

TUGAS AKHIR

PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH SLAG NIKEL SEBAGAI AGREGAT KASAR TERHADAP NILAI *CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)* LAPIS PONDASI BAWAH KONSTRUKSI JALAN



Diajukan Kepada Universitas Tadulako untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh
derajat Sarjana Strata Satu Teknik Sipil

Oleh :

MAISARAH AZ ZAHRA
Stb. F 111 21 029

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
PALU, NOVEMBER 2025

TUGAS AKHIR

PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH SLAG NIKEL SEBAGAI AGREGAT KASAR TERHADAP NILAI *CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)* LAPIS PONDASI BAWAH KONSTRUKSI JALAN



Diajukan Kepada Universitas Tadulako untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh derajad Sarjana Strata Satu Teknik Sipil

Oleh :

MAISARAH AZ ZAHRA

Stb. F 111 21 029

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
PALU, NOVEMBER 2025**

FINAL PROJECT

THE EFFECT OF USE OF NICKEL SLAG WASTE AS COARSE AGGREGATE ON THE CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) VALUE OF ROAD CONSTRUCTION FOUNDATION LAYERS



**Submitted as a partial fulfillment of the requirements for Bachelor Degree
at Civil Engineering**

By:

**MAISARAH AZ ZAHRA
F 111 21 029**

**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING TADULAKO UNIVERSITY
PALU, NOVEMBER 2025**



HALAMAN PENGESAHAN

**PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH SLAG NIKEL SEBAGAI
AGREGAT KASAR TERHADAP NILAI CALIFORNIA BEARING
RATIO (CBR) LAPIS PONDASI BAWAH KONSTRUKSI JALAN**

Yang dipersiapkan dan disusun oleh:

MAISARAH AZ ZAHRA

F11121029

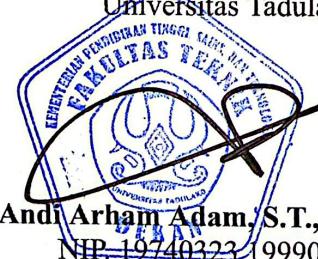
SKRIPSI

Telah dipertahankan didepan Majelis Penguji dan dinyatakan diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Strata Satu (S1) Teknik Sipil

Pada tanggal 19 November 2025

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Tadulako,



Ir. Andi Arham Adam, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 19740322 199903 1 002

Ketua Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Tadulako,

Dr. Sriyati Ramadhani, S.T., M.T.
NIP. 19750925 200501 2 011

HALAMAN PERSETUJUAN

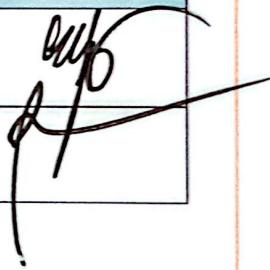
Panitia Ujian Tugas Akhir Program Studi S1 Teknik Sipil Universitas Tadulako yang ditetapkan berdasarkan SK Dekan Fakultas Teknik No. 19733/UN.28.6/DK/2025, Tanggal 15 Oktober 2025 menyatakan menyetujui Tugas Akhir yang telah dipertanggungjawabkan di hadapan Majelis Penguji pada Hari Rabu Tanggal 19 November 2025 oleh:

Nama : Maisarah Az Zahra

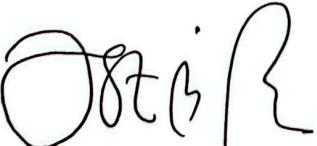
No. Stambuk : F11121029

Judul : PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH SLAG NIKEL SEBAGAI AGREGAT KASAR TERHADAP NILAI CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) LAPIS PONDASI BAWAH KONSTRUKSI JALAN

Dosen Pembimbing:

No.	Nama/ NIP	Jabatan	Tanda Tangan
1.	Dr. Ir. H. Syamsul Arifin, M.Sc NIP. 19641111 199102 1 001	Pembimbing 1	
2.	Dr. Sriyati Ramadhani, S.T., M.T. NIP. 19750925 200501 2 002	Pembimbing 2	

Palu, 19 November 2025
Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Tadulako



Dr. Astri Rahayu, ST., MT
NIP. 19670705 199702 2 001

PERNYATAAN ORISINALITAS LAPORAN TUGAS AKHIR

Penulis yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Maisarah Az Zahra

No. Stb : F11121029

Fakultas/Jurusan : Teknik/Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa laporan Tugas Akhir ini adalah benar merupakan karya penulis sendiri dan bukan duplikasi dari orang lain, dan sepanjang pengetahuan penulis juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka. Apabila pada masa mendatang diketahui bahwa pernyataan ini tidak benar adanya, maka penulis akan menerima sanksi yang diberikan dengan segala konsekuensinya.

Demikian pernyataan ini penulis buat dengan sebenar-benarnya.

Palu, 19 November 2025



Maisarah Az Zahra

Stb. F11121029

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO :

*“Allah tidak akan membebani seseorang melainkan sesuai dengan
kesanggupannya”*

(Q.S. Al-Baqarah : 286)

“Sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan”

(Q.S. Al-Insyirah : 6)

*“Semua jatuh bangunmu hal yang biasa, angan dan pertanyaan waktu yang
menjawabnya, berikan tenggat waktu bersedilah secukupnya, rayakan
perasaanmu sebagai manusia”*

(Baskara Putra – Hindia)

PERSEMBAHAN :

Tugas Akhir ini penulis persembahkan dengan penuh rasa hormat kepada kedua Orang Tua tercinta, Bapak **Muh. Rifai** dan Ibu **Ramlah, S.Pd** serta adik-adik penulis **Dzakki Dzakwan, Aqilla Rihadatul** dan **Yumna Adiibah** yang telah mendoakan, memberikan dukungan, bantuan baik secara moril dan materil, dan pengertian serta kesabaran yang tidak ada habisnya kepada penulis sehingga dapat menjalani dan menyelesaikan segala tugas dan tanggung jawab selama masa perkuliahan ini dengan baik, serta teman-teman **Teknik Sipil 2021** yang ikut membantu dan mendukung dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

KATA PENGANTAR



Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadirat Allāh Subḥānahu wa Ta‘ālā, karena atas berkat dan kuasa-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan tugas akhir ini. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat untuk penyelesaian studi pada Program Studi Strata Satu (S1) Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tadulako. Adapun judul tugas akhir ini adalah :

**“PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH SLAG NIKEL SEBAGAI
AGREGAT KASAR TERHADAP NILAI *CALIFORNIA BEARING RATIO*
(CBR) LAPIS PONDASI BAWAH KONSTRUKSI JALAN”**

Penulis telah berusaha maksimal dalam penulisan Tugas Akhir ini, melewati berbagai kesulitan yang menghambat, namun dapat diatasi dengan baik berkat izin-Nya dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, melalui kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak **Dr. Ir. Syamsul Arifin, M.Sc** dan Ibu **Dr. Sriyati Ramadhani, ST., M.T** selaku pembimbing yang senantiasa meluangkan waktunya untuk memberikan arahan dan bimbingan serta koreksi dan motivasi selama penyusunan Tugas Akhir ini.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Muh. Rifai dan Ibu Ramlah, orang tua tercinta. Terima kasih atas doa, kasih sayang, serta pengorbanan tanpa henti yang menjadi sumber kekuatan penulis. Segala pencapaian ini tidak lepas dari dukungan tulus Mama dan Papa.
2. Bapak Ir. Andi Arham Adam, ST, MSc., Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Tadulako.
3. Ibu Dr. Sriyati Ramadhani, ST., MT selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tadulako.
4. Ibu Dr. Ir. Astri Rahayu, ST., MT. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tadulako.
5. Bapak Ir. Mashuri, ST., MT., selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama masa studi.

6. Tim dosen penguji, Ibu Dr. Sriyati Ramadhani, ST., MT., Ibu Ir. Rahmatang Rahman, ST., MT., Ibu Dr. Ratnasari Ramlan, ST., MT., dan Bapak Ir. Mashuri, ST., MT., yang telah memberikan arahan, dan saran demi perbaikan penyusunan Tugas Akhir ini.
7. Bapak dan Ibu Dosen Fakultas Teknik Universitas Tadulako atas segala ilmu pengetahuan yang telah diberikan.
8. Staf Tata Usaha Fakultas Teknik Universitas Tadulako yang telah membantu pengurusan administrasi selama penulis menempuh Pendidikan di Fakultas Teknik Universitas Tadulako.
9. Untuk adik-adik penulis, Dzakki Dzakwan, Aqilla Rihadatul dan Yumna Adiibah yang telah menjadi penyemangat dan selalu mendukung penulis.
10. Terima kasih kepada sahabat terkasih Sely Silvana Mpueti, yang telah lebih dulu berpulang. Meski raganya telah tiada, tetapi semangat, kenangan, doa serta harapan yang pernah ia tinggalkan tetap hidup dan menjadi penyemangat dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
11. Terima kasih kepada sahabat semasa perkuliahan, Fiya Audrey Andalusia dan Shafitri Rayhana Adam yang selalu memberikan semangat, motivasi dan bersama-sama penulis dari awal hingga penyusunan Tugas Akhir ini.
12. Terimakasih kepada sahabat-sahabat penulis yang berada di grup Jeng-Jeng dan SKM sudah bersama-sama penulis mengerjakan tugas-tugas besar selama masa studi.
13. Terima kasih kepada Tim Semangat Baru yang lebih dikenal dengan 9 Bersaudara sudah berjuang bersama selama penelitian Tugas Akhir di Laboratorium Mekanika Tanah.
14. Terima kasih kepada teman-teman Teknik Sipil 21 lainnya yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu dari awal menemani perkuliahan sampai saat ini.
15. Terima kasih kepada partner saya pemilik stambuk F11121179 yang selalu memberi dukungan, mendoakan serta setia menemani dari masa putih abu-abu.
16. Terakhir, penulis berterima kasih kepada diri sendiri Maisarah Az Zahra karena sudah mau berjuang melalui banyak rintangan dalam menyelesaikan kuliah ini. Terima kasih untuk tidak menyerah dan selalu berusaha meningkatkan kualitas diri.

Sebagai penulis saya menyadari keterbatasan dalam penyusunan Tugas Akhir ini yang tidak lepas dari kekurangan baik materi maupun paduan bahasanya yang masih jauh dari kesempurnaan. Dengan demikian koreksi serta saran yang bersifat membangun sangat dibutuhkan dari semua pihak, agar ke depannya dapat disempurnakan.

Semoga segala bantuan yang telah diberikan kepada saya mendapat balasan yang setimpal dari Allāh Subhānahū wa Ta‘ālā dan semoga kita semua senantiasa diberikan kesehatan dan umur yang panjang.

Palu, November 2025
Penulis

Maisarah Az Zahra
F 111 21 029

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS LAPORAN TUGAS AKHIR	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xv
ABSTRAK	xvi
ABSTRACT	xvi
 BAB I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	I-1
1.2 Rumusan Masalah	I-2
1.3 Tujuan Penelitian.....	I-2
1.4 Manfaat Penelitian.....	I-2
1.5 Batasan Masalah.....	I-2
1.6 Metode Penelitian.....	I-3
1.7 Sistematika Penulisan.....	I-3
 BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Perkerasan Jalan	II-1
2.1.1 Perkerasan Jalan Lentur (<i>Flexible Pavement</i>).....	II-2
2.2 Lapis Pondasi Bawah	II-4
2.2.1 Gradiasi Lapis Pondasi Agregat Kelas B	II-5
2.2.2 Sifat-Sifat Lapis Pondasi Agregat.....	II-6
2.3 Agregat	II-7
2.3.1 Gradiasi Agregat	II-8
2.3.2 Klasifikasi Tekstur dan Ukuran Agregat	II-9
2.4 <i>Slag Nikel</i>	II-10
2.5 Pemadatan Tanah (<i>Modified Proctor</i>).....	II-13
2.6 <i>California Bearing Ratio</i> (CBR)	II-14

BAB III. METODE PENELITIAN

3.1 Bagan Alir Penelitian	III-1
3.2 Studi Literatur	III-2
3.3 Teknik Pengumpulan Data	III-2
3.4 Pengambilan Material	III-2
3.4.1 Lokasi Pengambilan Limbah <i>Slag Nikel</i>	III-2
3.4.2 Metode Pengambilan Limbah <i>Slag Nikel</i>	III-3
3.4.3 Lokasi Pengambilan Agregat	III-4
3.4.4 Metode Pengambilan Agregat	III-4
3.5 Pengujian Laboratorium	III-5
3.5.1 Pengujian Analisa Saringan	III-5
3.5.2 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan	III-6
3.5.3 Uji Keausan Menggunakan Mesin Abrasi	III-7
3.5.4 Pengujian Pemadatan (<i>Modified Proctor</i>)	III-7
3.5.5 Pengujian CBR (<i>California Bearing Ratio</i>)	III-8
3.6 Rancangan Campuran	III-9
3.6.1 Komposisi Campuran	III-10
3.6.2 Menentukan Jumlah Benda Uji	III-11
3.7 Analisis Data	III-11

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemeriksaan Agregat	IV-1
4.1.1 Hasil Pengujian Analisa Saringan	IV-1
4.1.2 Hasil Pengujian Berat Jenis Agregat dan <i>Slag Nikel</i>	IV-3
4.1.3 Hasil Pengujian Abrasi Agregat Alam dan <i>Slag Nikel</i>	IV-4
4.2 Uji Pemadatan (<i>Modified Proctor</i>)	IV-5
4.3 Uji <i>California Bearing Ratio</i> (CBR)	IV-7

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	V-1
5.2 Saran	V-1

DAFTAR PUSTAKA	P-1
-----------------------------	------------

LAMPIRAN	L-1
-----------------------	------------

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Gradasi Lapis Pondasi Agregat	II-6
Tabel 2.2 Sifat-sifat Lapis Pondasi Agregat.....	II-7
Tabel 2.3 Ketentuan Mutu Agregat.....	II-10
Tabel 2.4 Hasil Uji TCLP.....	II-12
Tabel 3.1 Rancangan Campuran Lapis Pondasi Bawah Gradasi Ideal	III-9
Tabel 3.2 Komposisi Rancangan Subtitusi Slag Nikel.....	III-10
Tabel 3.3 Sampel Pemadatan Untuk Mencari Kadar Air Optimum.....	III-11
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Alam.....	IV-3
Tabel 4.2 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan <i>Slag Nikel</i>	IV-4
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Analisa Saringan	IV-2
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Abrasi Agregat Alam dan <i>Slag Nikel</i>	IV-4
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Pemadatan (<i>Modified Proctor</i>)	IV-5
Tabel 4.6 Nilai Rata-rata Uji CBR Tanpa Rendaman	IV-8

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Struktur Lapisan Perkerasan Lentur	II-2
Gambar 2.2 Proses Pengolahan Nikel dan Bahan Limbah Slag Nikel.....	II-11
Gambar 2.3 Penumbuk Standard Proctor (kiri) dan Penumbuk Modified	II-14
Gambar 2.4 Hubungan antara beban dan penetrasi	II-15
Gambar 3.1 Bagan Alir.....	III-1
Gambar 3.2 Lokasi Pengambilan Limbah <i>Slag</i> Nikel	III-3
Gambar 3.3 Pengambilan Limbah <i>Slag</i> Nikel	III-3
Gambar 3.4 Lokasi Pengambilan Agregat.....	III-4
Gambar 3.5 Pengambilan Agregat	III-4
Gambar 4.1 Bentuk Agregat Kasar Konvensional (a) dan Slag Nikel (b).....	IV-1
Gambar 4.2 Grafik Pengujian Analisa Saringan	IV-2
Gambar 4.3 Nilai Kadar Air Optimum dan Kepadatan Kering Maksimum.....	IV-6
Gambar 4.4 Grafik Karakteristik Pemadatan Campuran <i>Slag</i> Nikel.....	IV-7
Gambar 4.5 Grafik Hasil CBR Nilai Tertinggi.....	IV-8

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Hasil Pengujian Analisa Saringan	1
Lampiran 2 Hasil Pengujian Berat Jenis Dan Penyerapan Agregat Kasar.....	2
Lampiran 3 Hasil Pengujian Berat Jenis Dan Penyerapan Agregat Halus.....	3
Lampiran 4 Hasil Pengujian Berat Jenis Dan Penyerapan <i>Slag</i> Nikel.....	4
Lampiran 5 Hasil Pengujian Abrasi Agregat Alam.....	5
Lampiran 6 Hasil Pengujian Abrasi <i>Slag</i> Nikel	6
Lampiran 7 Hasil Uji Pemadatan (<i>Modified Proctor</i>) Sampel 0% <i>Slag</i> Nikel	7
Lampiran 8 Hasil Uji Pemadatan (<i>Modified Proctor</i>) Sampel 15% <i>Slag</i> Nikel...	8
Lampiran 9 Hasil Uji Pemadatan (<i>Modified Proctor</i>) Sampel 30% <i>Slag</i> Nikel ...	9
Lampiran 10 Hasil Uji Pemadatan (<i>Modified Proctor</i>) Sampel 45% <i>Slag</i> Nikel	10
Lampiran 11 Hasil Uji Pemadatan (<i>Modified Proctor</i>) Sampel 60% <i>Slag</i> Nikel	11
Lampiran 12 Hasil Uji Pemadatan (<i>Modified Proctor</i>) Sampel 75% <i>Slag</i> Nikel	12
Lampiran 13 Hasil Uji Pemadatan (<i>Modified Proctor</i>) Sampel 100% <i>Slag</i> Nikel.....	13
Lampiran 14 Hasil Uji CBR 0% <i>Slag</i> Nikel Sampel 1	12
Lampiran 15 Hasil Uji CBR 0% <i>Slag</i> Nikel Sampel 2	13
Lampiran 16 Hasil Uji CBR 15% <i>Slag</i> Nikel Sampel 1	14
Lampiran 17 Hasil Uji CBR 15% <i>Slag</i> Nikel Sampel 2	15
Lampiran 18 Hasil Uji CBR 30% <i>Slag</i> Nikel Sampel 1	16
Lampiran 19 Hasil Uji CBR 30% <i>Slag</i> Nikel Sampel 2	17
Lampiran 20 Hasil Uji CBR 45% <i>Slag</i> Nikel Sampel 1	18
Lampiran 21 Hasil Uji CBR 45% <i>Slag</i> Nikel Sampel 2	19
Lampiran 22 Hasil Uji CBR 60% <i>Slag</i> Nikel Sampel 1	20
Lampiran 23 Hasil Uji CBR 60% <i>Slag</i> Nikel Sampel 2	21
Lampiran 24 Hasil Uji CBR 75% <i>Slag</i> Nikel Sampel 1	22
Lampiran 25 Hasil Uji CBR 75% <i>Slag</i> Nikel Sampel 2	23
Lampiran 26 Hasil Uji CBR 100% <i>Slag</i> Nikel Sampel 1	24
Lampiran 27 Hasil Uji CBR 100% <i>Slag</i> Nikel Sampel 2	25
Lampiran 28 Dokumentasi Pengambilan Material Agregat Alam.....	26
Lampiran 29 Dokumentasi Pengambilan Material <i>Slag</i> Nikel.....	27

Lampiran 30 Dokumentasi Pengujian Material	28
Lampiran 31 Dokumentasi Pengujian Material	29
Lampiran 32 Dokumentasi Pengujian <i>Modified Proctor</i> dan CBR <i>Unsoaked</i> ...	30

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

NOTASI/SINGKATAN	ARTI DAN KETERANGAN
TCLP	<i>Toxicity Characteristic Leaching Procedure</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
MDD	<i>Maximum Dry Density</i> (Kepadatan Kering Maksimum)
OMC	<i>Optimum Moisture Content</i> (Kadar Air Optimum)
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
SNI	Standar Nasional Indonesia
γ	Berat isi atau berat volume
MP	<i>Modified Proctor</i>

**PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH SLAG NIKEL SEBAGAI
AGREGAT KASAR TERHADAP NILAI CALIFORNIA BEARING RATIO
(CBR) LAPIS PONDASI BAWAH KONSTRUKSI JALAN**

Maisarah Az Zahra, Syamsul Arifin, Sriyati Ramadhani

ABSTRAK

Lapis pondasi bawah jalan berperan penting dalam daya dukung dan ketahanan terhadap beban lalu lintas. Keterbatasan agregat alami mendorong pemanfaatan material alternatif seperti *slag* nikel yang memiliki sifat fisik menyerupai batu alam. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan limbah *slag* nikel sebagai agregat kasar terhadap nilai *California Bearing Ratio* (CBR) lapis pondasi bawah konstruksi jalan. Metode yang digunakan adalah uji laboratorium CBR tanpa rendaman dengan pemedatan *Modified Proctor* pada variasi 0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75% dan 100%. Hasil menunjukkan peningkatan kadar *slag* nikel menaikkan *Maximum Dry Density* (MDD) dan menurunkan *Optimum Moisture Content* (OMC) karena partikel padat dan daya serap rendah. Nilai CBR tertinggi diperoleh pada 100% *slag* nikel sebesar 86,11% yang memenuhi syarat lapis pondasi bawah. Dengan demikian, *slag* nikel berpotensi sebagai alternatif agregat kasar sekaligus solusi pengelolaan limbah industri.

Kata Kunci: *Lapis Pondasi Bawah, Slag Nikel, Agregat Kasar, California Bearing Ratio*

**THE EFFECT OF USE NICKEL SLAG WASTE AS COARSE AGGREGATE
ON THE CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) VALUE OF ROAD
CONSTRUCTION FOUNDATION LAYERS**

Maisarah Az Zahra, Syamsul Arifin, Sriyati Ramadhani

ABSTRACT

The subbase layer of a road plays an important role in bearing capacity and resistance to traffic loads. The scarcity of natural aggregates encourages the use of alternative materials such as nickel slag, which possesses physical properties similar to natural stone. This study aims to analyze the effect of using nickel slag waste as coarse aggregate on the California Bearing Ratio (CBR) value of the road subbase layer. The method used is a laboratory CBR test without soaking, with Modified Proctor compaction at variations of 0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75%, and 100%. The results show that increasing the proportion of nickel slag raises the Maximum Dry Density (MDD) and decreases the Optimum Moisture Content (OMC) due to its dense particles and low absorption capacity. The highest CBR value was obtained at 100% nickel slag, reaching 86.11%, which meets the requirements for a subbase layer. Therefore, nickel slag has potential as an alternative coarse aggregate as well as a solution for industrial waste management.

Keywords: *Subbase Layer, Nickel Slag, Coarse Aggregate, California Bearing Ratio*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur jalan merupakan salah satu pilar utama dalam pembangunan ekonomi dan sosial suatu Negara. Kualitas jalan yang baik tidak hanya meningkatkan mobilitas masyarakat, tetapi juga mendukung pertumbuhan industri, perdagangan dan konektivitas antar daerah. Dalam konteks ini, lapis pondasi bawah jalan memiliki peran krusial dalam menentukan daya dukung dan ketahanan struktur jalan terhadap beban lalu lintas yang terus meningkat. Dalam hal ini perlu kualitas material dan komposisi campuran yang tepat sehingga dapat menghasilkan konstruksi jalan yang memiliki kekuatan dan kestabilan yang baik.

Pemilihan agregat yang tepat sangat penting untuk memastikan kekuatan, stabilitas, dan ketahanan lapisan dasar dalam konstruksi jalan. Namun, dengan semakin menipisnya sumber daya agregat alami dan dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh pengambilan agregat tersebut, penggunaan material alternatif yang lebih ramah lingkungan menjadi solusi untuk memenuhi kebutuhan praktik konstruksi yang lebih berkelanjutan. Salah satu alternatif yang menjanjikan adalah *slag nikel* (Wiziarti & Rahayu, 2022). Sesuai pasal 54 PP 101 Tahun 2014, pemanfaatan limbah B3 (*slag nikel, fly ash, steel slag, spent bleaching earth*) dapat berupa substitusi bahan baku, substitusi sumber energi, bahan baku dan lainnya sesuai iptek (Kemenperin, 2020).

