

Efek *fly ash* terhadap parameter kompaksi material komposit lapisan *base course* suatu *hauling road*

Immanuel Marchellino¹, Andrias Suhendra Nugraha^{1,*}

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha, Bandung, Jawa Barat, Indonesia

*Corresponding authors: andrias.snugraha@maranatha.ac.id

Submitted: 5 May 2025, Revised: 26 November 2025, Accepted: 20 December 2025

ABSTRACT: The utilization of coal combustion waste, particularly fly ash (FA), as an additive in the base course of mining haul roads has the potential to enhance the mechanical performance of the material while supporting sustainable construction practices. This study aims to analyse the effect of fly ash on Maximum Dry Density (MDD) and Optimum Moisture Content (OMC) in a composite material of fly ash and fill material (FM). Samples were collected from the PLTU stockpile in the Tanjung Selor mining area, North Kalimantan, and compaction tests were conducted in the laboratory using the Standard Proctor method (ASTM D698). The results indicate that pure fly ash has a low MDD (0.94 t/m³) and high OMC (65%) due to its fine, lightweight, and porous particles. The addition of 35% fly ash to 65% fill material significantly increased MDD to 1.62 t/m³ and reduced OMC to 10%, demonstrating the interstitial filling effect that improves composite density. Fly ash is non-plastic with a specific gravity (Gs) of 3.02, enhancing the mechanical stability of the composite material without causing plastic deformation. The study concludes that a 35% fly ash proportion in the base course achieves an optimal balance between high density, low moisture content, and ease of compaction, while promoting sustainable mining infrastructure through industrial waste reduction and material cost efficiency.

KEYWORDS: base course; compaction parameters; fly ash; hauling road.

ABSTRAK: Pemanfaatan limbah hasil pembakaran batu bara, khususnya fly ash (FA), sebagai bahan tambahan pada lapisan base course jalan angkut tambang (*hauling road*) memiliki potensi untuk meningkatkan kinerja mekanik material sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh fly ash terhadap Maximum Dry Density (MDD) dan Optimum Moisture Content (OMC) pada material komposit fly ash dan fill material (FM). Sampel diambil dari stockpile PLTU di area pertambangan Tanjung Selor, Kalimantan Utara, dan diuji kompaksi di laboratorium menggunakan metode Standard Proctor (ASTM D698). Hasil pengujian menunjukkan bahwa fly ash memiliki MDD rendah (0.94 t/m³) dan OMC tinggi (65%) karena partikel halus, ringan, dan berpori. Penambahan 35% fly ash pada 65% fill material meningkatkan MDD menjadi 1.62 t/m³ dan menurunkan OMC menjadi 10%, menunjukkan efek interstitial filling yang memperbaiki kepadatan campuran. Fly ash bersifat non-plastik dengan specific gravity (Gs) = 3.02, sehingga meningkatkan stabilitas mekanik material komposit tanpa menimbulkan deformasi plastis. Kesimpulan penelitian menunjukkan bahwa proporsi 35% fly ash pada lapisan base course memberikan keseimbangan optimal antara kepadatan tinggi, kadar air rendah, dan kemudahan pematatan, serta mendukung prinsip infrastruktur tambang berkelanjutan melalui pengurangan limbah industri dan efisiensi biaya material.

KATA KUNCI: base course; parameter kompaksi; fly ash; jalan angkut tambang.

© The Author(s) 2025. This article is distributed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license.

1. PENDAHULUAN

Infrastruktur transportasi tambang memiliki peranan strategis dalam menunjang produktivitas operasional, khususnya dalam proses transportasi material dari lokasi tambang ke area pengolahan. Jalan angkut (*hauling road*) menjadi jalur utama bagi alat berat pengangkut material tambang, sehingga kualitas dan kekuatan struktur jalan menjadi faktor penentu keberhasilan operasional dan pencapaian target produksi. Jalan tambang yang tidak memenuhi standar daya dukung menyebabkan meningkatnya waktu edar alat angkut, konsumsi bahan bakar, serta biaya pemeliharaan yang tinggi

(Mustofa et al., 2019; Suhendik et al., 2022). Oleh karena itu, desain dan perbaikan lapisan perkerasan harus mempertimbangkan aspek kekuatan, ketahanan, ekonomi, dan keberlanjutan.

Pemanfaatan limbah hasil pembakaran batu bara berupa *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) telah menjadi perhatian penting dalam bidang rekayasa sipil, terutama dalam mendukung konsep pembangunan berkelanjutan (*sustainable construction*). Seiring dengan diterbitkannya Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021, yang menetapkan bahwa FABA tidak lagi termasuk kategori limbah bahan berbahaya dan beracun (B3), peluang

pemanfaatan material ini sebagai bahan konstruksi alternatif semakin terbuka luas.

