



POTENSI PENGGUNAAN CAMPURAN *SLAG* NIKEL DAN *FLY ASH* SEBAGAI MATERIAL PERKERASAN JALAN

Rifanni Wiziarti¹, Wiwik Rahayu²

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Jalan Margonda Raya, Pondok Cina, Kecamatan Beji, Kota Depok, 16424
(021) 7867222
email : wiziartirifanni@gmail.com, wiwikftui@gmail.com

Info Artikel

Abstrak

Sejarah Artikel:

Diterima : Juni 2022
Disetujui : Juni 2022
Dipublikasikan : Juni 2022

Keywords:

Nickel slag; fly ash;
CBR; swelling;
Permeability;

Penggunaan kembali material daur ulang dalam skala besar untuk proyek yang berhubungan dengan geoteknik, seperti pada perkerasan jalan, akan menjadikan lebih ekonomis dan mendukung kelestarian lingkungan. *Slag* nikel dan *fly ash* adalah salah satu contoh hasil sampingan produksi dari pengolahan feronikel dan batubara. Dalam penelitian ini, campuran *slag* nikel dan *fly ash* diteliti untuk dijadikan alternatif material struktur perkerasan jalan. Penggunaan *fly ash* tipe F digunakan sebagai material pengisi dan stabilisasi. Pengujian laboratorium direncanakan untuk komposisi campuran 0%, 5%, 8%, 11%, 14%, 17%, dan 20% FA dalam kriteria desain berupa pengujian pemadatan (*modified proctor*), California Bearing Ratio (CBR), potensi pengembangan (*swelling*) dan permeabilitas. Hasil menunjukkan nilai CBR *soaked* lebih besar daripada CBR *unsoaked* karena pengaruh dari *fly ash* yang bersifat pozzolan. Maka CBR kondisi *unsoaked* yang digunakan sebagai CBR desain dengan nilai memenuhi standar minimum CBR lapis fondasi bawah, bahu jalan, dan timbunan pilihan. Potensi pengembangan (*swelling*) masih memenuhi batas nilai maksimum yaitu 0,5% (derajat ekspansi rendah). Koefisien permeabilitas hanya berkisar lebih besar dari 10^{-5} m/sec (permeabilitas sedang) dimana kombinasi campuran dikategorikan untuk lapis fondasi bawah dengan indeks plastisitas maksimum 10 dan tanpa adanya persyaratan permeabilitas untuk semua kategori lalu lintas.

Kata Kunci: *slag* nikel, *fly ash*, CBR, *swelling*, permeabilitas

Abstract

The reuse of recycled materials on a large scale for geotechnical projects, such as in road pavements, will make it more economical and support environmental sustainability. Nickel slag and fly ash are examples of by-products of ferronickel and coal processing. In this study, a mixture of nickel slag and fly ash was investigated to be an alternative material for road pavement structures. The use of Class F fly ash is used as a filler and stabilization material. Laboratory testing is planned for the composition of the mixture of 0%, 5%, 8%, 11%, 14%, 17%, and 20% FA in the design criteria for compaction test (modified proctor), California Bearing Ratio (CBR), swelling potential and permeability. The results show the

soaked CBR value is greater than the unsoaked CBR due to the influence of pozzolanic fly ash. Then the unsoaked condition CBR is used as the design CBR with a value that meets the minimum CBR standards for sub-base, shoulder roadways, and structural fill. The potential for swelling still meets the maximum value limit of 0.5% (low degree of expansion). The coefficient of permeability is only greater than 10^{-5} m/sec (medium permeability) where the mixture combination is categorized for sub-base layers with a maximum plasticity index of 10 and without any permeability requirements for all traffic categories.

Keywords : *nickel slag, fly ash, CBR, swelling, permeability*

© 2022 Universitas Abdurrah

ISSN 2527-7073

□ Alamat korespondensi:

E-mail: wiziartirifanni@gmail.com (R. Wiziarti),

wiwikftui@gmail.com (W. Rahayu)

PENDAHULUAN

Peningkatan pembangunan infrastruktur jalan dilakukan oleh Pemerintah untuk menunjang konektivitas transportasi darat di seluruh wilayah Indonesia serta meningkatkan perekonomian. Pembangunan tersebut berbanding lurus dengan penggunaan material konvensional sebagai bahan baku perkerasan jalan. Penggunaan material konvensional tersebut dianggap kurang ekonomis dan tidak ramah lingkungan. Untuk mendukung pelestarian lingkungan, penggunaan material sampingan industri telah banyak digunakan dan diteliti sebagai pengganti material alam.

Indonesia merupakan salah satu negara penghasil nikel di dunia, yang memiliki cadangan nikel sebesar 52% dari cadangan dunia sebesar 139 juta ton Nikel [1]. Untuk memproduksi *ferronickel* yang dilakukan secara pirometalurgi, akan menghasilkan sejumlah kecil produk *ferronickel* dan sejumlah besar limbah *slag* [2]. Penggunaan *slag* telah banyak digunakan sebagai material perkerasan lentur, perkerasan beton dan material timbunan. Pada beberapa aplikasi *slag* nikel yang sudah dilakukan hanya berfokus pada penggunaan bahan limbah saja, tidak dicampur dengan bahan lain mengingat *slag* nikel merupakan material granular.

Di sisi lain, *fly ash* telah banyak digunakan sebagai material stabilisasi dalam perkerasan jalan dan tanah yang bermasalah. Beberapa studi telah melakukan pengujian terhadap *fly ash* yang telah dicampur sebagai material pengisi menunjukkan bahwa akan memberikan hasil penurunan yang kecil. Dalam penelitian ini, digunakan *fly ash* tipe F disebut juga *low-calcium fly ash*, dimana tidak mempunyai sifat *cementitious*, hanya bersifat pozzolan [3]. Mengingat *slag* nikel merupakan material granular yang tidak memiliki cukup butiran halus untuk memenuhi persyaratan material lapis fondasi atas, maka kehadiran *fly ash* diharapkan dapat menambah kepadatan pada campuran, meningkatkan daya ikat antar butiran dan mengurangi permeabilitas. Di dalam penelitian ini, *fly ash* dikombinasikan dengan campuran

slag nikel sebagai bahan pengisi (*filler*) untuk memenuhi persyaratan kurva distribusi ukuran partikel untuk lapis fondasi atas (*base course*).