Saat ini, jumlah produksi *slag nikel* di Indonesia mencapai 13 juta ton setiap tahun, yang ditumpuk di darat menunggu proses pengolahan (Tanjung dkk, 2022). *Slag nikel* yang memiliki tampilan fisik mirip batu alam, sangat ideal untuk diaplikasikan di berbagai lapisan perkerasan jalan (Syaharuddin dkk., 2021). Di beberapa daerah, *slag nikel* telah dimanfaatkan oleh masyarakat sebagai bahan paving block dan batako. Akan tetapi volume yang dimanfaatkan sangat kecil dibandingkan *slag nikel* yang dihasilkan. Penggunaan *slag nikel* bisa menjadi solusi untuk meningkatkan penyerapan limbah secara signifikan sebagai bahan lapis perkerasan jalan (Irawan, 2021).

Nilai CBR (*California Bearing Ratio*) parameter krusial dalam desain perkerasan jalan yang berpengaruh signifikan terhadap daya dukung dan stabilitas

fondasi. CBR berfungsi sebagai indikator kemampuan tanah dalam menahan beban, di mana nilai yang tinggi menandakan kapasitas dukung yang lebih baik, sehingga berpotensi mengurangi risiko kerusakan pada infrastruktur jalan (Amran & Prasetyo, 2022).

Berdasarkan latar belakang di atas, maka perlu dilakukan penelitian terkait pengaruh penggunaan limbah *slag* nikel sebagai agregat kasar terhadap nilai *California Bearing Ratio* (CBR) lapis pondasi bawah konstruksi jalan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, dapat dirumuskan suatu permasalahan masalah dalam rencana penelitian yaitu bagaimana pengaruh penggunaan limbah *slag* nikel sebagai agregat kasar terhadap nilai CBR lapis pondasi bawah konstruksi jalan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan limbah *slag* nikel sebagai agregat kasar terhadap nilai CBR lapis pondasi bawah konstruksi jalan.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Bagi Universitas

Penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai bahan ajar dalam mata kuliah material perkerasan jalan.

2. Bagi Peneliti

Untuk dapat dijadikan salah satu referensi tentang penggunaan limbah *Slag* nikel terhadap konstruksi jalan.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian yang dilakukan dalam tugas akhir ini antara lain:

1. Penelitian ini dikhurasukan pada lapis pondasi bawah konstruksi jalan tanpa meneliti bagian dari lapis perkerasan lainnya.
2. Agregat alam yang digunakan diperoleh dari PT. Hasal Logam Utama, Kota Palu.

3. Limbah *slag* nikel yang digunakan diperoleh dari PT. Indonesia Huabao Industrial Park, Desa Topogaro, Kabupaten Morowali.
4. Variasi persentase limbah *slag* nikel yang digunakan adalah 0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75% dan 100% terhadap berat campuran agregat kasar.
5. Pengujian pemasukan dilakukan pada setiap persentase *slag* nikel
6. Pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) dilakukan pada sampel dengan kondisi tanpa rendaman.

1.6 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen yang bertujuan untuk mengatur dan mengendalikan variabel secara langsung, agar dapat melihat sejauh mana pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat. Dalam hal ini, variabel bebasnya adalah persentase campuran antara agregat kasar dengan limbah *slag* nikel. Sementara itu, variabel terikatnya adalah daya dukung lapisan pondasi bawah pada konstruksi jalan, yang diuji menggunakan metode *California Bearing Ratio* (CBR) dalam kondisi tanpa rendaman.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan ini berdasarkan urutan penulisan yang dibagi menjadi beberapa bab dan beberapa bab terdapat sub-bab yang menjadi rincian pembahasan.

BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan tentang latar belakang masalah dalam penulisan tugas akhir, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah dan sistematika penulisan tugas akhir.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori-teori pendukung yang digunakan sebagai landasan dalam pembahasan dan proses analisis masalah serta beberapa definisi dari studi pustaka yang berhubungan dengan penelitian.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini akan menampilkan rincian rencana kegiatan penelitian, lokasi pengambilan sampel, tata cara pengambilan data, dan teknik analisis data.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan semua hasil dan pembahasan yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menyajikan tentang kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian dan saran dibuat sesuai dengan pengalaman dan pertimbangan penulis yang telah melakukan penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perkerasan Jalan

Pembangunan jalan telah dilakukan sejak lama, karena transportasi merupakan aktivitas fundamental bagi manusia. Pada awalnya, jalan tanah yang diperkeras dianggap cukup memadai, mengingat beban kendaraan dan volume lalu lintas masih rendah. Namun seiring berjalannya waktu, jalan tanah dianggap tidak lagi memadai karena sering mengalami kerusakan. Oleh karena itu, dicari teknik untuk menambahkan lapisan di atas permukaan jalan guna meningkatkan daya dukungnya terhadap beban. Lapisan tambahan ini perlu diperkeras untuk memperkuat kemampuan jalan dalam menahan beban lalu lintas, sehingga disebut sebagai perkerasan. Lapisan yang dibangun untuk konstruksi jalan dikenal sebagai perkerasan jalan. Pembedaan ini bertujuan membedakan perkerasan yang direncanakan untuk keperluan lain, seperti bandar udara, area parkir dan terminal (Masriadi, 2016).

Kelancaran lalu lintas sangat dipengaruhi oleh kondisi jalan yang ada. Semakin baik kondisi jalan, semakin lancar pula arus lalu lintas. Oleh karena itu, dalam perencanaan jalan penting untuk mempertimbangkan berbagai faktor yang dapat memengaruhi kinerja pelayanan jalan, seperti fungsi jalan, kinerja perkerasan, umur rencana, volume lalu lintas yang menjadi beban perkerasan, karakteristik tanah dasar, kondisi lingkungan, jenis dan jumlah material yang tersedia di lokasi untuk lapisan perkerasan, serta bentuk geometris lapisan perkerasan (Arzaq, 2019).

Berdasarkan jenis bahan pengikatnya, perkerasan jalan dapat dibedakan menjadi tiga kategori (Sukirman, 1999) :

1. Perkerasan Lentur (*Flexible Pavement*)

Jenis perkerasan ini menggunakan aspal sebagai bahan pengikat. Lapisan perkerasan berfungsi untuk menampung beban lalu lintas dan mendistribusikannya ke lapisan di bawahnya hingga ke tanah dasar.

2. Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)

Jenis perkerasan ini terdiri dari pelat beton semen yang terhubung (tidak terus menerus) baik tanpa tulangan maupun dengan tulangan, yang diletakkan di atas

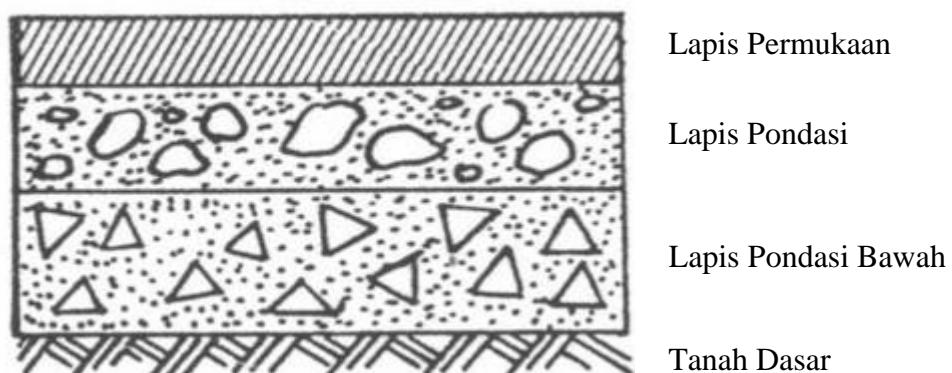
lapisan pondasi bawah atau tanah dasar, dengan atau tanpa lapisan permukaan beraspal.

3. Perkerasan Komposit (*Composite Pavement*)

Jenis perkerasan ini adalah kombinasi antara konstruksi perkerasan kaku dan lapisan perkerasan lentur di atasnya, di mana kedua jenis perkerasan ini bekerja sama untuk menanggung beban lalu lintas.

2.1.1 Perkerasan Jalan Lentur (*Flexible Pavement*)

Perkerasan lentur adalah jenis perkerasan jalan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat dan terdiri dari beberapa lapisan yang diletakkan di atas tanah dasar yang telah dipadatkan. Lapisan perkerasan ini berfungsi untuk menampung dan mendistribusikan beban lalu lintas dari lapisan permukaan hingga ke tanah dasar (Sukirman, 1999). Adapun struktur lapisan perkerasan lentur dapat dilihat pada gambar 2.1 di bawah ini.



Gambar 2. 1 Struktur Lapisan Perkerasan Lentur

(Sumber: Darlan, 2014)

Lapisan perkerasan lentur terdiri atas (Arzaq, 2019) :

1. Lapis Permukaan (*Surface Course*)

Lapisan permukaan struktur perkerasan lentur terdiri dari campuran mineral agregat dan bahan pengikat yang diletakkan sebagai lapisan teratas, biasanya di atas lapis pondasi. Fungsi dari lapisan permukaan meliputi:

- a. Menjadi bagian dari perkerasan yang menahan beban roda.
- b. Berfungsi sebagai lapisan yang tidak tembus air untuk melindungi badan jalan dari kerusakan akibat cuaca.
- c. Berfungsi sebagai lapisan aus (*wearing course*).

Bahan yang digunakan untuk lapis permukaan umumnya sama dengan bahan untuk lapis pondasi, namun dengan persyaratan yang lebih tinggi. Penggunaan bahan aspal sangat penting agar lapisan dapat bersifat kedap air, di samping itu, bahan aspal juga memberikan dukungan terhadap tegangan tarik, yang berarti meningkatkan daya dukung lapisan terhadap beban roda. Pemilihan bahan untuk lapis permukaan harus mempertimbangkan kegunaan, umur rencana, serta tahapan konstruksi agar manfaat yang diperoleh dapat maksimal dibandingkan dengan biaya yang dikeluarkan.

2. Lapis Pondasi Atas (*Base Course*)

Lapis pondasi merupakan bagian dari struktur perkerasan lentur yang terletak langsung di bawah lapis permukaan. Lapis pondasi dibangun di atas lapis pondasi bawah atau, jika tidak ada lapis pondasi bawah, langsung di atas tanah dasar. Fungsi dari lapis pondasi meliputi:

- a. Menjadi bagian dari konstruksi perkerasan yang menahan beban roda.
- b. Berfungsi sebagai penopang untuk lapis permukaan.

Bahan-bahan yang digunakan untuk lapis pondasi harus cukup kuat dan tahan lama agar dapat menahan beban roda. Sebelum menentukan bahan yang akan digunakan sebagai bahan pondasi, perlu dilakukan penyelidikan dan pertimbangan yang matang terkait dengan persyaratan teknik. Berbagai bahan alam atau setempat dapat digunakan sebagai bahan lapis pondasi, antara lain: batu pecah, kerikil pecah yang distabilisasi dengan semen, dan kapur.

3. Lapis Pondasi Bawah (*Subbase Course*)

Lapis pondasi bawah adalah bagian dari struktur perkerasan lentur yang terletak antara tanah dasar dan lapis pondasi. Biasanya, lapis ini terdiri dari material berbutir (granular material) yang dipadatkan, baik yang distabilisasi maupun tidak, atau lapisan tanah yang distabilisasi. Fungsi dari lapis pondasi bawah meliputi:

- a. Menjadi bagian dari konstruksi perkerasan yang mendukung dan menyebarkan beban roda.
- b. Efisiensi penggunaan material yang relatif murah, sehingga ketebalan lapisan di atasnya dapat dikurangi (penghematan biaya konstruksi).
- c. Mencegah tanah dasar masuk ke dalam lapis pondasi.
- d. Berfungsi sebagai lapis pertama agar pelaksanaan konstruksi berjalan lancar.

Lapis pondasi bawah diperlukan karena daya dukung tanah dasar yang terlalu lemah terhadap roda-roda alat berat, terutama saat pelaksanaan konstruksi, atau karena kondisi lapangan yang memaksa untuk segera menutup tanah dasar dari pengaruh cuaca.

Berbagai jenis tanah setempat yang relatif lebih baik dari tanah dasar dapat digunakan sebagai bahan pondasi bawah. Campuran tanah setempat dengan kapur atau semen portland sangat dianjurkan dalam beberapa kasus untuk meningkatkan kestabilan konstruksi perkerasan.

4. Tanah Dasar (*Subgrade*)

Tanah dasar adalah permukaan tanah semula, permukaan galian, atau permukaan tanah timbunan yang telah dipadatkan dan berfungsi sebagai dasar untuk perletakan bagian-bagian perkerasan lainnya. Kekuatan dan keawetan konstruksi perkerasan jalan sangat bergantung pada sifat-sifat dan daya dukung tanah dasar. Umumnya, persoalan yang menyangkut tanah dasar meliputi:

- a. Perubahan bentuk tetap (deformasi permanen) dari jenis tanah tertentu akibat beban lalu lintas.
- b. Sifat mengembang dan menyusut dari tanah tertentu akibat perubahan kadar air.
- c. Daya dukung tanah yang tidak merata dan sulit ditentukan secara pasti pada daerah dengan berbagai jenis tanah yang memiliki sifat dan kedudukan yang sangat berbeda, atau akibat pelaksanaan konstruksi.

2.2 Lapis Pondasi Bawah

Lapis pondasi bawah merupakan salah satu faktor yang sangat berperan dalam menentukan kekuatan dan kestabilan dari suatu konstruksi jalan. Lapisan ini terletak antara lapis pondasi atas (*base course*) dan lapis tanah dasar (*subgrade course*), biasanya mempunyai ketebalan 20-30 cm yang terdiri dari material berbutir kasar (granular material) yang merupakan campuran pasir dan batu. Bahan-bahan yang digunakan untuk lapis pondasi bawah harus bebas dari debu, zat organik, serta bahan-bahan lain yang harus dibuang dan harus memiliki kualitas (Pareda, 2016).

Di Indonesia terdapat dua jenis lapisan pondasi bawah yang umum digunakan antara lain (Sukirman, 1999):

1. Agregat bergradasi baik
2. Stabilisasi, terbagi menjadi empat yaitu:
 - a. Stabilisasi agregat dengan semen (*cement treated subbase*)
 - b. Stabilisasi agregat dengan kapur (*Lime treated subbase*)
 - c. Stabilisasi tanah dengan semen (*Soil cement stabilization*)
 - d. Stabilisasi tanah dengan kapur (*Soil lime stabilization*)

Adapun fungsi lapis pondasi bawah diantaranya:

1. Merupakan bagian dari konstruksi perkerasan jalan yang mendukung dan menyalurkan beban roda kendaraan ke tanah dasar.
2. Sebagai lapis pertama karena kondisi lapangan yang masih lembek atau tanah dasar yang tidak mendukung terhadap roda-roda alat-alat berat.
3. Lapisan yang mencegah partikel-partikel halus dari tanah dasar naik ke lapis pondasi atas.
4. Sebagai efisiensi material, karena lebih ekonomis dibandingkan dengan lapisan di atasnya.

2.2.1 Gradasi Lapis Pondasi Agregat Kelas B

Persyaratan gradasi pada lapis pondasi agregat dibedakan menjadi tiga kategori, yaitu Kelas A, Kelas B, dan Kelas S. Setiap kelas memiliki rentang ukuran butiran yang telah ditentukan dalam spesifikasi teknis, mengacu pada ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga. Penentuan rentang ukuran butiran ini dilakukan melalui analisis saringan, sehingga material yang digunakan memiliki distribusi partikel yang tepat untuk mencapai kepadatan maksimum serta stabilitas struktural yang optimal.

Gradasi yang sesuai akan mengurangi rongga antarbutir, meningkatkan keterikatan antarpartikel, dan memperbaiki kemampuan lapisan dalam menahan beban lalu lintas. Selain itu, kesesuaian gradasi turut mempengaruhi kinerja drainase pada lapis pondasi, sehingga mampu mencegah penurunan daya dukung akibat penumpukan air. Dengan penerapan gradasi yang tepat, lapis pondasi dapat mendistribusikan beban secara merata ke lapisan di bawahnya sekaligus

memperpanjang umur layanan perkerasan jalan. Rincian persyaratan gradasi untuk setiap kelas dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Gradasi Lapis Pondasi Agregat

Ukuran Saringan		% Berat Yang Lolos Lapis Pondasi Agregat		
ASTM	(mm)	Kelas A	Kelas B	Kelas S
1 ½ ”	37,5	100	100	100
1”	25,0	79 - 85	75 - 95	77 - 89
3/8”	9,50	44 - 58	40 - 75	41 - 66
No.4	4,75	29 - 44	30 - 60	26 - 54
No.10	2,0	17 - 30	20 - 45	15 - 42
No.40	0,425	7 - 17	15 - 30	7 - 26
No.200	0,075	0 - 5	5 - 15	4 - 16

(Sumber: Spesifikasi umum, 2025)

2.2.2 Sifat-Sifat Lapis Pondasi Agregat

Mengacu pada Spesifikasi Umum 2025, sifat-sifat lapis pondasi agregat ditentukan melalui sejumlah parameter yang merujuk pada Standar Nasional Indonesia (SNI). Parameter ini meliputi ketahanan aus, persentase butiran pecah, batas cair, indeks plastisitas, kandungan gumpalan lempung, nilai CBR rendaman, serta gradasi butiran. Seluruh kriteria tersebut dirancang untuk memastikan lapis pondasi bawah memiliki kekuatan, stabilitas, dan ketahanan yang optimal terhadap beban lalu lintas maupun pengaruh lingkungan. Persyaratan rinci untuk masing-masing kelas lapis pondasi agregat disajikan pada Tabel 2.2.

Setiap parameter tersebut memiliki peran saling mendukung. Nilai abrasi rendah menunjukkan agregat tahan terhadap keausan sehingga umur rencana perkerasan dapat lebih panjang. Proporsi butiran pecah yang tinggi memberikan gesekan internal yang baik, meningkatkan stabilitas mekanis. Batas cair dan indeks plastisitas yang rendah meminimalkan risiko perubahan volume saat kadar air berubah, sehingga lapisan tetap stabil. Pembatasan fraksi halus plastis mencegah terjadinya kelemahan struktural akibat partikel lempung. Kandungan gumpalan lempung yang rendah menghindari terbentuknya titik lemah pada struktur, sementara nilai CBR tinggi menjadi indikasi daya dukung lapisan yang memadai. Selain itu, pengaturan perbandingan No.200 terhadap No.40 membantu menjaga kemampuan drainase lapisan dan mencegah segregasi butiran.

Tabel 2.2 Sifat-sifat Lapis Pondasi Agregat

Sifat-sifat	Lapis Fondasi Agregat		
	Kelas A	Kelas B	Kelas S
Abrasi dari Agregat Kasar (SNI 2417:2008)	100 putaran 500 putaran	0 - 8% 0 - 40%	0 - 8% 0 - 40%
Butiran pecah, tertahan ayakan No.4 (SNI 7619:2012)		95/90 ¹⁾	55/50 ²⁾ 55/50 ²⁾
Batas Cair (SNI 1967:2008)		Maks.25	Maks.35
Indeks Plastisitas (SNI 1966:2008)		Maks.6	4 - 10 4 - 15
Hasil kali Indek Plastisitas dengan % Lolos Ayakan No.200		maks.25	- -
Gumpalan Lempung dan Butiran-butiran Mudah Pecah (SNI 4141:2015)		0 - 5%	0 - 5% 0 - 5%
CBR Rendaman (SNI 1744:2012)		min.90 %	min.60 %
Perbandingan Persen Lolos Ayakan No.200 dan No.40		maks.2/3	maks.2/3 -

(Sumber: Spesifikasi umum, 2025)

Catatan :

- 1) 95/90 menunjukkan bahwa 95% agregat mempunyai muka bidang pecah satu atau lebih dan 90% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah dua atau lebih.
- 2) 55/50 menunjukkan bahwa 55% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah satu atau lebih dan 50% agregat kasar mempunyai bidang pecah satu atau lebih.

2.3 Agregat

Agregat adalah sekumpulan batu-batu pecah, kerikil, pasir atau mineral lainnya baik berupa hasil alam maupun hasil buatan. Perkerasan jalan mempunyai daya dukung yang sebagian besar ditentukan oleh karakteristik agregat yang digunakan. Agregat merupakan komponen utama dari struktur perkerasan jalan, yaitu 90-95% agregat berdasarkan presentase berat, atau 75-85% agregat berdasarkan presentase volume (Sukirman, 2016). Dengan demikian daya dukung, keawetan, dan mutu perkerasan jalan ditentukan juga dari sifat dan hasil campuran agregat dengan material lain. Berdasarkan ukuran butirannya, agregat dapat dibedakan atas agregat kasar, agregat halus, dan abu batu/bahan pengisi (*filler*).

2.3.1 Gradasi Agregat

Gradasi merupakan sebaran ukuran butiran agregat yang dapat diketahui melalui uji saringan. Gradasi ini berperan penting dalam memengaruhi beberapa sifat campuran, seperti stabilitas, kekuatan, daya kedap air, dan berat volume. Stabilitas dan kekuatan suatu campuran sangat dipengaruhi oleh pola gradasinya, karena kontak langsung antar butiran, gaya gesekan, serta saling menguncinya partikel agregat memberikan kontribusi terhadap kekokohan struktur, khususnya pada lapisan permukaan maupun lapisan dasar.

Gradasi agregat juga mempengaruhi tingkat kedap air (impermeabilitas), semakin seragam ukuran butirannya, maka campuran akan menjadi lebih padat dan memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap masuknya cairan. Berat volume pun ikut terpengaruh oleh gradasi agregat, karena distribusi butiran yang seragam menghasilkan susunan yang lebih rapat dan mengurangi jumlah rongga udara di dalam campuran padat (Masriadi, 2016).

Gradasi agregat dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama:

1. Gradasi Seragam

Karakteristik gradasi seragam ditandai dengan ukuran partikel yang cenderung seragam atau kandungan agregat halus yang sangat sedikit. Kondisi ini menyebabkan rongga antar butiran tidak terisi dengan baik, sehingga struktur perkerasan menjadi kurang padat. Akibatnya, perkerasan dengan jenis gradasi ini biasanya memiliki tingkat permeabilitas yang tinggi, namun kurang stabil dan memiliki kepadatan yang rendah.

2. Gradasi Rapat

Gradasi rapat ditandai dengan proporsi agregat kasar dan halus yang seimbang, sehingga sering disebut sebagai gradasi ideal. Jenis gradasi ini menghasilkan perkerasan yang memiliki stabilitas tinggi karena struktur partikel yang saling mengunci dengan baik. Namun, karena sifatnya yang sangat padat, perkerasan dengan gradasi rapat cenderung memiliki permeabilitas yang rendah dan kemampuan drainase yang kurang baik.

3. Gradasi Senjang

Gradasi senjang merupakan tipe gradasi yang tidak sepenuhnya termasuk dalam kategori terbuka maupun rapat. Umumnya, gradasi ini ditandai oleh

tidak adanya atau minimnya fraksi ukuran tertentu dalam campuran. Kualitas perkerasan yang menggunakan gradasi senjang biasanya berada di antara dua jenis gradasi lainnya, tergantung pada komposisi dan fungsi yang diinginkan.

2.3.2 Klasifikasi Tekstur dan Ukuran Agregat

Berdasarkan ukurannya, agregat dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

- 1) Agregat Kasar: Agregat dengan ukuran butiran lebih besar dari 4,75 mm (menurut ASTM) atau lebih besar dari 2 mm (menurut AASHTO).
- 2) Agregat Halus: Agregat dengan ukuran butiran lebih kecil dari 4,75 mm (menurut ASTM) atau antara 2 mm hingga 0,075 mm (menurut AASHTO).
- 3) Bahan pengisi atau *filler*: Agregat halus yang ukurannya sangat kecil, umumnya mampu lolos saringan #200 (0,075 mm). (Akbar dkk, 2021)

Batu pecah, kerikil hasil pemecahan, dan pasir merupakan material utama yang umum digunakan pada lapisan perkerasan jalan maupun elemen pendukung strukturnya. Kualitas agregat yang digunakan harus memenuhi persyaratan teknis tertentu agar kekuatan, ketahanan, dan kinerja konstruksi dapat terjamin. Standar tersebut mencakup berbagai aspek sifat fisik dan mekanis agregat, seperti ketahanan terhadap aus, kestabilan bentuk saat terpapar larutan, kadar gumpalan lempung, kandungan partikel halus, bahan ringan, hingga kotoran organik.