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan material berkualitas dan keterbatasan agregat alam, pemanfaatan limbah industri seperti FABA menjadi alternatif yang menjanjikan dalam konstruksi jalan tambang (Gazalie et al., 2023; Hawinuti et al., 2024). *Fly ash*, sebagai material halus hasil pembakaran batu bara, mengandung silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan kalsium oksida (CaO). Sifat pozzolanik *fly ash* memungkinkan terbentuknya senyawa *cementitious*, seperti *calcium silicate hydrate* (C–S–H), ketika bereaksi dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), sehingga dapat meningkatkan kekuatan dan kepadatan campuran tanah atau agregat (Haryanti, 2014; Marthinus et al., 2015; Yemima & Dian, 2022). *Bottom ash* memiliki karakteristik lebih kasar dan umumnya dimanfaatkan sebagai bahan pengganti agregat halus atau filler dalam campuran konstruksi.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa FABA memiliki potensi signifikan dalam meningkatkan daya dukung lapisan perkerasan. (Gunawan & Nono, 2019) melaporkan bahwa campuran 20% *fly ash* dan 80% *bottom ash* dengan 8% semen memenuhi persyaratan kuat tekan untuk lapis fondasi jalan semen, sementara (Syahilla Indriyati et al., 2019) menemukan nilai CBR (*California Bearing Ratio*) 100–252% pada variasi campuran FABA, seluruhnya sesuai standar Bina Marga 2018. Temuan ini diperkuat oleh (Fauzi et al., 2015) yang mengidentifikasi komposisi optimum semen 13.7% dan *fly ash* 10.4%, menghasilkan CBR 134.872%–162.001% serta UCS 24 kg/cm², melebihi batas minimum 120%. Hasil-hasil tersebut menegaskan bahwa *fly ash* berfungsi efektif sebagai material stabilisasi yang mampu meningkatkan kekuatan sub-base secara signifikan.

Dari sisi mekanis, parameter kompaksi seperti *Maximum Dry Density* (MDD) dan *Optimum Moisture Content* (OMC) berperan penting dalam kinerja lapisan *base*. (Elisza et al., 2019; Sulha et al., 2025) menunjukkan bahwa variasi kadar air dan kepadatan kering secara langsung memengaruhi nilai CBR dan modulus elastisitas material. (Murtedza & Nugraha, 2024) menemukan bahwa campuran *fly ash* 50% ditambah *fill material* 50% dapat meningkatkan nilai CBR laboratorium hingga 31.84% pada kadar air 10.24%, menegaskan pentingnya OMC dalam menentukan performa mekanik material. (Situngkir et al., 2025) menambahkan bahwa peningkatan persentase *fly ash* dari 50% menjadi 70% menurunkan MDD dari 1.44 t/m³ menjadi 1.20 t/m³, sekaligus meningkatkan OMC dari 12.9% menjadi 21.9%, sehingga semakin

tinggi kandungan *fly ash* memerlukan kadar air lebih besar untuk mencapai kepadatan maksimum.

Pengaruh *fly ash* terhadap kekuatan dan stabilitas material juga dipengaruhi oleh karakteristik tanah. (Nurhidayatullah et al., 2025) menegaskan bahwa peningkatan indeks plastisitas menurunkan nilai CBR, sedangkan peningkatan MDD dan penurunan OMC meningkatkan nilai CBR. Hasil penelitian ini juga memberikan rekomendasi tebal lapisan jalan berdasarkan nilai CBR laboratorium untuk memastikan daya dukung optimal terhadap alat berat.

Selain itu, penggunaan FABA sebagai bahan alternatif tidak hanya berdampak pada aspek teknis, tetapi juga aspek ekonomi dan lingkungan. (Rosyad & Andini, 2024) membuktikan bahwa pemanfaatan *bottom ash* dapat meningkatkan durabilitas dan fleksibilitas campuran aspal panas (AC-WC) sekaligus mengurangi penggunaan material konvensional, seperti semen dan debu kapur. (Amin et al., 2024; Ampung et al., 2018) menegaskan bahwa penggunaan limbah industri ini sebagai pengganti agregat halus dapat dilakukan tanpa mengurangi kekuatan struktural perkerasan.

Berdasarkan berbagai studi tersebut, *fly ash* memiliki potensi besar sebagai material alternatif pada berbagai lapisan struktur jalan, mulai dari lapisan *subgrade/subbase* hingga lapisan permukaan (*surface layer*). Penelitian ini difokuskan pada lapisan pondasi bawah (*base course*) *hauling road* dengan mengombinasikan *fly ash* dan *fill material* menjadi material komposit. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *fly ash* terhadap parameter kompaksi, yaitu *Maximum Dry Density* (MDD) dan *Optimum Moisture Content* (OMC), sebagai dasar untuk menentukan kelayakan material komposit dalam konstruksi jalan tambang yang kuat, ekonomis, dan berkelanjutan.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di area pertambangan batubara Tanjung Selor, Kabupaten Bulungan, Provinsi Kalimantan Utara, seperti ditunjukkan pada Gambar 1 (Sumber: <https://earth.google.com/web>). Lokasi tersebut dipilih karena memiliki ketersediaan material *fly ash* hasil pembakaran batu bara dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di sekitar area tambang serta *fill material* yang biasa digunakan dalam pekerjaan perkerasan jalan angkut tambang (*hauling road*).