TINJAUAN PUSTAKA

Spesifikasi Agregat Lapis Pondasi Menurut Spesifikasi Umum 2010 Bina Marga

Dalam Spesifikasi Umum 2010 (Revisi 3) Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga untuk pekerjaan konstruksi jalan dan jembatan, terdapat persyaratan untuk lapis pondasi agregat dengan gradasi dan sifat – sifat sebagai berikut :

Tabel 1. Gradasi Lapis Fondasi Agregat [4]

No.	Ukuran Ayakan		Persen Berat Yang Lolos		
	ASTM	(mm)	Kelas A	Kelas B	Kelas S
1.	2”	50	-	100	-
2	1 ½”	37,5	100	88 – 95	100
3.	1”	25,0	79 – 85	70 – 85	77 – 89
4.	3/8”	9,50	44 – 58	30 – 65	41 – 66
5.	No. 4	4,75	29 – 44	25 – 55	26 – 54
6.	No. 10	2,0	17 – 30	15 – 40	15 – 42
7.	No. 40	0,425	7 – 17	8 – 20	7 – 26
8.	No. 200	0,075	2 – 8	2 – 8	4 – 16

Tabel 2. Sifat Fisik Lapis Pondasi Agregat [4]

No.	Sifat – sifat	Kelas A	Kelas B	Kelas S
1.	Abrasi dari Agregat Kasar (SNI 03-2417-1990)	Maks 40%	Maks 40%	Maks 40%
2.	Indeks Plastisitas (SNI-03-1996-1990)	0 – 6	6 – 12	4 – 15
3.	Hasil Kali Indeks Plastisitas dengan % Lolos Ayakan No. 200	Maks 25	-	-
4.	Batas Cair (SNI 03-1967-1990)	0 – 25	0 – 35	0 – 35
5.	Bagian yang Lunak (SK SNI M-01-1994-03)	0 – 5%	0 – 5%	0 – 5%
6.	CBR (SNI 03-1744-1989)	Min 90%	Min 60%	Min 50%

Dari Tabel 1 dan Tabel 2, kelas A digunakan untuk lapis pondasi atas dan kelas B untuk lapis pondasi bawah. Sedangkan kelas S hanya digunakan untuk bahu jalan tanpa penutup. Selain sebagai lapis fondasi, komposisi campuran akan direkomendasikan sebagai material timbunan pilihan dengan nilai minimum CBR yaitu 10%.

Agregat Substandar

Agregat substandar merupakan agregat yang memiliki satu atau lebih kekurangan sifat – sifat agregat standar. Sifat yang umumnya tidak terpenuhi adalah gradasi, bidang pecah, kepipihan, kekerasan (abrasi), keawetan (*soundness*) dan kadar lempung yang tinggi [5]. Agregat substandar dapat berasal dari alam seperti batu gamping, batu karang, batu apung, agregat dari kelompok silika agregat, pasir kuarsa dan pasir laut. Sedangkan agregat substandar buatan dapat berupa batu bata, hasil sampingan industri seperti *slag* dan *tailing*, alwa dan genting. Agregat ini masih memiliki potensi untuk digunakan apabila digunakan dengan mencampur bahan stabilisasi dengan memodifikasi desain perkerasan standar dan prosedur konstruksi.

Material Tidak Terikat Lapis Fondasi Atas (*Unbound Aggregate Base Course*)

Lapis fondasi atas merupakan lapis pondasi yang terletak tepat di bawah lapis permukaan. Lapis fondasi atas dapat terdiri dari material tidak terikat seperti : pecahan batu dan *slag* serta campuran tanah-agregat dengan ketahanan yang tinggi terhadap deformasi untuk mencegah terjadinya kerusakan dan perubahan volume. Untuk menentukan kekuatan, diperlukan karakteristik stabilitas material yang berasal dari *interlock* antar partikel, gesekan antar permukaan dan gradasi ukuran butiran [6].

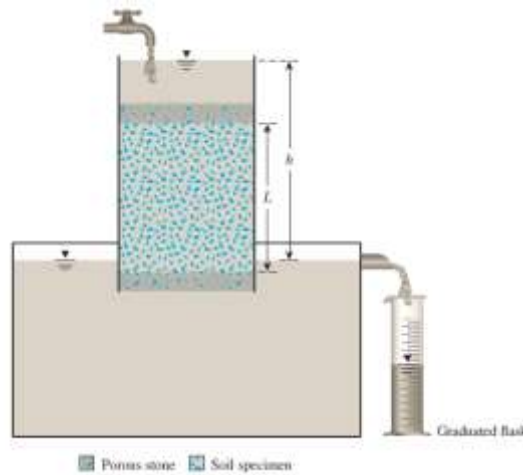
Kondisi campuran agregat dengan sedikit atau tanpa kandungan butiran halus akan memiliki kepadatan yang rendah dan sulit untuk dipadatkan selama konstruksi karena sifatnya yang tidak kohesif. Agregat yang mengandung cukup butiran halus akan memiliki kepadatan yang tinggi yang akan meningkatkan ketahanan geser dengan permeabilitas rendah. Namun jika agregat banyak mengandung butiran halus akan menurunkan kepadatan serta rentan terhadap kondisi aliran air.

Prosedur Pengujian Potensi Pengembangan (*Swelling*)

Pengujian pengembangan (*swelling*) adalah perbandingan antara perubahan tinggi selama perendaman terhadap tinggi benda uji semula yang dinyatakan dalam persen (Badan Standarisasi Nasional, 1989). Pada pengujian *swelling* ini dilakukan pada benda uji CBR dengan kepadatan kering maksimum dan kadar air optimum. Berdasarkan ASTM D4792/D4792M-13:2013 (*Standar Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions*), batas nilai *swelling* adalah maksimum 0,5%. Dimana batas nilai tersebut termasuk ke dalam derajat ekspansi yang rendah.