Tabel 2.3 berisi ketentuan batas nilai dan standar mutu agregat yang harus dipenuhi sebelum digunakan pada pekerjaan konstruksi jalan. Sebagai contoh, rendahnya nilai keausan menandakan bahwa agregat memiliki ketahanan yang baik terhadap gesekan dan tekanan akibat beban lalu lintas. Selain itu, kadar gumpalan lempung dan partikel halus dibatasi agar tidak mengganggu keterikatan antarbutir agregat. Kandungan bahan ringan maupun kotoran organik juga harus dijaga serendah mungkin karena berpotensi menurunkan kekuatan serta daya tahan perkerasan. Dengan memenuhi seluruh persyaratan, agregat dapat berfungsi secara optimal baik pada lapis pondasi maupun lapisan perkerasan di atasnya.

Adapun ketentuan mutu agregat berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 seperti pada Tabel 2.3 berikut ini.

Tabel 2.3 Ketentuan Mutu Agregat

Sifat-sifat	Metode Pengujian	Batas Maksimum Yang Diizinkan	
		Halus	Kasar
Keausan agregat dengan mesin Los Angeles	100 Putaran 500 Putaran	SNI 2417:2008	6% 30%
Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan natrium sulfat atau magnesium sulfat	Natrium Magnesium	SNI 3407:2008	10% 15% 18%
Gumpalan lempung dan partikel yang mudah pecah		SNI 03-4141-1996	3% 0,5%
Bahan yang lolos saringan No.200		SNI ASTM C117:2021	5% untuk kondisi umum, 3% untuk kondisi permukaan terabrasi ⁽¹⁾
Bahan Ringan (<i>Lightweight Material</i>)		SNI ASTM C123:2012	0,5% 2,0%
Batu Bara dan Lignit (<i>Coal and Lignite</i>):			
Struktur beton terekspos		SNI ASTM C123:2012	0,5% 1,0%
Struktur beton lainnya			-
Kotoran Organik		SNI 2816:2014	Pelat Organik No.3 ⁽²⁾

(Sumber: Spesifikasi Umum, 2025)

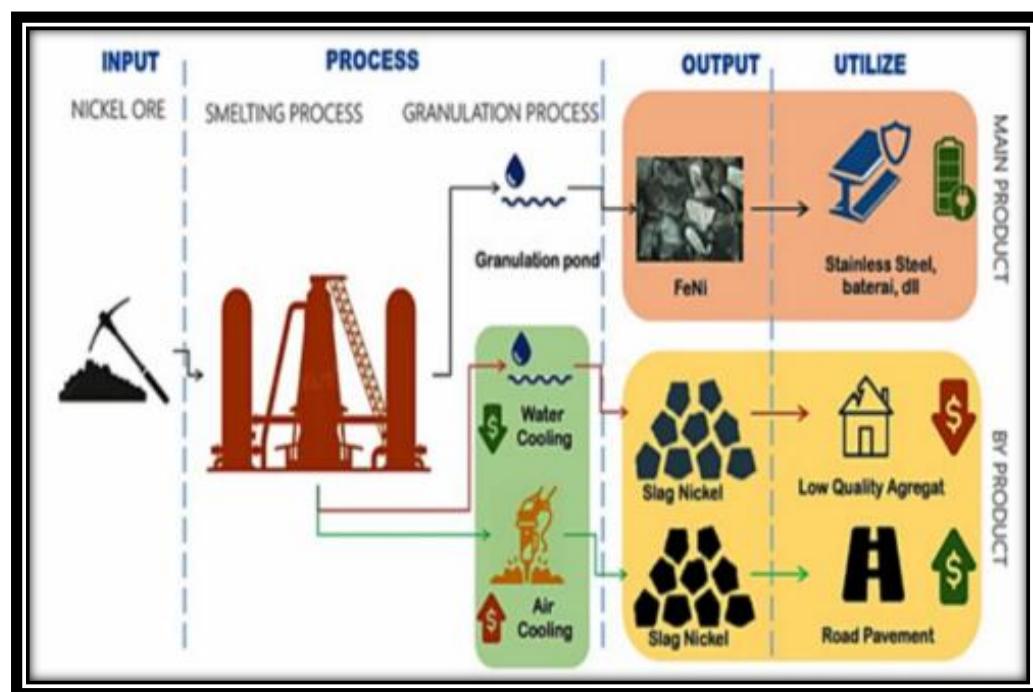
2.4 Slag Nikel

Slag nikel merupakan salah satu limbah padat yang berasal dari kategori mineral non logam hasil penambangan dan proses pengolahan bijih nikel. Terdapat sekitar 70% komposisi kimia pada *slag* nikel terdiri dari Silika 41,47%, Ferri Oksida 30,44% dan Aluminia 2,58%. Proses utama terbentuknya *slag* nikel diperoleh melalui peleburan bijih nikel adalah *Slag* cair yang memiliki temperature berkisar $\pm 1550^{\circ}\text{C}$ dikeluarkan langsung melalui *slag runner* menuju kolam granulasi (*slag granulation pond*) kemudian *slag* cair yang mengalir akan mengalami pendinginan (Bethary and Intari, 2022).

Adapun proses pendinginan pada pengolahan *slag* terdiri dari 2 metode yaitu :

1. Pendinginan dengan dibantu semprotan air bertekanan tinggi secara mendadak untuk memecah ukuran *slag* sehingga terbentuk butiran-butiran.
2. Pendinginan langsung dengan udara, dimana ukuran butir agregat limbah *slag* nikel bisa diatur dengan alat *stone crusher*.

Karakteristik fisik *slag* nikel menunjukkan potensi yang baik untuk digunakan sebagai material konstruksi, terutama sebagai agregat kasar dalam lapis pondasi jalan. Beberapa penelitian menyatakan bahwa *slag* nikel memiliki nilai berat jenis dan kekerasan yang tinggi, serta ketahanan terhadap keausan yang baik. Ini membuatnya memenuhi syarat sebagai pengganti agregat alam yang saat ini terus mengalami eksplorasi berlebihan (Prakoso & Fauzi, 2021).



Gambar 2.2 Proses Pengolahan Nikel dan Bahan Limbah *Slag* Nikel

(Sumber: Susanto & Hamdani, 2021)

Sebagai bahan sisa atau bekas, agregat yang dipergunakan untuk bahan lapis perkerasan dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Tjokrodimulyo, 1996):

1. Kelas I, yaitu bahan berpotensi tinggi dengan karakteristik bahan alamiah seperti terak baja dan terak nikel.
2. Kelas II, yaitu bahan dengan kualitas tidak termasuk dalam kategori I. Diperlukan proses lebih lanjut bila akan dipergunakan seperti terak tembaga dan bahan sisa bahan tambang.

3. Kelas III, yaitu bahan yang hanya dipergunakan pada kondisi tertentu tidak masuk dalam kategori I dan II seperti pecahan beton dan pecahan keramik.
4. Kelas IV, yaitu agregat yang tidak dapat dipergunakan sebagai bahan lapis perkerasan jalan.

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, setiap limbah wajib melalui serangkaian prosedur ketat sebelum dapat dimanfaatkan. Salah satu persyaratan utamanya adalah harus lolos uji karakteristik di laboratorium yang terakreditasi untuk memastikan bahwa limbah tidak lagi memiliki sifat berbahaya, seperti mudah meledak, mudah terbakar, maupun beracun. Tabel 2.4 menyajikan pengujian TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*) terhadap limbah *slag* nikel. Dengan demikian, penggunaan *slag* nikel dalam jumlah besar tidak akan menimbulkan dampak yang merugikan bagi lingkungan.

Tabel 2.4 Uji TCLP

No	Parameter	Satuan	Hasil	Batas Ketentuan
1	Arsenik	Mg/l	< 0.002	3
2	Barium	Mg/l	< 0.03	210
3	Boron	Mg/l	0.001	150
4	Kadmium	Mg/l	0.05	1
5	Klorida	Mg/l	5.38	75.000
6	Kromium Heksavalen	Mg/l	< 0.01	1
7	Tembaga	Mg/l	0.02	60
8	Sianida	Mg/l	0.01	21
9	Timbal	Mg/l	0.04	3
10	Merkuri	Mg/l	< 0.002	0.3
11	Molibdenum	Mg/l	< 0.06	21
12	Nikel	Mg/l	0.01	21
13	Nitrat	Mg/l	0.32	15.000
14	Nitrit	Mg/l	< 0.19	900
15	Selenium	Mg/l	0.004	40
16	Perak (Silver)	Mg/l	< 0.006	40
17	Seng (Zinc)	Mg/l	0.18	300
18	Antimon	Mg/l	0.004	6

(Sumber : Arifin dkk, 2025)

2.5 Pemadatan Tanah (*Modified Proctor*)

Pemadatan tanah merupakan salah satu tahap krusial dalam pekerjaan konstruksi jalan. Tujuan utamanya adalah meningkatkan kepadatan dan kekuatan tanah agar mampu menahan beban lalu lintas serta meminimalkan risiko penurunan (*settlement*) di masa yang akan datang. Hardiyatmo (2014) menjelaskan bahwa pemadatan adalah proses mekanis untuk mengurangi volume pori-pori tanah dengan memberikan energi pada setiap satuan volumenya, sehingga tercapai kepadatan kering maksimum pada kadar air tertentu.

Metode uji pemadatan *Modified Proctor* awalnya dikembangkan oleh Ralph R. Proctor pada tahun 1933, kemudian disempurnakan oleh Corps of Engineers pada tahun 1945 dengan memberikan energi pemadatan yang lebih tinggi. Perbedaan utama antara *Standard Proctor* dan *Modified Proctor* terletak pada besarnya energi yang digunakan. Pada *Modified Proctor*, palu yang digunakan memiliki bobot lebih berat dan tinggi jatuh yang lebih besar, sehingga mampu menghasilkan kepadatan kering yang lebih tinggi (Das, 2016).

Pengujian pemadatan *Modified Proctor* mengacu pada SNI 1743:2022. Menurut penelitian Suryolelono dan Wardani (2018), metode *Modified Proctor* sering digunakan untuk mensimulasikan kondisi lapangan yang membutuhkan daya dukung tinggi, seperti pada lapis pondasi bawah atau timbunan di atas tanah lunak. Saat kadar air melebihi batas optimum, karakteristik tanah sangat dipengaruhi oleh tingkat keberhasilan proses pemadatan (Mujahidin dan Setiawan, 2024).

Energi pemadatan yang diberikan sangat bergantung pada jumlah tumbukan lapisan, jumlah lapisan, berat penumbuk, tinggi jatuh penumbuk dan volume cetakan. Semakin tinggi usaha yang diberikan maka berat volume kering yang dicapai akan semakin tinggi pula (Nurmaidah & Suranto, 2022). Setiap proses pemadatan akan menghasilkan nilai kadar air dan tingkat kepadatan tertentu, yang dinyatakan melalui angka pori. Nilai-nilai tersebut kemudian dapat digunakan untuk menyusun grafik yang menggambarkan hubungan antara angka pori dan kadar air. Pemahaman yang baik mengenai hubungan antara kadar air dan tingkat pemadatan sangat penting untuk mencapai kepadatan tanah yang optimal, terutama dalam berbagai pekerjaan geoteknik. (Akbar dkk, 2021).



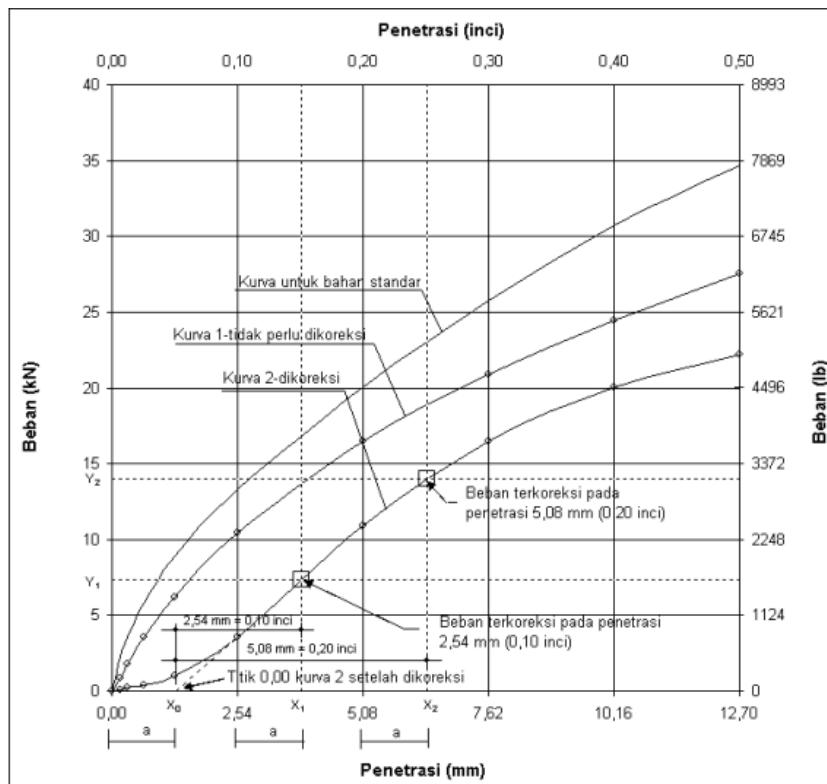
Gambar 2.3 Penumbuk *Standard Proctor* (kiri) dan Penumbuk *Modified Proctor* (kanan)
(Sumber: Das, 1995)

2.6 *California Bearing Ratio (CBR)*

California Bearing Ratio (CBR) merupakan salah satu parameter utama yang digunakan untuk menilai kemampuan daya dukung tanah atau material perkerasan terhadap beban lalu lintas. Metode pengujian ini pertama kali dikembangkan oleh *California Division of Highways* sebagai acuan untuk mengevaluasi kualitas lapisan tanah dasar (*subgrade*) maupun lapisan pondasi dalam konstruksi jalan. Nilai CBR diperoleh dari perbandingan antara tekanan yang dibutuhkan untuk menembus contoh material uji dengan tekanan yang diperlukan untuk menembus material standar berupa batu pecah, pada kedalaman dan kecepatan penetrasi yang sama. Semakin tinggi nilai CBR, maka semakin besar daya dukung material tersebut terhadap beban.

Berdasarkan SNI 1744:2012, pengujian CBR dapat dilakukan dalam kondisi laboratorium, baik dengan rendaman maupun tanpa rendaman, menyesuaikan dengan kondisi lingkungan tempat material akan digunakan. Nilai CBR menunjukkan perbandingan antara tekanan penetrasi pada spesimen uji dengan tekanan standar yang diperoleh dari tanah bergradasi baik. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar kekuatan tanah dasar yang telah dipadatkan.

Nilai CBR memegang peranan penting dalam menentukan ketebalan lapisan perkerasan, khususnya pada lapis pondasi bawah (*subbase*) dan lapis pondasi atas (*base course*). Faktor-faktor seperti kondisi fisik material, kadar air, tingkat kepadatan, serta jenis agregat yang digunakan sangat memengaruhi nilai CBR yang dihasilkan. Oleh karena itu, pemanfaatan pengujian CBR sangat penting dalam memastikan bahwa lapisan tanah atau pondasi jalan memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan beban lalu lintas, guna mendukung pembangunan jalan yang kokoh dan tahan lama (Susetyo dkk, 2024).



Gambar 2.4 Hubungan antara beban dan penetrasi

(Sumber : SNI 1744:2012)

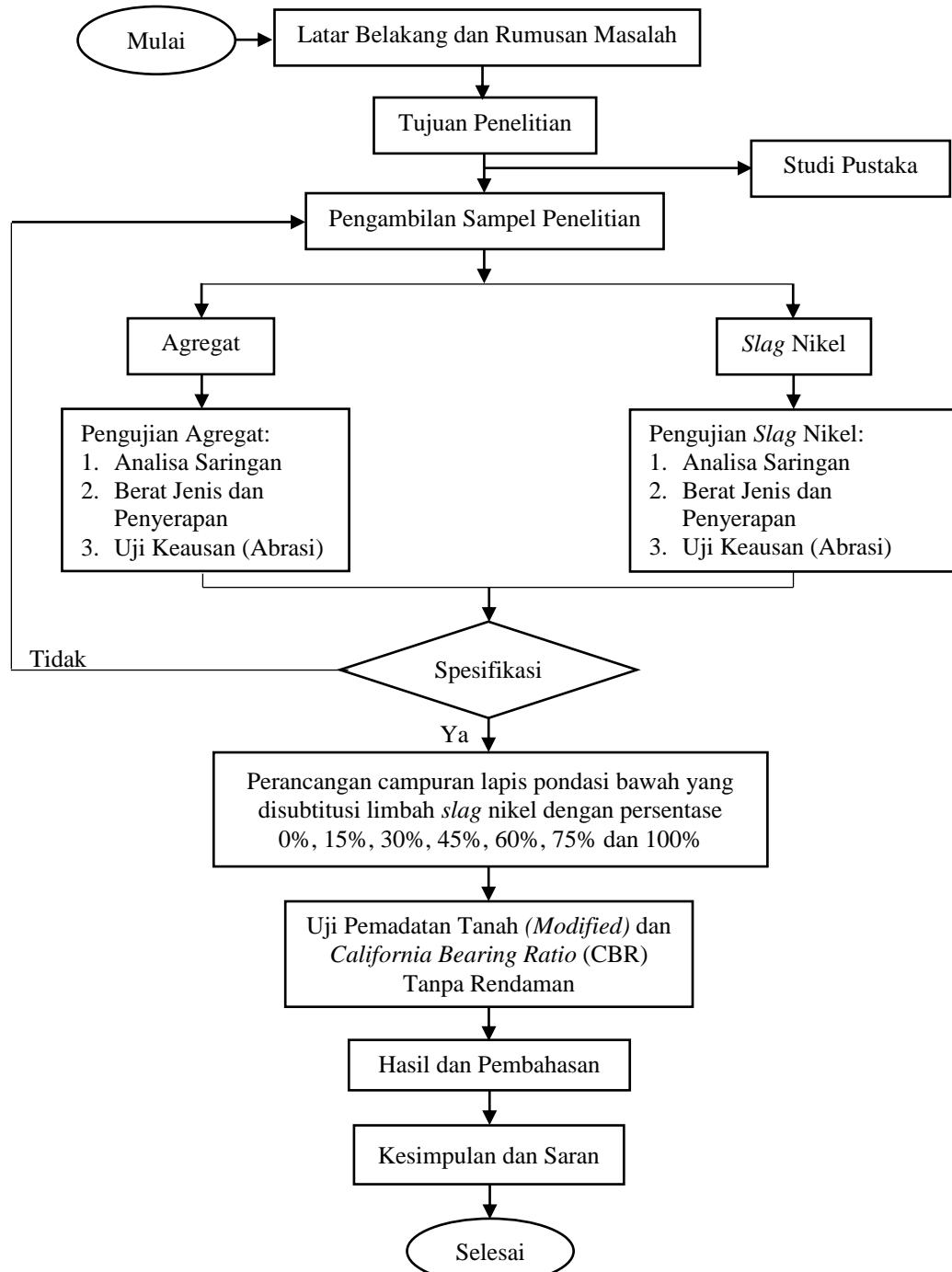
Grafik hubungan antara beban dan penetrasi pada pengujian CBR memperlihatkan pola peningkatan beban seiring dengan bertambahnya kedalaman penetrasi piston ke dalam sampel tanah atau campuran agregat. Pada tahap awal penetrasi (0–2,5 mm atau 0–0,1 inci), kurva menunjukkan kenaikan beban yang cukup signifikan, menggambarkan daya tahan awal material terhadap deformasi. Namun setelah melewati titik tertentu, laju peningkatan beban mulai menurun seiring bertambahnya penetrasi, yang menandakan terjadinya pergeseran partikel dan penyesuaian struktur internal material.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir berikut menunjukkan urutan tahapan penelitian yang disusun sehingga memberikan gambaran alur kegiatan yang dimulai dari persiapan hingga tahap akhir.



Gambar 3.1 Bagan Alir

3.2 Studi Literatur

Sebelum penelitian dimulai, serangkaian proses persiapan dilakukan untuk menjamin keyakinan hasil. Proses ini meliputi tinjauan pustaka, survey area lokasi pengambilan sampel, menyiapkan peralatan pengujian, persiapan spesimen, dan pelaksanaan pemeriksaan laboratorium. Tahap akhir diakhiri dengan langkah penting berupa analisis data menyeluruh.

3.3 Teknik Pengumpulan Data

Pada penelitian ini, penulis menggunakan data primer melalui studi eksperimental di laboratorium yang menggunakan sejumlah benda uji yang disiapkan kemudian diuji. Proses ini melibatkan metode untuk memastikan data yang dihasilkan secara akurat dan sesuai standar pengujian. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Tadulako dengan melakukan serangkaian pengujian karakteristik fisik agregat serta uji daya dukung tanah menggunakan metode *California Bearing Ratio* (CBR).

Pengujian CBR dilakukan terhadap beberapa variasi campuran agregat kasar dengan substitusi limbah *Slag* nikel sesuai dengan prosedur yang tercantum dalam SNI 1744:2020 tentang Metode Uji CBR Laboratorium. Setiap tahapan pengumpulan data, mulai dari persiapan material, proses pencampuran, pemasukan dengan energi standar, hingga pelaksanaan pengujian CBR, dilakukan secara sistematis untuk memastikan data yang diperoleh bersifat valid, representatif, dan dapat dianalisis lebih lanjut sesuai tujuan penelitian.

3.4 Pengambilan Material

Sebelum melakukan pengujian di laboratorium, terlebih dahulu harus mempersiapkan bahan atau sampel yang akan digunakan untuk pengujian. Dalam penelitian ini, material utama yang digunakan terdiri dari agregat kasar konvensional (batu pecah) dan limbah *slag* nikel sebagai material substitusi. Proses pengambilan sampel dilakukan secara representatif agar karakteristik sampel yang diuji di laboratorium benar-benar mencerminkan kondisi asli material di lapangan.

3.4.1 Lokasi Pengambilan Limbah *Slag* Nikel

Limbah *slag* nikel yang digunakan adalah hasil dari peleburan bijih nikel diproduksi oleh PT. IHIP (Indonesia Huabao Industrial Park) yang berlokasi di Desa Topogaro, Kabupaten Morowali, Sulawesi Tengah.



Gambar 3.2 Lokasi Pengambilan Limbah *Slag Nickel*

(Sumber: *Google Earth*, 2025)

3.4.2 Metode Pengambilan Limbah *Slag Nickel*

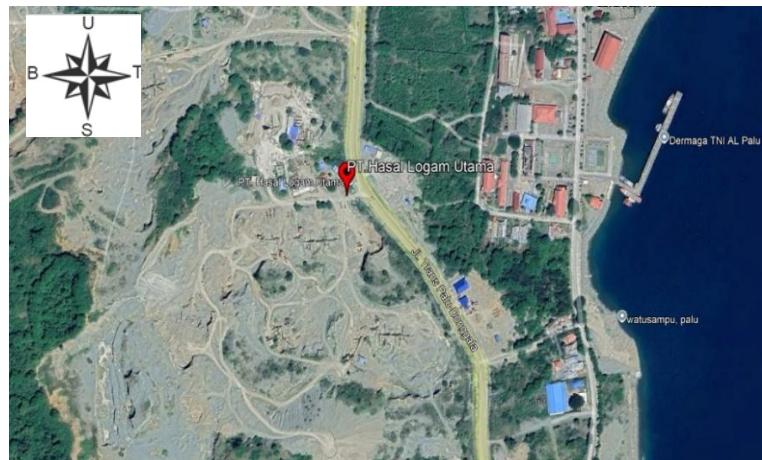
Material yang diambil merupakan material yang metode pendinginannya dengan udara, dimana ukuran butir agregat limbah *slag* nikel bisa diatur dengan alat pemecah batu (*stone crusher*). Pengambilan material dilakukan dengan cara sederhana pada titik dan ukuran yang berbeda kemudian dimasukkan ke dalam karung yang berbeda-beda juga agar tidak tercampur. Setelah dimasukkan ke dalam karung, kemudian diikat menggunakan tali agar aman dan tidak tumpah selama perjalanan dari lokasi pengambilan menuju lokasi pengujian.