Gambar 1. Lokasi penelitian

2.2 Material Uji

Material uji yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari:

1. *Fly Ash* (FA)
 - a. Merupakan limbah *non-B3* hasil pembakaran batu bara dari PLTU di area tambang.
 - b. Diambil langsung dari *stockpile* fly ash untuk memastikan kondisi material masih representatif terhadap sifat aslinya.
 - c. Fly ash memiliki tekstur halus, berwarna abu-abu, dan mengandung unsur *pozzolanik* seperti silika dan alumina.
2. *Fill Material* (FM)
 - a. Merupakan agregat tanah hasil galian lokal di area tambang yang digunakan sebagai bahan utama *base course*.
 - b. Berfungsi sebagai material struktural yang memberikan kekuatan dan stabilitas utama pada lapisan dasar jalan tambang.

Kedua material kemudian dicampurkan untuk membentuk material komposit yang akan diuji di laboratorium dengan proporsi *fill material* 65% ditambah *fly ash* 35%, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi material komposit penelitian

Jenis Material	Komposisi (%)	Keterangan
<i>Fill Material</i> (FM)	65	Material Utama
<i>Fly Ash</i> (FA)	35	Bahan tambahan

2.3 Pengambilan dan Penanganan Sampel

Proses pengambilan sampel untuk material uji dilakukan secara representatif dan terkendali untuk menjaga karakteristik alami material, terutama kadar air awal yang memengaruhi hasil kompaksi (Nugraha, 2021). Pengambilan *bulk sampel* dari *fly ash* dan *fill material* dilakukan di area *stockpile* seperti tampak pada Gambar 2.



(a)



(b)

Gambar 2. Pengambilan sampel uji (a) *Fly ash* (FA) (b) *Fill material* (FM)/agregat

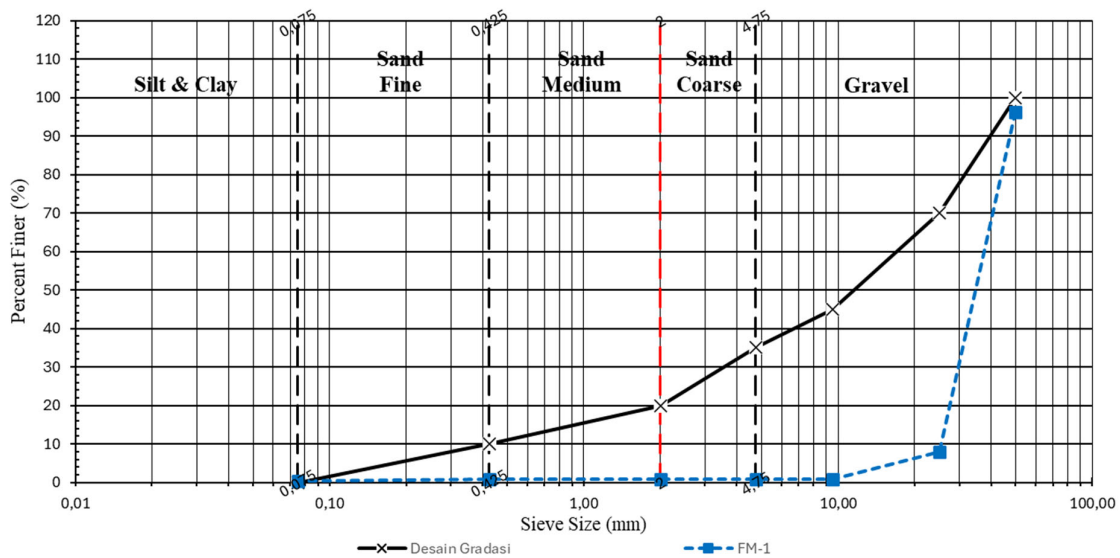
Setelah tiba di laboratorium, pada sampel *fly ash* dan *fill material* kemudian dilakukan proses *quartering* (Nugraha, 2021) untuk memperoleh sampel yang homogen dan representatif, seperti ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Hasil *quartering* untuk *fly ash*



Gambar 4. Hasil *quartering* untuk *fill material*



Gambar 5. Gradasi fill material

2.4 Gradasi Ukuran Butiran Fill Material

Uji sieve analysis dilakukan terhadap fill material untuk mengetahui distribusi ukuran butir. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM C136 (ASTM, 2019a) dan ASTM D422 (ASTM, 2002). Hasil uji sieve analysis dinyatakan pada Tabel 2. dan Gambar 5.

