

PENGEMBANGAN PAVING BLOCK UNTUK JALAN USAHA TANI MENGUNAKAN BOTTOM ASH RESIDU PEMBAKARAN SAMPAH DOMESTIK

**Nur Khotimah Handayani^{1*}, Alfia Magfirona¹, Angger Adi Bastian¹, M. Rizki Faisal
Fadhillah¹, Nabil Belantara Kusuma¹**

¹Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, Jawa Tengah

*Email: nur.k.handayani@ums.ac.id

Abstrak

Peningkatan volume sampah domestik mendorong pemanfaatan residu pengolahan, salah satunya *bottom ash* dari proses insinerasi sampah padat perkotaan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan *paving block* untuk jalan usaha tani dengan memanfaatkan *bottom ash* tersebut sebagai substitusi agregat halus sebesar 30%, dan 50%, dengan perbandingan semen dan pasir 1:3. Pengujian meliputi kuat tekan dan daya serap air mengacu pada SNI 03-0691-1996. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar *bottom ash* menyebabkan kenaikan daya serap air dari 2,61% menjadi 17,86% serta penurunan kuat tekan dari 27,83 MPa menjadi sekitar 10,76 MPa. Variasi tanpa *bottom ash* menghasilkan mutu terbaik (mutu B), sedangkan variasi 30% dan 50% masih memenuhi mutu D. Peningkatan daya serap air dan penurunan kuat tekan dipengaruhi oleh tingginya porositas material akibat penggunaan *bottom ash* tanpa perlakuan awal. Meskipun demikian, *bottom ash* tetap berpotensi dimanfaatkan sebagai material alternatif untuk *paving block* pada jalan usaha tani dengan beban ringan, terutama untuk aplikasi non-struktural. Namun, karakteristiknya yang masih memiliki porositas tinggi dan potensi kandungan kontaminan menyebabkan kerjanya belum stabil. Oleh karena itu, hasil penelitian ini menegaskan perlunya penerapan perlakuan awal pada *bottom ash* yang tepat untuk meningkatkan kualitas dan konsistensi kinerja material *bottom ash* sebelum digunakan.

Kata kunci: *bottom ash*, jalan usaha tani, kuat tekan, *paving block*, residu pembakaran sampah domestik

Abstract

The increasing volume of domestic waste has encouraged the utilization of processing residues. One such residue is bottom ash from the incineration of municipal solid waste. This research aims to develop paving blocks for farm roads. The study used bottom ash as a substitute for fine aggregate at 30%, and 50%, respectively. The cement to sand ratio was 1:3. The test included compressive strength and water absorption. The test referred to SNI 03-0691-1996. The results showed that increasing the bottom ash content caused an increase in water absorption from 2.61% to 17.86%. Increasing the bottom ash content also caused a decrease in compressive strength from 27.83 MPa to around 10.76 MPa. The variation without bottom ash produced the best quality (quality B). Variations of 30% and 50% still met quality D. The increase in water absorption and decrease in compressive strength are influenced by the material's high porosity. This occurs due to the use of bottom ash without pretreatment. Bottom ash still has the potential to be used as an alternative material for paving blocks on farm roads with light loads. This utilization is primarily for non-structural applications. However, this material has high porosity and the potential for contaminants. This results in unstable performance. Therefore, proper pretreatment is necessary to improve the quality and consistency of bottom ash performance before use.

Keywords: *bottom ash, compressive strength, farm access road, municipal solid waste incineration, paving block*

1. PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah sampah domestik akibat pertumbuhan penduduk dan urbanisasi menimbulkan tantangan serius dalam pengelolaan limbah perkotaan. Salah satu teknologi yang banyak diterapkan adalah proses insinerasi melalui insinerator maupun Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA), yang mampu mengurangi volume sampah secara signifikan. Namun demikian, proses ini menghasilkan residu padat hasil pembakaran sampah atau *Municipal Solid Waste Incineration* (MSWI) berupa *bottom ash* dan *fly ash* yang tetap memerlukan penanganan lanjutan agar tidak menimbulkan dampak lingkungan. *Bottom ash* merupakan

residu dengan proporsi terbesar dan berpotensi dimanfaatkan kembali sebagai material konstruksi apabila memenuhi persyaratan teknis dan lingkungan (Silva dkk., 2019).