Prosedur Pengujian Permeabilitas

Pengujian permeabilitas tanah yang dilakukan di laboratorium dapat dilakukan dengan metode *Constant Head Permeameter* dan *Variable/Falling Head Permeameter*. Dalam penelitian ini, dilakukan uji permeabilitas dengan metode *constant head permeameter* dimana ini digunakan untuk tanah yang memiliki butiran kasar dan koefisien permeabilitas yang tinggi seperti pasir dan kerikil. Konsep alat yang digunakan seperti Gambar 2.



Gambar 2. Konsep Pengujian *Constand Head Permeability* [8]

Dalam pengujian ini, koefisien permeabilitas dihitung menggunakan prinsip hukum Henry Darcy (1956) yang mengusulkan hubungan antara kecepatan dan gradien hidrolik dalam persamaan (1) dan (2) :

$$v = k I \quad \dots \quad (1)$$

$$q = k A i \quad \dots \quad (2)$$

$$k = QL/tA\Delta h \quad \dots \quad (3)$$

dimana, v adalah kecepatan air (cm/det), gradien hidrolik adalah $\Delta H/L$, k adalah koefisien permeabilitas (cm/det), q adalah debit air (cm³/det) = Q/t , Q adalah volume air yang mengalir, t adalah waktu yang diperlukan, A adalah luas permukaan sampel uji (cm²).

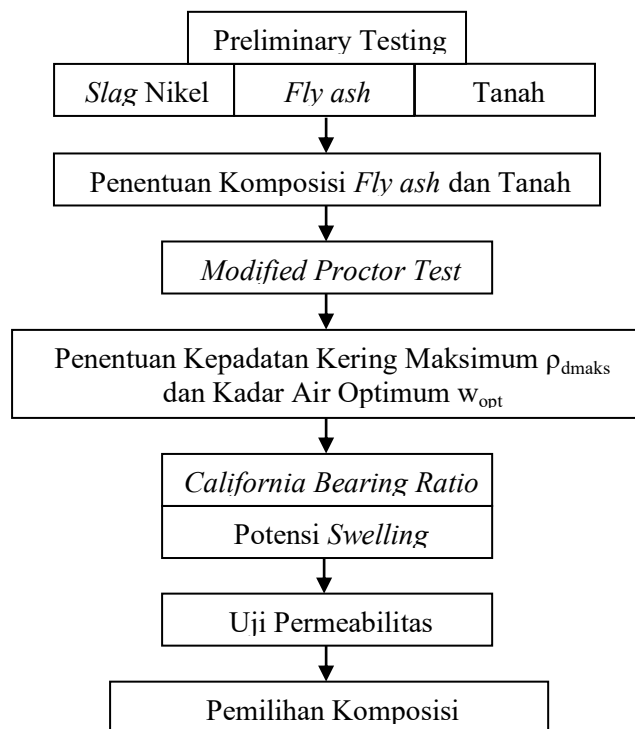
METODE

Secara umum, penelitian ini merupakan penelitian eksperimental – kuantitatif yang dilakukan di laboratorium. Pada tahap awal, dilakukan pengujian untuk mengetahui karakteristik fisik *slag* nikel yaitu : analisa saringan agregat, berat jenis dan penyerapan, pengujian keausan agregat menggunakan alat abrasi Los Angeles, pengujian gumpalan lempung dan butir mudah pecah, dan uji persentase butir pecah pada agregat kasar. *Slag* nikel merupakan material dengan gradasi ukuran butiran berkisar antara 0.075 mm hingga 2.54 mm (Gambar 4). Sedangkan *fly ash* memiliki butiran halus kurang dari 0.075 mm. Dapat dilihat pada analisa

saringan agregat, *slag* nikel tidak memenuhi persentase minimum agregat halus dalam Spesifikasi Umum 2010 Revisi 3 Bina Marga.

Dalam penelitian (Gambar 4), *slag* nikel dan *fly ash* akan dikombinasikan dengan tanah untuk memudahkan pemadatan di laboratorium maupun di lapangan karena mengingat sifat *slag* nikel dan *fly ash* tidak kohesif dan sulit dipadatkan. Komposisi *fly ash* yang digunakan adalah 0%, 5%, 8%, 11%, 14%, 17% dan 20% dengan komposisi tanah 5%.

Pengujian terdiri dari pengujian pemadatan laboratorium dengan *modified proctor* metode D sesuai standar SNI 1743 : 2008 untuk menentukan kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum. Metode ini dipadatkan dengan menggunakan massa penumbuk 4,54 kg yang dijatuhkan secara bebas dari ketinggian 457 mm. Pengujian CBR laboratorium dan potensi pengembangan dilakukan pada kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum sesuai standar SNI 03-1744-1989. Batasan nilai CBR digunakan dalam kondisi terendam dalam air (*soaked*) selama 4 hari. Pengujian permeabilitas menggunakan metode *constant-head permeameter* dengan benda uji dipadatkan menggunakan metode *modified proctor* dengan ukuran diameter mould 99.95 mm dan tinggi 13.07 mm.

