

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah merupakan material dasar yang sangat penting karena merupakan dasar dimana struktur akan didirikan seperti pondasi bangunan, jalan raya, bendungan, tanggul dan lain-lain. Kerusakan yang terjadi pada jalan dan gedung, seperti terangkat atau turunnya suatu pondasi, keretakan dinding bangunan, dan bergelombangnya permukaan jalan, disebabkan oleh permasalahan pada tanah yang ada di bawah struktur suatu bangunan.

Permasalahan tanah ini tidak hanya terbatas pada penurunan (*settlement*) saja tetapi mencakup secara menyeluruh, seperti penyusutan dan pengembangan tanah. Oleh karena itu sifat teknis yang berkaitan dengan tanah dasar harus diperhatikan agar suatu struktur yang dibangun diatasnya dapat stabil terhadap pengaruh tanah. Beberapa jenis tanah memerlukan penanganan khusus untuk dapat dijadikan sebagai dasar konstruksi, salah satunya adalah tanah lempung ekspansif. Disebut demikian karena tanah jenis ini umumnya mempunyai fluktuasi kembang susut yang tinggi dan mengandung mineral yang mempunyai potensi mengembang (*swelling potential*) yang tinggi bila terkena air. Sehingga diperlukan penanganan khusus untuk menanggulangi pada masalah-masalah yang nantinya akan timbul apabila bangunan atau jalan terletak diatas tanah lempung ekspansif (Gunarso dkk, 2017).

Setiap pekerjaan teknik sipil tidak lepas dengan aspek yang paling penting yaitu tanah. Sejumlah masalah dengan bangunan teknik sipil yang sering dijumpai di lapangan adalah akibat dari sifat-sifat teknis tanah yang buruk, yang ditandai dengan kadar air tanah yang tinggi, kompreibilitas yang besar dan daya dukung yang rendah. Sebagian dari jenis tanah yang memiliki sifat buruk tersebut adalah tanah yang mudah mengalami kembang susut besar. *Swelling volumetrik* (3D) yang besar pada tanah lempung ekspansif tersebut sangat membahayakan bangunan ringan dan jalan raya. Metode perbaikan atau stabilisasi selama ini baru dilakukan pada *swelling vertical* (1D). Guna mendapatkan hasil yang optimal pada stabilisasi tanah lempung ekspansif maka harus diketahui bagaimana penggunaan bahan aditif yang mengandung silika (Si) terhadap perilaku *swelling* 3 dimensi. Dengan demikian kembang diasumsikan terjadi hanya pada arah vertikal saja. Kondisi ini agak berbeda dengan banyak kejadian di lapangan, tanah yang mengembang adalah tanah yang sudah menyusut sebelumnya. Pada tanah yang telah menyusut tersebut menjadi retak-retak akibat penyusutan 3 dimensi (Jorge Marcal dkk, 2022).

Tidak diketahui sejak kapan manusia mulai menggunakan tanah sebagai bangunan. Untuk beberapa lama pada mulanya seni rekayasa tanah hanya dilaksanakan berdasarkan pengalaman dimasa lalu saja. Tetapi dengan pertumbuhan ilmu pengetahuan dan teknologi, perancangan dan pelaksanaan struktur yang lebih baik dan lebih ekonomis menjadi diperlukan. Hal ini menyebabkan terjadinya studi yang lebih terperinci terhadap sifat dan kondisi dasar dari tanah

dalam hubungannya dengan ilmu teknik sipil pada abad kedua puluh. Dalam hubungannya dengan memikul beban diatasnya, secara ekonomis dan efisien dibutuhkan tanah yang daya dukung tinggi (Srihandayani, 2018).

Akan tetapi tidak semua tanah dimuka bumi ini mempunyai daya dukung seperti demikian. Untuk itu para ahli sipil berusaha merekayasa agar proyek pembangunan dapat dilaksanakan dengan kondisi tanah tersebut, dapat dijadikan pertimbangan untuk perencanaan selanjutnya. Kondisi tanah tidaklah selalu konstan. Terkadang tanah tersebut mengalami erosi, sedimentasi yang diantaranya disebabkan oleh keadaan cuaca yang dialaminya, tapi secara umum tanah dapat diklasifikasikan sesuai dengan sifat-sifat yang dimilikinya, dan penggolongan tanah didasarkan pada sifat-sifat tanah paling dominan yang dimiliki oleh tanah tersebut. Indonesia mempunyai iklim dan kondisi tanah yang dapat dikatakan mendukung adanya wilayah yang digolongkan mempunyai tanah sulit. Tanah sulit disini diartikan sebagai tanah sangat lunak organik atau gambut dan tanah lunak yang berpotensi mengembang tinggi (tanah ekspansif).