Pemanfaatan *bottom ash* dalam konstruksi menjadi bagian dari pendekatan infrastruktur berkelanjutan, yaitu melalui pengurangan limbah sekaligus substitusi terhadap sumber daya alam yang semakin terbatas. Secara karakteristik, *bottom ash* memiliki sifat fisik menyerupai agregat granular sehingga berpotensi digunakan sebagai pengganti agregat halus pada beton maupun perkerasan jalan (Forteza dkk., 2004). Di sisi lain, kebutuhan agregat halus dalam konstruksi terus meningkat, sementara eksploitasi pasir alam berpotensi menimbulkan degradasi lingkungan. Oleh karena itu, penggunaan material alternatif berbasis limbah menjadi solusi strategis yang sejalan dengan prinsip ekonomi berkelanjutan.

Penelitian Lu dkk., (2024) menunjukkan bahwa *bottom ash* dapat digunakan sebagai pengganti sebagian agregat halus dalam beton dengan performa yang memadai. Salah satu aplikasi yang relevan untuk pengembangan material alternatif adalah *paving block*. Produk ini dapat digunakan pada jalan lingkungan, trotoar, dan area parkir karena kemudahan pemasangan, perawatan, dan efisiensi biaya. Karakteristik tersebut menjadikan *paving block* berpotensi diterapkan pada berbagai jenis infrastruktur jalan dengan kebutuhan konstruksi yang praktis dan ekonomis. Salah satu penerapan yang diusulkan adalah pada Jalan Usaha Tani (JUT), mengingat infrastruktur ini membutuhkan perkerasan yang mampu mendukung mobilitas kendaraan pengangkut hasil pertanian serta mudah diperbaiki pada kondisi kerusakan lokal di kawasan pedesaan.

Penelitian nasional menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah pembakaran dalam *paving block* memberikan hasil yang menjanjikan, namun masih memiliki keterbatasan. (Pangestuti dkk., 2023) memanfaatkan limbah *fly ash dan bottom ash* (FABA) dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan menghasilkan *paving block* dengan mutu yang memenuhi standar untuk aplikasi non-struktural seperti area parkir dan pejalan kaki. Sementara itu, penelitian (Krisdiansyah dkk., 2024) menggunakan *bottom ash* dari Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA) sebagai substitusi agregat halus dalam *paving block*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *bottom ash* mampu meningkatkan kinerja material, namun kuat tekan yang dihasilkan masih belum memenuhi kebutuhan fungsional untuk jalan usaha tani.

Keterbatasan tersebut berkaitan erat dengan desain campuran yang digunakan. Pada penelitian sebelumnya, perbandingan semen terhadap agregat halus sebesar 1:6 belum mampu menghasilkan ikatan material yang optimal, sehingga berdampak pada rendahnya kuat tekan. Selain itu, karakteristik *bottom ash* yang memiliki daya serap air tinggi dan sifat heterogen juga memengaruhi performa material, sehingga diperlukan optimasi komposisi campuran.

Selain aspek teknis, pemanfaatan *bottom ash* juga perlu ditinjau dari aspek lingkungan dan kimia material untuk memastikan keamanan penggunaannya. Penelitian menunjukkan bahwa kandungan logam berat dalam *bottom ash* hasil pembakaran sampah dapat diminimalkan melalui proses solidifikasi dalam matriks semen, sehingga risiko pelindian menjadi rendah dan material relatif aman digunakan dalam konstruksi (Kim dkk., 2014). Selain itu, *bottom ash* juga memiliki karakteristik mekanik yang memadai untuk diterapkan pada konstruksi jalan volume rendah, sehingga relevan untuk aplikasi seperti jalan usaha tani (Bansal dkk., 2024).

Mengingat Pedoman Teknis Pengembangan Jalan Pertanian belum menetapkan secara spesifik persyaratan kuat tekan *paving block*, penelitian ini menetapkan mutu A berdasarkan SNI 03-0691-1996 (Tabel 1) dengan kuat tekan minimum 35 MPa sebagai target capaian. Pemilihan mutu tersebut bertujuan untuk mengantisipasi variasi beban kendaraan pengangkut hasil pertanian, mengurangi risiko kerusakan perkerasan, serta meningkatkan ketahanan material terhadap kondisi lingkungan pertanian yang lembap dan agresif. Dengan mengacu pada standar mutu tertinggi untuk perkerasan jalan kendaraan, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi teknis dalam pengembangan konstruksi JUT yang lebih tahan lama, andal, dan berkelanjutan.