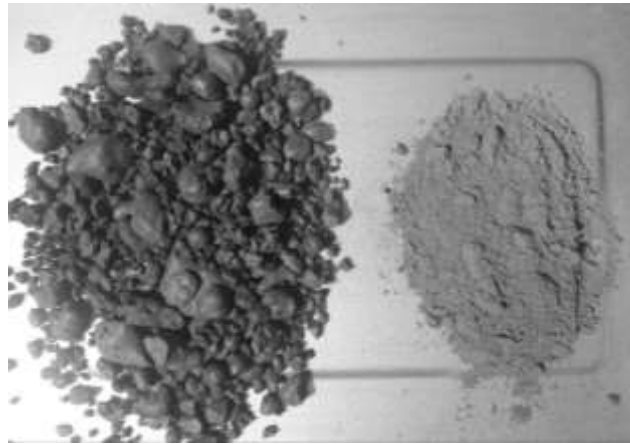


Gambar 3. Skema Pengujian Laboratorium untuk Campuran *Slag* Nikel dan *Fly ash* (Penulis, 2022)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Fisik Material

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 tahun 2021 tentang penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup, *slag* nikel (kode limbah N102) dan *fly ash* (kode limbah N106) termasuk kategori jenis limbah non B3 yang sudah dapat dimanfaatkan. *Slag* nikel yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Slag* FeNi-II PT. ANTAM, dimana secara fisik mirip dengan kerikil alam (Gambar 4).



Gambar 4. Tipikal Bentuk *Slag* Nikel dan *Fly ash* (Penulis, 2022)

Untuk mengetahui sifat fisik material yang digunakan, maka dilakukan pengujian tahap awal seperti pada Tabel 4.

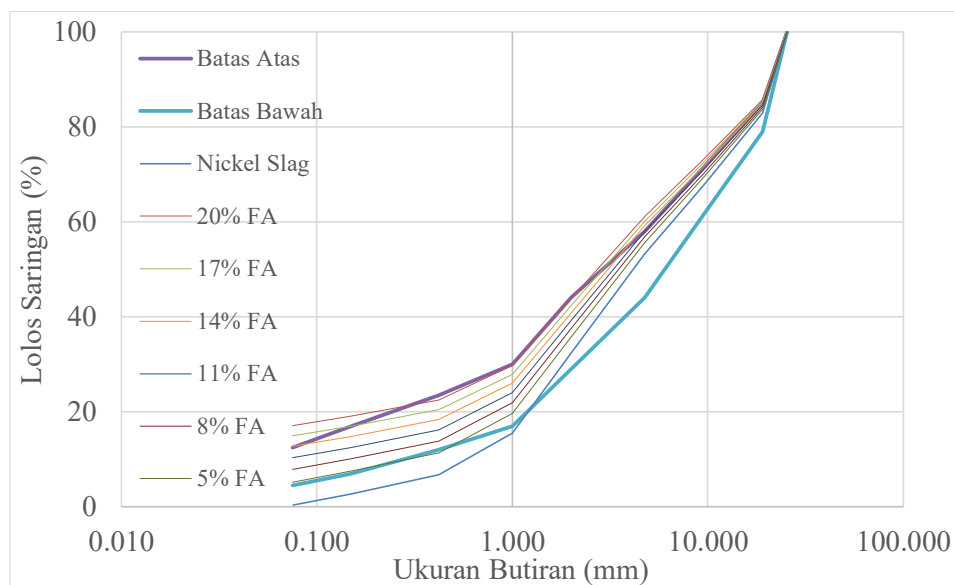
Tabel 4. Hasil Laboratorium Pengujian Awal (Penulis, 2022)

No	Pengujian	Hasil	Spesifikasi <i>Base Course</i>
Karakteristik <i>Slag</i> Nikel			
1.	Abrasi (%)	37.99	Maks 40%
2.	<i>Spesific Gravity</i>		
	<i>Bulk</i>	2.87	-
	<i>SSD</i>	2.89	-
	<i>Apparent</i>	2.93	-
3.	Penyerapan (%)	0.77	Maks 5%
4.	Gumpalan Lempung dan Butir Mudah Pecah (%)	0.15	Maks 5%
5.	Persentase Butir Pecah pada Agregat Kasar (%)	80/72	Min 95/90
Karakteristik <i>Fly ash</i>			
1.	<i>Spesific Gravity</i>	2,75	-
2.	Ukuran Butiran	< 0.075	-

Karakteristik Tanah

1. Jenis Tanah	ML	<i>Low Plasticity</i>
2. <i>Spesific Gravity</i>	2,69	-
3. Batas Cair (%)	23,54	Maks 25
4. Indeks Plastisitas (%)	3,87	0 – 6

Butiran *fly ash* memiliki butiran halus non plastis kurang dari 0.075 mm (Gambar 4) dengan nilai *specific gravity* 2,75 dan berwarna abu – abu kehitaman. Berdasarkan sistem klasifikasi USCS (*Unified Soil Classification System*), bentuk *slag* nikel dapat diklasifikasikan sebagai kerikil bergradasi buruk dan campuran kerikil pasir dengan sedikit mengandung butiran halus (GP). Maka untuk memenuhi prosentase agregat halus untuk lapis pondasi atas (Gambar 5), digunakan *fly ash* tipe F dari PLTU Banten 3 Lontar dimana tidak mempunyai sifat *cementitious*, hanya bersifat *pozzolan*, dan tidak kohesif.



Gambar 5. Grafik Analisa Saringan Campuran *Slag* Nikel, *Fly ash*, dan Tanah (Penulis, 2022)

Karakteristik Pemadatan (*Modified Proctor Test*)

Pada penelitian ini, metode pemadatan yang dilakukan untuk pengujian CBR menggunakan *modified proctor* (Tabel 5). Dengan metode ini diharapkan mampu mewakili energi pemadatan di lapangan khususnya untuk perkerasan jalan. Dalam *modified proctor*, hanya menggunakan material yang lolos saringan 19,00 mm. Maka untuk material yang tertahan 19.00 mm (3/4”), komposisinya akan ditambahkan ke dalam fraksi yang lebih halus.

Dalam percobaan pemadatan, variasi 0% *fly ash* dengan 5% tanah tidak dapat dipadatkan dikarenakan kurangnya butiran halus sebagai bahan pengisi. Untuk itu dilakukan pemadatan pada campuran 5% hingga 20% *fly ash*.

