Schollbach, K., van Hoek, C., van der Laan, S., de Wolf, T., & Brouwers, H. J. H. (2019). In-depth mineralogical quantification of MSWI bottom ash phases and their association with potentially toxic elements. *Waste Management*, 87, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.031>
- Bahrami, A., Cehlin, M., Wallhagen, M., Nexén, O., & Paul, E. (2026). Toward sustainable concrete: Experimental investigation using municipal solid waste incineration bottom ash. *Buildings*, 16, 1331. <https://doi.org/10.3390/buildings16071331>
- Belebchouche, C., Bensebti, S.-E., Ould-Said, C., Moussaceb, K., Czarnecki, S., & Sadowski, L. (2023). Stabilization of chromium waste by solidification into cement composites. *Materials*, 16, 6295. <https://doi.org/10.3390/ma16186295>
- Burhanuddin, B., Basuki, B., dan Darmanijati, M. R. S. 2018. Pemanfaatan Limbah Plastik Bekas Untuk Bahan Utama Pembuatan Paving Block. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*. 18(1).
- Blanca, M. J., Alarcón, R., Arnau, J., Bono, R., & Bendayan, R. (2017). Non-normal data: Is ANOVA still a valid option?. *Psicothema*, 29(4), 552–557. <https://doi.org/10.7334/psicothema2016.383>
- Chen, B., Perumal, P., Illikainen, M., & Ye, G. (2023). A review on the utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash as a mineral resource for construction materials. *Journal of Building Engineering*, 71, 106386. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106386>
- Chen, D., Zhang, Y., Xu, Y., Nie, Q., Yang, Z., Sheng, W., & Qian, G. (2022). Municipal solid waste incineration residues recycled for typical construction materials: A review. *RSC Advances*, 12(10), 6279–6291. <https://doi.org/10.1039/D1RA08050D>
- Chimenos, J. M., Cuspoca, F., Maldonado-Alameda, A., Mañosa, J., Rosell, J. R., Andrés, A., Faneca, G., & Cabeza, L. F. (2025). MSW incineration bottom ash-based alkali-activated binders as an eco-efficient alternative for urban furniture and paving: Closing the loop towards sustainable construction solutions. *Buildings*, 15, 1571. <https://doi.org/10.3390/buildings15091571>
- Dutka, B., Rada, S., Godyń, K., Moldovan, D., Chelcea, R. I., & Tram, M. (2024). Structural and textural characteristics of municipal solid waste incineration

- bottom ash subjected to periodic seasoning. *Sustainability*, 16, 9597. <https://doi.org/10.3390/su16219597>
- Embong, R. (2025). Transforming coal bottom ash into a high-performance pozzolan: Effects of acid treatment on material properties. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10, 313. <https://doi.org/10.1007/s41062-025-02110-x>
- Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6), 1060. <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>
- Ghani, J., Toller, S., Dinelli, E., & Funari, V. (2023). Impact and recoverability of metals from waste: A case study on bottom ash from municipal solid waste incineration plants. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1252313. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1252313>
- Gholizadeh Khasevani, S., Carabante, I., Bjuhr, J., & Andreas, L. (2026). Bioash-based stabilization/solidification for heavy metal(oid) soil remediation: A case study in Northern Sweden. *Materials*, 19(4), 790. <https://doi.org/10.3390/ma19040790>
- Hafez, H., Kurda, R., Kurda, R., Al-Hadad, B., Mustafa, R., & Ali, B. (2020). A critical review on the influence of fine recycled aggregates on technical performance, environmental impact and cost of concrete. *Applied Sciences*, 10, 1018. <https://doi.org/10.3390/app10031018>
- He, Y., Jiang, Y., Ren, L., Qian, C., Zhang, H., Zhong, Y., Qu, X., Dou, J., Zhang, S., Ding, J., & Zhang, H. (2025). Recent advances in heavy metal stabilization and resource recovery from municipal solid waste incineration fly ash. *Toxics*, 13(8), 695. <https://doi.org/10.3390/toxics13080695>
- Kabbo, M. K. I., Sobuz, M. H. R., Khatun, M., et al. (2025). Analyzing the influence of chemical components of incinerated bottom ash on compressive strength of magnesium phosphate cement using machine learning analysis. *Geoenvironmental Disasters*, 12, 35. <https://doi.org/10.1186/s40677-025-00341-9>