Melihat kondisi tersebut, untuk meningkatkan daya dukung tanah lempung tersebut digunakan metode perbaikan tanah yang pada saat ini adalah metode stabilisasi, dalam pengertian luas yang dimaksud stabilisasi adalah pencampuran tanah dengan bahan tertentu, guna memperbaiki sifat-sifat tanah, atau dapat pula stabilisasi tanah adalah usaha untuk merubah atau memperbaiki sifat-sifat teknis tanah agar memenuhi syarat teknis tertentu. Slag nikel adalah salah satu jenis sisa dari proses industri yaitu dari proses peleburan biji nikel setelah melalui proses pembakaran dan penyaringan. Sebagai limbah buangan hasil pengolahan biji nikel. Selama ini slag nikel hanya digunakan sebagai bahan timbunan oleh masyarakat yang dianggap sudah tidak memiliki manfaat lagi. Tetapi jika dilihat dari segi visual, bentuk fisik dari slag nikel menyerupai agregat baik yang halus menyerupai pasir sehingga bisa digunakan untuk bahan campuran tanah agar bisa diharapkan memperbaiki sifat-sifat teknis tanah menjadi lebih baik (Nepiawan dkk, 2023).

Tanah ekspansif dapat diidentifikasi di laboratorium untuk dilakukan beberapa pengujian, seperti *Atterberg Limit* dan *Grain Size Analysis*. Dari kedua percobaan tersebut kita akan mendapat *plasticity index*, *shrinkage limit*, dan nilai *activity*, nilai-nilai tersebut telah umum untuk menjadi potensi *swelling* (mengembang). Maka pengujian ini dilakukan untuk memudahkan menganalisis tanah ekspansif di daerah Jakarta dan sekitarnya dengan menambahkan butiran halus sebanyak 100%, 30:70%, 20:80% dan 50:50%. Pengujian tanah yang disimulasi di Laboratorium diuji kembali parameter *Index properties*, *Atterberg Limit*, dan *Sieve Analysis* (Levany dan Sentosa, 2024).

Pada umumnya yang disebut dengan lapisan tanah yang lunak adalah lempung atau lanau yang mempunyai nilai pengujian *standart penetration test* lebih kecil dari 4 atau tanah organis seperti gambut yang mempunyai kadar air alamiah yang sangat tinggi. Dilihat dari mineral pembentuknya, tanah lempung dapat dibagi menjadi tanah lempung ekspansif dan lempung non-ekspansif. Tanah lempung ekspansif tersusun dari mineral lempung yang mempunyai karakter kembang susut yang besar apabila

terjadi perubahan kadar air. Hal ini dikarenakan tanah ekspansif mengandung jenis-jenis material tertentu yang mengakibatkan tanah ekspansif (Gunarso dkk, 2017).

Berdasarkan latar belakang tersebut maka disusunlah tugas akhir dengan judul **“Evaluasi Nilai CBR Tanah Ekspansif Terstabilisasi Limbah Ferronikel”**.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh penambahan limbah ferronikel terhadap nilai CBR tanah ekspansif?
2. Berapa persentase optimal limbah ferronikel yang digunakan untuk stabilisasi tanah ekspansif?
3. Bagaimana perubahan sifat fisik dan mekanik tanah ekspansif setelah distabilisasi dengan limbah ferronikel?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengevaluasi perubahan nilai CBR tanah ekspansif yang distabilisasi menggunakan limbah ferronikel.
2. Menentukan persentase optimal limbah ferronikel untuk stabilisasi tanah ekspansif.
3. Menganalisis perubahan sifat fisik dan mekanik tanah ekspansif setelah stabilisasi dengan limbah ferronikel.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Memberikan solusi alternatif untuk stabilisasi tanah ekspansif menggunakan limbah industri.
2. Mengurangi dampak lingkungan dari limbah ferronikel dengan pemanfaatannya dalam konstruksi tanah.
3. Menyediakan data ilmiah yang dapat digunakan dalam proyek infrastruktur di daerah yang memiliki tanah ekspansif.