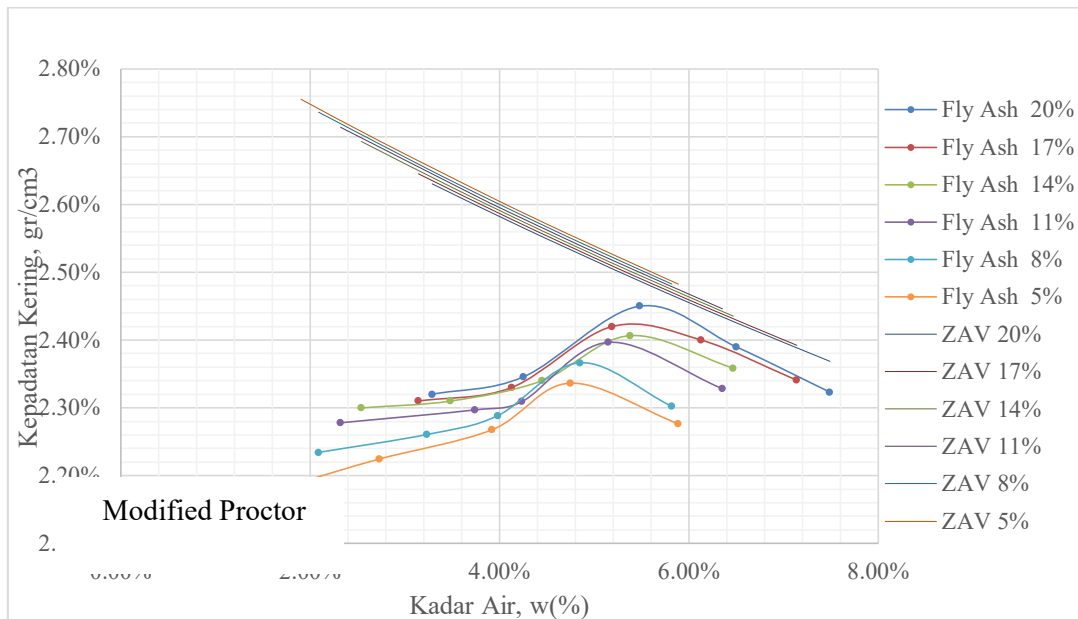
Tabel 5. Detail Pengujian Pemadatan, CBR dan *Swelling* di Laboratorium (Penulis, 2022)

Pengujian Pemadatan				California Bearing Ratio dan Swelling			
Kode Sampel	%FA	%Tanah	Jenis Pemadatan	Kode Sampel	%FA	%Tanah	Moisture Content
MP1	5%	5%	<i>Modified Proctor</i>	CBR1	5%	5%	OMC
MP2	8%	5%	<i>Modified Proctor</i>	CBR2	8%	5%	OMC
MP3	11%	5%	<i>Modified Proctor</i>	CBR3	11%	5%	OMC
MP4	14%	5%	<i>Modified Proctor</i>	CBR4	14%	5%	OMC
MP5	17%	5%	<i>Modified Proctor</i>	CBR5	17%	5%	OMC
MP6	20%	5%	<i>Modified Proctor</i>	CBR6	20%	5%	OMC

Variasi kepadatan kering dengan kadar air dalam pemadatan campuran dapat dilihat pada Tabel 6. Kepadatan kering maksimum akan mengalami peningkatan seiring penambahan *fly ash* hingga 20% dengan kepadatan kering maksimum meningkat dari 2.35 gr/cm³ hingga 2.45 gr/cm³ dan kadar air juga meningkat dari 4.78% hingga 5.65%. Kadar air yang diperlukan selama pemadatan hanya berkisar 1.9% hingga 7.49% (Gambar 6) dikarenakan dominasi komposisi *slag* nikel yang hanya memiliki penyerapan yaitu 0.77% jika dibandingkan dengan kerikil alam merapi sebesar 2,8% [9].

Tabel 6. Karakteristik Pemadatan, Berat Jenis dan Angka Pori Campuran (Penulis, 2022)

<i>Fly ash</i>	Kepadatan Kering	Kadar Air (w)	Gs	Angka Pori (e at $\rho_{d_{maks}}$)
	($\rho_{d_{maks}}$) gr/cm ³	%		
5%	2.350	4.78	2.879	0.225
8%	2.365	4.85	2.885	0.220
11%	2.395	5.20	2.891	0.207
14%	2.405	5.40	2.896	0.204
17%	2.420	5.45	2.902	0.199
20%	2.450	5.65	2.908	0.187



Gambar 6. Grafik Karakteristik Pemadatan Campuran *Slag* Nikel, *Fly ash*, dan Tanah (Penulis, 2022)

Nilai angka pori pada campuran menunjukkan nilai yang paling rendah ($e = 0.187$) pada kepadatan kering yang tinggi ($\rho_{d_{maks}} = 2.45$). Hal ini membuktikan bahwa nilai angka pori dalam campuran akan semakin berkurang ketika campuran semakin padat.

Pada Gambar 6, grafik kepadatan yang tinggi akan mendekati grafik *zero air void* (ZAV 20%) dan kepadatan yang rendah akan menjauhi grafik *zero air void* (ZAV 5%) seiring dengan penggunaan *fly ash* sebagai bahan pengisi. Hal ini terjadi karena grafik *zero air void* menggambarkan kondisi campuran sangat padat dan tanpa adanya rongga udara (mencapai nilai maksimum secara teoritis).

California Bearing Ratio (CBR)

Dalam penelitian ini, dilakukan uji beban statis CBR (Tabel 5) dengan mesin penetrasi terhadap campuran *slag* nikel dan *fly ash* kondisi tanpa rendaman (*unsoaked*) dan rendaman (*soaked*) untuk mengetahui potensi penggunaan material sebagai lapis pondasi atas perkerasan jalan. Peningkatan komposisi *fly ash* dalam campuran menunjukkan peningkatan nilai CBR dikarenakan campuran semakin padat.