Tabel 1. Klasifikasi mutu *paving block* berdasarkan SNI 03-0691-1996

Mutu	Kuat Tekan (MPa)		Kuat Tekan (mm/menit)		Penyerapan air rata-rata maksimal (%)	Penggunaan
	Rata-rata	Minimum	Rata-rata	Minimum		
A	40	35	0,090	0,103	3	Jalan
B	20	17	0,130	0,149	6	Pelataran parkir
C	15	12,5	0,160	0,184	8	Pejalan kaki
D	10	8,5	0,219	0,251	10	Taman dan penggunaan lain

Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan *bottom ash* dengan komposisi campuran konvensional masih belum mampu mencapai kisaran kuat tekan tersebut. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan dalam optimasi desain campuran *paving block* berbasis *bottom ash*, khususnya untuk aplikasi jalan usaha tani. Untuk menjawab kesenjangan tersebut, penelitian ini mengusulkan peningkatan rasio semen terhadap agregat halus menjadi 1:3 sebagai pendekatan untuk meningkatkan kekuatan ikatan antarpartikel, mengurangi porositas, dan meningkatkan kuat tekan *paving block*. Pendekatan ini diharapkan mampu menghasilkan material yang memenuhi target kuat tekan 30 - 40 MPa serta layak diterapkan pada jalan usaha tani. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan material konstruksi berbasis limbah sekaligus mendukung penerapan infrastruktur berkelanjutan melalui pemanfaatan residu sampah domestik dan efisiensi penggunaan sumber daya alam.

2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental di laboratorium untuk mengkaji pemanfaatan *bottom ash* residu sampah domestik sebagai bahan substitusi agregat halus pada *paving block*. Tahapan metodologi disusun secara sistematis mulai dari persiapan material, pembuatan benda uji, hingga pengujian karakteristik sesuai standar yang berlaku.

2.1. Bahan dan Peralatan

Bahan utama yang digunakan meliputi semen Portland sebagai bahan pengikat, agregat halus (pasir), serta *bottom ash* sebagai material substitusi sebagian agregat halus. Rasio air semen sebesar 0,25 digunakan sebagai bahan pencampur sesuai kebutuhan pengikat *paving block*. *Bottom ash* yang digunakan berasal dari residu pembakaran sampah domestik dari Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Mardiko, Yogyakarta (Gambar 1). Residu yang digunakan dimanfaatkan secara langsung sebagai substitusi agregat halus tanpa dilakukan perlakuan awal dengan mempertimbangkan kondisi operasional di TPST yang memiliki keterbatasan ruang penyimpanan. Perlakuan awal yang umum dilakukan pada *bottom ash* adalah penebaran alami/*weathering*, perlakuan kimia/*chemical treatment* atau pencucian/*washing* (Kim dkk., 2023; Lu dkk., 2024). *Bottom ash* digunakan sebagai substitusi agregat halus setelah melewati proses penyaringan menggunakan saringan No. 4 (4,75 mm).

Pengujian karakteristik agregat halus dilakukan untuk memastikan kelayakan material sebelum digunakan dalam campuran *paving block*. Uji kandungan bahan organik untuk pasir berdasarkan SNI 2816:2014 menunjukkan warna larutan pada tingkat 2, yang menandakan kandungan organik pada agregat halus masih dalam batas aman. Pengujian serupa juga dilakukan pada *bottom ash*, di mana secara visual larutan menunjukkan tingkat kekeruhan rendah (tingkat 1), sehingga dapat dikategorikan memiliki kandungan bahan organik yang rendah dan layak digunakan sebagai material substitusi. Selanjutnya, uji berat jenis dan penyerapan air mengacu pada SNI 1970:2008 menghasilkan nilai berat jenis bulk pasir sebesar 2,53, berat jenis SSD 2,58, dan berat jenis semu 2,66, dengan penyerapan air sebesar 2,04%, yang menunjukkan karakteristik agregat memenuhi standar. Selain itu, hasil uji kadar lumpur sebesar 2,33% juga masih berada dalam batas yang diizinkan. Secara keseluruhan, agregat halus dan *bottom ash* yang digunakan dinyatakan layak untuk digunakan dalam campuran *paving block*.



Gambar 1. *Bottom ash* residu pembakaran sampah domestik

Peralatan yang digunakan antara lain alat pencampur, cetakan *paving block* 5 cm x 5 cm, alat pemadat manual, serta peralatan pengujian seperti mesin uji tekan dan timbangan untuk pengujian serapan air.