1.5 Ruang Lingkup

Untuk mempermudah pembahasan terkait dengan rumusan masalah yang diajukan serta mengurangi kerancuan dalam pengkajian masalah yang terkandung dalam penelitian tugas akhir ini (tidak meluas dan dapat terarah sesuai dengan tujuan dari pembuatan skripsi ini, maka pemasalahan yang dibahas dibatasi sebagai berikut:

1. Penelitian ini dilakukan secara experimental pada alat *California Bearing Ratio (CBR)* dan *Standart Proctor* di laboratorium Mekanika Tanah Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Penelitian ini akan memudahkan menganalisis tanah ekspansif di daerah Makassar dan sekitarnya dengan menambahkan butiran halus sebanyak 100%, 30:70%, 20:80% dan 50:50%. Pengujian tanah yang disimulasi di Laboratorium diuji kembali parameter *Index properties*, *Atterberg Limit*, dan *Sieve Analysis*.
3. Fokus utama penelitian ini adalah pada karakteristik aliran yang meliputi

kecepatan, bilangan Froude & bilangan Reynolds

4. Penelitian ini tidak mencakup analisis *plasticity index*, *shrinkage limit*, dan nilai *activity*, nilai-nilai tersebut telah umum untuk menjadi potensi *swelling* (mengembang).

1.6 Teori

1.6.1 Tanah Ekspansif

Tanah ekspansif menimbulkan tantangan yang signifikan dalam industri konstruksi karena kecenderungannya untuk mengalami perubahan volumetrik respon terhadap variasi kadar air. Tanah ini, umumnya ditemukan di daerah dengan kandungan tanah liat yang tinggi, akan mengembang jika terkena kelembapan dan menyusut saat kering, sehingga memberikan tekanan yang sangat besar pada sistem pondasi. Tekanan ini seringkali menyebabkan kerusakan struktural, membahayakan keselamatan dan stabilitas bangunan.

Dalam praktik geoteknik, berbagai metode telah digunakan untuk memitigasi atau menghilangkan risiko terjadinya gelombang besar pada struktur ringan dan perkerasan jalan. Metode-metode tersebut antara lain meliputi pengolahan tanah dekat pondasi dengan kapur dan semen, penggunaan teknik penggantian tanah, penggunaan tiang pancang dan tiang pancang dengan atau tanpa pembesaran dasar. Namun efektivitas metode ini dapat bervariasi tergantung pada wilayah geografis karena perbedaan kondisi lingkungan dan komposisi mineral. Terbukti, terlepas dari penelitian menyeluruh yang dilakukan oleh berbagai Lembaga sehubungan dengan stabilisasi tanah ekspansif, tidak ada penerapan di lapangan yang dapat diakui. Alasan utamanya adalah kenyataan bahwa sebagian besar formasi ekspansif adalah jenis batuan, sehingga sulit untuk menerapkan stabilisasi kimia (Abden et al., 2024).

Karena tanah ekspansif adalah jenis tanah liat khusus, berbagai jenis bahan tambahan digunakan untuk mengurangi sifat pembengkakannya dan untuk memperbaikinya perilaku mekanisnya, yang dikenal sebagai metode perbaikan kimia. Metode perbaikan kimia banyak digunakan untuk berbagai jenis tanah liat di Teknik Geoteknik. Por dkk. menyelidiki karakteristik deformasi dan respons tegangan dari tanah ekspansif yang diberi perlakuan semen dan menyarankan bahwa penambahan semen dapat menyebabkan penurunan yang luar biasa dalam regangan penyusutan areal dan pembengkakan bebas vertikal pada tanah ekspansif. Chompoorat dkk. menganalisis sifat mekanik dan karakteristik retak susut tanah liat ekspansif lunak yang diolah dengan semen dan abu terbang. Rasio campuran optimal dari material yang ditingkatkan ditentukan, dan tanah yang diolah secara efektif memenuhi persyaratan kekuatan dan retak susut. Salimi dkk. mempelajari penerapan bahan perlakuan campuran yang terdiri dari kapur, tanah liat nano, dan serat kaca dalam tanah liat ekspansif, menentukan bahwa rasio optimal adalah 6% kapur, 1% tanah liat nano, dan 0,75% serat kaca. Nouhi dkk. menganalisis perubahan sifat mekanik tanah liat yang diolah dengan larutan alkali, dan menyimpulkan bahwa larutan alkali secara efektif mempengaruhi mekanika tanah, dan konsentrasi larutan yang lebih rendah membantu mengoptimalkan material

komposit. Namun, masih ada beberapa kelemahan pengolahan kimia dalam praktik teknik, seperti stabilitas jangka panjang, kompleksitas konstruksi, dan kemampuan beradaptasi yang buruk terhadap berbagai jenis tanah. (Lin et al., 2024).