- Li, J., Hou, Q., Peng, J., Hu, H., & Vizzari, D. (2025). A critical review of heavy metal characteristics and risk assessment approaches of municipal solid waste incineration bottom ash in subgrade construction. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 12(5). <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2025.02.004>
- Liu, J., Wu, Y., Cheng, L., Jin, H., Liu, J., & Xing, F. (2024). Recycling of municipal solid waste incineration bottom ash (MSWIBA) particles into natural fine sands for sustainable engineering cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 418, 135500. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135500>
- Lu, J., Wu, D., Li, S., & Gao, X. (2024). Reaction process of solid waste composite-based cementitious materials for immobilizing and characterizing heavy metals in lead and zinc tailings: Based on XRD, SEM-EDS and compressive strength characterization. *Molecules*, 29, 996. <https://doi.org/10.3390/molecules29050996>
- Luhar, I., Luhar, S., Abdullah, M. M. A. B., Sandu, A. V., Vizureanu, P., Razak, R. A., Burduhos-Nergis, D. D., & Imjai, T. (2023). Solidification/stabilization technology for radioactive wastes using cement: An appraisal. *Materials*, 16, 954. <https://doi.org/10.3390/ma16030954>
- Marandi, N., & Shirzad, S. (2025). Sustainable cement and concrete technologies: A review of materials and processes for carbon reduction. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10, 408. <https://doi.org/10.1007/s41062-025-02213-5>
- Nan, Y., Wang, W., Chen, H., Guo, J., Chen, Y., & Yuan, D. (2026). A review of research on the valorization and risk management of municipal solid waste incineration bottom ash. *Materials*, 19(7), 1471. <https://doi.org/10.3390/ma19071471>
- NIST/SEMATECH. (2013). NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. National Institute of Standards and Technology. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods
- Petrillo, A., Fraternali, F., Acampora, A., Di Chiara, G., Colangelo, F., & Farina, I. (2025). Innovative solidification and stabilization techniques using industrial by-products for soil remediation. *Applied Sciences*, 15, 4002. <https://doi.org/10.3390/app15074002>
- Rachmawati, S., Syafrudin, B. (2023). Potential to be Used for Paving Blocks. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 19(2), 312–318.
- Reis, D. C., Quattrone, M., Souza, J., Punhagui, K. R. G., Pacca, S. A., & John, V. M. (2021). Potential CO₂ reduction and uptake due to industrialization and efficient cement use in Brazil by 2050. *Journal of Industrial Ecology*, 25, 344–358. <https://doi.org/10.1111/jiec.13130>
- Sarkar, B. K., & Ghosh, P. (2026). Sustainable resource-efficient concrete using bottom ash as a partial sand replacement. *Sustainability*, 18, 5435. <https://doi.org/10.3390/su18115435>
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.
- Tram, M., Sułkowska, K., Jarosz, A., & Nowakowski, A. (2025). Mechanical properties of composite made from bottom ash fractions of municipal waste incineration plant products. *Materials*, 18(23), 5302. <https://doi.org/10.3390/ma18235302>
- Trihadiningrum, Y. (2016). Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya & Beracun (B3). Teknosain.
- Wei, X., Wang, J., Zhang, Y., Wu, M., Yang, J., Meng, T., Wang, S., Yap, Z. S., Huang, Y., Zhou, W., et al. (2026). Mechanical and environmental performance of chemical pretreated incineration bottom ash as a supplementary cementitious material. *Materials*, 19, 706. <https://doi.org/10.3390/ma19040706>
- Zhang, S., Ghoul, Z., He, Z., Hu, L., & Shao, Y. (2021). Use of municipal solid waste incineration bottom ash as a supplementary cementitious material in dry-cast concrete. *Construction and Building Materials*, 266(Part A), 120890. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120890>
- Zuraida, S., Dewancker, B., & Margono, R. B. (2023). Application of non-degradable waste as building material for low-cost housing. *Scientific Reports*, 13(1), 6390. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32981-y>