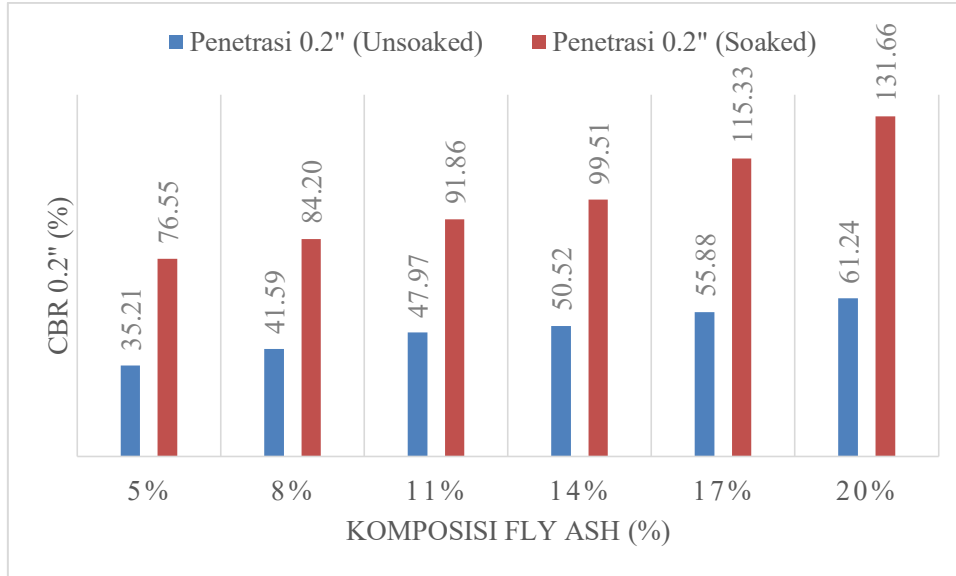
Tabel 7. Hasil CBR Laboratorium (Penulis, 2022)

Komposisi <i>Fly ash</i>	Kepadatan	Kadar	Penetrasi 0,1"		Penetrasi 0,2"	
	Kering	Air	<i>Unsoaked</i>	<i>Soaked</i>	<i>Unsoaked</i>	<i>Soaked</i>
	Maks (gr/cm ³)	Optimum (%)	(%)	(%)	(%)	(%)
5%	2.350	4.78	22.96	42.87	35.21	76.55
8%	2.365	4.85	23.73	46.69	41.59	84.20
11%	2.395	5.20	24.49	51.29	47.97	91.86
14%	2.405	5.40	27.94	62.00	50.52	99.51
17%	2.420	5.45	31.96	78.08	55.88	115.33
20%	2.450	5.65	35.98	94.92	61.24	131.66

Dari tabel di atas, semua campuran terlihat bahwa nilai CBR *unsoaked* pada penetrasi 0,1" berada pada rentang 22,96% hingga 35,98%. Pada penetrasi 0,2" nilai CBR berada pada rentang 35,21% hingga 61,24%. Untuk kondisi *soaked*, nilai CBR pada penetrasi 0,2" berada pada rentang 42,87% hingga 94,92%. Pada penetrasi 0,2" nilai CBR berada pada rentang 76,55% hingga 131,66%.

Dari seluruh sampel yang telah diuji, didapat nilai CBR meningkat seiring dengan peningkatan kepadatan kering dan kadar air optimum yang terjadi ketika pemadatan menggunakan *modified proctor* (Gambar 7). Nilai CBR *soaked* yang terjadi lebih besar dari nilai CBR *unsoaked*. Hal ini disebabkan karena adanya penambahan *fly ash* sebagai bahan pengisi yang berbutir sangat halus dan bersifat pozzolan. Dimana pozzolan tidak mempunyai sifat sementasi, tetapi dengan bentuknya yang halus, dengan adanya air akan terjadi reaksi kimia dengan kalsium hidroksida pada suhu biasa, membentuk senyawa yang memiliki sifat seperti kalsium silikat dan kalsium aluminat [10]. Keberadaan air akan bereaksi dengan *fly ash* sehingga meningkatkan daya ikat antar partikel butiran dan membuat campuran menjadi lebih padat, rapat serta kompak.

Pada sampel 17%FA dan 20%FA, nilai CBR yang dicapai hingga melewati 100%. Hal ini mungkin bisa terjadi pada pemadatan *slag* (limbah peleburan logam) pecah dan tanah yang telah distabilkan [11]. Selain itu, nilai CBR tersebut terjadi pada sampel dalam keadaan *soaked*. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, kehadiran *fly ash* dalam proses perendaman akan semakin membantu mengisi rongga – rongga dalam sampel dan akan meningkatkan daya ikat butiran.



Gambar 7. Grafik Hasil CBR Laboratorium (Penulis, 2022)

Potensi Pengembangan (*Swelling*)

Pada penelitian ini, potensi pengembangan diukur pada benda uji CBR kondisi rendaman (*soaked*) selama 4 hari (Tabel 5). Nilai *swelling* yang terjadi berkisar antara 0 hingga 0,36%. Hasil pengujian juga menunjukkan semakin bertambahnya komposisi *fly ash* pada campuran maka akan menurunkan nilai *swelling*. Hal tersebut terjadi karena penambahan *fly ash* akan menyebabkan rongga pada butiran *slag* nikel akan distabilisasi oleh bahan tersebut, sehingga rongga – rongga antar butiran menjadi lebih padat, rapat dan kompak.

Tabel 8. Hasil Pengujian *Swelling* (Olahan Penulis, 2022)

Komposisi <i>Fly ash</i>	Kepadatan Kering Maks (gr/cm ³)	Kadar Air Optimum (%)	<i>Swelling</i> (%)
5%	2.25	4.80	0.36
8%	2.36	4.85	0.32
11%	2.38	5.18	0.28
14%	2.40	5.25	0.03
17%	2.42	5.46	0.01
20%	2.45	5.65	0.00

Berdasarkan ASTM D4792/D4792M-13:2013 (*Standar Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions*), nilai *swelling* hasil pengujian menunjukkan masih dalam batas nilai *swelling* yaitu maksimum 0,5%.