Kekuatan dan stabilitas struktur pada daerah tanah ekspansif terutama berkaitan dengan kadar air tanah, yang sebagian besar ditentukan oleh hisapan matrik (Fityus dan Buzzi, 2009). Pengukuran hisapan tanah yang akurat sangat penting dalam studi mengenai tanah ekspansif yang telah dimodifikasi. Tinjauan literatur yang ada menunjukkan bahwa penelitian tentang efek aditif atau pemodifikasi pada Kurva Karakteristik Air Tanah (*Soil Water Characteristic Curve/SWCC*) tanah ekspansif memiliki dampak yang substansial pada aplikasi Teknik (Guan et al., 2024).

Chen et al. (2021) menganalisis hasil eksperimen pada pasir yang diolah dengan EICP (Enzyme-induced calcite precipitation) dan menemukan bahwa peningkatan konsentrasi larutan urea-kalsium klorida meningkatkan nilai masuk udara (*air entry value*), tingkat desorpsi, dan kapasitas retensi air. Presipitasi kalsium karbonat menghasilkan distribusi ukuran pori yang lebih merata. Berdasarkan temuan ini, mereka mengusulkan model kurva retensi air untuk pasir yang diolah dengan EICP yang berkaitan dengan konsentrasi larutan (Guan et al., 2024).

Liu et al. (2021) membandingkan kemampuan penyerapan air dan SWCC dari sampel tanah sebelum dan sesudah perlakuan menggunakan teknologi presipitasi kalsit yang diinduksi oleh mikroba (MICP). Hasil uji menunjukkan bahwa kapasitas retensi air tanah ekspansif yang telah dimodifikasi meningkat secara signifikan.

Yu et al. (2021), membandingkan hasil pemodelan kurva SWCC menggunakan model Fredlund and Xing, model Van Genuchten tiga parameter, model Gardner, dan model Van Genuchten dua parameter pada tanah ekspansif yang dimodifikasi oleh MICP. Mereka menemukan bahwa model Fredlund & Xing memberikan kinerja terbaik dalam mencocokkan SWCC tanah ekspansif yang telah dimodifikasi. Hasil model Fredlund & Xing menunjukkan bahwa peningkatan jumlah pengikat menyebabkan bagian transisi pada SWCC tanah ekspansif yang dimodifikasi menjadi lebih datar.

Tabel 1 Sifat Rekayasa Tanah Ekspansif Alami

Characteristics	Expansive Soil	Standards Codes
AASHTO Clasification	A-7-5	AASHTOT27
Unified Soil Classification	CH	ASTM-D2487, ASTM-D7928
Liquid Limit (%)	68,3	ASTM-D4318
Plastic Limit (%)	23	ASTM-D4318
Plasticity Index (%)	45,3	ASTM-D4318
Specific Gravity	2,77	ASTM-D854
Maximum Dry Density (kN/m ³)	15,78	ASTM-D698
Optimum Moisture Content (%)	22,3	ASTM-D698
Swelling Presure (kPa)	250	ASTM-D2435

Unconfined Compressive Strength (kPa)	174	ASTM-D2166
Cohesion (kN/m ²)	93,5	ASTM-D3080
Angle of Internal Friction (ø)	8,08	ASTM-D3080
Permeability Coefficient (k) m/sec	$1,55 \times 10^{-11}$	ASTM-D5084
California Bearing Ratio (Soaked) (%)	1,7	ASTM-D1883
California Bearing Ratio (Unsoaked) (%)	2,4	ASTM-D1883