Gambar 3.3 Pengambilan Limbah *Slag Nickel*

3.4.3 Lokasi Pengambilan Agregat

Agregat alam yang digunakan berasal dari PT. Hasal Logam Utama yang berlokasi di Kelurahan Watusampu, Kecamatan Ulujadi, Kota Palu.



Gambar 3.4 Lokasi Pengambilan Agregat

(Sumber: *Google Earth*, 2025)

3.4.4 Metode Pengambilan Agregat

Sampel diambil dari beberapa titik timbunan (*stockpile*) yang masing-masing berisi agregat dengan ukuran butiran yang berbeda. Ukuran agregat yang dikumpulkan meliputi batu pecah 3/4", 3/8", abu batu, dan pasir. Keempat jenis material ini secara keseluruhan dinilai mampu merepresentasikan karakteristik umum dari material yang tersedia di lokasi. Pengambilan dilakukan menggunakan alat bantu berupa sekop, dengan setiap fraksi agregat dikemas secara terpisah dalam karung yang berbeda dan diikat mencegah terjadinya pencampuran ukuran.



Gambar 3.5 Pengambilan Agregat

3.5 Pengujian Laboratorium

Pengujian laboratorium dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah dan Laboratorium Struktur & Uji Bahan dengan beberapa jenis pengujian yang dilakukan antara lain, sebagai berikut:

3.5.1 Pengujian Analisa Saringan

Analisis saringan dilakukan untuk menentukan distribusi ukuran butiran agregat. Proses ini melibatkan pengayakan agregat melalui serangkaian saringan dengan ukuran berbeda. Hasil pengayakan kemudian dihitung persentasenya dan direpresentasikan dalam bentuk kurva gradasi. Tujuan utama pemeriksaan ini adalah untuk menetapkan gradasi agregat halus dan kasar, yang sangat penting dalam menentukan kualitas dan kinerja campuran. Berikut adalah daftar peralatan yang diperlukan untuk melaksanakan analisis ini:

- a. Timbangan dan neraca dengan ketelitian 0,2% dari berat benda uji
 - b. Satu set saringan : 25,0 mm (1''); 9,50 mm (3/8''); 4,75 mm (No.4); 2,0 mm (No.10); 0,425 mm (No.40); 0,075 (No.200); PAN
 - c. Oven yang dilengkapi dengan pengatur suhu untuk memanasi sampai (110°)
 - d. Alat pemisah contoh
 - e. Mesin pengguncang saringan
 - f. Talam
 - g. Kuas, sikat kuningan, sendok, dan alat-alat lainnya

Prosedur pengujian analisa saringan adalah sebagai berikut :

1. Sampel dikeringkan di dalam oven dengan suhu $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$
 2. Saringan disusun dari ukuran saringan yang diameter terbesar diletakkan paling atas hingga ukuran saringan diameter yang paling kecil terletak di bawah, lalu masukkan material. Selanjutnya guncang saringan dalam waktu 15 menit menggunakan mesin.

Persentase berat sampel yang lolos dan tertahan pada setiap saringan dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\text{Persen Tertahan} = \frac{\text{Berat Kumulatif Tertahan}}{\text{Berat Total}} \times 100\% \dots \dots \dots (3.1)$$

3.5.2 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan

Berat jenis mengacu pada rasio antara berat satuan volume zat dan berat volume air yang setara pada suhu tertentu. Penting untuk diketahui bahwa nilai berat jenis adalah tidak berdimensi. Pengujian ini bertujuan untuk menilai berat jenis curah, berat jenis kering permukaan jenuh (SSD), berat jenis semu, serta angka penyerapan dari agregat kasar dan agregat halus.

- 1) Berat jenis curah adalah perbandingan antara berat agregat kering dan berat air suling yang isinya sama dengan isi agregat dalam keadaan jenuh pada suhu tertentu.

Agregat Kasar : Berat jenis curah (*bulk specific gravity*) = $\frac{BK}{Bj-Ba}$ (3.3)

- 2) Berat jenis kering permukaan jenuh adalah perbandingan antara berat agregat kering permukaan jenuh dan berat air suling yang isinya sama dengan isi agregat dalam keadaan jenuh pada suhu tertentu.

Agregat Kasar :Berat jenis kering permukaan jenuh

$$\text{Aggregat Halus : Berat jenis kering permukaan jenuh} = \frac{500}{B_t + 500 - B_t} \dots \dots \dots (3.6)$$

- 3) Berat jenis semu adalah perbandingan antara berat agregat kering dan berat air suling yang isinya sama dengan isi agregat dalam keadaan kering pada suhu tertentu.

$$\text{Berat jenis semu (apparent specific gravity)} = \frac{\text{Bk}}{\text{Bk} - \text{Ba}} \dots \dots \dots (3.7)$$

- 4) Penyerapan perbandingan berat air yang dapat diserap oleh pori terhadap berat agregat kering dan dinyatakan dalam persen.

Keterangan :

Bk = Berat benda uji kering oven, satuan gram (gr)

B_i = Berat benda i kering permukaan, satuan gram (gr)

Ba ≡ Berat benda m di dalam air, satuan gram (gr)

3.5.3 Uji Keausan Menggunakan Mesin Abrasi

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat kekerasan agregat atau seberapa besar ketahanannya terhadap proses keausan. Secara lebih spesifik, pengujian dilakukan untuk menilai agregat kasar berdasarkan tingkat gesekan dan benturan yang terjadi selama proses pengujian, yang kemudian dinyatakan dalam bentuk persentase. Proses pengujian ini menggunakan mesin abrasi Los Angeles. Nilai keausan diperoleh dengan membandingkan berat agregat yang lolos saringan No. 12 setelah dilakukan pengujian terhadap berat awal material, lalu dinyatakan dalam persen.

$$\text{Keausan} = \frac{\text{Berat Lolos Saringan No.12}}{\text{Berat Benda Uji Semula}} \times 100\% \dots \dots \dots (3.9)$$

3.5.4 Pengujian Pemadatan (*Modified Proctor*)

Metode pengujian pemedatan tanah dilakukan sebagai acuan dalam melakukan pengujian kepadatan tanah maksimum dengan kadar air optimum. Adapun tujuan pengujian ini ialah untuk mengetahui hubungan kadar air dengan kepadatan tanah. Pengujian ini dimaksudkan untuk memperoleh cetakan campuran *subbase* untuk dilakukan uji *California bearing ratio* (CBR). Peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Satu set mold
 2. Alat penumbuk
 3. Timbangan
 4. Talang
 5. Pisau perata
 6. Sendok pengaduk
 7. Cawan
 8. Oven

Prosedur pengujian pemadatan sebagai berikut :

1. Alat *proctor* ditimbang beratnya.
 2. Ukur diameter dan tinggi masing – masing bagian dengan alat tersebut.
 3. Campur benda uji dengan kadar air yang direncanakan secara merata
 4. Tanah dimasukkan kedalam cetakan *proctor* dalam 5 lapisan, masing-masing lapisan dipadatkan dengan 56 kali tumbukan dari alat penumbuk seberat 4,54 kg yang dijatuhkan dari tinggi 457 mm.

5. Ratakan dan bersihkan permukaan cetakan menggunakan pisau perata
6. Timbang berat total cetakan dan benda uji untuk menghitung berat isi basah.
7. Ambil cawan kemudian timbang beratnya, masukan sebagian sampel dari dalam cetakan. Lakukan sampai 5 cawan.
8. Timbang berat cawan dan contoh basah, kemudian oven selama 24 jam.
9. Setelah 24 jam, cawan dan sampel kering ditimbang.

3.5.5 Pengujian CBR (*California Bearing Ratio*)

Pengujian CBR dilakukan untuk mengetahui seberapa besar daya dukung relatif tanah saat berada dalam keadaan kering atau belum jenuh air. Pengujian ini umumnya menggambarkan kondisi lapangan di musim kemarau atau saat tanah belum terpengaruh oleh genangan atau kelembaban berlebih. Adapun peralatan yang digunakan dalam pengujian CBR adalah sebagai berikut:

1. Mesin Penetrasi (*leading machine*)
2. Cetakan logam berbentuk silinder
3. Piringan pemisah dari logam (*spaeer disk*)
4. Alat penumbuk *modified*
5. Keping beban lubang alur
6. Terak penetrasi
7. Satu buah arloji beban dan satu buah arloji pengukur penetrasi
8. Alat perata

Adapun prosedur percobaan CBR sebagai berikut:

1. Siapkan benda uji kemudian padatkan. Setelah pemadatan selesai, istirahatkan selama $\pm 10-15$ menit (tanpa perendaman).
2. Pasang cetakan pada mesin uji CBR.
3. Turunkan piston penetrasi ke permukaan tanah dan nolkan dial gauge.
4. Lakukan penetrasi dengan kecepatan 1,27 mm/menit, sambil mencatat beban pada:

Penetrasi 0,0 mm (awal)

Penetrasi 0,64 mm (0,025 inci)

Penetrasi 1,27 mm (0,05 inci)

Penetrasi 1,90 mm (0,075 inci)

Penetrasi 2,54 mm (0,1 inci)

- Penetrasi 5,08 mm (0,2 inci)
 Penetrasi 7,62 mm (0,3 inci)
 Penetrasi 10,16 mm (0,4 inci)
 Penetrasi 12,70 mm (0,5 inci)
5. Ambil sampel tanah dari cetakan setelah uji selesai untuk uji kadar air aktual.

3.6 Rancangan Campuran

Perancangan campuran pada pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan hasil perkerasan lapis pondasi bawah yang optimal menggunakan campuran dari agregat limbah *slag* nikel dan agregat konvensional. Dalam proses ini melibatkan penentuan proporsi yang tepat antara agregat kasar, agregat halus, dan bahan pengisi. Adapun komposisi campuran antara agregat kasar konvensional dan agregat kasar limbah *slag* nikel ditentukan untuk mendapatkan suatu komposisi campuran yang memenuhi syarat gradasi, sehingga diperoleh suatu lapis pondasi bawah yang dimana ikatan butir-butir agregat saling mengikat.

Metode ini dilakukan menggunakan cara percobaan kemudian melakukan perbandingan hasil antara gradasi-gradasi yang diperoleh dengan gradasi yang telah disyaratkan dan didasarkan pada persentase pemakaian agregat konvensional dan limbah *slag* nikel. Melalui metode ini dapat ditentukan jumlah yang tepat pada perkiraan *slag* nikel sehingga dapat menghasilkan komposisi campuran yang baik dan sesuai dengan persyaratan teknis perkerasan jalan.

Tabel 3.1 Rancangan Campuran Lapis Pondasi Bawah Gradasi Ideal

Saringan No.	Bukaan (mm)	Spesifikasi Gradasi		Gradasi Ideal		
		Max	Min	% Lolos	% Tertahan	Berat Tertahan (gr)
1 1/2"	37,50	100	100	100	0	-
1"	25,00	95	75	85	15	750
3/8"	9,50	75	40	57,5	27,5	1.375
# 4	4,75	60	30	45	12,5	625
# 10	2,00	45	20	32,5	12,5	625
# 40	0,425	30	15	22,5	10	500
# 200	0,075	15	5	10	12,5	625
PAN	-	-	-	-	10	500
				100,00	100	5.000

3.6.1 Komposisi Campuran

Dalam menentukan komposisi campuran dilakukan dengan menggunakan proporsi agregat yang terdiri dari fraksi-fraksi. Campuran dilakukan dengan cara tahapan substitusi diawali dengan penyaringan setiap fraksi agregat menggunakan satu set saringan sesuai spesifikasi umum 2025. Setelah data persen lolos setiap ukuran sudah diketahui, maka selanjutnya dibuatkan komposisi agregat dan hasilnya dibandingkan dengan gradasi yang telah disyaratkan, jika komposisi agregat telah memenuhi spesifikasi, dilanjutkan dengan penentuan setiap fraksi.

Tabel 3.2 di bawah ini menampilkan tahapan substitusi agregat kasar dengan *slag* nikel dalam campuran total seberat 2750 gram. Substitusi dilakukan secara bertahap dengan variasi persentase sebesar 15%, 30%, 45%, 60%, 75% dan 100%. Proses ini dilakukan dengan cara mengurangi porsi agregat alam dari fraksi 1", 3/8", dan No. #4, lalu menggantinya dengan jumlah *slag* nikel yang setara beratnya. Misalnya, pada substitusi 15%, *slag* nikel ditambahkan masing-masing sebesar 113 gram untuk fraksi 1", 206 gram untuk fraksi 3/8", dan 94 gram untuk fraksi No. #4, sehingga total *slag* nikel yang digunakan mencapai 413 gram. Perhitungan ini digunakan untuk memastikan komposisi campuran tetap seimbang sesuai dengan total berat awal.

Tabel 3.2 Komposisi Rancangan Substitusi *Slag* Nikel

Saringan No.	Berat Tertahan (gr)	% dari 2750	Percentase <i>Slag</i> Nikel (gr)						
			0%	15%	30%	45%	60%	75%	100%
1 1/2"	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1"	750	27	750	113	225	338	450	563	750
3/8"	1375	50	1375	206	413	619	825	1031	1375
No. #4	625	23	625	94	188	281	375	469	625
Total	2750	100	2750	413	825	1238	1650	2063	2750

Keterangan:

Total berat agregat kasar 2750 gr

3.6.2 Menentukan Jumlah Benda Uji

Dalam penelitian ini, pengujian dilakukan sesuai dengan rencana variasi persentase campuran *slag* nikel terhadap agregat kasar. Variasi kadar *slag* nikel yang digunakan adalah 0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75% dan 100%.

Tabel 3.3 Sampel Pemadatan Untuk Mencari Kadar Air Optimum

Variasi Kadar Slag Nikel	Pemadatan	CBR	Jumlah Sampel
0%	1 set (5 Sampel)	2 sampel	7 sampel
15%	1 set (5 Sampel)	2 sampel	7 sampel
30%	1 set (5 Sampel)	2 sampel	7 sampel
45%	1 set (5 Sampel)	2 sampel	7 sampel
60%	1 set (5 Sampel)	2 sampel	7 sampel
75%	1 set (5 Sampel)	2 sampel	7 sampel
100%	1 set (5 Sampel)	2 Sampel	7 Sampel
Total Sampel			49 Sampel

3.7 Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan mengumpulkan sampel agregat kasar alami yang disubtitusi limbah *slag* nikel dengan persentase variasi 0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75% dan 100% yang mencakup pengujian pemadatan dan CBR. Data yang telah diperoleh dari pengujian ini dianalisis untuk mengidentifikasi hubungan antara proporsi penggunaan limbah *slag* nikel dengan nilai CBR. Hasil dari analisis ini akan disajikan dalam bentuk grafik perbandingan. Selain itu, data yang diperoleh juga digunakan untuk mengevaluasi apakah penggunaan limbah *slag* nikel memberikan dampak yang signifikan terhadap karakteristik mekanik lapis pondasi bawah.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemeriksaan Agregat

Dalam perencanaan campuran material untuk konstruksi jalan, pengujian mutu agregat merupakan tahap penting yang tidak boleh diabaikan. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui sifat fisik dan karakteristik dasar setiap komponen penyusun, sehingga dapat dipastikan bahwa material yang digunakan sesuai dengan standar teknis yang berlaku. Melalui pengujian tersebut, dapat dinilai apakah agregat maupun limbah *slag* nikel yang digunakan mampu memberikan kinerja optimal, khususnya dalam hal kekuatan, ketahanan, dan stabilitas campuran.

Melalui pengujian awal terhadap kedua jenis material ini, diharapkan campuran yang dihasilkan tidak hanya memenuhi persyaratan teknis, tetapi juga memberikan manfaat dari sisi efisiensi biaya serta kontribusi positif terhadap keberlanjutan lingkungan dalam pekerjaan konstruksi jalan.



Gambar 4.1 Bentuk Agregat Kasar Konvensional (a) dan *Slag* Nikel (b)

4.1.1 Hasil Pengujian Analisa Saringan

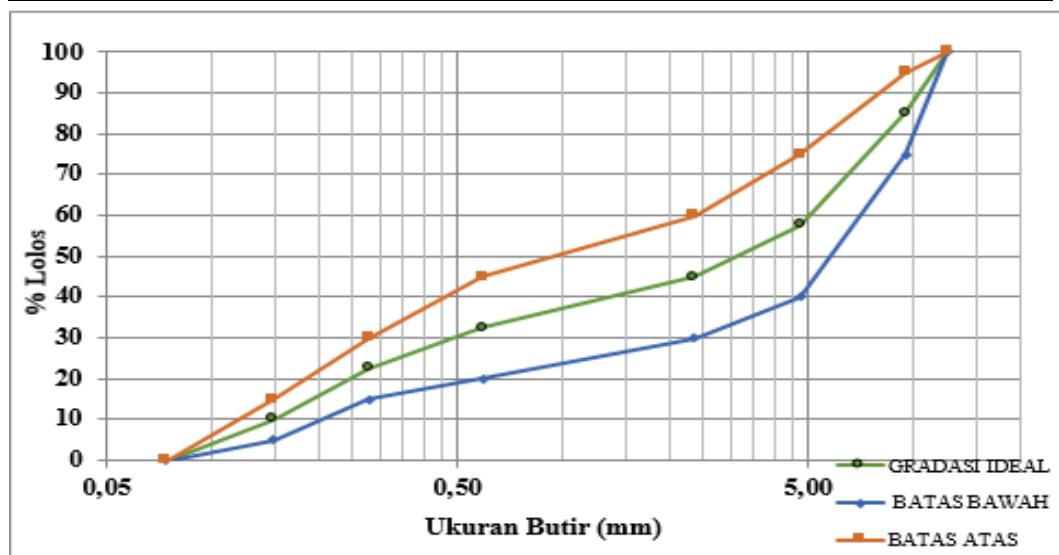
Pengujian analisa saringan pada agregat dilakukan berdasarkan acuan standar SNI ASTM C136-2012 dan mengacu pada ketentuan yang tercantum dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengetahui distribusi ukuran butiran agregat, sehingga dapat dipastikan bahwa gradasi material yang digunakan sesuai dengan persyaratan teknis untuk Lapis Pondasi Agregat Kelas B.

Distribusi gradasi yang tepat sangat berpengaruh terhadap stabilitas, kekuatan, dan daya dukung lapisan pondasi bawah. Gradasi yang baik akan menghasilkan kombinasi ukuran partikel yang saling mengisi rongga di antara

butiran, sehingga tercapai *interlocking* yang optimal dan mengurangi porositas campuran. Adapun hasil pengujian analisa saringan dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Rancangan Lapis Pondasi Agregat Menggunakan Gradasi Ideal

Saringan No	Bukaan	Spesifikasi		% Lolos	% Tertahan	Berat Tertahan (gr)
		Max	Min			
1 1/2	12,5	100	100	100	0	0
1	9,5	95	75	85	15,0	750
3/8	4,76	75	40	57,5	27,5	1375
4	2,36	60	30	45	12,5	625
10	0,59	45	20	32,5	12,5	625
40	0,279	30	15	22,5	10,0	500
200	0,149	15	5	10	12,5	625
PAN	0,074	-	-	-	10,0	500
		Total		100,0	5000	



Gambar 4.2 Grafik Pengujian Analisa Saringan

Berdasarkan hasil pengujian, persentase kumulatif butiran yang lolos pada setiap ukuran saringan menunjukkan bahwa agregat yang digunakan berada dalam rentang batas gradasi ideal sesuai spesifikasi yang ditetapkan untuk Lapis Pondasi Agregat Kelas B. Ukuran butiran kasar memiliki proporsi yang memadai untuk memberikan daya dukung struktural, sementara fraksi butiran halus cukup untuk mengisi rongga antar butir sehingga meningkatkan kerapatan campuran.

Kesesuaian dari hasil pengujian ini dengan batas spesifikasi umum menunjukkan bahwa material yang digunakan layak diaplikasikan sebagai Lapis

Pondasi Agregat Kelas B, baik dari segi stabilitas maupun durabilitas, sehingga diharapkan mampu mendukung kinerja lapisan perkerasan jalan secara optimal.

4.1.2 Hasil Pengujian Berat Jenis Agregat dan *Slag Nikel*

Pemeriksaan terhadap karakteristik agregat dilakukan secara menyeluruh berdasarkan metode pengujian dan standar yang ditetapkan dalam Standar Nasional Indonesia (SNI). Pengujian ini secara khusus mengacu pada SNI 1969:2016 untuk penentuan berat jenis dan penyerapan air pada agregat kasar, serta SNI 1970:2016 untuk penentuan berat jenis dan penyerapan air pada agregat halus. Seluruh pengujian juga mengacu pada ketentuan teknis dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025. Hasil lengkap dari pengujian tersebut disajikan pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Alam

Fraksi	Pengujian	Hasil Pengujian	Spesifikasi	Satuan	Keterangan
Agregat Kasar	Berat Jenis				
	a. Bj. Bulk	2,790	> 2,5		
	b. Bj. SSD	2,810	> 2,5	-	Memenuhi
	c. Bj. Apparent	2,846	> 2,5		
	Penyerapan Agregat	0,717	< 3	%	
Agregat Halus	Berat Jenis				
	a. Bj. Bulk	2,678	> 2,5		
	b. Bj. SSD	2,713	> 2,5	-	Memenuhi
	c. Bj. Apparent	2,774	> 2,5		
	Penyerapan Agregat	1,285	< 3	%	

Berdasarkan Tabel 4.2, hasil uji berat jenis dan penyerapan agregat alam menunjukkan bahwa agregat kasar memiliki berat jenis *bulk* sebesar 2,790, berat jenis SSD sebesar 2,810, dan berat jenis *apparent* sebesar 2,846. Seluruh nilai tersebut melebihi batas minimal 2,5 sesuai ketentuan spesifikasi teknis, sehingga dinyatakan memenuhi standar yang berlaku. Adapun nilai penyerapan air agregat kasar sebesar 0,717%, yang dimana nilai ini berada jauh di bawah batas maksimum 3%, sehingga juga dinyatakan lolos persyaratan.

Pada agregat halus diperoleh berat jenis *bulk* sebesar 2,678, berat jenis SSD sebesar 2,713, dan berat jenis *apparent* sebesar 2,774. Sama halnya dengan agregat kasar, seluruh nilai berat jenis agregat halus berada di atas batas minimal 2,5,

sehingga dapat dikatakan memenuhi standar teknis. Nilai penyerapan air agregat halus adalah 1,285%, yang masih berada di bawah batas maksimum 3%, sehingga agregat halus tersebut juga dinyatakan sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Tabel 4.3 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan *Slag* Nikel

Fraksi	Pengujian	Hasil Pengujian	Spesifikasi	Satuan	Keterangan
Agregat Kasar <i>Slag</i> Nikel	Berat Jenis				
	a. Bj. Bulk	2,844	> 2,5		
	b. Bj. SSD	2,860	> 2,5	-	Memenuhi
	c. Bj. Apparent	2,891	> 2,5		
Penyerapan Agregat					
		0,578	< 3	%	

Berdasarkan Tabel 4.3, dapat diketahui bahwa agregat kasar *slag* nikel memiliki nilai berat jenis *bulk* sebesar 2,844, SSD sebesar 2,860, dan *apparent* sebesar 2,891, disertai penyerapan air hanya 0,578%. Nilai penyerapan air agregat kasar *slag* nikel diperoleh sebesar 0,578%, yang jauh berada di bawah batas maksimum 3%. Hal ini menunjukkan bahwa *slag* nikel memiliki porositas rendah dan kemampuan menyerap air yang kecil, sehingga berpotensi memberikan kinerja yang baik dalam campuran perkerasan jalan.

Secara keseluruhan, agregat alam dan *slag* nikel ini memenuhi spesifikasi teknis dari segi berat jenis dan penyerapan air. Namun, *slag* nikel menunjukkan nilai berat jenis yang lebih tinggi dan penyerapan yang lebih rendah dibanding agregat alam.