Permeabilitas

Pengujian permeabilitas *constant head* ini dilakukan sebagai uji tambahan untuk mengetahui koefisien permeabilitas campuran sebagai material yang tidak terikat (*unbound material*) untuk lapis pondasi perkerasan dengan metode pemadatan *modified proctor* (Tabel 9).

Tabel 9. Detail Pengujian Permeabilitas di Laboratorium (Penulis, 2022)

Pengujian Permeabilitas					
Kode Sampel	%FA	%Tanah	Moisture Content	Jenis Pengujian	Jenis Pengujian
PM1	5%	5%	OMC	<i>Modified Proctor</i>	<i>Constant Head</i>
PM2	8%	5%	OMC	<i>Modified Proctor</i>	<i>Constant Head</i>
PM3	11%	5%	OMC	<i>Modified Proctor</i>	<i>Constant Head</i>
PM4	14%	5%	OMC	<i>Modified Proctor</i>	<i>Constant Head</i>
PM5	17%	5%	OMC	<i>Modified Proctor</i>	<i>Constant Head</i>
PM6	20%	5%	OMC	<i>Modified Proctor</i>	<i>Constant Head</i>

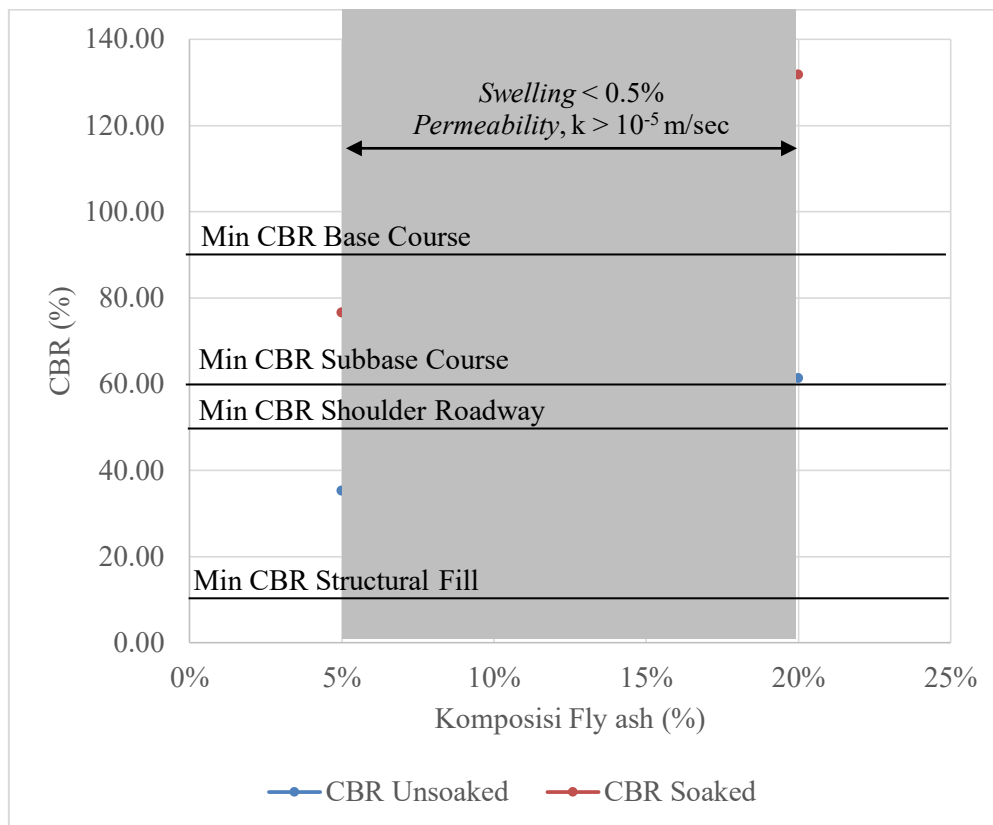
Tabel 10. Hasil Pengujian Permeabilitas *Constant-Head* (Olahan Penulis, 2022)

SAMPLE	A (cm ²)	L (cm)	t (second)	h (cm)	Q (ml)	K (cm/second)	K (m/second)
20% FA	78.46	13.07	973	88.50	1000	0.0019345	0.0000193
17% FA	78.46	13.07	722	88.50	1000	0.0026070	0.0000261
14% FA	78.46	13.07	620	88.50	1000	0.0030359	0.0000304
11% FA	78.46	13.07	483	88.50	1000	0.0038970	0.0000390
8% FA	78.46	13.07	372	88.50	1000	0.0050598	0.0000506
5% FA	78.46	13.07	252	88.50	1000	0.0074692	0.0000747

Berdasarkan pengujian permeabilitas yang dilakukan, penggunaan *fly ash* (5% - 20%) mengalami peningkatan koefisien permeabilitas dari 7.47×10^{-5} m/sec hingga 1.93×10^{-5} m/sec. Tetapi nilai tersebut hanya berkisar $> 10^{-5}$ m/sec (*medium permeability*). Nilai tersebut tidak memenuhi spesifikasi *Transport for NSW (Granular Pavement Base and Subbase Materials)* dimana diperlukan koefisien permeabilitas sebesar lebih kecil 5×10^{-8} m/sec untuk lapis fondasi atas kategori *Traffic A* (kategori lalu lintas lebih besar 1000 kendaraan/hari). Persyaratan tersebut untuk material yang tidak terikat dengan nilai indeks plastisitas maksimum 6%.