A. Karakteristik Tanah Ekspansif

Tanah ekspansif biasanya terdiri dari lempung berbutir halus yang kaya akan mineral seperti montmorillonit, illit, atau kaolinit. Mineral-mineral ini memiliki kemampuan untuk menyerap air ke dalam struktur molekulnya, yang menyebabkan perubahan volume tanah. Tanah ekspansif (ES) adalah tanah liat dengan proporsi bahan hidrofilik yang tinggi yang terbentuk oleh proses geologi alami. Ini berbeda dari tanah liat konvensional melalui pemuaian, penyusutan, dan superkonsolidasinya. ES berlimpah di Tiongkok dan banyak belahan dunia, dengan sekitar 400 juta orang tinggal di negara-negara tersebut; ES mencakup sekitar sepertiga wilayah negara tersebut. Karena bahan pengisi yang sesuai tidak mencukupi, ES dengan kemampuan pengembangan sedang atau ringan biasanya digunakan sebagai bahan pengisi pada pondasi, landasan jalan, bendungan, dan kanal. Bila kadar air pada ES meningkat maka akan menimbulkan tegangan muai dan deformasi, sedangkan penurunan air akan menimbulkan tegangan susut dan keretakan yang mengakibatkan penurunan sebagian pondasi, penurunan tanah dasar, permukaan jalan, dan keretakan dinding saluran, dan kebocoran bendungan adalah masalah kelemahan umum yang dihadapi dari ES. Masalah ini dikenal sebagai perubahan volume (VC), dan karena masalah-masalah rumit yang ditemui dalam praktik, pembengkakan tanah disebut sebagai "kanker tersembunyi dalam rekayasa geoteknik" (Mohamed et al., 2023).

1. Daya Dukung Rendah: Tanah ekspansif cenderung memiliki daya dukung yang rendah, sehingga tidak mampu menopang beban berat secara optimal. Ini menjadi masalah serius bagi bangunan, terutama jika tidak dilakukan perbaikan atau stabilisasi pada tanah tersebut.
2. Kompresibilitas Tinggi: Tanah ekspansif memiliki kemampuan untuk memampat saat terkena beban, tetapi pemampatan ini tidak seragam karena perubahan volume tanah yang disebabkan oleh kadar air yang fluktuatif.
3. Sensitif terhadap Perubahan Kadar Air: Tanah ekspansif sangat peka terhadap perubahan kadar air. Saat musim hujan atau jika tanah terpapar air, tanah mengembang dan kehilangan kekuatannya. Di sisi lain, saat kondisi kering, tanah menyusut dan mengalami retakan yang parah. Kondisi ini dapat

menyebabkan pergeseran atau penurunan struktur bangunan yang di atasnya (Mahmud dkk, 2024)

4. Retakan saat Kering: Saat tanah ekspansif mengalami pengeringan, retakan besar dapat terbentuk di permukaannya. Ini tidak hanya mengurangi estetika tetapi juga meningkatkan potensi kerusakan pada pondasi bangunan atau jalan yang dibangun di atasnya.

1.6.2 Stabilisasi Tanah Ekspansif

Tanah ekspansif yang terkenal karena perubahan volumetriknya yang besar sebagai respons terhadap variasi kelembapan, menimbulkan tantangan besar dalam hal ini infrastruktur teknik sipil. Tanah ini, yang biasanya mengandung montmorillonit tinggi, membengkak saat basah dan menyusut saat kering, menyebabkan kerusakan struktural, penurunan diferensial, dan peningkatan biaya pemeliharaan. Meskipun metode stabilisasi tradisional seperti pengolahan kapur dan semen cukup efektif, metode ini mempunyai kelemahan besar terhadap lingkungan, termasuk emisi karbon yang tinggi dan konsumsi energi yang signifikan terdapat kebutuhan yang semakin besar untuk mencari alternatif yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Almuaythir et al., 2024)

Dalam hal ini, penggunaan bahan limbah industri untuk stabilisasi tanah dipandang sebagai solusi yang menjanjikan. Produk samping seperti fly ash, terak tanur tinggi, abu sekam padi, dan asap silika tidak hanya meningkatkan sifat teknik tanah ekspansif tetapi juga berkontribusi terhadap pengelolaan limbah dan konservasi lingkungan. Memasukkan bahan-bahan ini ke dalam praktik stabilisasi tanah menawarkan manfaat ganda: meningkatkan kinerja tanah sekaligus mengurangi dampak lingkungan yang terkait dengan metode konvensional. Pendekatan ini tidak hanya mengatasi tantangan yang ditimbulkan oleh tanah ekspansif namun juga mendorong keberlanjutan dalam praktik teknik sipil (Almuaythir et al., 2024).