4.1.3 Hasil Pengujian Abrasi Agregat Alam dan *Slag* Nikel

Dalam penelitian ini, pengujian abrasi agregat dilakukan dengan menggunakan mesin Los Angeles, sesuai dengan prosedur yang tercantum dalam SNI 2417:2008 serta mengacu pada persyaratan teknis yang diatur dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Abrasi Agregat Alam dan *Slag* Nikel

Jenis Pengujian	Hasil	Spesifikasi	Satuan	Keterangan
Abrasi Agregat	19,87	< 40	%	Memenuhi
Abrasi <i>Slag</i> Nikel	19,27			

Tabel 4.4 menampilkan hasil pengujian abrasi untuk dua jenis material, yaitu agregat alami dan *slag* nikel. Nilai abrasi agregat alami didapatkan sebesar 19,87% dan nilai abrasi *slag* nikel sebesar 19,27%, kedua jenis material tersebut berada jauh di bawah batas spesifikasi maksimum yang disyaratkan yaitu < 40%. Hal ini berarti kedua material memiliki tingkat ketahanan aus yang baik dan memenuhi persyaratan standar. Secara sederhana semakin kecil nilai persentase abrasi, semakin tinggi ketahanan material terhadap gesekan dan benturan.

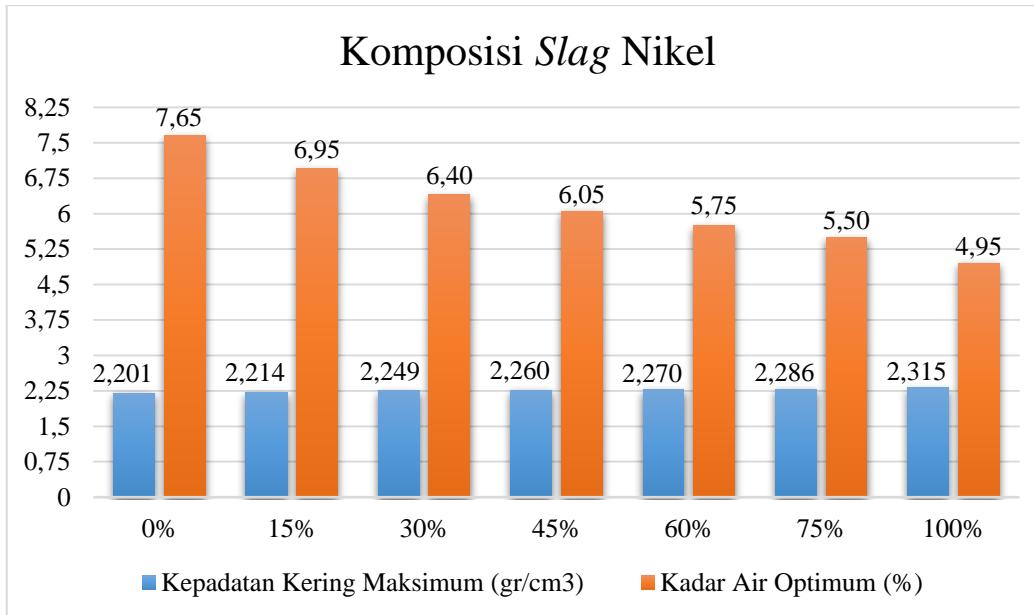
4.2 Uji Pemadatan (*Modified Proctor*)

Dalam penelitian ini, pengujian CBR dilakukan menggunakan metode pemadatan *Modified Proctor*. Metode ini dipilih karena mampu mencerminkan kondisi pemadatan yang mendekati kondisi nyata di lapangan, khususnya pada konstruksi perkerasan jalan. Pada prosedur *Modified Proctor*, agregat kasar yang digunakan adalah material yang tertahan pada saringan berukuran 4,75 mm. Sementara itu, material yang lolos dari saringan tersebut akan digabungkan sebagai bagian dari agregat halus dalam komposisi campuran yang diuji.

Berdasarkan Tabel 4.5, diketahui bahwa penambahan agregat kasar *slag* nikel dari 0% hingga 100% dalam campuran memberikan pengaruh positif meningkatkan nilai kepadatan kering maksimum, tetapi kadar air optimum justru mengalami penurunan. Perubahan ini dipengaruhi oleh sifat fisik *slag* nikel yang memiliki daya serap air lebih rendah (0,578%) dibandingkan dengan agregat kasar alam (0,717%). Rendahnya nilai penyerapan *slag* nikel menyebabkan kebutuhan air dalam proses pemadatan menjadi lebih sedikit, sehingga kadar air optimum pun ikut menurun seiring meningkatnya persentase penggunaannya dalam campuran.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Pemadatan (*Modified Proctor*)

Kode Sampel	Agregat Kasar <i>Slag</i> Nikel	Kepadatan Kering (γ_{maks})		Kadar Air (w) %
		gr/cm ³		
MP 1	0%	2,201		7,65
MP 2	15%	2,214		6,95
MP 3	30%	2,249		6,40
MP 4	45%	2,260		6,05
MP 5	60%	2,270		5,75
MP 6	75%	2,286		5,50
MP 7	100%	2,315		4,95

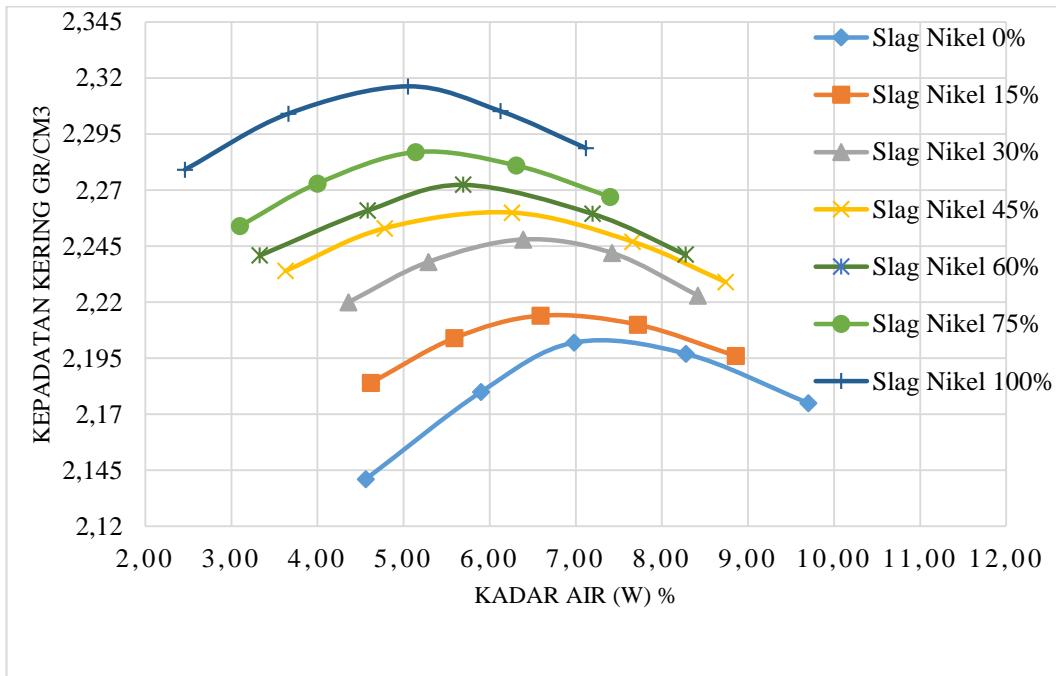


Gambar 4.3 Nilai Kadar Air Optimum dan Kepadatan Kering Maksimum

Grafik di atas memperlihatkan nilai kepadatan kering maksimum (gr/cm³) dan nilai kadar air optimum (%) pada campuran agregat kasar dengan variasi persentase *slag* nikel, yaitu 0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75% dan 100%. Terlihat bahwa semakin meningkat nilai kepadatan kering maksimum, nilai kadar air optimum justru cenderung menurun. Hal ini menunjukkan bahwa kelebihan air dapat mengurangi kerapatan material karena pori-pori terisi air secara berlebihan. Selain itu, grafik juga memperlihatkan bahwa peningkatan persentase *slag* nikel dalam campuran berkorelasi dengan penurunan kadar air optimum. Pada campuran tanpa *slag* nikel, kadar air optimum relatif tinggi, namun pada campuran dengan *slag* nikel 100%, kadar air optimum menjadi paling rendah. Hal ini disebabkan oleh *slag* nikel yang kurang menyerap air dibandingkan dengan agregat alam, sehingga membutuhkan air lebih sedikit untuk mencapai kepadatan maksimum.

Berdasarkan Gambar 4.4 terlihat bahwa pola kurva yang terbentuk pada masing-masing variasi menunjukkan karakteristik menyerupai parabola, di mana titik tertingginya menggambarkan nilai kepadatan kering maksimum yang dicapai pada kadar air optimum. Semakin tinggi persentase *slag* nikel yang digunakan, nilai kepadatan kering maksimum cenderung meningkat. Campuran dengan *slag* nikel 100% menghasilkan kepadatan kering tertinggi, yaitu sekitar 2,315 gr/cm³, sedangkan campuran tanpa *slag* nikel (0%) menunjukkan kepadatan kering

terendah, yakni sekitar $2,201 \text{ gr/cm}^3$. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan *slag* nikel sebagai pengganti agregat kasar dapat meningkatkan kerapatan campuran benda uji yang dipadatkan.



Gambar 4.4 Grafik Karakteristik Pemadatan Campuran *Slag* Nikel

Selain itu, puncak kurva yang bergeser ke kiri seiring bertambahnya kadar *slag* nikel menunjukkan bahwa kadar air optimum menjadi lebih rendah. Material dengan kandungan *slag* nikel yang lebih tinggi cenderung mencapai kepadatan maksimal dengan jumlah air yang lebih sedikit dibandingkan material tanpa *slag*.

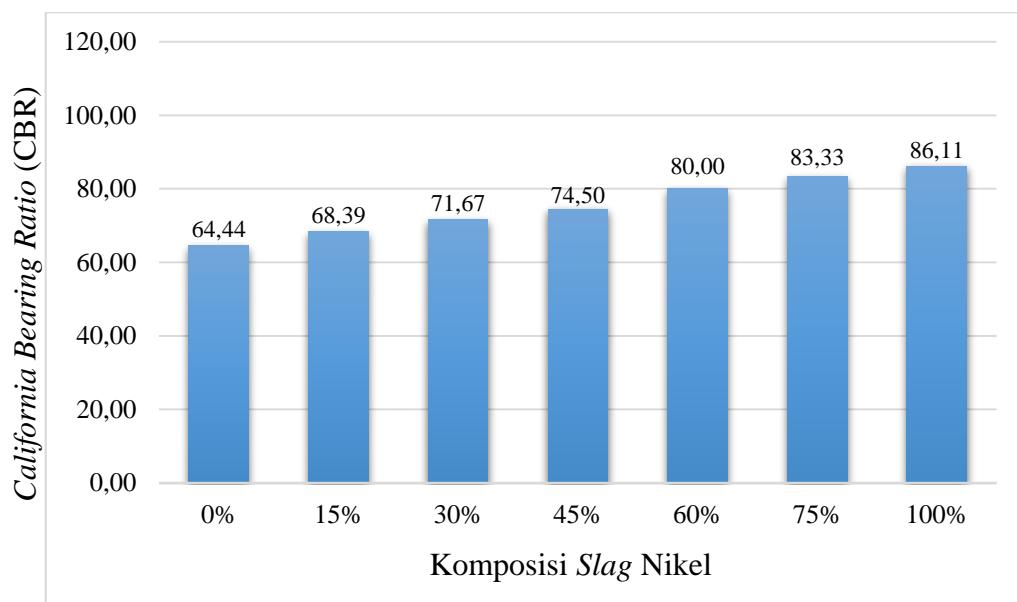
4.3 Uji California Bearing Ratio (CBR)

Pada penelitian ini, pengujian CBR dilakukan dengan menggunakan mesin penetrasi terhadap campuran agregat kasar yang memanfaatkan limbah *slag* nikel. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi campuran, yaitu 0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75% dan 100% *slag* nikel sebagai substitusi agregat kasar. Adapun tujuan dari pengujian ini adalah untuk menganalisis hubungan antara variasi persentase substitusi *slag* nikel terhadap agregat kasar pada campuran lapis pondasi bawah dengan nilai CBR yang dihasilkan, sekaligus menentukan persentase *slag* nikel yang memberikan nilai CBR paling tinggi. Analisis ini juga berperan penting untuk menilai sejauh mana *slag* nikel mampu meningkatkan daya dukung tanah sebagai lapis pondasi bawah.

Berdasarkan hasil pengujian CBR pada dua sampel sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.6, diketahui bahwa seluruh campuran memiliki nilai CBR tertinggi berada pada rentang 64,44% hingga 86,11%.

Tabel 4.6 Nilai Rata-rata Uji CBR

Komposisi Agregat Kasar <i>Slag Nikel</i>	Kepadatan Kering Maksimum (gr/cm ³)	Kadar Air Optimum (%)	CBR (%)
0%	2,201	7,65	64,44
15%	2,214	6,95	68,39
30%	2,249	6,40	71,67
45%	2,260	6,05	74,50
60%	2,270	5,75	80,00
75%	2,286	5,50	83,33
100%	2,315	4,95	86,11



Gambar 4.5 Grafik Hasil CBR Nilai Tertinggi

Hasil ini menunjukkan bahwa nilai CBR meningkat seiring dengan bertambahnya kepadatan kering yang diperoleh melalui pemasatan menggunakan metode *modified proctor* sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4. Peningkatan ini semakin jelas dengan bertambahnya persentase penggantian agregat kasar menggunakan limbah *slag* nikel. Hal tersebut disebabkan oleh sifat *slag* nikel yang memiliki daya serap air sangat rendah, yaitu sekitar 0,578%,

sehingga mampu menghasilkan kepadatan kering yang tinggi dan berdampak positif terhadap peningkatan nilai CBR campuran.

Nilai CBR tertinggi diperoleh pada campuran dengan 100% *slag* nikel, yang kemampuannya mencapai kepadatan kering maksimum pada kadar air rendah didukung oleh karakteristik fisik partikel yang padat dan memiliki penyerapan air yang rendah. Hal ini yang menunjukkan bahwa semakin banyak *slag* nikel yang ditambahkan, daya dukung lapis pondasi bawah ikut meningkat, dan kondisi paling optimal terjadi pada campuran sekitar 100%.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, pengaruh penggunaan limbah *slag* nikel sebagai agregat kasar yang disubstitusi pada agregat alam lapis pondasi bawah terbukti meningkatkan kepadatan kering maksimum (MDD) dari persentase 0% sebesar 2,201 gr/cm³ hingga persentase 100% sebesar 2,315 gr/cm³. Kadar air optimum (OMC) menurun dari 7,65% pada persentase 0% *slag* nikel menjadi 4,95% pada persentase 100% *slag* nikel. Peningkatan nilai kepadatan kering maksimum berkorelasi dengan kenaikan nilai CBR dimana pada komposisi 100% *slag* nikel didapatkan nilai tertinggi sebesar 86,11%.

Peningkatan ini dipengaruhi sifat *slag* nikel yang keras dan padat sehingga menghasilkan keterikatan antarbutir yang optimal, mengurangi porositas, dan memungkinkan pencapaian densitas maksimum pada kadar air rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa *slag* nikel berpotensi memenuhi persyaratan minimum CBR lapis pondasi bawah sehingga layak digunakan untuk konstruksi jalan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang menunjukkan potensi limbah *slag* nikel dalam meningkatkan karakteristik material lapis pondasi bawah, berikut adalah beberapa saran yang dapat diajukan:

1. Pada penelitian selanjutnya dilakukan pengujian tambahan seperti CBR rendaman untuk mendapatkan hasil yang lebih komprehensif.
2. Limbah *slag* nikel dipertimbangkan secara serius sebagai material substitusi agregat kasar, khususnya pada lapisan pondasi bawah (*subbase*) dalam konstruksi perkerasan jalan, mengingat daya dukung yang sangat baik ditunjukkan oleh nilai CBR yang tertinggi pada 100% substitusi.
3. Mengevaluasi ketahanan material terhadap perubahan kondisi lingkungan, seperti pengaruh pengeringan dan pembasahan berulang atau perubahan suhu ekstrem, serta kemampuan menahan beban yang diberikan secara terus-menerus.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, S. J., Burhanuddin, B., & Jufriadi, J. (2021). Hubungan Nilai CBR Dan Sand Cone Lapisan Pondasi Bawah Pada Perkerasan Lentur Jalan. *Teras Jurnal : Jurnal Teknik Sipil*, Vol.: No.1:21–31.
- Amran, Y. dan Prasetyo, A. (2022). Analisis Stabilisasi Daya Dukung Tanah Dasar Menggunakan Campuran Arang Kayu Dan Sulfur (Studi Kasus Pada Tanah Lempung Berpasir). *TAPAK (Teknologi Aplikasi Konstruksi): Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, Vol.12: No.1:79-93.
- Arzaq, A.F. (2019). Perencanaan Perkerasan Jalan Mayjend Sungkono Gresik. *Tugas Akhir*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Arifin, S., Salakory, M., Sundari, S., Lestari, S. P., Fadliah, I., & Efendi, M. N. (2025). *Load-Bearing Capacity Performance of Road Construction using Nickel Slag Waste* (Issue Icosiet 2024). Atlantis Press International BV. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-768-7_45
- Bethary, R.T. dan Intari, D.E. (2022). Penggunaan Limbah Slag Nikel Untuk Material Jalan Ramah Lingkungan. *Fondasi : Jurnal Teknik Sipil*, Vol.11: No.1:34.
- Darlan, (2014). *Konstruksi Perkerasan Lentur (Flexible Pavement)*. (<https://www.dpupr.grobogan.go.id/info/artikel/29-konstruksi-perkerasan-lentur-flexible-pavement>). Diakses 27 Juni 2025.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Terjemahan oleh Noor Endah dan Indrasurya B. Mochtar. 1988. Institut Teknologi 10 Nopember. Surabaya.
- Das, B. M. (2016). *Principles of Geotechnical Engineering*. 9th ed. Cengage Learning, Stamford, USA.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2025). *Spesifikasi Umum 2025 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan Dan Jembatan*, Bina Marga. Jakarta.
- Hardiyatmo, H. C. (2014). *Mekanika Tanah 1*. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.

- Irawan, R.R (2021). *Membangun Konektivitas Dengan Semen Yang Ramah Lingkungan.*(<https://www.binamarga.pu.go.id/index.php/article/membangun-konektivitas-dengan-semen-yang-ramah-lingkungan>). Diakses 27 Januari 2025.
- Junaidi. (2022). Perbandingan Daya Dukung (CBR) Kondisi Soaked Dan Unsoaked Agregat Kelas B Berdasarkan Variasi Gradasi Lapangan (Studi Kasus : Material Agregat Kelas B di Quary Pulau Bengkalis). *Seminar Nasional Industri dan Teknologi (SNIT)*. Politeknik Negeri Bengkalis.
- Kemenperin. (2020). Kemenperin Angkat Potensi Slag Nikel Jadi Bahan Baku Industri.(<https://kemenperin.go.id/artikel/21806/Kemenperin-Angkat-Potensi-Slag-Nikel-Jadi-Bahan-Baku-Industri>). Diakses 17 Mei 2025.
- Masriadi, I. (2016). Analisa Perkerasan Lentur Terhadap Lapisan Pondasi Bawah. *Tugas Akhir*. Universitas Medan Area. Medan.
- Mujahidin, P.R. dan Setiawan D, M.F. (2024). Analisis CBR Tanah Lempung Dengan Penambahan Fly Ash Dan Bottom Ash (FABA). *Tugas Akhir*. Universitas Sultang Agung. Semarang.
- Nurmaidah, N., & Suranto, S. (2022). Uji Pemadatan Standar Dan Uji Pemadatan Modified Terhadap Tanah Yang Dicampur Kapur. *Journal Of Civil Engineering Building And Transportation*, Vol.6:No.1:50-60.
- Pareda, A. (2016). Metode Pelaksanaan Dan Penentuan Kepadatan Lapangan Lapis Pondasi Bawah Pada Proyek Pelebaran Jalan Tumpaan-Lopana. *Tugas Akhir*, Politeknik Negeri Manado.
- Prakoso, R. A., & Fauzi, M. A. (2021). Pemanfaatan Limbah Industri sebagai Agregat Alternatif dalam Campuran Aspal dan Beton. *Jurnal Teknik Sipil Indonesia*, Vol.8:No.1:13–20.
- SNI 1743:2022. *Metode Pengujian Kepadatan Tanah di Laboratorium Menggunakan Pemadatan Modified*. BSN. Jakarta.
- SNI 1744:2012. *Metode CBR Uji Laboratorium*. BSN. Jakarta.
- SNI 1969:2008. *Metode Uji Berat Jenis Agregat Kasar*. BSN. Jakarta.
- SNI 1970:2008. *Metode Uji Berat Jenis Agregat Halus*. BSN. Jakarta.
- SNI 2417:2008. *Metode Uji Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles*. BSN. Jakarta.