Tabel 2. Hasil uji sieve analysis

Ukuran Saringan	Persentase Lolos (%)
No. 2 (50 mm)	96.28
No. 1 (25 mm)	7.96
No. 3/8 (9.5 mm)	0.89
No. 4 (4.75 mm)	0.81
No. 10 (2 mm)	0.80
No. 40 (0.425 mm)	0.75
No. 200 (0.075 mm)	0.33

Pada Gambar 5 disajikan desain gradasi dari material base course yang telah digunakan di salah satu area hauling road di lokasi pertambangan.

2.5 Pengujian Kompaksi

Uji kompaksi dilakukan di laboratorium menggunakan metode Standard Proctor ASTM D698 (ASTM, 2000). Proses uji kompaksi tampak pada Gambar 6. Hasil dari uji kompaksi adalah untuk mendapatkan kurva kompaksi (kurva antara kadar air, w dan kepadatan kering γ_{dry}), dan dari kurva tersebut selanjutnya akan diperoleh parameter kompaksi yaitu:

1. Maximum Dry Density (MDD)

2. Optimum Moisture Content (OMC)



Gambar 6. Uji kompaksi standard proctor

2.6 Parameter yang Dianalisis

Parameter utama yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi:

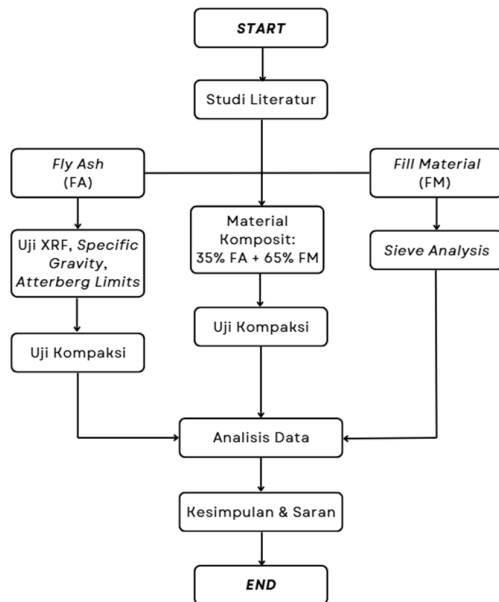
1. Maximum Dry Density (MDD) = kepadatan kering maksimum (t/m^3)
2. Optimum Moisture Content (OMC) = kadar air optimum (%)

Kedua parameter tersebut digunakan untuk menilai efektivitas penambahan fly ash dalam memperbaiki karakteristik pemadatan material

komposit untuk lapisan *base course* dari suatu *hauling road*.

2.7 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ini menggambarkan tahapan kegiatan mulai dari studi literatur hingga analisis data dan kesimpulan serta saran, seperti terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengujian XRF Fly Ash

Hasil uji XRF (*X-Ray Fluorescence*) pada material *fly ash* ditunjukkan pada Tabel 3. Terdapat 4 (empat) senyawa dominan dari material abu terbang yang diuji.

Tabel 3. Hasil Uji XRF fly Ash

No.	Oxidation	Amount	Units	Element
1	Na ₂ O	0.163	%	Na
2	MgO	4.57	%	Mg
3	Al ₂ O ₃	21.9	%	Al
4	SiO ₂	37.4	%	Si
5	P ₂ O ₅	0.117	%	P
6	SO ₃	2.85	%	S
7	Cl	0.0898	%	Cl
8	K ₂ O	1.26	%	K
9	CaO	14.6	%	Ca
10	TiO ₂	0.730	%	Ti
11	MnO	0.354	%	Mn
12	Fe ₂ O ₃	15.1	%	Fe
13	Co ₂ O ₃	0.0185	%	Co
14	NiO	0.0136	%	Ni
15	CuO	0.0119	%	Cu

Ke-empat senyawa tersebut meliputi SiO₂ (silika atau silikon dioksida): 37.4%, Al₂O₃ (aluminium oksida): 21.9%, Fe₂O₃ (ferioksida): 15.1%, dan CaO (kalsium oksida): 14.6%. Berdasarkan ASTM C618 (ASTM, 2019b), abu terbang dapat digolongkan ke dalam Kelas F. Hal ini berdasarkan data bahwa; SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ = 74.4% > 50%, CaO = 14.4% < 18%, dan SO₃ = 2.85% < 5%.