Tanah ekspansif adalah istilah yang digunakan untuk tanah yang masing-masing dapat mengembang dan menyusut selama pembasahan dan pengeringan. Komposisi kimia dan ukuran partikel menjadikan tanah ekspansif merupakan bahan hidrofilik, artinya mempunyai afinitas terhadap air yang tinggi serta mampu menyerap dan menahan air. Struktur dan sifat partikel tanah mempengaruhi potensi pengembangan tanah; misalnya, tanah liat yang terflokulasi dan partikel yang berkontak ujung-ke-muka cenderung membengkak lebih besar dibandingkan tanah liat yang partikelnya terdispersi dan berkontak tatap muka. Selain itu, dengan batas cair yang tinggi, tanah plastik menyerap lebih banyak kelembapan dan lebih banyak mengembang dibandingkan tanah non-plastik. Jalan, bangunan ringan, dan sub-struktur berada dalam bahaya regangan muai/susut yang menyerang ketika lapisan tanah liat ekspansif menjadi basah atau kering (Rabab'ah et al., 2023).

Tabel 2 Hubungan Indeks Plastisitas terhadap Potensial Pengembangan

Indeks Plastisitas (%)	Potensial Pengembangan
0-15	Rendah
15-35	Sedang

20-55	Tinggi
≥55	Sangat Tinggi

Pengukuran langsung terhadap pengembangan tanah ekspansif dilakukan dengan menggunakan alat konsolidasi satu dimensi. Metode ini bertujuan untuk menentukan angka persentase pengembangan tanah tersebut. Proses ini melibatkan pengujian tanah di laboratorium untuk mengukur perubahan volume atau tinggi sampel tanah ketika mengalami pembasahan. Dengan cara ini, tingkat pengembangan tanah ekspansif dapat diidentifikasi secara langsung, memberikan data yang akurat mengenai potensi perubahan volume tanah akibat perubahan kadar air. Data ini penting untuk mengevaluasi karakteristik tanah ekspansif dan menentukan langkah penanganan yang sesuai dalam bidang teknik sipil (Chen, 1975).

Tabel 3 Hubungan Persentase Pengembangan terhadap Tingkat Pengembangan

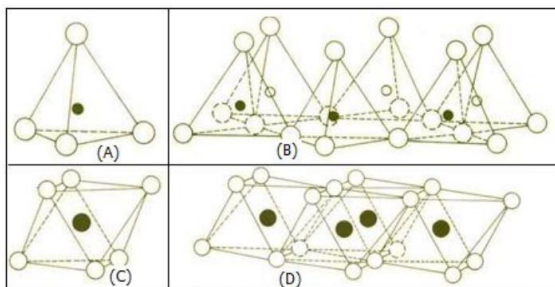
Presentase Pengembangan (%)	Tingkat Pengembangan
100	Kritis
50-100	Batas
≥50	Aman

A. Stabilisasi Kimia

Tanah yang mengalami perubahan volumetrik akibat perubahan kandungannya kadar air disebut tanah ekspansif. Bahan ini membengkak saat dibasahi dan menyusut saat dikeringkan, sebuah fenomena yang biasanya terkait dengan fluktuasi kelembapan musiman. Ketidakstabilan volume tanah ekspansif dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti mineralogi, kandungan liat, struktur kain, kadar air, kepadatan, kimia air pori dan kondisi pembebanan (Seed dan Lundgren, 1962; Nelson dan Miller, 1997; Muttharam, 2000; Otcovska dan Padevet, 2016). Namun, alasan utamanya adalah adanya mineral seperti montmorillonit (Katti, 1979). Pada montmorillonit (2:1, satuan silika/alumina), ujung tetrahedra berbagi oksigen dan hidroksil dengan lembaran oktahedral, menjadikannya satu lapisan. Karena kekurangan muatan dalam struktur dan adanya ikatan Van der Waals yang lebih lemah antara dua lembar silika berturut-turut, air dan kation yang dapat ditukar dapat dengan cepat masuk dan dengan demikian memisahkan lapisan primer (Holtz et al., 1981). Oleh karena itu, kemampuan menahan kelembapan membuat tanah yang kaya akan montmorillonit lebih mudah mengalami pengembangan. Begitu pula dengan air yang menguap (Barman and Dash, 2022).