- Sukirman, S. (1999). *Perkerasan Lentur Jalan Raya*, Nova. Bandung.
- Sukirman, S. (2016). *Beton Aspal Campuran Panas*, Itenas. Bandung.
- Suryolelono, K. B., & Wardani, S. P. R. (2018). Pengaruh Pemanfaatan terhadap Karakteristik Kuat Geser Tanah Lempung. *Jurnal Teknik Sipil*, Vol.25:No.2:95–104.
- Susanto, I. dan Hamdani, D. (2021). Pemanfaatan Limbah *Slag* Nikel Sebagai Bahan Perkerasan Jalan (<https://binamarga.pu.go.id/index.php/article/pemanfaatan-limbah-Slag-nikel-sebagai-bahan-perkerasan-jalan>). Diakses 2 Februari 2025.
- Susetyo, A. H., Sariman, S., & Yunianti, N. H. (2024). Analisis Nilai CBR Dan Permeabilitas Tanah Lempung Yang Distabilisasi Dengan Fertilizer Di Desa Alam Buana Kabupaten Luwu Timur. *Jurnal Penelitian Teknik Sipil Konsolidasi*, Vol.2:No.2:188–193.
- Syaharuddin, Hafram, S. M., & Alifuddin, A. (2021). Pengaruh Variasi *Slag* Nikel Sebagai Bahan Tambah Agregat Halus pada Campuran Lapisan Aspal Beton. *Jurnal Teknik Sipil MACCA*, Vol.6:No.2:101–107.
- Tanjung, A. A., Gonzales, R., Seprianti, A., & Izati, R. (2022). Analisis Pemanfaatan Limbah Terak Nikel (*Slag*) sebagai Bahan Baku Pembuatan Shotcrete dan Penanganan Limbah Lumpur Nikel (Slurry) untuk Mengurangi Dampak Pencemaran Lingkungan. *Jurnal Migasian*, Vol.6:No.2:11-22.
- Tjokrodimulyo, K. (1996). *Teknologi Beton*. Nafiri. Yogyakarta.
- Wiziarti, R. dan Rahayu, W. (2022). Potensi Penggunaan Campuran *Slag* Nikel Dan Fly Ash Sebagai Material Perkerasan Jalan. *Racic: Rab Construction Research*, Vol.7:No.1:55-70.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Pengujian Analisa Saringan



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH

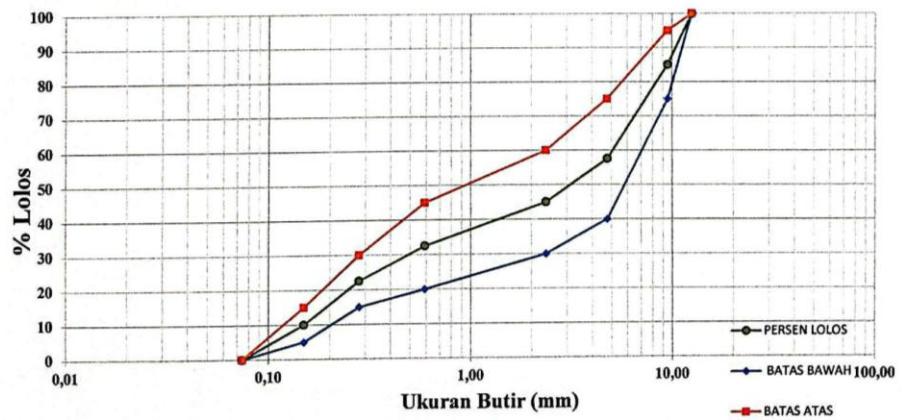
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO

Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: Penelitian Tugas Akhir	DIKERJAKAN	: Maisarah Az Zahra / F 111 21 029
Lokasi	: Lab. Mekanika Tanah Fatek UNTAD	DIHITUNG	: Maisarah Az Zahra / F 111 21 029
Pekerjaan	: Analisa Saringan	DIPERIKSA	: Ir. Imran, ST, MT
Contoh	: Gradasi Ideal	TANGGAL	: 25 Februari 2025

PERCOBAAN ANALISA SARINGAN LABORATORIUM

Saringan No	Bukaan	Spesifikasi		% Lolos	% Tertahan	Berat Tertahan
		Max	Min			
1 1/2	12,5	100	100	100	0	0
1	9,5	95	75	85	15,0	750
3/8	4,76	75	40	57,5	27,5	1375
4	2,36	60	30	45	12,5	625
10	0,59	45	20	32,5	12,5	625
40	0,279	30	15	22,5	10,0	500
200	0,149	15	5	10	12,5	625
PAN	0,074	-	-	-	10,0	500
				Total	100,0	5000



Lampiran 2 Hasil Pengujian Berat Jenis Dan Penyerapan Agregat Kasar



UNIVERSITAS TADULAKO
FAKULTAS TEKNIK - JURUSAN TEKNIK SIPIL
LABORATORIUM STRUKTUR & BAHAN BANGUNAN

Kampus Bumi Tadulako Tendo Palu - Telp. (0451) 422611 Psw. 170 email: labsstruktur2012@gmail.com

Proyek	: Tugas Akhir	Dikerjakan	: Tim Semangat Baru
Pekerjaan	: Analisa Saringan Agregat Halus	Dihitung	: Tim Semangat Baru
Lokasi	: Lab. Struktur dan Bahan Bangunan Untad	Diperiksa	: Firhansyah S. S.T
Sampel	: Pemeriksaan Agregat	Tanggal	: 28 Juli 2025

BERAT JENIS & PENYERAPAN AIR AGREGAT KASAR

SNI 03-1969-1990 (ASTM C 127-01)

JENIS MATERIAL : AGREGAT KASAR

Uraian Pemeriksaan	No. Sampel		Ket.
	I	II	
Berat contoh kering oven	Bk (gr)	5,291.8	5,312.9
Berat contoh kering permukaan	Bj (gr)	5,323.6	5,357.2
Berat contoh dalam air	Ba (gr)	3,438.0	3,441.0
Berat jenis bulk (BJ. Ov.)	Bk	2.806	2.773
	Bj - Ba	Rata-rata	2.790
Berat jenis bulk SSD (BJ. SSD)	Bj		2.796
	Bj - Ba	Rata-rata	2.810
Berat jenis semu (BJ. App)	Bk	2.85	2.838
	Bk - Ba	Rata-rata	2.846
Penyerapan air (%)	Bj - Bk Bk x 100 %		0.60
		Rata-rata	0.834
			0.717

Mengetahui

PLP Laboratorium Struktur dan Bahan
Bangunan

Firhansyah S. S.T

NIP. 19700111 199603 1 001

Lampiran 3 Hasil Pengujian Berat Jenis Dan Penyerapan Agregat Halus



UNIVERSITAS TADULAKO
FAKULTAS TEKNIK - JURUSAN TEKNIK SIPIL
LABORATORIUM STRUKTUR DAN BAHAN BANGUNAN

Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu - Telp. 454014 Psw 170

PROYEK	: Tugas Akhir	DIKERJAKAN	: Tim Semangat Baru
PEKERJAAN	: Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus	DIHITUNG	: Tim Semangat Baru
LOKASI	: Lab. Struktur dan Bahan Bangunan Untad	DIPERIKSA	: Firhansyah S. S.T
CONTOH	:	TANGGAL	: 28 Juli 2025

BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AGREGAT HALUS
(SNI 03 - 1970 - 1990)

JENIS MATERIAL : AGREGAT HALUS

Pemeriksaan		I	II	Keterangan
Berat contoh kering oven	Bk (gr)	493.850	493.465	
Berat betol + air	B (gr)	664.400	664.400	
Berat contoh + betol + air	Bt (gr)	980.400	979.750	
Berat benda uji SSD	V (gr)	500.000	500.000	
Berat jenis bulk (BJ. Ov.)	Bk	2.684	2.672	
	B + V - Bt	Rata-rata	2.678	
Berat jenis bulk SSD (BJ. SSD)	V	2.717	2.708	memenuhi
	B + V - Bt	Rata-rata	2.713	≥ 2.5
Berat jenis secukup (BJ. App)	Bk	2.777	2.770	
	B + Bk - Bt	Rata-rata	2.774	
Penyerapan air	V - Bk Bk x 100%	1.245	1.324	memenuhi
Volume Pycnometer	= 500 ml		1.285	≤ 3%

Mengetahui,
PLP Laboratorium Struktur dan Bahan
Bangunan

Firhansyah S. S.T

NIP. 19700111 199603 1 001

Lampiran 4 Hasil Pengujian Berat Jenis Dan Penyerapan *Slag Nikel*



UNIVERSITAS TADULAKO
FAKULTAS TEKNIK - JURUSAN TEKNIK SIPIL
LABORATORIUM STRUKTUR & BAHAN BANGUNAN

Kampus Bumi Tadulako Tendo Palu - Telp. (0451) 422611 Fsw. 120 email: labstruktur2012@gmail.com

Proyek	: Tugas Akhir	Dikerjakan	: Tim Semangat Baru
Pekerjaan	: Analisa Saringan Agregat Halus	Dihitung	: Tim Semangat Baru
Lokasi	: Lab. Struktur dan Bahan Bangunan Untad	Diperiksa	: Firhansyah S. S.T
Sampel	: Pemeriksaan Agregat	Tanggal	: 28 Juli 2025

BERAT JENIS & PENYERAPAN AIR AGREGAT KASAR

SNI 03-1969-1990 (ASTM C 127-01)

JENIS MATERIAL : AGREGAT KASAR SLAG NIKEL

Uraian Pemeriksaan	No. Sampel		Ket.
	I	II	
Berat contoh kering oven	Bk (gr)	5,077.5	5,364.2
Berat contoh kering permukaan	Bj (gr)	5,105.0	5,397.2
Berat contoh dalam air	Ba (gr)	3,318.6	3,512.0
Berat jenis bulk (BJ. Ov.)	Bk Bj - Ba	2.842	2.845
	Rata-rata	2.844	
Berat jenis bulk SSD (BJ. SSD)	Bj Bj - Ba	2.86	2.863
	Rata-rata	2.860	
Berat jenis semu (BJ. App)	Bk Bk - Ba	2.89	2.896
	Rata-rata	2.891	
Penyerapan air (%)	Bj - Bk Bk x 100 %	0.54	0.615
	Rata-rata	0.578	

Mengetahui

PLP Laboratorium Struktur dan Bahan
Bangunan

Firhansyah S. S.T

NIP. 19700111 199603 1 001

PLP Laboratorium Struktur dan Bahan Bangunan

Lampiran 5 Hasil Pengujian Abrasi Agregat Alam



UNIVERSITAS TADULAKO
FAKULTAS TEKNIK - JURUSAN TEKNIK SIPIL
LABORATORIUM STRUKTUR DAN BAHAN BANGUNAN

Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu - Telp. 454014 Psw 170

PROYEK	: Penelitian Tugas Akhir	DIKERJAKA	: TIM SEMANGAT BARU
PEKERJAAN	: Keausan Agregat (Abrasi)	DIHITUNG	: TIM SEMANGAT BARU
LOKASI	: Laboratorium Beton	DIPERIKSA	:
CONTOH	:	TANGGAL	:

KEAUSAN AGREGAT DENGAN MESIN ABRASI LOS ANGELES
(SNI 03-2417-1991)

Ukuran Saringan	Tertahan	A/B/C/D/E/F/G	
		Berat Contoh (gram)	
Lolos		I	II
76,2 mm (3")	63,5 mm (2 1/2")		
63,5 mm (2 1/2")	50,8 mm (2")		
50,8 mm (2")	37,5 mm (1 1/2")		
37,5 mm (1 1/2")	25,4 mm (1")		
25,4 mm (1")	19 mm (3/4")		
19 mm (3/4")	12,5 mm (1/2")	2500,8	2503,3
12,5 mm (1/2")	9,5 mm (3/8")	2500,7	2505
9,5 mm (3/8")	6,3 mm (1/4")		
6,3 mm (1/4")	4,75 mm (No. 4)		
4,75 mm (No. 4)	2,36 mm (No. 8)		
A. Berat Contoh		5001,5	5008,3
B. Berat Tertahan Saringan No. 12		4009,1	4011,7
C. Berat Lolos Saringan No. 12 (A-B)		992,4	996,6
Keausan Agregat, C/A X 100%		19,84	19,9
Nilai rata-rata keausan agregat			19,87

Mengetahui,
PLP Laboratorium Struktur dan Bahan
Bangunan

Purnansyah S. S.T
NIP. 197001111996031001

Lampiran 6 Hasil Pengujian Abrasi Slag Nikel



UNIVERSITAS TADULAKO
FAKULTAS TEKNIK - JURUSAN TEKNIK SIPIL
LABORATORIUM STRUKTUR DAN BAHAN BANGUNAN

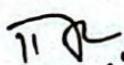
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu - Telp. 454014 Psw 170

PROYEK	: Penelitian Tugas Akhir	DIKERJAKA	: Tim Semangat Baru
PEKERJAAN	: Keausan Agregat (Abrasi)	DIHITUNG	: Tim Semangat Baru
LOKASI	: Laboratorium Beton	DIPERIKSA	:
CONTOH	:	TANGGAL	:

KEAUSAN SLAG NIKEL DENGAN MESIN ABRASI LOS ANGELES
(SNI 03-2417-1991)

Ukuran Saringan	Tertahan	A/B/C/D/E/F/G
		Berat Contoh (gram)
Lolos	Tertahan	I
76,2 mm (3")	63,5 mm (2 1/2")	
63,5 mm (2 1/2")	50,8 mm (2")	
50,8 mm (2")	37,5 mm (1 1/2")	
37,5 mm (1 1/2")	25,4 mm (1")	1250,9
25,4 mm (1")	19 mm (3/4")	1250
19 mm (3/4")	12,5 mm (1/2")	1250,2
12,5 mm (1/2")	9,5 mm (3/8")	1250,6
9,5 mm (3/8")	6,3 mm (1/4")	
6,3 mm (1/4")	4,75 mm (No. 4)	
4,75 mm (No. 4)	2,36 mm (No. 8)	
A. Berat Contoh		5001,7
B. Berat Tertahan Saringan No. 12		4038
C. Berat Lolos Saringan No. 12 (A-B)		963,7
Keausan Agregat, C/A X 100%		19,27%

Mengetahui,
PLP Laboratorium Struktur dan Bahan
Bangunan


Firhansyah S. S.T
NIP. 197001111996031001

Lampiran 7 Hasil Uji Pemadatan (*Modified Proctor*) Sampel 0% *Slag Nikel*



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR	Dikerjakan	: MAISARAH AZ ZAHRA
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	Dihitung	: MAISARAH AZ ZAHRA
No. Contoh	: 0% SLAG NIKEL	Diperiksa	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: 1	Tanggal	: 17 JUNI 2025

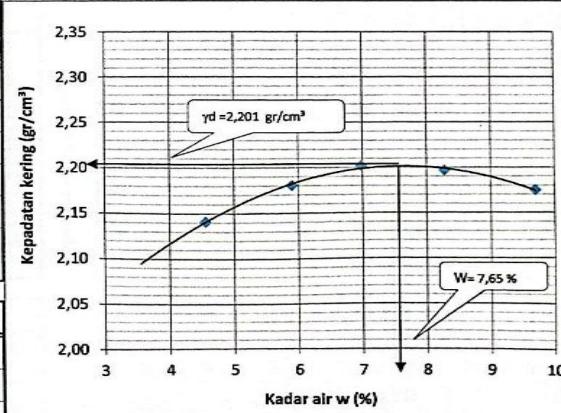
PERCOBAAN PEMADATAN

SNI - 03 - 1742 - 2008

Jenis pemadatan : **Standar/ Modified**
 Cara : **D**

	I	II	III	IV	V
A Berat mold + contoh basah gram	8786,0	8935,0	9034,0	9083,0	9098,0
B Berat mold gram	4035,0	4035,0	4035,0	4035,0	4035,0
C Berat contoh basah = A - B gram	4751,0	4900,0	4999,0	5048,0	5063,0
D Volume contoh cm ³	2122,23	2122,231	2122,231	2122,231	2122,231
E Kepadatan basah = C/D gr/cm ³	2,239	2,309	2,356	2,379	2,386
F Kadar air = N %	4,56	5,90	6,98	8,28	9,70
G Kepadatan kering = $\frac{E \cdot 100}{100 + N}$ gr/cm ³	2,141	2,180	2,202	2,197	2,175

H Nomor cawan	A	B	C	D	E
I Berat cawan + contoh basah gram	45,15	44,77	42,48	53,94	80,90
J Berat cawan + contoh kering gram	43,76	42,86	40,39	50,57	74,57
K Berat cawan gram	13,26	10,49	10,44	9,87	9,30
L Berat air = I - J gram	1,39	1,91	2,09	3,37	6,33
M Berat contoh kering = J - K gram	30,50	32,37	29,95	40,70	65,27
N Kadar air = $\frac{L \cdot 100}{M}$ %	4,56	5,90	6,98	8,28	9,70
Kadar air rata-rata %	4,56	5,90	6,98	8,28	9,70



Berat isi kering maksimum 2,201 gr/cm³
 Kadar air optimum = 7,65 %

Lampiran 8 Hasil Uji Pemadatan (*Modified Proctor*) Sampel 15% Slag Nikel



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu 422611 Psw 166

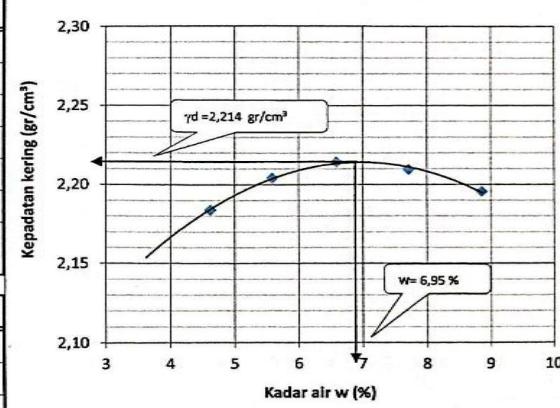
Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR	Dikerjakan	: MAISARAH AZ ZAHRA
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	Dihitung	: MAISARAH AZ ZAHRA
No. Contoh	: 15 % SLAG NIKEL	Diperiksa	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: 2	Tanggal	: 17 JUNI 2025

PERCOBAAN PEMADATAN
SNI - 03 - 1742 - 2008

Jenis pemadatan : **Standar/ Modified**
Cara : **D**

	I	II	III	IV	V
A Berat mold + contoh basah gram	8884	8974	9044	9086	9107
B Berat mold gram	4035	4035	4035	4035	4035
C Berat contoh basah = A - B gram	4849	4939	5009	5051	5072
D Volume contoh cm ³	2122	2122	2122	2122	2122
E Kepadatan basah = C/D gr/cm ³	2,285	2,327	2,360	2,380	2,390
F Kadar air = N %	4,62	5,59	6,59	7,72	8,86
G Kepadatan kering = $\frac{E \cdot 100}{100 + N}$ gr/cm ³	2,184	2,204	2,214	2,210	2,196

H Nomor cawan	A	B	C	D	E
I Berat cawan + contoh basah gram	45,23	48,37	43,52	60,42	59,86
J Berat cawan + contoh kering gram	43,64	46,30	41,40	56,89	56,47
K Berat cawan gram	9,24	9,24	9,24	11,15	18,19
L Berat air = I - J gram	1,59	2,07	2,12	3,53	3,39
M Berat contoh kering = J - K gram	34,40	37,06	32,16	45,74	38,28
N Kadar air = $\frac{L \cdot 100}{M}$ %	4,62	5,59	6,59	7,72	8,86
Kadar air rata-rata %	4,62	5,59	6,59	7,72	8,86



Berat isi kering maksimum	2,214 gr/cm ³
Kadar air optimum	= 6,95 %

Lampiran 9 Hasil Uji Pemadatan (*Modified Proctor*) Sampel 30% *Slag Nikel*



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR	Dikerjakan	: MAISARAH AZ ZAHRA
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	Dihitung	: MAISARAH AZ ZAHRA
No. Contoh	: 30% SLAG NIKEL	Diperiksa	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: 3	Tanggal	: 18 JUNI 2025

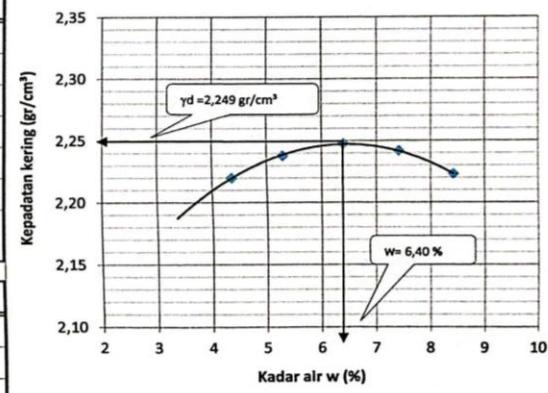
PERCOBAAN PEMADATAN

SNI - 03 - 1742 - 2008

Jenis pemadatan : **Standar/Modified**
 Cara : **D**

	I	II	III	IV	V
A Berat mold + contoh basah gram	8952,0	9036,0	9110,0	9145,0	9150,0
B Berat mold gram	4035,0	4035,0	4035,0	4035,0	4035,0
C Berat contoh basah = A - B gram	4917	5001	5075	5110	5115
D Volume contoh cm ³	2122	2122	2122	2122	2122
E Kepadatan basah = C/D gr/cm ³	2,317	2,356	2,391	2,408	2,410
F Kadar air = N %	4,36	5,29	6,39	7,42	8,42
G Kepadatan kering = $\frac{E \cdot 100}{100 + N}$ gr/cm ³	2,220	2,238	2,248	2,242	2,223

H Nomor cawan	A	B	C	D	E
I Berat cawan + contoh basah gram	44,40	54,78	55,18	57,42	59,86
J Berat cawan + contoh kering gram	42,95	52,56	52,97	54,12	55,96
K Berat cawan gram	9,70	10,61	18,40	9,62	9,65
L Berat air = I - J gram	1,45	2,22	2,21	3,30	3,90
M Berat contoh kering = J - K gram	33,25	41,95	34,57	44,50	46,31
N Kadar air = $\frac{L \cdot 100}{M}$ %	4,36	5,29	6,39	7,42	8,42
Kadar air rata-rata %	4,36	5,29	6,39	7,42	8,42



Berat isi kering maksimum	2,249 gr/cm ³
Kadar air optimum	= 6,40 %

Lampiran 10 Hasil Uji Pemadatan (*Modified Proctor*) Sampel 45% *Slag Nikel*



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

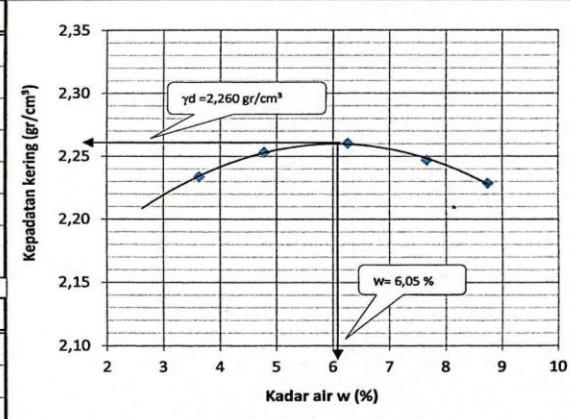
Pekerjaan	: PERCOBAAN PEMADATAN	Dikerjakan	: MAISARAH AZ ZAHRA
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	Dihitung	: MAISARAH AZ ZAHRA
No. Contoh	: 45% SLAG NIKEL	Diperiksa	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: 4	Tanggal	: 18 JUNI 2025

PERCOBAAN PEMADATAN
SNI - 03 - 1742 - 2008

Jenis pemadatan : Standar/Modified
 Cara : D

	I	II	III	IV	V
A Berat mold + contoh basah gram	8948,0	9045,0	9132,0	9169,0	9178,0
B Berat mold gram	4035,0	4035,0	4035,0	4035,0	4035,0
C Berat contoh basah = A - B gram	4913,0	5010,0	5097,0	5134,0	5143,0
D Volume contoh cm ³	2122,23	2122,231	2122,231	2122,231	2122,231
E Kepadatan basah = C/D gr/cm ³	2,315	2,361	2,402	2,419	2,423
F Kadar air = N %	3,63	4,78	6,26	7,66	8,74
G Kepadatan kering = $\frac{E \cdot 100}{100 + N}$ gr/cm ³	2,234	2,253	2,260	2,247	2,229

H Nomor cawan	A	B	C	D	E
I Berat cawan + contoh basah gram	53,82	58,25	61,97	66,18	68,13
J Berat cawan + contoh kering gram	52,27	56,03	58,89	62,16	63,43
K Berat cawan gram	9,56	9,56	9,67	9,68	9,66
L Berat air = I - J gram	1,55	2,22	3,08	4,02	4,70
M Berat contoh kering = J - K gram	42,71	46,47	49,22	52,48	53,77
N Kadar air = $\frac{L \cdot 100}{M}$ %	3,63	4,78	6,26	7,66	8,74
Kadar air rata-rata %	3,63	4,78	6,26	7,66	8,74



Berat isi kering maksimum	2,260 gr/cm ³
Kadar air optimum	= 6,05 %

Lampiran 11 Hasil Uji Pemadatan (*Modified Proctor*) Sampel 60% *Slag Nikel*



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PERCOBAAN PEMADATAN	Dikerjakan	: MAISARAH AZ ZAHRA
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	Dihitung	: MAISARAH AZ ZAHRA
No. Contoh	: 60% SLAG NIKEL	Diperiksa	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: 5	Tanggal	: 19 JUNI 2025

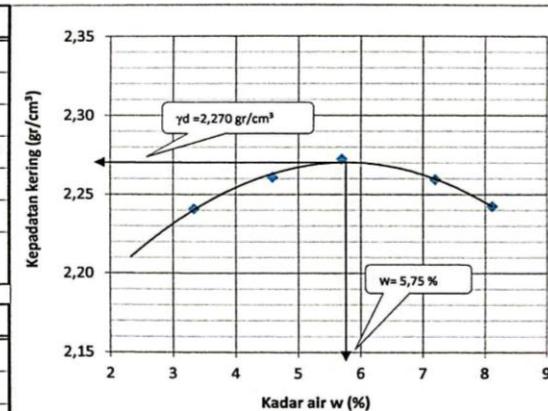
PERCOBAAN PEMADATAN

SNI - 03 - 1742 - 2008

Jenis pemasatan : **Standar/ Modified**
 Cara : **D**

	I	II	III	IV	V
A Berat mold + contoh basah gram	8949,0	9053,0	9132,0	9175,0	9180,0
B Berat mold gram	4035,0	4035,0	4035,0	4035,0	4035,0
C Berat contoh basah = A - B gram	4914,0	5018,0	5097,0	5140,0	5145,0
D Volume contoh cm ³	2122,23	2122,231	2122,231	2122,231	2122,231
E Kepadatan basah = C/D gr/cm ³	2,315	2,364	2,402	2,422	2,424
F Kadar air = N %	3,33	4,58	5,69	7,20	8,11
G Kepadatan kering = $\frac{E \cdot 100}{100 + N}$ gr/cm ³	2,241	2,261	2,272	2,259	2,242

H Nomor cawan	A	B	C	D	E
I Berat cawan + contoh basah gram	56,50	57,56	60,00	63,07	57,78
J Berat cawan + contoh kering gram	54,96	55,42	57,24	59,42	54,10
K Berat cawan gram	8,73	8,73	8,76	8,70	8,73
L Berat air = I - J gram	1,54	2,14	2,76	3,65	3,68
M Berat contoh kering = J - K gram	46,23	46,69	48,48	50,72	45,37
N Kadar air = $\frac{L \cdot 100}{M}$ %	3,33	4,58	5,69	7,20	8,11
Kadar air rata-rata %	3,33	4,58	5,69	7,20	8,11