2.2. Perancangan Campuran

Perancangan campuran (*mix design*) dilakukan dengan mengacu pada rasio semen terhadap agregat halus sebesar 1:3, dengan variasi substitusi *bottom ash* terhadap agregat halus sebesar 10%, 30%, dan 50%. Variasi ini bertujuan untuk menentukan pengaruh kadar *bottom ash* terhadap kinerja *paving block* serta memperoleh komposisi optimum yang memenuhi standar.

2.3. Pembuatan Benda Uji

Proses pembuatan benda uji dilakukan melalui beberapa tahapan yang sistematis. Tahap awal dimulai dengan penimbangan bahan sesuai dengan komposisi campuran yang telah ditentukan. Selanjutnya, dilakukan pencampuran bahan kering yang terdiri dari semen, agregat halus, dan *bottom ash* hingga tercapai kondisi homogen. Setelah itu, air ditambahkan secara bertahap sambil terus diaduk hingga diperoleh konsistensi campuran yang diinginkan. Adukan yang telah siap kemudian dicetak ke dalam cetakan *paving block*, dilanjutkan dengan proses pemadatan secara manual untuk memastikan kepadatan dan kekompakan material. Setelah mencapai kondisi setting awal, cetakan dilepaskan dari benda uji. Tahap terakhir adalah perawatan (*curing*) benda uji selama 7 hari dengan metode perendaman air guna menjaga kelembapan dan mendukung proses hidrasi semen secara optimal.

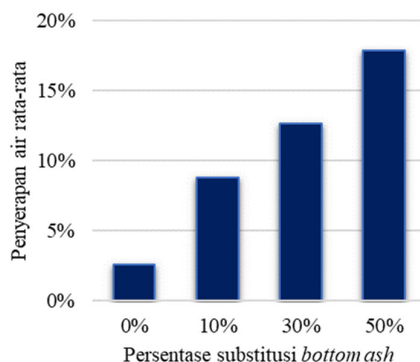
2.4. Pengujian Karakteristik dan Mekanik *Paving block*

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi mutu *paving block* berdasarkan parameter teknis yang mengacu pada Badan Standardisasi Nasional melalui standar SNI 03-0691-1996. Parameter yang diuji meliputi kuat tekan untuk mengetahui kemampuan menahan beban dan daya serap air untuk menilai porositas material yang dilakukan pada umur 7 hari.

Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif dengan membandingkan setiap variasi campuran terhadap nilai kontrol (tanpa *bottom ash*). Analisis dilakukan untuk menentukan persentase optimum penggunaan *bottom ash* yang masih memenuhi standar mutu *paving block* untuk aplikasi jalan usaha tani. Selain itu, dilakukan evaluasi terhadap kecenderungan perubahan sifat mekanik dan fisik akibat penambahan *bottom ash*, sehingga dapat ditarik kesimpulan mengenai kelayakan material ini sebagai alternatif agregat halus yang berkelanjutan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian sifat fisik dan mekanik *paving block* ditinjau berdasarkan variasi substitusi *bottom ash* terhadap agregat halus. Parameter yang dianalisis meliputi daya serap air sebagai indikator porositas material serta kuat tekan sebagai parameter utama kinerja struktural. Hasil pengujian selanjutnya dibandingkan dengan persyaratan mutu berdasarkan SNI 03-0691-1996 untuk mengevaluasi kelayakan *paving block* pada aplikasi jalan usaha tani. Selain itu, dilakukan pembahasan mengenai pengaruh variasi kadar *bottom ash* terhadap perubahan karakteristik material serta hubungan antara sifat fisik dan mekanik yang dihasilkan.



Gambar 2. Hubungan persentase substitusi *bottom ash* terhadap daya serap air *paving block*