Analisis Pengujian

Pada Gambar 8, dihubungkan nilai CBR, permeabilitas dan *swelling* dengan klasifikasi perkerasan jalan yang memenuhi persyaratan. Menurut nilai permeabilitas hanya berkisar $> 10^{-5}$ m/sec (*medium permeability*) dimana tidak dapat digunakan untuk lapis fondasi atas kategori *Traffic A*. Berdasarkan nilai *swelling* menunjukkan masih dalam batas nilai yaitu maksimum 0,5%. Berdasarkan desain untuk perkerasan jalan, nilai CBR yang diambil adalah nilai CBR yang paling terendah. Dalam pengujian yang telah dilakukan, CBR *unsoaked* lebih rendah daripada CBR *soaked*. CBR *unsoaked* hanya berkisar antara 35.21% hingga 61.24% dimana hanya memenuhi nilai CBR untuk lapis fondasi bawah (*subbase course*), bahu jalan, dan timbunan pilihan.



Gambar 8. Grafik Hubungan CBR dan Permeabilitas (Penulis, 2022)

SIMPULAN

Dari hasil penelitian dan pembahasan pengaruh penggunaan *fly ash* sebagai pengganti bahan pengisi (*filler*) dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Pengaruh penambahan *fly ash* pada campuran *slag* nikel dan tanah yang mengandung indeks plastisitas 3.87 akan meningkatkan kepadatan dan daya ikat antar partikel, daya

dukung beban statis lapis fondasi, menurunkan angka pori, mengurangi potensi *swelling* dan menurunkan nilai permeabilitas.

2. Nilai CBR *soaked* menjadi lebih besar dari *unsoaked* karena pengaruh *fly ash* yang bersifat pozzolan. Dimana keberadaan air akan bereaksi membentuk senyawa yang memiliki sifat seperti kalsium silikat dan kalsium aluminat.
3. Nilai CBR desain yang digunakan adalah nilai CBR yang lebih rendah yaitu dalam keadaan tak terendam (*unsoaked*) dimana nilai tersebut hanya dapat memenuhi standar minimum CBR lapis fondasi bawah, bahu jalan, dan timbunan pilihan.
4. Dengan nilai koefisien permeabilitas yang didapatkan, berdasarkan spesifikasi *Transport for NSW* maka material tersebut masih bisa dimanfaatkan untuk lapis fondasi bawah dengan indeks plastisitas maksimum 10 dan tanpa adanya persyaratan permeabilitas untuk semua kategori lalu lintas.

SARAN

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait campuran terhadap beban dinamis (beban berulang seperti beban lalu lintas) yang dinyatakan dalam suatu parameter yaitu modulus resilien (Mr). Pengujian ini dilakukan karena mendekati kondisi lapangan (mekanistik) sedangkan pengujian CBR berdasarkan beban statis (emperikal).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada PT. Antam Tbk UBPN Sultra dan PLTU 3 Lontar yang telah mengizinkan dan memberikan bantuan material untuk menyelesaikan studi penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Universitas Indonesia dan dosen pembimbing karena telah memberikan fasilitas laboratorium serta bimbingan untuk melakukan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Indonesia Ministry of Energy and Mineral Resources, "Peluang Investasi Nikel Indonesia," *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia*. pp. 1–40, 2020.
- [2] D. D. Ardama, "Inovasi dan Efisiensi Limbah Slag Nikel yang Bernilai Tambah," in *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*, 2019, pp. 9–29.
- [3] R. Wenno, S. E. Wallah, and R. Pandaleke, "Kuat Tekan Mortar Dengan Menggunakan," vol. 2, no. 5, pp. 252–259, 2014.
- [4] Bina Marga, "Spesifikasi umum 2010," *Direktorat Jendral Bina Marga*, vol. 2010, no. Revisi 3, pp. 1–6, 2010.

- [5] A. Yamin, *Pemanfaatan dan Kinerja Agregat Substandar sebagai Bahan Konstruksi Jalan*. 2013.
- [6] B. I. Siswosoebrotho, E. Augusta, and W. Pamudji., “the Influence of Fines Content and Plasticity on the Strength and Permeability of Aggregate for Base Course Material,” *Eastren Asia Soc. Transp. Stud.*, vol. 5, pp. 845–856, 2005.
- [7] SNI 03-1744-1989, “Metode Pengujian CBR Laboratorium,” 1989.
- [8] B. M. Das, D. Emeritus, and K. Sobhan, *Principles of Geotechnical Engineering*. 2012.
- [9] Budhisantoso dan Prasetya, “Pengaruh Serat Polyethylene Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton Non Pasir dengan Agregat Krikil Asal Gunung Merapi,” 2004.
- [10] A. Romli, “Pemanfaatan Fly Ash (Abu Terbang) Batubara untuk Pembuatan Semen Portland Pozzolan,” vol. 6, no. 1, pp. 1–6, 2010.
- [11] S. J. Hartono, “Nilai CBR Soaked dan kv Subbase Course pada Batu Kuning (Dolomite Limestone) dengan Rasio Perbandingan Agregat Kasar dan Agregat Halus,” 2012.
- [12] SNI 8379. (2017). Spesifikasi Material Pilihan Menggunakan *Slag* untuk Konstruksi Jalan.
- [13] SNI 2435. (2008). Cara Uji Kelulusan Air Benda Uji Tanah di Laboratorium dengan Tekanan Tetap.
- [14] SNI 2417. (2008). Cara Uji Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles.
- [15] SNI 1743. (2008). Cara Uji Kepadatan Berat untuk Tanah.
- [16] SNI 03-4141. (1996). Metode Pengujian Gumpalan Lempung dan Butir Mudah Pecah.
- [17] SNI 7619. (2012). Metode Uji Penentuan Persentase Butir Pecah pada Agregat Kasar.
- [18] SNI 1966. (2008). Cara Uji Penentuan Batas Plastis dan Indeks Plastisitas Tanah.
- [19] SNI 03-1968. (1990). Metode Pengujian tentang Analisa Saringan Agregat Halus dan Kasar.
- [20] SNI 03-1969. (1990). Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar.
- [21] QA Specification 3051. (2020). Granular Pavement Base and Subbase Materials.
- [22] Kementerian LHK. (2020). Pemanfaatan Limbah Berbahaya dan Beracun.