Tingginya kandungan silika (SiO₂) dan alumina (Al₂O₃) menunjukkan bahwa material ini memiliki potensi pozzolanik, sementara kadar kalsium oksida (CaO) yang sedang mendukung aktivitas pengikatan sekunder dalam stabilisasi tanah. Hasil analisis XRF pun menunjukkan adanya unsur minor seperti magnesium oksida (MgO, 4.57%), sulfur trioksida (SO₃, 2.85%), dan kalium oksida (K₂O, 1.26%) yang meskipun jumlahnya kecil tetap memengaruhi reaktivitas *fly ash*. Kehadiran logam-logam seperti besi (Fe), mangan (Mn), dan titanium (Ti) juga memperkuat karakter mineralogis *fly ash* sebagai residu pembakaran batubara.

3.2 Hasil Uji Specific Gravity dan Batas Plastis Fly Ash

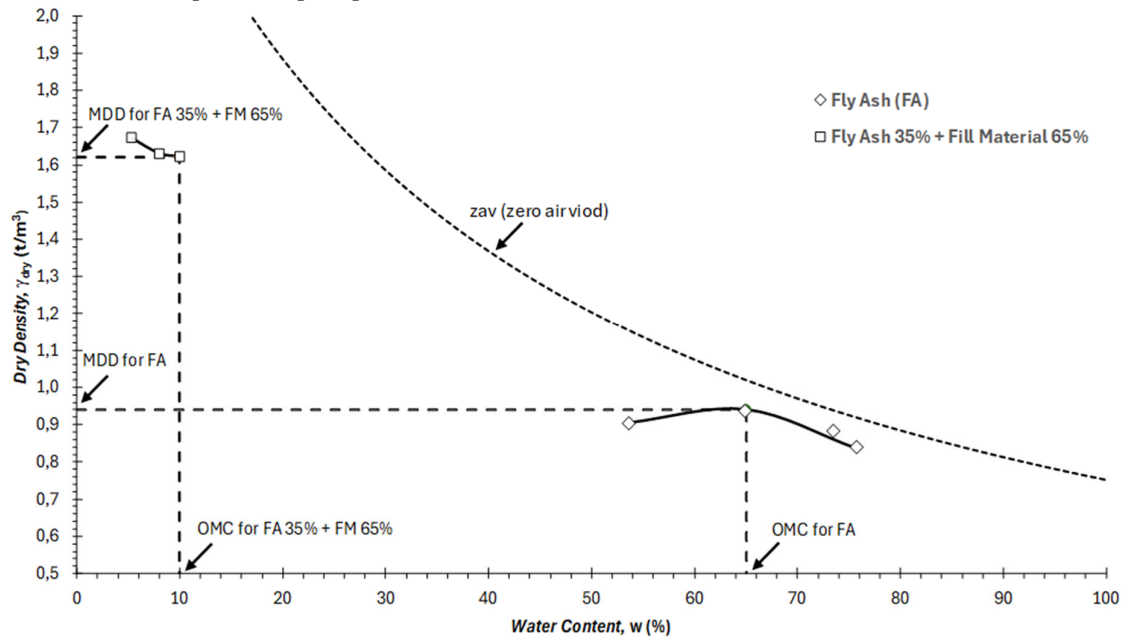
Hasil uji *specific gravity* (Gs) (XP CEN ISO/TS 17892-3, 2015) menunjukkan nilai sebesar 3.02, yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah mineral pada umumnya, yaitu sekitar 2.60–2.70. Nilai Gs yang relatif tinggi ini menunjukkan bahwa material *fly ash* memiliki densitas butiran yang lebih besar, yang dapat mempengaruhi proses pemadatan dan berat isi kering maksimum (*Maximum Dry Density*, MDD) saat diaplikasikan di lapangan. Dengan densitas butiran yang tinggi, *fly ash* dapat memberikan kontribusi terhadap peningkatan stabilitas struktural pada lapisan *base course*, terutama jika dicampur dengan agregat atau material dasar lainnya.

Hasil uji batas plastis (*Atterberg Limits*) ASTM D4318 (ASTM, 2014) menunjukkan bahwa *fly ash* bersifat non-plastik, yang berarti material ini tidak mengalami perubahan konsistensi dari padat ke plastis maupun ke cair. Sifat *non-plastik* ini dapat menguntungkan dalam aplikasi lapisan *base course* karena mengurangi potensi deformasi plastis dan retak saat mengalami beban lalu lintas, sehingga meningkatkan daya dukung jalan.

Secara teknis, kombinasi nilai Gs yang tinggi dan sifat *non-plastik* membuat *fly ash* cocok sebagai bahan tambahan atau substitusi pada campuran *base course*, terutama untuk meningkatkan berat isi kering dan stabilitas mekanik, sekaligus meminimalkan masalah plastisitas yang sering muncul pada tanah *subgrade* tradisional. Namun, perlu diperhatikan perilaku pemadatan dan kandungan air optimum, agar MDD dapat tercapai sesuai standar desain.

3.3 Hasil Pengujian Kompaksi *Fly Ash*

Dari hasil pengujian diperoleh kurva kompaksi yang menggambarkan perubahan densitas terhadap variasi kadar air seperti tampak pada Gambar 8.