3.1. Hasil Pengujian

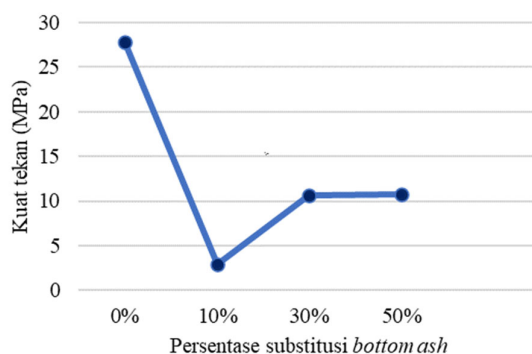
Berdasarkan hasil pengujian daya serap air (Gambar 2), terlihat adanya peningkatan nilai serapan seiring dengan bertambahnya kadar substitusi *bottom ash*. Variasi 0% menunjukkan nilai terendah sebesar 2,61% (mutu A) (lihat Tabel 2), sedangkan variasi 10%, 30%, dan 50% masing-masing meningkat menjadi 8,78%, 12,63%, dan 17,86%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar *bottom ash*, semakin besar

kemampuan material dalam menyerap air. Hal ini disebabkan oleh struktur *bottom ash* yang berpori dan bertekstur kasar, sehingga meningkatkan jumlah rongga dalam matriks *paving block*. Selain itu, penggunaan *bottom ash* tanpa perlakuan awal memperkuat peningkatan nilai serapan, karena material masih memiliki pori terbuka yang tinggi dan kemampuan retensi air yang besar. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa proses *weathering* atau *washing* dapat mengurangi porositas efektif serta menurunkan daya serap air (Lynn dkk., 2016; Silva dkk., 2019). Dengan demikian, nilai serapan yang relatif tinggi dalam penelitian ini mencerminkan kondisi material yang belum mengalami perlakuan awal.

Hasil pengujian kuat tekan (Gambar 3) menunjukkan bahwa variasi 0% menghasilkan nilai tertinggi sebesar 27,83 MPa (mutu B). Pada variasi 10%, kuat tekan mengalami penurunan drastis menjadi 2,88 MPa, sedangkan pada variasi 30% dan 50% meningkat kembali menjadi 10,64 MPa dan 10,76 MPa (mutu D) (Tabel 2). Nilai kuat tekan pada variasi 10% *bottom ash* mengalami penurunan yang sangat signifikan dan tidak menunjukkan pola yang konsisten dengan variasi lainnya. Kondisi ini diduga dipengaruhi oleh ketidaksempurnaan proses pembuatan benda uji, seperti pencampuran atau pemadatan yang kurang optimal. Dugaan tersebut diperkuat oleh meningkatnya kembali kuat tekan pada variasi 30% dan 50% *bottom ash*. Namun demikian, data tetap ditampilkan sebagai bentuk transparansi penelitian dan bahan evaluasi untuk pengujian lanjutan. Selanjutnya data variasi 10% tidak digunakan pada pembahasan.

Nilai kuat tekan pada spesimen yang menggunakan *bottom ash* sebagai substitusi agregat halus cenderung lebih rendah dibandingkan campuran tanpa substitusi. Kondisi ini dipengaruhi oleh penggunaan *bottom ash* tanpa perlakuan awal, sehingga material masih memiliki permukaan yang kurang reaktif serta distribusi ukuran partikel yang tidak seragam. Selain itu, karakteristik *bottom ash* yang berpori dan memiliki kemampuan menyerap air lebih tinggi dibanding agregat alami menyebabkan terbentuknya rongga yang lebih banyak dalam matriks *paving block*. Peningkatan jumlah rongga tersebut mengurangi kepadatan material dan menurunkan kekuatan ikatan antara agregat dan pasta semen, sehingga berdampak pada penurunan kuat tekan.

Kondisi ini sejalan dengan hasil pengujian daya serap air yang menunjukkan peningkatan nilai serapan seiring bertambahnya kadar *bottom ash*. Semakin tinggi nilai penyerapan air, semakin tinggi pula porositas material yang terbentuk. Hal tersebut menunjukkan adanya hubungan terbalik antara daya serap air dan kuat tekan, di mana peningkatan porositas akibat penggunaan *bottom ash* menyebabkan kemampuan material dalam menahan beban tekan menjadi lebih rendah. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa perlakuan awal seperti *weathering*, pengeringan, atau perlakuan kimia dapat meningkatkan kuat tekan pada beton dengan substitusi *bottom ash* melalui perbaikan interaksi antara partikel *bottom ash* dan pasta semen serta mengurangi porositas material (Kim dkk., 2023; Lu dkk., 2024).