Teknik stabilisasi tanah secara luas dikategorikan menjadi fisik, mekanis, dan kimia. Namun tergantung jenis tanahnya dan penerapannya, beberapa pendekatan mungkin mahal atau tidak berhasil. Stabilisasi kimia sering digunakan untuk meningkatkan sifat-sifat tanah liat tanah dengan mengubah sifat fisikokimianya. Ini proses menciptakan jaringan pengikat yang kuat di dalam struktur tanah, menghasilkan peningkatan daya tahan, kekuatan, dan kualitas keseluruhan dibandingkan ke tanah yang tidak stabil. Jumlah bahan pengikat yang digunakan

untuk tanah stabilisasinya bergantung pada sifat kimia dan sifat tanah, dan keduanya satu atau dua pengikat dapat digunakan (Ahmad et al., 2024).



Gambar 1 Struktur mineral lempung (Sumber: Grim, 1959 dalam Chen, FU, 1975)

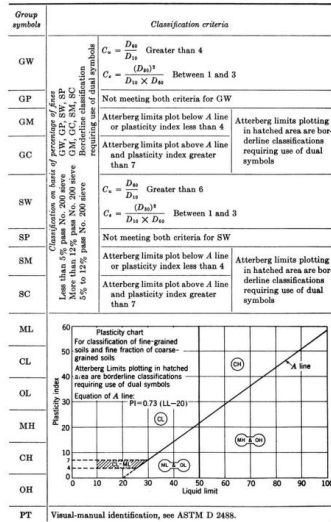
1.6.3 California Bearing Ratio (CBR)

Uji CBR merupakan pengukuran kekuatan tanah secara tidak langsung karena membandingkan kekuatan tanah dengan kekuatan tanah standar yang terdiri dari batuan pecah.. Uji CBR dianggap sebagai uji penetrasi yang pertama kali diusulkan oleh California State Highway Department, AS untuk mengevaluasi tanah dasar selama proses desain perkerasan lentur. Pada pengujian CBR, piston standar digunakan untuk menembus sampel tanah yang dipadatkan hingga titik kepadatan kering maksimum (MDD) dan kadar air optimum (OMC), dengan kecepatan standar 1,25 mm/menit. Kemudian nilai CBR dihitung sebagai perbandingan tegangan atau gaya yang diperlukan untuk menembus suatu sampel tanah terhadap tegangan atau gaya suatu material standar terhadap kedalaman penetrasi standar seperti ditunjukkan pada persamaan (1). Namun, uji CBR memakan waktu dan tenaga karena memerlukan perendaman sampel tanah di bawah air selama 96 jam untuk mensimulasikan skenario terburuk ketika perkerasan aspal terendam air saat banjir. Selain itu, karakteristik tanah dasar berubah dari satu lokasi ke lokasi lain bahkan dalam jarak beberapa meter karena tanah merupakan material yang heterogen. Oleh karena itu, pembangunan jalan baru memerlukan pengumpulan sampel tanah dalam jumlah besar secara bertahap sepanjang koridor proyek dan nilai CBR setiap sampel diperkirakan dalam uji CBR standar yang memerlukan waktu minimal 4 hari per sampel (5 hingga 6 hari termasuk uji Proctor untuk mencapai titik MDD dan OMC), yang biasanya mengakibatkan penundaan yang signifikan dalam pelaksanaan proyek dan peningkatan biaya tahap konstruksi secara signifikan. Selain itu, hasil pengujian terkadang tidak akurat karena gangguan sampel dan buruknya kualitas kondisi pengujian laboratorium. Berdasarkan hal-hal tersebut di atas, para peneliti berupaya mengembangkan model prediksi untuk memperkirakan nilai CBR dari sifat indeks tanah yang dapat ditentukan dengan mudah (Othman and Abdelwahab, 2023).