Berat isi kering maksimum	2,270 gr/cm ³
Kadar air optimum	= 5,75 %

Lampiran 12 Hasil Uji Pemadatan (*Modified Proctor*) Sampel 75% Slag Nikel



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PERCOBAAN PEMADATAN	Dikerjakan	: MAISARAH AZ ZAHRA
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	Dihitung	: MAISARAH AZ ZAHRA
No. Contoh	: 75% SLAG NIKEL	Diperiksa	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: 6	Tanggal	: 19 JUNI 2025

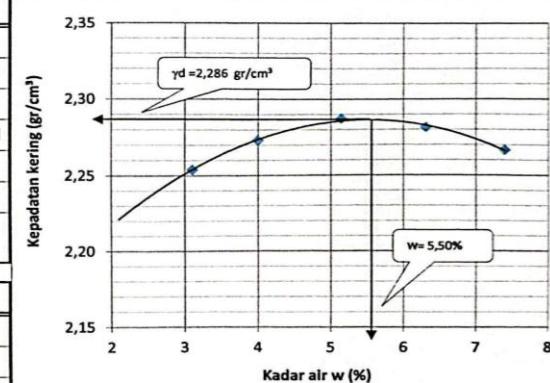
PERCOBAAN PEMADATAN

SNI - 03 - 1742 - 2008

Jenis pemadatan : **Standar/ Modified**
 Cara : **D**

	I	II	III	IV	V
A Berat mold + contoh basah gram	8967,0	9052,0	9138,0	9182,0	9201,0
B Berat mold gram	4035,0	4035,0	4035,0	4035,0	4035,0
C Berat contoh basah = A - B gram	4932,0	5017,0	5103,0	5147,0	5166,0
D Volume contoh cm ³	2122,23	2122,231	2122,231	2122,231	2122,231
E Kepadatan basah = C/D gr/cm ³	2,324	2,364	2,405	2,425	2,434
F Kadar air = N %	3,10	4,00	5,14	6,31	7,40
G Kepadatan kering = $\frac{E \cdot 100}{100 + N}$ gr/cm ³	2,254	2,273	2,287	2,281	2,267

H Nomor cawan	A	B	C	D	E
I Berat cawan + contoh basah gram	65,62	63,07	72,35	70,88	75,40
J Berat cawan + contoh kering gram	63,93	61,35	69,28	67,76	70,87
K Berat cawan gram	9,49	18,30	9,54	18,30	9,62
L Berat air = I - J gram	1,69	1,72	3,07	3,12	4,53
M Berat contoh kering = J - K gram	54,44	43,05	59,74	49,46	61,25
N Kadar air = $\frac{L \cdot 100}{M}$ %	3,10	4,00	5,14	6,31	7,40
Kadar air rata-rata %	3,10	4,00	5,14	6,31	7,40



Berat isi kering maksimum	2,286 gr/cm ³
Kadar air optimum	= 5,50 %

Lampiran 13 Hasil Uji Pemadatan (*Modified Proctor*) Sampel 100% Slag Nikel



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PERCOBAAN PEMADATAN	Dikerjakan	: MAISARAH AZ ZAHRA
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	Dihitung	: MAISARAH AZ ZAHRA
No. Contoh	: 100% SLAG NIKEL	Diperiksa	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: 7	Tanggal	: 19 JUNI 2025

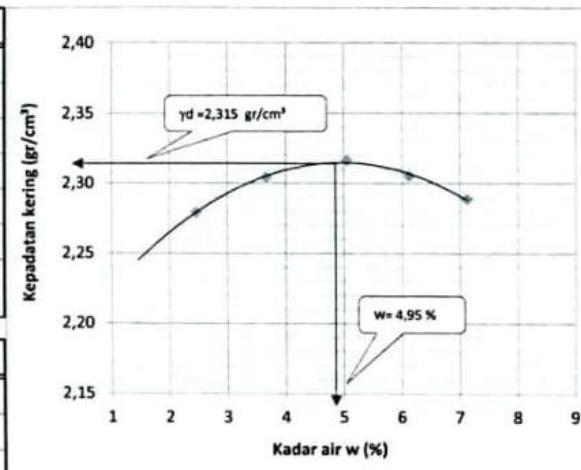
PERCOBAAN PEMADATAN

SNI - 03 - 1742 - 2008

Jenis pemadatan : Standar/Modified
 Cara : D

		I	II	III	IV	V
A	Berat mold + contoh basah gram	8974,0	9087,0	9182,0	9210,0	9221,0
B	Berat mold gram	4018,0	4018,0	4018,0	4018,0	4018,0
C	Berat contoh basah = A - B gram	4956,0	5069,0	5164,0	5192,0	5203,0
D	Volume contoh cm ³	2122	2122	2122	2122	2122
E	Kepadatan basah = C/D gr/cm ³	2,335	2,389	2,433	2,446	2,452
F	Kadar air = N %	2,46	3,66	5,05	6,13	7,12
G	Kepadatan kering = $\frac{E \cdot 100}{100 + N}$ gr/cm ³	2,279	2,304	2,316	2,305	2,289

H	Nomor cawan	A	B	C	D	E
I	Berat cawan + contoh basah gram	74,20	58,59	53,23	52,72	57,38
J	Berat cawan + contoh kering gram	72,65	56,86	51,13	50,23	54,20
K	Berat cawan gram	9,68	9,62	9,54	9,58	9,52
L	Berat air = I - J gram	1,55	1,73	2,10	2,49	3,18
M	Berat contoh kering = J - K gram	62,97	47,24	41,59	40,65	44,68
N	Kadar air = $\frac{L \cdot 100}{M}$ %	2,46	3,66	5,05	6,13	7,12
	Kadar air rata-rata %	2,46	3,66	5,05	6,13	7,12



Berat isi kering maksimum	2,315 gr/cm ³
Kadar air optimum	= 4,95 %

Lampiran 14 Hasil Uji CBR 0% Slag Nikel Sampel 1



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR	DIKERJAKAN	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	DIHTITUNG	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
No. Contoh	: 0% SLAG NIKEL	DIPERIKSA	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: SAMPEL 1	TANGGAL	: 15 JULI 2025

PERCOBAAN CBR LABORATORIUM

SNI - 03 - 1744 - 2012

Pengujian Kepadatan	: Standard/Modified
Kadar air yang dikehendaki	: 7,65 %
Berat isi yang dikehendaki	: 2,201 gr/cm ³

PENGEMBANGAN UNTUK SAMPEL YANG DIRENDAM

Tanggal				
Jam				
Pemb. Dial				
Swell (%)				

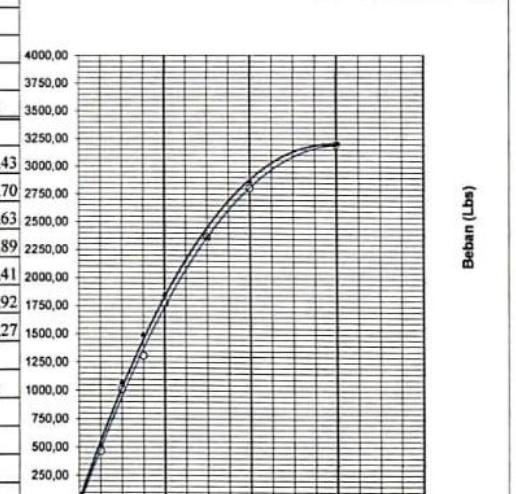
KEPADATAN	Sebelum	Sesudah
Berat tanah + cetakan	Gr	9180,00
Berat cetakan	Gr	3961,00
Berat tanah basah	Gr	5219,00
Isi contoh	cm ³	2202,14
Berat isi basah	Gr/cm ³	2,370
Berat isi kering	Gr/cm ³	2,201

Tinggi Sampel Awal =

KALIBRASI PROVING RING : 8,4586 Lbs/Div

Time (min)	Pen (inch)	Dial beban		Beban (Lbs)	
		Atas	Bawah	Atas	Bawah
0	0	0	0	0,00	0,00
0,5	0,025	55	62	465,22	524,43
1	0,05	120	128	1.015,03	1.082,70
1,5	0,075	155	178	1.311,08	1.505,63
2	0,1	210	220	1.776,31	1.860,89
3	0,15	280	280	2.368,41	2.368,41
4	0,2	332	340	2.808,26	2.875,92
5	0,3	378	380	3.197,35	3.214,27

Pengujian Kadar Air	Sebelum		Sesudah
	A	B	
Cawan + Tanah basah	Gram	54,74	
Cawan + Tanah kering	Gram	51,60	
Berat air	Gram	3,15	
Berat cawan	Gram	10,51	
Berat tanah kering	Gram	41,09	
Kadar air	%	7,65	



PENETRASI	0,1 Inch	0,2 Inch
NILAI Atas	58,33	63,33
CBR (%) Bawah	61,67	64,44

Lampiran 15 Hasil Uji CBR 0% *Slag Nikel Sampel 2*



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR	DIKERJAKAN	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	DIHITUNG	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
No. Contoh	: 0% SLAG NIKEL	DIPERIKSA	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: SAMPEL 2	TANGGAL	: 15 JULI 2025

PERCOBAAN CBR LABORATORIUM

SNI - 03 - 1744 - 2012

Pengujian Kepadatan	: Standard/Modified
Kadar air yang dikehendaki	: 7,65 %
Berat isi yang dikehendaki	: 2,201 gr/cm ³

PENGEMBANGAN UNTUK SAMPEL YANG DIRENDAM

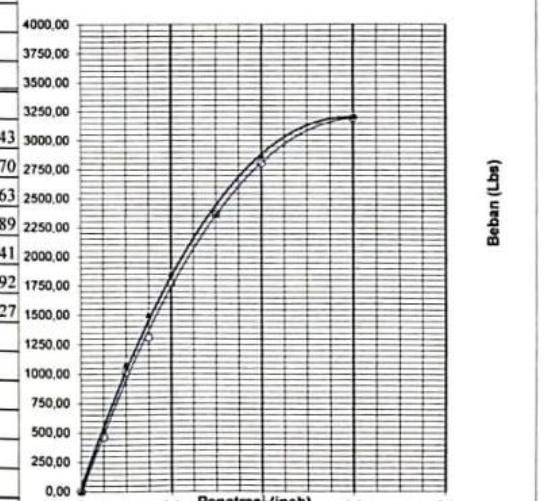
Tanggal				
Jam				
Pemb. Dial				
Swell (%)				

KEPADATAN	Sebelum	Sesudah
Berat tanah + cetakan	Gr	9240,00
Berat cetakan	Gr	4021,00
Berat tanah basah	Gr	5219,00
Isi contoh	cm ³	2202,14
Berat isi basah	Gr/cm ³	2,370
Berat isi kering	Gr/cm ³	2,201

Tinggi Sampel Awal =

KALIBRASI PROVING RING : 8,4586 Lbs/Div

Time (min)	Pen (inch)	Dial beban		Beban (Lbs)	
		Atas	Bawah	Atas	Bawah
0	0	0	0	0,00	0,00
0,5	0,025	55	62	465,22	524,43
1	0,05	120	128	1.015,03	1.082,70
1,5	0,075	155	178	1.311,08	1.505,63
2	0,1	210	220	1.776,31	1.860,89
3	0,15	280	280	2.368,41	2.368,41
4	0,2	332	340	2.808,26	2.875,92
5	0,3	378	380	3.197,35	3.214,27



Pengujian Kadar Air	Sebelum		Sesudah	
	A	B		
Cawan + Tanah basah	Gram	54,74		
Cawan + Tanah kering	Gram	51,60		
Berat air	Gram	3,15		
Berat cawan	Gram	10,51		
Berat tanah kering	Gram	41,09		
Kadar air	%	7,65		

PENETRASI		0,1 Inch	0,2 Inch
NILAI	Atas	58,33	62,22
CBR (%)	Bawah	61,67	64,44

Lampiran 16 Hasil Uji CBR 15% Slag Nikel Sampel 1



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR	DIKERJAKAN	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	DIHITUNG	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
No. Contoh	: 15% SLAG NIKEL	DIPERIKSA	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: SAMPEL 1	TANGGAL	: 15 JULI 2025

PERCOBAAN CBR LABORATORIUM
SNI - 03 - 1744 - 2012

Pengujian Kepadatan	: Standard/Modified
Kadar air yang dikehendaki	: 6,95 %
Berat isi yang dikehendaki	: 2,214 gr/cm ³

PENGEMBANGAN UNTUK SAMPEL YANG DIRENDAM

Tanggal				
Jam				
Pemb. Dial				
Swell (%)				

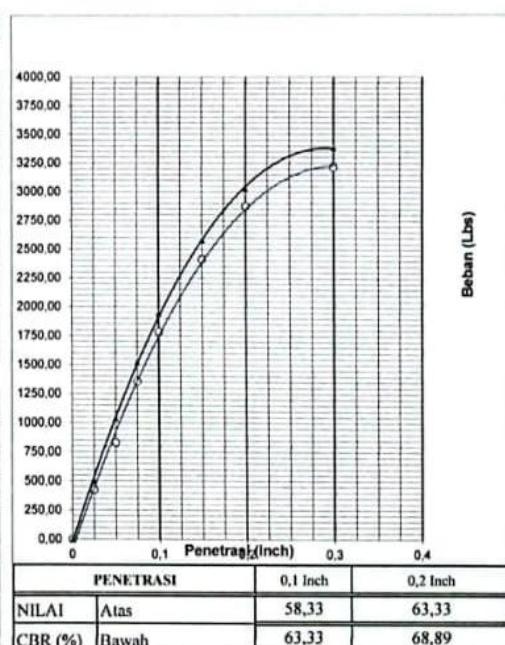
KEPADATAN	Sebelum	Sesudah
Berat tanah + cetakan	Gr	9043,00
Berat cetakan	Gr	4018,00
Berat tanah basah	Gr	5025,00
Isi contoh	cm ³	2122,23
Berat isi basah	Gr/cm ³	2,368
Berat isi kering	Gr/cm ³	2,214

Tinggi Sampel Awal =

KALIBRASI PROVING RING : 8.4586 Lbs/Div

Time (min)	Pen (inch)	Dial beban		Beban (Lbs)	
		Atas	Bawah	Atas	Bawah
0	0	0	0	0,00	0,00
0,5	0,025	50	59	422,93	499,06
1	0,05	98	123	828,94	1.040,41
1,5	0,075	160	180	1.353,38	1.522,55
2	0,1	211	230	1.784,76	1.945,48
3	0,15	285	305	2.410,70	2.579,87
4	0,2	340	358	2.875,92	3.028,18
5	0,3	380	400	3.214,27	3.383,44

Pengujian Kadar Air	Sebelum		Sesudah	
	A	B		
Cawan + Tanah basah	Gram	54,74		
Cawan + Tanah kering	Gram	51,86		
Berat air	Gram	2,89		
Berat cawan	Gram	10,32		
Berat tanah kering	Gram	41,54		
Kadar air	%	6,95		



Lampiran 17 Hasil Uji CBR 15% Slag Nikel Sampel 2



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR	DIKERJAKAN	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	DIHITUNG	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
No. Contoh	: 15% SLAG NIKEL	DIPERUKSA	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: SAMPEL 2	TANGGAL	: 15 JULI 2025

PERCOBAAN CBR LABORATORIUM

SNI - 03 - 1744 - 2012

Pengujian Kepadatan	: Standard/Modified
Kadar air yang dikehendaki	: 6,95 %
Berat isi yang dikehendaki	: 2,214 gr/cm ³

PENGEMBANGAN UNTUK SAMPEL YANG DIRENDAM

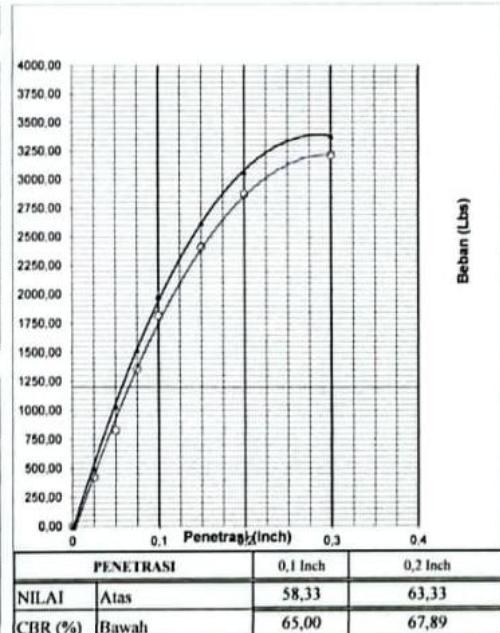
Tanggal				
Jam				
Pemb. Dial				
Swell (%)				

KEPADATAN	Sebelum	Sesudah
Berat tanah + cetakan	Gr	9041,00
Berat cetakan	Gr	4015,00
Berat tanah basah	Gr	5026,00
Isi contoh	cm ³	2122,23
Berat isi basah	Gr/cm ³	2,368
Berat isi kering	Gr/cm ³	2,214

Tinggi Sampel Awal =

KALIBRASI PROVING RING : 8,4586 Lbs/Div

Time (min)	Pen (inch)	Dial beban		Beban (Lbs)	
		Atas	Bawah	Atas	Bawah
0	0	0	0	0,00	0,00
0,5	0,025	50	59	422,93	499,06
1	0,05	98	123	828,94	1.040,41
1,5	0,075	160	180	1.353,38	1.522,55
2	0,1	215	235	1.818,60	1.987,77
3	0,15	285	310	2.410,70	2.622,17
4	0,2	340	363	2.875,92	3.070,47
5	0,3	380	400	3.214,27	3.383,44



Pengujian Kadar Air	Sebelum		Sesudah	
	A	B		
Cawan + Tanah basah	Gram	54,74		
Cawan + Tanah kering	Gram	51,86		
Berat air	Gram	2,89		
Berat cawan	Gram	10,32		
Berat tanah kering	Gram	41,54		
Kadar air	%	6,95		

Lampiran 18 Hasil Uji CBR 30% Slag Nikel Sampel 1



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR	DIKERJAKAN	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	DIHITUNG	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
No. Contoh	: 30% SLAG NIKEL	DIPERIKSA	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: SAMPEL 1	TANGGAL	: 16 JULI 2025

PERCOBAAN CBR LABORATORIUM
SNI - 03 - 1744 - 2012

Pengujian Kepadatan : Standard/Modified
Kadar air yang dikehendaki : 6,40 %
Berat isi yang dikehendaki : 2,249 gr/cm³

PENGEMBANGAN UNTUK SAMPEL YANG DIRENDAM

Tanggal				
Jam				
Pemb. Dial				
Swell (%)				

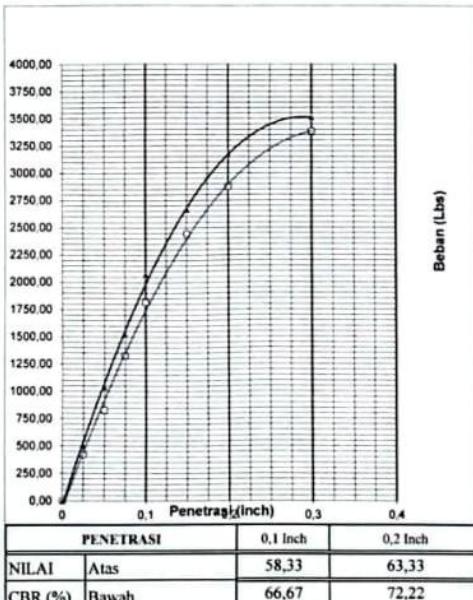
KEPADATAN		Sebelum	Sesudah
Berat tanah + cetakan	Gr	9105,00	
Berat cetakan	Gr	4021,00	
Berat tanah basah	Gr	5084,00	
Isi contoh	cm ³	2122,23	
Berat isi basah	Gr/cm ³	2,396	
Berat isi kering	Gr/cm ³	2,251	

Tinggi Sampel Awal =

KALIBRASI PROVING RING : 8.4586 Lbs/Div

Time (min)	Pen (inch)	Dial beban		Beban (Lbs)	
		Atas	Bawah	Atas	Bawah
0	0	0	0	0,00	0,00
0,5	0,025	50	59	422,93	499,06
1	0,05	98	123	828,94	1.040,41
1,5	0,075	157	180	1.328,00	1.522,55
2	0,1	215	245	1.818,60	2.072,36
3	0,15	289	315	2.444,54	2.664,46
4	0,2	340	375	2.875,92	3.171,98
5	0,3	400	415	3.383,44	3.510,32

Pengujian Kadar Air	Sebelum		Sesudah	
	A	B		
Cawan + Tanah basah	Gram	64,52		
Cawan + Tanah kering	Gram	61,27		
Berat air	Gram	3,25		
Berat cawan	Gram	10,51		
Berat tanah kering	Gram	50,76		
Kadar air	%	6,40		



Lampiran 19 Hasil Uji CBR 30% Slag Nikel Sampel 2



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR.	DIKERJAKAN	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	DIHITUNG	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
No. Contoh	: 30% SLAG NIKEL	DIPERIKSA	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: SAMPEL 2	TANGGAL	: 16 JULI 2025

PERCOBAAN CBR LABORATORIUM
SNI - 03 - 1744 - 2012

Pengujian Kepadatan	: Standard/Modified
Kadar air yang dikehendaki	: 6,40 %
Berat isi yang dikehendaki	: 2,249 gr/cm ³

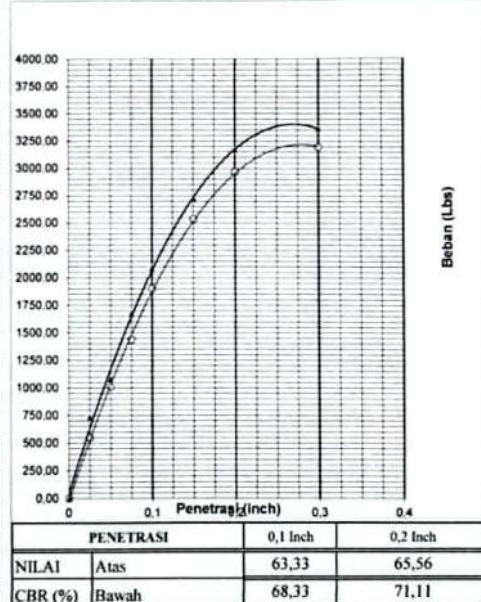
PENGEMBANGAN UNTUK SAMPEL YANG DIRENDAM				
Tanggal				
Jam				
Pemb. Dial				
Swell (%)				

Tinggi Sampel Awal =
KALIBRASI PROVING RING : 8,4586 Lbs/Div

Time (min)	Pen (inch)	Dial beban		Beban (Lbs)	
		Atas	Bawah	Atas	Bawah
0	0	0	0	0,00	0,00
0,5	0,025	65	87	549,81	735,90
1	0,05	120	128	1.015,03	1.082,70
1,5	0,075	170	198	1.437,96	1.674,80
2	0,1	225	247	1.903,19	2.089,27
3	0,15	300	322	2.537,58	2.723,67
4	0,2	351	375	2.968,97	3.171,98
5	0,3	378	398	3.197,35	3.366,52

Pengujian Kadar Air	Sebelum		Sesudah	
	A	B		
Cawan + Tanah basah	Gram	54,74		
Cawan + Tanah kering	Gram	51,95		
Berat air	Gram	2,80		
Berat cawan	Gram	10,51		
Berat tanah kering	Gram	41,44		
Kadar air	%	6,75		

KEPADATAN	Sebelum	Sesudah
Berat tanah + cetakan	Gr	9105,00
Berat cetakan	Gr	4021,00
Berat tanah basah	Gr	5084,00
Isi contoh	cm ³	2122,23
Berat isi basah	Gr/cm ³	2,396
Berat isi kering	Gr/cm ³	2,244



Lampiran 20 Hasil Uji CBR 45% Slag Nikel Sampel 1



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR	DIKERJAKAN	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	DIHITUNG	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
No. Contoh	: 45% SLAG NIKEL	DIPERIKSA	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: SAMPEL 1	TANGGAL	: 16 JULI 2025