Gambar 3. Hubungan persentase substitusi *bottom ash* terhadap kuat tekan *paving block*

Tabel 2. Rekapitulasi pengujian dan klasifikasi SNI

Variasi <i>Bottom Ash</i>	Daya Serap Air	Kuat Tekan	Klasifikasi Umum
0%	Mutu A	Mutu B	Memenuhi
10%	Mutu C	-	Tidak memenuhi
30%	-	Mutu D	Terbatas
50%	-	Mutu D	Terbatas

3.2. Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi substitusi *bottom ash* berdampak terhadap sifat fisik dan mekanik *paving block*. Parameter yang dianalisis meliputi daya serap air sebagai indikator porositas material

dan kuat tekan sebagai parameter utama kinerja struktural. Secara umum, peningkatan kadar *bottom ash* menyebabkan kenaikan daya serap air dan penurunan kuat tekan, yang mengindikasikan adanya perubahan struktur internal material. Perlu dicatat bahwa *bottom ash* dalam penelitian ini digunakan tanpa melalui proses perlakuan awal seperti *weathering* atau *washing*, sehingga karakteristik material yang digunakan masih dalam kondisi asli. Kondisi ini berkontribusi terhadap meningkatnya porositas material dan memengaruhi performa *paving block*. Hal ini sejalan dengan karakteristik *bottom ash* yang memiliki porositas lebih tinggi dibanding agregat alami (Silva dkk., 2019; Zhang dan Hu, 2012).

Hubungan antara daya serap air dan kuat tekan menunjukkan pola yang konsisten, yaitu semakin tinggi daya serap air maka semakin rendah kuat tekan. Hal ini menegaskan bahwa porositas merupakan faktor dominan yang memengaruhi kedua parameter tersebut. Peningkatan jumlah rongga dalam material menyebabkan berkurangnya luas bidang kontak antar partikel serta menurunkan kekuatan ikatan pasta semen. Kondisi ini berdampak langsung pada penurunan kuat tekan. Fenomena ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa peningkatan porositas akibat penggunaan *bottom ash* berkorelasi dengan penurunan kekuatan mekanik (Kumpueng dkk., 2024; Lynn dkk., 2016).

Berdasarkan hasil pengujian, seluruh variasi *paving block* dengan substitusi *bottom ash* belum mampu memenuhi kriteria Mutu A (35 MPa) sesuai SNI 03-0691-1996. Variasi kontrol (0%) hanya mencapai Mutu B, sementara variasi 30% dan 50% masuk dalam kategori Mutu D, yang hanya disarankan untuk penggunaan non-struktural seperti taman. Hal ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa *bottom ash* lebih sesuai untuk aplikasi jalan volume rendah atau non-struktural, seperti jalan pedesaan dan *paving block* (Bansal dkk., 2024; Vaitkus dkk., 2023). Penurunan kuat tekan dan kenaikan daya serap air ini disebabkan oleh tingginya porositas *bottom ash* yang digunakan tanpa perlakuan awal. Meskipun pendekatan ini realistis secara operasional di lapangan, pemanfaatan *bottom ash* untuk jalan usaha tani tetap memerlukan optimasi campuran atau perlakuan material tambahan agar dapat mencapai standar kekuatan dan durabilitas yang diinginkan.

Secara keseluruhan, penggunaan *bottom ash* tanpa perlakuan awal meningkatkan porositas material yang berdampak pada peningkatan daya serap air dan penurunan kuat tekan. Kondisi ini menunjukkan bahwa karakteristik asli *bottom ash* masih memberikan pengaruh signifikan terhadap kinerja *paving block*, terutama akibat tingginya pori terbuka dan rendahnya kualitas ikatan dengan pasta semen. Meskipun demikian, pendekatan tanpa perlakuan awal dalam penelitian ini memberikan gambaran yang lebih representatif terhadap kondisi operasional di lapangan, khususnya pada fasilitas pengolahan sampah dengan keterbatasan proses pengolahan lanjutan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *bottom ash* masih berpotensi dimanfaatkan sebagai material substitusi agregat halus untuk *paving block* pada aplikasi beban ringan atau non-struktural, sekaligus mendukung upaya pengurangan limbah dan pemanfaatan material berkelanjutan. Namun, diperlukan optimasi komposisi campuran serta perlakuan awal pada *bottom ash*, seperti *aging/weathering*, pencucian (*washing*), pengeringan, pengayakan, maupun perlakuan kimia. Perlakuan tersebut bertujuan untuk menurunkan porositas dan daya serap air, memperbaiki distribusi ukuran partikel, meningkatkan reaktivitas permukaan material dan kualitas ikatan dengan pasta semen, serta mengurangi potensi pelindian logam berat sehingga kualitas *paving block* yang dihasilkan dapat memenuhi standar mutu yang lebih tinggi.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *bottom ash* sebagai substitusi agregat halus berdampak signifikan terhadap sifat *paving block*. Peningkatan kadar *bottom ash* menyebabkan kenaikan daya serap air dan penurunan kuat tekan akibat meningkatnya porositas material. Variasi tanpa *bottom ash* menghasilkan kinerja terbaik dengan kuat tekan 27,83 MPa (mutu B) dan daya serap air terendah, sedangkan variasi 30% dan 50% masih memenuhi mutu D dengan kuat tekan sekitar 10 MPa. Kondisi ini dipengaruhi oleh penggunaan *bottom ash* tanpa perlakuan awal, sehingga material masih memiliki pori terbuka dan karakteristik yang belum stabil.