Gambar 8. Kurva kompaksi

1. *Maximum Dry Density* (MDD) = 0.94 t/m³
2. *Optimum Moisture Content* (OMC) = 65%

Nilai MDD dan OMC yang diperoleh menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki densitas maksimum yang rendah dan kadar air optimum yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh sifat fisik *fly ash* yang berbutiran sangat halus, ringan, dan berpori tinggi sehingga membutuhkan kadar air yang besar untuk mencapai pepadatan maksimum. Karakteristik ini menandakan bahwa *fly ash* tidak dapat digunakan sendiri sebagai material struktural, tetapi memiliki potensi besar sebagai bahan campuran (stabilisasi) untuk memperbaiki sifat pepadatan material lain seperti *fill material*.

3.4 Hasil Pengujian Kompaksi Material Komposit

Uji kompaksi berikutnya dilakukan pada material komposit dengan komposisi 35% *fly ash* ditambah 65% *fill material*. Kurva hubungan antara kadar air dan kepadatan kering pada material komposit juga disajikan pada Gambar 3.1.

Hasil pengujian menunjukkan nilai parameter kompaksi sebagai berikut:

1. *Maximum Dry Density* (MDD) = 1.62 t/m³
2. *Optimum Moisture Content* (OMC) = 10%

Nilai MDD yang diperoleh menunjukkan peningkatan kepadatan yang signifikan dibandingkan dengan kurva kompaksi *fly ash* saja, sementara nilai OMC menurun tajam. Hal tersebut terjadi karena disebabkan oleh pengaruh butiran kasar dari *fill*

Berdasarkan kurva kompaksi tersebut, nilai parameter kompaksi *fly ash* pada Gambar 8.

material yang membantu mengurangi rongga udara antara partikel halus dari *fly ash*. Kombinasi komposit ini menghasilkan struktur yang lebih padat, dengan kadar air optimum yang lebih rendah karena air lebih mudah terdistribusi dan terserap oleh permukaan partikel yang bervariasi ukurannya (*well-graded mix*).

3.5 Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Hasil uji kompaksi pada penelitian ini dibandingkan dengan hasil penelitian (Situngkir et al., 2025) yang meneliti pengaruh variasi *fly ash* terhadap parameter kompaksi pada material serupa. Perbandingan hasil disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan parameter kompaksi

Komposisi Campuran	MDD (t/m ³)	OMC (%)	Referensi
FA (50%) + FM (50%)	1.44	12.9	(Situngkir et al., 2025)
FA (70%) + FM (30%)	1.20	21.9	(Situngkir et al., 2025)
FA (35%) + FM (65%)	1.62	10.0	Penelitian ini

Dari tabel di atas terlihat bahwa penurunan persentase *fly ash* menghasilkan peningkatan MDD dan penurunan OMC. Artinya, semakin sedikit kandungan *fly ash*, semakin tinggi kepadatan maksimum yang dapat dicapai karena berat jenis material meningkat dan jumlah rongga antarpartikel

berkurang. Sebaliknya, persentase *fly ash* yang lebih besar akan menyebabkan penurunan densitas akibat dominasi partikel halus yang ringan dan berpori, serta peningkatan kebutuhan air untuk mencapai kepadatan optimum.

Hasil penelitian ini konsisten dengan tren yang dilaporkan oleh (Situngkir et al., 2025) dan memperkuat pemahaman bahwa proporsi *fly ash* secara langsung memengaruhi perilaku kompaksi material komposit.

3.6 Interpretasi Geoteknik

Hasil uji menunjukkan bahwa *fly ash* berperan ganda dalam memengaruhi perilaku pemadatan material:

1. Secara fisik, partikel halus *fly ash* mengisi rongga antarbutiran kasar (*interparticle voids*) pada *fill material*, sehingga menghasilkan susunan yang lebih rapat dan meningkatkan kepadatan kering.
2. Secara kimiawi, sifat pozolanik *fly ash* memungkinkan terbentuknya reaksi pengikatan dengan kalsium dari material lain ketika terpapar air, yang dapat meningkatkan kekuatan struktur tanah seiring waktu (*self-cementation effect*).

Namun, pada kadar *fly ash* yang terlalu tinggi (>50%), fenomena ini berbalik arah: butiran halus yang dominan menyebabkan peningkatan plastisitas dan kebutuhan kadar air, serta penurunan kepadatan kering maksimum.

Dengan demikian, proporsi *fly ash* sebesar 35% pada penelitian ini dapat dianggap sebagai komposisi optimum untuk mencapai keseimbangan antara kepadatan tinggi dan kadar air yang efisien dalam konstruksi *base course* jalan angkut tambang.