PERCOBAAN CBR LABORATORIUM
SNI - 03 - 1744 - 2012

Pengujian Kepadatan : Standard/Modified
 Kadar air yang dikehendaki : 6,05 %
 Berat isi yang dikehendaki : 2,260 gr/cm³

PENGEMBANGAN UNTUK SAMPEL YANG DIRENDAM

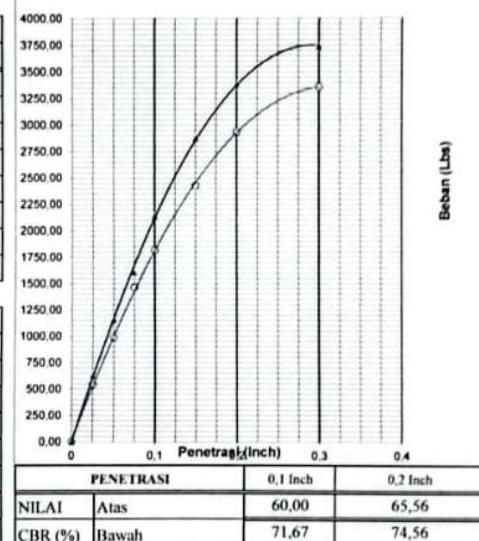
Tanggal				
Jam				
Pemb. Dial				
Swell (%)				

KEPADATAN	Sebelum	Sesudah
Berat tanah + cetakan Gr	9106,00	
Berat cetakan Gr	4020,00	
Berat tanah basah Gr	5086,00	
Isi contoh cm ³	2122,23	
Berat isi basah Gr/cm ³	2,397	
Berat isi kering Gr/cm ³	2,260	

Tinggi Sampel Awal =

KALIBRASI PROVING RING : 8,4586 Lbs/Div

Time (min)	Pen (inch)	Dial beban		Beban (Lbs)	
		Atas	Bawah	Atas	Bawah
0	0	0	0	0,00	0,00
0,5	0,025	64	74	541,35	625,94
1	0,05	117	137	989,66	1.158,83
1,5	0,075	173	190	1.463,34	1.607,13
2	0,1	215	253	1.818,60	2.140,03
3	0,15	287	340	2.427,62	2.875,92
4	0,2	347	400	2.935,13	3.383,44
5	0,3	397	442	3.358,06	3.738,70



Pengujian Kadar Air	Sebelum		Sesudah	
	A	B		
Cawan + Tanah basah Gram	55,74			
Cawan + Tanah kering Gram	53,22			
Berat air Gram	2,53			
Berat cawan Gram	11,51			
Berat tanah kering Gram	41,71			
Kadar air %	6,05			

Lampiran 21 Hasil Uji CBR 45% Slag Nikel Sampel 2



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR	DIKERJAKAN	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	DIHITUNG	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
No. Contoh	: 45% SLAG NIKEL	DIPERIKSA	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: SAMPEL 2	TANGGAL	: 16 JULI 2025

PERCOBAAN CBR LABORATORIUM
SNI - 03 - 1744 - 2012

Pengujian Kepadatan	: Standard/Modified
Kadar air yang dikehendaki	: 6,05 %
Berat isi yang dikehendaki	: 2,260 gr/cm ³

PENGEMBANGAN UNTUK SAMPEL YANG DIRENDAM				
Tanggal				
Jam				
Pemb. Dial				
Swell (%)				

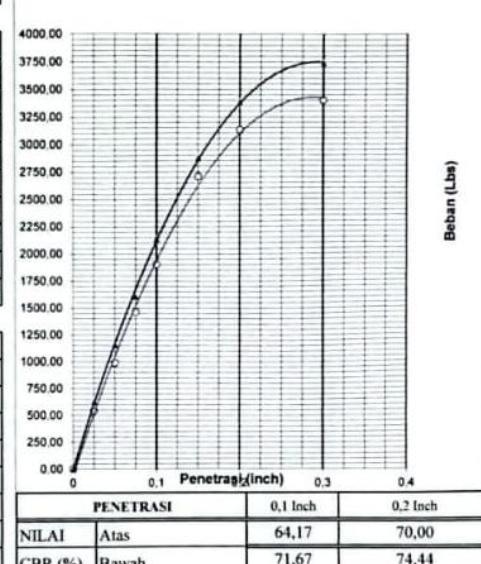
KEPADATAN	Sebelum	Sesudah
Berat tanah + cetakan Gr	9106,00	
Berat cetakan Gr	4020,00	
Berat tanah basah Gr	5086,00	
Isi contoh cm ³	2122,23	
Berat isi basah Gr/cm ³	2,397	
Berat isi kering Gr/cm ³	2,260	

Tinggi Sampel Awal =

KALIBRASI PROVING RING : 8,4586 Lbs/Div

Time (min)	Pen (inch)	Dial beban		Beban (Lbs)	
		Atas	Bawah	Atas	Bawah
0	0	0	0	0,00	0,00
0,5	0,025	64	74	541,35	625,94
1	0,05	117	137	989,66	1.158,83
1,5	0,075	173	190	1.463,34	1.607,13
2	0,1	225	253	1.903,19	2.140,03
3	0,15	320	340	2.706,75	2.875,92
4	0,2	370	400	3.129,68	3.383,44
5	0,3	402	442	3.400,36	3.738,70

Pengujian Kadar Air	Sebelum		Sesudah	
	A	B		
Cawan + Tanah basah Gram	54,74			
Cawan + Tanah kering Gram	52,22			
Berat air Gram	2,53			
Berat cawan Gram	10,51			
Berat tanah kering Gram	41,71			
Kadar air %	6,05			



Lampiran 22 Hasil Uji CBR 60% Slag Nikel Sampel 1



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR	DIKERJAKAN	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	DIHITUNG	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
No. Contoh	: 60% SLAG NIKEL	DIPERIKSA	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: SAMPEL 1	TANGGAL	: 17 JULI 2025

PERCOBAAN CBR LABORATORIUM
SNI - 03 - 1744 - 2012

Pengujian Kepadatan : Standard/Modified
Kadar air yang dikehendaki : 5,75 %
Berat isi yang dikehendaki : 2,270 gr/cm³

PENGEMBANGAN UNTUK SAMPEL YANG DIRENDAM

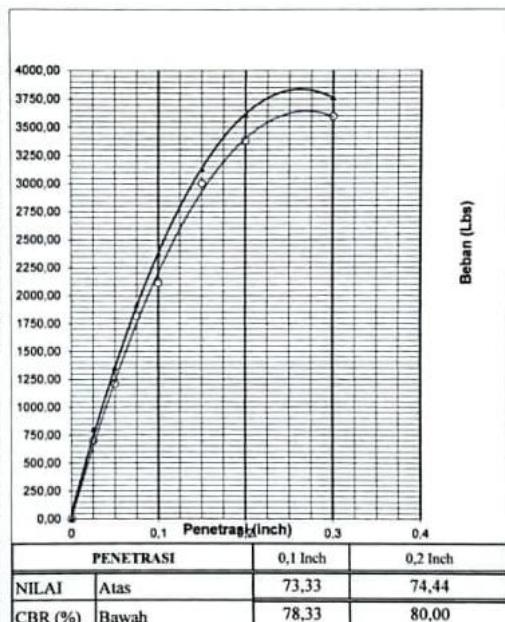
Tanggal				
Jam				
Pemb. Dial				
Swell (%)				

KEPADATAN	Sebelum	Sesudah
Berat tanah + cetakan Gr	9115,00	
Berat cetakan Gr	4021,00	
Berat tanah basah Gr	5094,00	
Isi contoh cm ³	2122,23	
Berat isi basah Gr/cm ³	2,400	
Berat isi kering Gr/cm ³	2,270	

Tinggi Sampel Awal =

KALIBRASI PROVING RING : 8,4586 Lbs/Div

Time (min)	Pen (inch)	Dial beban		Beban (Lbs)	
		Atas	Bawah	Atas	Bawah
0	0	0	0	0,00	0,00
0,5	0,025	83	95	702,06	803,57
1	0,05	143	160	1.209,58	1.353,38
1,5	0,075	215	227	1.818,60	1.920,10
2	0,1	250	281	2.114,65	2.376,87
3	0,15	355	370	3.002,80	3.129,68
4	0,2	400	427	3.383,44	3.611,82
5	0,3	425	445	3.594,91	3.764,08



Pengujian Kadar Air	Sebelum		Sesudah	
	A	B		
Cawan + Tanah basah Gram	54,74			
Cawan + Tanah kering Gram	52,34			
Berat air Gram	2,41			
Berat cawan Gram	10,51			
Berat tanah kering Gram	41,83			
Kadar air %	5,75			

Lampiran 23 Hasil Uji CBR 60% Slag Nikel Sampel 2



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR	DIKERJAKAN	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	DIHITUNG	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
No. Contoh	: 60% SLAG NIKEL	DIPERIKSA	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: SAMPEL 2	TANGGAL	: 17 JULI 2025

PERCOBAAN CBR LABORATORIUM

SNI - 03 - 1744 - 2012

Pengujian Kepadatan	: Standard/Modified
Kadar air yang dikehendaki	: 5,75 %
Berat isi yang dikehendaki	: 2,270 gr/cm ³

PENGEMBANGAN UNTUK SAMPEL YANG DIRENDAM				
Tanggal				
Jam				
Pemb. Dial				
Swell (%)				

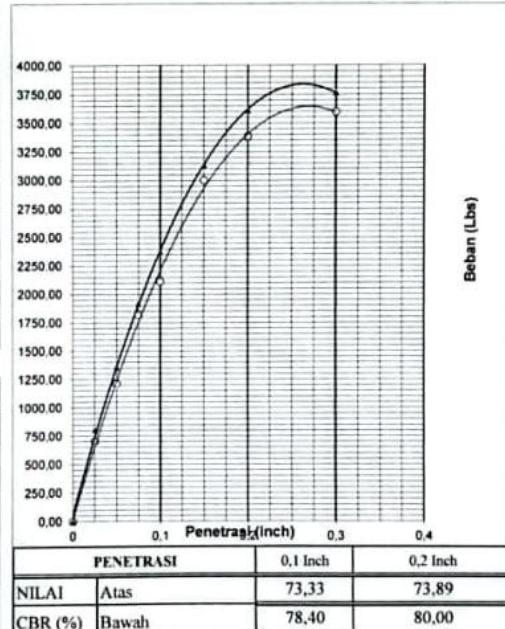
KEPADATAN	Sebelum	Sesudah
Berat tanah + cetakan	Gr	9115,00
Berat cetakan	Gr	4021,00
Berat tanah basah	Gr	5094,00
Isi contoh	cm ³	2122,23
Berat isi basah	Gr/cm ³	2,400
Berat isi kering	Gr/cm ³	2,270

Tinggi Sampel Awal =

KALIBRASI PROVING RING : 8,4586 Lbs/Div

Time (min)	Pen (inch)	Dial beban		Beban (Lbs)	
		Atas	Bawah	Atas	Bawah
0	0	0	0	0,00	0,00
0,5	0,025	83	95	702,06	803,57
1	0,05	143	160	1.209,58	1.353,38
1,5	0,075	215	227	1.818,60	1.920,10
2	0,1	250	281	2.114,65	2.376,87
3	0,15	355	370	3.002,80	3.129,68
4	0,2	400	427	3.383,44	3.611,82
5	0,3	425	445	3.594,91	3.764,08

Pengujian Kadar Air	Sebelum		Sesudah
	A	B	
Cawan + Tanah basah	Gram	54,74	
Cawan + Tanah kering	Gram	52,34	
Berat air	Gram	2,41	
Berat cawan	Gram	10,51	
Berat tanah kering	Gram	41,83	
Kadar air	%	5,75	



Lampiran 24 Hasil Uji CBR 75% Slag Nikel Sampel 1



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR	DIKERJAKAN	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	DIHITUNG	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
No. Contoh	: 75% SLAG NIKEL	DIPERIKSA	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: SAMPEL 1	TANGGAL	: 17 JULI 2025

PERCOBAAN CBR LABORATORIUM

SNI - 03 - 1744 - 2012

Pengujian Kepadatan	-Standard/Modified
Kadar air yang dikehendaki	: 5,50 %
Berat isi yang dikehendaki	: 2,286 gr/cm ³

PENGEMBANGAN UNTUK SAMPEL YANG DIRENDAM

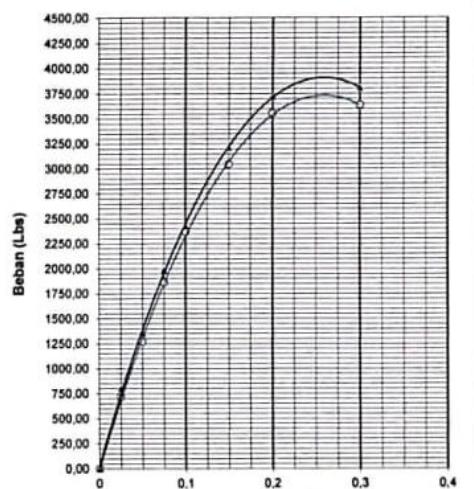
Tanggal				
Jam				
Pemb. Dial				
Swell (%)				

KEPADATAN	Sebelum	Sesudah
Berat tanah + cetakan	Gr	9132,00
Berat cetakan	Gr	4015,00
Berat tanah basah	Gr	5117,00
Isi contoh	cm ³	2122,23
Berat isi basah	Gr/cm ³	2,411
Berat isi kering	Gr/cm ³	2,286

Tinggi Sampel Awal =

KALIBRASI PROVING RING : 8,4586 Lbs/Div

Time (min)	Pen (inch)	Dial beban		Beban (Lbs)	
		Atas	Bawah	Atas	Bawah
0	0	0	0	0,00	0,00
0,5	0,025	85	95	718,98	803,57
1	0,05	150	160	1.268,79	1.353,38
1,5	0,075	220	235	1.860,89	1.987,77
2	0,1	280	287	2.368,41	2.427,62
3	0,15	360	380	3.045,10	3.214,27
4	0,2	420	440	3.552,61	3.721,78
5	0,3	430	450	3.637,20	3.806,37



Pengujian Kadar Air	Sebelum		Sesudah	
	A	B		
Cawan + Tanah basah	Gram	75,45		
Cawan + Tanah kering	Gram	72,02		
Berat air	Gram	3,43		
Berat cawan	Gram	9,60		
Berat tanah kering	Gram	62,42		
Kadar air	%	5,50		

PENETRASI	0,1 Inch	0,2 Inch
NILAI Atas	76,67	77,78
CBR (%) Bawah	81,67	82,22

Lampiran 25 Hasil Uji CBR 75% Slag Nikel Sampel 2



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR	DIKERJAKAN	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	DIHITUNG	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
No. Contoh	: 75% SLAG NIKEL	DIPERIKSA	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: SAMPEL 2	TANGGAL	: 17 JULI 2025

PERCOBAAN CBR LABORATORIUM

SNI - 03 - 1744 - 2012

Pengujian Kepadatan	: Standard/Modified
Kadar air yang dikehendaki	: 5,50 %
Berat isi yang dikehendaki	: 2,286 gr/cm ³

PENGEMBANGAN UNTUK SAMPEL YANG DIRENDAM

Tanggal				
Jam				
Pemb. Dial				
Swell (%)				

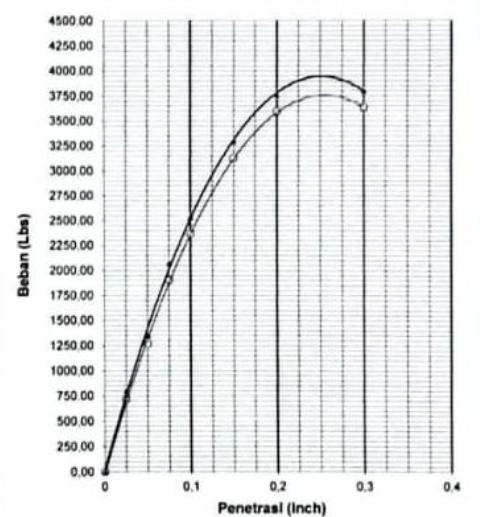
KEPADATAN	Sebelum	Sesudah
Berat tanah + cetakan	Gr	9132,00
Berat cetakan	Gr	4015,00
Berat tanah basah	Gr	5117,00
Isi contoh	cm ³	2122,23
Berat isi basah	Gr/cm ³	2,411
Berat isi kering	Gr/cm ³	2,286

Tinggi Sampel Awal =

KALIBRASI PROVING RING : 8,4586 Lbs/Div

Time (min)	Pen (inch)	Dial beban		Beban (Lbs)	
		Atas	Bawah	Atas	Bawah
0	0	0	0	0,00	0,00
0,5	0,025	85	95	718,98	803,57
1	0,05	150	160	1.268,79	1.353,38
1,5	0,075	225	245	1.903,19	2.072,36
2	0,1	280	300	2.368,41	2.537,58
3	0,15	370	390	3.129,68	3.298,85
4	0,2	425	445	3.594,91	3.764,08
5	0,3	430	450	3.637,20	3.806,37

Pengujian Kadar Air		Sebelum	Sesudah
		A	B
Cawan + Tanah basah	Gram	75,45	
Cawan + Tanah kering	Gram	72,02	
Berat air	Gram	3,43	
Berat cawan	Gram	9,60	
Berat tanah kering	Gram	62,42	
Kadar air	%	5,50	



PENETRASI	0,1 Inch	0,2 Inch
NILAI Atas	78,50	79,00
CBR (%) Bawah	84,17	84,44

Lampiran 26 Hasil Uji CBR 100% Slag Nikel Sampel 1



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR	DIKERJAKAN	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	DIHITUNG	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
No. Contoh	: 100% SLAG NIKEL	DIPERIKSA	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: SAMPEL 1	TANGGAL	: 17 JULI 2025

PERCOBAAN CBR LABORATORIUM
SNI - 03 - 1744 - 2012

Pengujian Kepadatan	: Standard/Modified
Kadar air yang dikehendaki	: 4,95 %
Berat isi yang dikehendaki	: 2,315 gr/cm ³

PENGEMBANGAN UNTUK SAMPEL YANG DIRENDAM

Tanggal				
Jam				
Pemb. Dial				
Swell (%)				

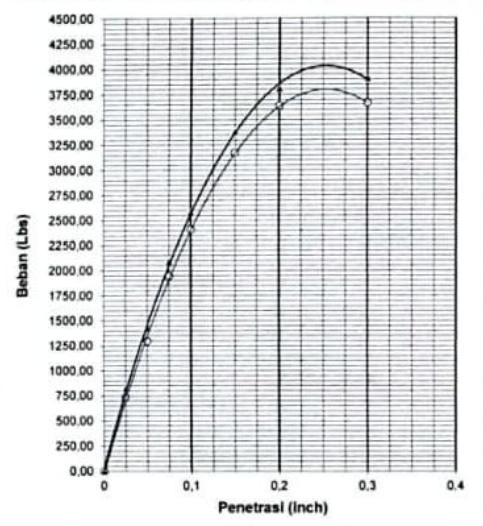
Tinggi Sampel Awal =

KALIBRASI PROVING RING : 8,4586 Lbs/Div

Time (min)	Pen (inch)	Dial beban		Beban (Lbs)	
		Atas	Bawah	Atas	Bawah
0	0	0	0	0,00	0,00
0,5	0,025	87	97	735,90	820,48
1	0,05	153	169	1.294,17	1.429,50
1,5	0,075	230	247	1.945,48	2.089,27
2	0,1	285	305	2.410,70	2.579,87
3	0,15	375	400	3.171,98	3.383,44
4	0,2	430	450	3.637,20	3.806,37
5	0,3	433	462	3.662,57	3.907,87

Pengujian Kadar Air	Sebelum		Sesudah
	A	B	
Cawan + Tanah basah	Gram	76,56	
Cawan + Tanah kering	Gram	73,40	
Berat air	Gram	3,16	
Berat cawan	Gram	9,60	
Berat tanah kering	Gram	63,80	
Kadar air	%	4,95	

KEPADATAN	Sebelum	Sesudah
Berat tanah + cetakan	Gr	9194,00
Berat cetakan	Gr	4011,00
Berat tanah basah	Gr	5183,00
Isi contoh	cm ³	2122,23
Berat isi basah	Gr/cm ³	2,442
Berat isi kering	Gr/cm ³	2,327



PENETRASI	0,1 Inch	0,2 Inch
NILAI	Atas	81,67
CBR (%)	Bawah	85,56

Lampiran 27 Hasil Uji CBR 100% Slag Nikel Sampel 2



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TADULAKO
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu Telp. 422611 Psw 166

Pekerjaan	: PENELITIAN TUGAS AKHIR.	DIKERJAKAN	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
Lokasi	: LAB. MEKANIKA TANAH FATEK UNTAD	DIHITUNG	: MAISARAH AZ ZAHRA / F 111 21 029
No. Contoh	: 100% SLAG NIKEL	DIPERIKSA	: Ir. IMRAN, ST., MT
Ked. Sampel	: SAMPEL 2	TANGGAL	: 17 JULI 2025

PERCOBAAN CBR LABORATORIUM
SNI - 03 - 1744 - 2012

Pengujian Kepadatan : Standard/Modified
Kadar air yang dikehendaki : 4,95 %
Berat isi yang dikehendaki : 2,315 gr/cm³

PENGEMBANGAN UNTUK SAMPEL YANG DIRENDAM

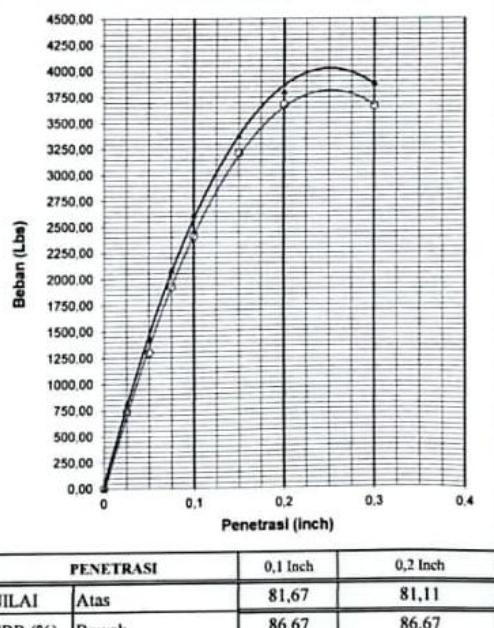
Tanggal				
Jam				
Pemb. Dial				
Swell (%)				

KEPADATAN	Sebelum	Sesudah
Berat tanah + cetakan	Gr	9194,00
Berat cetakan	Gr	4011,00
Berat tanah basah	Gr	5183,00
Isi contoh	cm ³	2122,23
Berat isi basah	Gr/cm ³	2,442
Berat isi kering	Gr/cm ³	2,327

Tinggi Sampel Awal =

KALIBRASI PROVING RING : 8,4586 Lbs/Div

Time (min)	Pen (inch)	Dial beban		Beban (Lbs)	
		Atas	Bawah	Atas	Bawah
0	0	0	0	0,00	0,00
0,5	0,025	87	97	735,90	820,48
1	0,05	153	170	1.294,17	1.437,96
1,5	0,075	227	247	1.920,10	2.089,27
2	0,1	285	310	2.410,70	2.622,17
3	0,15	380	400	3.214,27	3.383,44
4	0,2	435	450	3.679,49	3.806,37
5	0,3	433	460	3.662,57	3.890,96



Pengujian Kadar Air	Sebelum		Sesudah	
	A	B		
Cawan + Tanah basah	Gram	76,56		
Cawan + Tanah kering	Gram	73,40		
Berat air	Gram	3,16		
Berat cawan	Gram	9,60		
Berat tanah kering	Gram	63,80		
Kadar air	%	4,95		

PENETRASI	0,1 Inch	0,2 Inch
Nilai Atas	81,67	81,11
CBR (%) Bawah	86,67	86,67

Lampiran 28 Dokumentasi Pengambilan Material Agregat Alam



Lampiran 29 Dokumentasi Pengambilan Material *Slag Nickel*



Lampiran 30 Dokumentasi Pengujian Material



Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan



Pengujian Analisa Saringan

Lampiran 31 Dokumentasi Pengujian Material



Pengujian Abrasi

Lampiran 32 Dokumentasi Pengujian *Modified Proctor* dan *CBR Unsoaked*