Meskipun demikian, *bottom ash* tetap berpotensi dimanfaatkan sebagai material alternatif untuk *paving block*, khususnya pada aplikasi jalan usaha tani dengan beban ringan. Untuk meningkatkan kinerja material, disarankan dilakukan perlakuan awal seperti *weathering* atau *washing*, serta optimasi desain campuran dan pengujian pada umur yang lebih panjang. Pendekatan tanpa perlakuan awal dalam penelitian ini memberikan gambaran kondisi lapangan yang realistis, namun memerlukan pengembangan lebih lanjut agar dapat memenuhi standar mutu yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Bansal, D., Ramana, G. V, Datta, M., dan Ramaiah, B.J., 2024. Waste to Resource: Enviro-Mechanical Suitability of MSW Incineration Bottom Ash in Flexible Pavements and Embankments. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* 10: 17.
- Badan Standarisasi Nasional (BSN), 1996. *SNI 03-0691-1996: Standar Nasional Indonesia Bata beton (Paving block)*. Badan Standarisasi Nasional Indonesia.
- Forteza, R., Far, M., Seguí, C., dan Cerdá, V., 2004. Characterization of bottom ash in municipal solid waste incinerators for its use in road base. *Waste Management* 24: 899–909.
- Kim, H.-J., Yamada, Y., Zeng, H., dan Iwanami, M., 2023. A study of chloride pretreatment methods for enhancing strength of mortar by recycling Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) bottom ash. *Case Studies in Construction Materials* 19: e02349.
- Kim, J., Nam, B.H., Al Muhit, B.A., Tasneem, K.M., dan An, J., 2014. Effect of chemical treatment of MSWI bottom ash for its use in concrete. *Magazine of Concrete Research* 67: 179–186.
- Krisdiansyah, G., Simanihuruk, B., Handika, N., Purwita, D., dan Mutiara, A., 2024. Pemanfaatan Bottom Ash Pembakaran PLTSA sebagai Substitusi Pasir Penyusun Paving Block. *The Construction and Material Journal* 6: 43–52.
- Kumpueng, P., Phutthimethakul, L., dan Supakata, N., 2024. Production of Cement mortars from glass powder and municipal incinerated bottom ash. *Scientific Reports* 14: 1569.
- Lu, J., Yang, X., Lai, Y., Wan, X., Gao, J., Wang, Y., dkk., 2024. Utilization of municipal solid waste incinerator bottom ash (MSWIBA) in concrete as partial replacement of fine aggregate. *Construction and Building Materials* 414: 134918.
- Lynn, C.J., Ghataora, G.S., dan Dhir, R.K., 2016. Environmental impacts of MIBA in geotechnics and road applications. *Environmental Geotechnics* 5: 31–55.
- Pangestuti, E.K., Bagaskara, P., dan Heriyanto, F.R., 2023. Pengaruh Fly Ash Dan Bottom Ash (Faba) PLTU sebagai Campuran Paving Blok ditinjau terhadap Kuat Tekan dan Daya Serap Air 2: 48–57.
- Silva, R. V, de Brito, J., Lynn, C.J., dan Dhir, R.K., 2019. Environmental impacts of the use of bottom ashes from municipal solid waste incineration: A review. *Resources, Conservation and Recycling* 140: 23–35.
- Váitkus, A., Škuldeckė, J., dan Šernas, O., 2023. A Test Road with Unbound Base and Sub-Base Course from MSWI Bottom Ash Mixtures. *Buildings* 13: .
- Zhang, R.J. dan Hu, Y.J., 2012. Feasibility of Reutilizing Municipal Solid Waste Incineration Residues as Construction Materials. *Applied Mechanics and Materials* 164: 289–292.