3.7 Implikasi terhadap Desain *Hauling Road*

Lapisan *base course* berfungsi sebagai perantara antara lapisan tanah dasar (*subgrade*) dan lapisan permukaan jalan, sehingga memerlukan material dengan daya dukung tinggi, stabilitas baik, dan permeabilitas terkendali

Berdasarkan hasil uji, material komposit dengan 35% *fly ash* memenuhi karakteristik berikut:

1. Kepadatan cukup tinggi ($MDD = 1.62 \text{ t/m}^3$) sehingga mendukung kekuatan struktural.
2. Kadar air optimum rendah ($OMC = 10\%$) sehingga efisiensi terhadap proses konstruksi di lapangan.
3. Material mudah dipadatkan dan tersedia lokal sehingga menekan biaya transportasi dan logistik.

Selain itu, pemanfaatan *fly ash* yang merupakan limbah *non-B3* dari PLTU di area tambang memberikan nilai tambah dalam hal efisiensi ekonomi dan keberlanjutan lingkungan.

Dengan menggunakan *fly ash* sebagai bahan tambahan pada *base course*, proyek pembangunan jalan tambang dapat berkontribusi terhadap konsep infrastruktur hijau (*green infrastructure*) dengan cara

mengurangi penggunaan material konvensional serta meminimalkan timbunan limbah industri.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian laboratorium terhadap pengaruh *fly ash* terhadap parameter kompaksi material komposit lapisan *base course* sautu *hauling road*, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. *Fly ash* memiliki karakteristik kepadatan rendah dan kebutuhan air tinggi. Berdasarkan hasil uji kompaksi *Standard Proctor*, *fly ash* memiliki *Maximum Dry Density* (MDD) sebesar 0.94 t/m^3 dan *Optimum Moisture Content* (OMC) sebesar 65%. Nilai ini menunjukkan bahwa *fly ash* tidak cocok digunakan sebagai material tunggal untuk lapisan struktural, namun berpotensi sebagai bahan campuran yang dapat memperbaiki sifat tanah atau agregat.
2. Penambahan *fly ash* sebesar 35% terhadap *fill material* meningkatkan kepadatan campuran. Hasil pengujian material komposit (65% *fill material* ditambah 35% *fly ash*) menunjukkan $MDD = 1.62 \text{ t/m}^3$ dan $OMC = 10\%$.
3. *Fly ash* mampu mengisi rongga antarpartikel kasar pada *fill material* (*interstitial filling effect*), sehingga meningkatkan kepadatan campuran.
4. Pemanfaatan *fly ash* yang merupakan limbah *non-B3* dari PLTU mendukung prinsip pembangunan infrastruktur tambang berkelanjutan (*sustainable mining infrastructure*) melalui pengurangan limbah industri dan efisiensi biaya material.

Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut dapat disampaikan sebagai berikut:

1. Penelitian lanjutan disarankan untuk menguji parameter mekanik lainnya, seperti *California Bearing Ratio* (CBR) guna memperkuat dasar perencanaan teknis lapisan *base course* dengan material komposit *fly ash*.
2. Penerapan hasil penelitian di lapangan (*field trial*) direkomendasikan untuk memastikan kesesuaian antara hasil uji laboratorium dan kondisi aktual pemadatan di lapangan, termasuk pemantauan nilai MDD di lapangan.
3. Penerapan konsep *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk menilai dampak lingkungan dari penggunaan *fly ash* sebagai material konstruksi *hauling road*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak manajemen PT. Pesona Khatulistiwa Nusantara yang telah memberikan *support* yang luar biasa untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Amin, A. F., Nurhakim, N., & Riswan, R. (2024). Analisis pemanfaatan fly ash dan bottom ash sebagai campuran material perkerasan jalan di PLTU Asam Asam. *Jurnal Himasapta*, 9(2), 95. <https://doi.org/10.20527/jhs.v9i2.13298>
- Ampung, L. S., Arsyad, M., & Yasruddin. (2018). Pengoptimalan Penggunaan Material Agregat Lokal sebagai Bahan Perkerasan Jalan di Kabupaten Lamandau. *Jurnal Teknologi Berkelanjutan (Sustainable Technology Journal)*, 2(1).
- ASTM. (2000). *ASTM D 698 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effor*. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM. (2002). *ASTM D422 Standard Test Methods for Particle-Size Analysis of Soils*. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM. (2014). *ASTM D4318 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM. (2019a). *ASTM C 136 Standard Test Methods for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM. (2019b). *ASTM C 618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. Annual Book of ASTM Standards.
- Elisza, M., Mardiah, M., & Oktarianty, H. (2019). Analisis Pengaruh Parameter Kompaksi Terhadap Nilai CBR Berdasarkan Standar dan Kriteria Jalan Tambang PT Bukit Asam Tbk. Tanjung Enim. *MINERAL*, 4(2), 58–64. <https://doi.org/10.33019/mineral.v4i2.1596>
- Fauzi, H., Priadi, E., & Aprianto. (2015). Peningkatan Daya Dukung Lapis Fondasi Bawah dengan Campuran Flyash. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Sipil*, 1(1).
- 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>
- Gunawan, G., & Nono. (2019). Potensi Pemanfaatan Bahan Limbah Fly Ash dan Bottom Ash untuk Lapisan Pondasi Semen Jalan. *Jurnal Jalan Jembatan*, 36(1), 19–29.
- Haryanti, N. H. (2014). Uji abu terbang PLTU Asam Asam sebagai Bahan Pembuatan Bata Ringan. . . *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 11(2).
- Hawinuti, R., Gazalie, R., & Tomy Isanto. (2024). Pemanfaatan Limbah Abu Batu Bara sebagai Pengganti Pasir pada Campuran Beraspal HRS-Base. *Jurnal Gradasi Teknik Sipil*, 8(1), 103–115. <https://doi.org/10.31961/gradasi.v8i1.1401>
- Marthinus, A. P., Sumajouw, M. D. J., & Windah, R. S. (2015). Pengaruh Penambahan Abu Terbang (Fly Ash) terhadap Kuat Tarik Belah Beton. *Jurnal Sipil Statik*, 3(11).
- Murtedza, M. F., & Nugraha, A. S. (2024). Pengaruh Fly Ash dan Kadar Air Terhadap Nilai California Bearing Ratio Suatu Fill Material. *Jurnal Kacapuri : Jurnal Keilmuan Teknik Sipil*, 7(2), 168. <https://doi.org/10.31602/jk.v7i2.14121>
- Mustofa, A., Wicaksono, J. G., Nurhakim, N., Afriko, A., & Melati, S. (2019). Perbaikan Jalan Angkut Tambang: Pengaruh Perubahan Struktur Lapis Jalan terhadap Produktivitas Alat Angkut. *Jurnal Himasapta*, 1(01). <https://doi.org/10.20527/jhs.v1i01.906>
- Nugraha, A. S. (2021). *Studi laboratorium kompaksi statik dan dinamik dan uji kompaksi di lapangan dengan energi terukur pada tanah vulkanik di Jawa Barat*. Disertasi. Program Studi Teknik Sipil Program Doktor [Disertasi]. Program Studi Teknik Sipil Program Doktor Fakultas Teknik Universitas Katolik Parayahyangan.
- Nurhidayatullah, A., Shalaho, D. D., Lucia, L. R., Ardhan, I., & Tommy, T. (2025). Analisis Nilai California Bearing Ratio (CBR) Terhadap Tebal Lapisan Jalan Tambang pada Pit Selatan PT. Bina Sarana Sukses Site PT. Baramulti Suksessarana. *Venus: Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik*, 3(3), 154–168. <https://doi.org/10.61132/venus.v3i3.933>
- Rosyad, F., & Andini, N. T. (2024). Analisis Pemanfaatan Limbah Batu Bara Bottom Ash Sebagai Filler Terhadap Durabilitas dan Fleksibilitas Aspal Beton AC–WC. *Ensiklopedia of Journal*, 6(3), 111–116.
- Situngkir, H. P., Nugraha, A. S., & Riyadi, S. (2025). Efek Persentase Fly Ash terhadap Parameter Kompaksi Suatu Fill Material. *Jurnal Teknik Sipil*, 21(1), 80–92. <https://doi.org/10.28932/jts.v21i1.9694>
- Suhendik, A. A., Oktaviani, R., & Trides, T. (2022). Studi Perbaikan Perkerasan Lapis Jalan Tambang dengan Nilai CBR dan DCP. *Jurnal Riset Teknik Pertambangan*, 75–83. <https://doi.org/10.29313/jrtp.v2i1.1019>
- Sulha, S., Muhammad Rustamin, F. A., & Mustika, W. (2025). Inovasi Material Limbah Crusher Untuk Meningkatkan Daya Dukung Lapis Pondasi Bawah Konstruksi Jalan Berbasis Keberlanjutan. *Media Konstruksi*, 10(1), 59–72. <https://doi.org/10.33772/jmk.v10i1.93>
- Syahilla Indriyati, T., Malik, A., & Alwinda, Y. (2019). Kajian Pengaruh Pemanfaatan Limbah Faba (Fly Ash Dan Bottom Ash) pada Konstruksi Lapisan Base Perkerasan Jalan. *JURNAL TEKNIK*, 13(2), 112–119. <https://doi.org/10.31849/teknik.v13i2.3596>
- XP CEN ISO/TS 17892-3. (2015). *Geotechnical Investigation and Testing-Laboratory Testing of Soil-Part 3: Determination of Particle Density*.
- Yemima, A. G. M. P., & Dian, N. (2022). Pemanfaatan Limbah Fly Ash dalam Pembuatan Batu Bata Ringan. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sipil*, 3(1), 34–40.