Desain untuk konstruksi baru sebaiknya didasarkan pada kekuatan sampel yang disiapkan pada kadar air optimum (OMC) sesuai dengan uji Proctor Compaction dan direndam dalam air selama empat hari sebelum pengujian. Untuk jalan yang sudah ada dan memerlukan penguatan, tanah harus dicetak pada kadar air lapangan dan

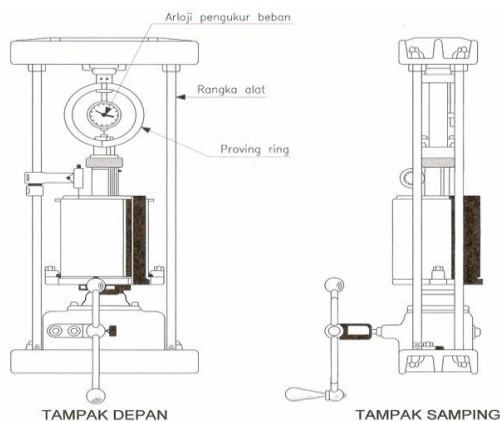
direndam selama empat hari sebelum pengujian. Namun, Bindra (1991) melaporkan bahwa perendaman selama empat hari mungkin terlalu berat dan dapat diabaikan dalam beberapa kasus.

Namun, uji CBR memerlukan waktu dan tenaga yang banyak. Selain itu, hasilnya terkadang tidak akurat karena keterampilan teknisi laboratorium yang kurang dalam menguji sampel tanah (Chattopadhyay dan Roy, 2010).



Gambar 2 Klasifikasi Tanah berdasarkan USCS Sumber:: Krebs and Walker (1971).

Namun apabila setelah dilakukan pengujian pemadatan laboratorium menggunakan metode *Proctor standar* nilai CBR tanah asli masih tidak memenuhi persyaratan daya dukung yang diperlukan, maka langkah lain harus diambil. Salah satu opsi adalah mencampur tanah asli dengan material lain yang memiliki nilai CBR lebih tinggi, atau menggantinya dengan tanah dari lokasi lain yang lebih baik kualitasnya.

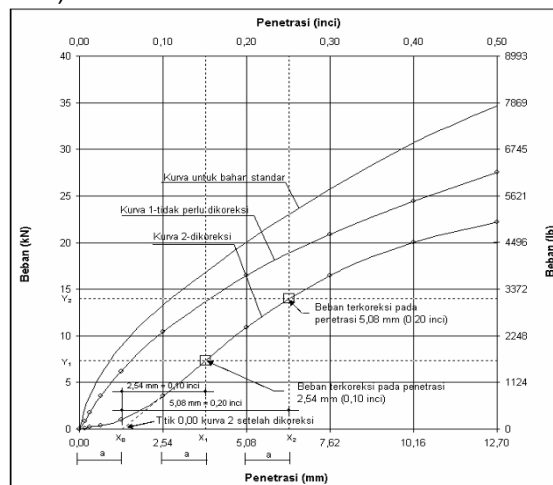


Gambar 3. Tipikal Alat Uji Penetrasi CBR Laboratorium

Metode penelitian yang umum digunakan untuk mengukur nilai CBR adalah dengan pengambilan sampel tanah di lapangan yang kemudian diuji di laboratorium

menggunakan alat uji CBR. Pengujian CBR dilakukan dalam dua kondisi, yaitu CBR *soaked* dan CBR *unsoaked*. CBR *soaked* merupakan pengujian tanah yang telah direndam dalam air untuk mensimulasikan kondisi tanah yang jenuh air, sedangkan CBR *unsoaked* dilakukan pada tanah yang tidak jenuh atau dalam kondisi kering. Penelitian ini biasanya dibatasi pada jenis tanah tertentu atau kondisi spesifik yang berkaitan dengan proyek jalan, dan hasilnya sangat berguna untuk merancang ketebalan dan jenis perkerasan jalan yang tepat berdasarkan daya dukung tanah dasar tersebut. Dengan demikian, perencanaan yang matang berdasarkan nilai CBR yang akurat dapat meminimalkan kerusakan jalan dan meningkatkan umur layanannya.

CBR adalah perbandingan antara beban yang dibutuhkan untuk penetrasi contoh tanah sebesar 0,1" / 0,2" dengan beban yang ditahan batu pecah standar pada penetrasi 0,1" / 0,2" tersebut. Harga CBR dinyatakan dalam persen. Jadi harga CBR adalah nilai yang menyatakan kualitas tanah dasar dibandingkan dengan bahan standar berupa batu pecah yang mempunyai nilai CBR sebesar 100% dalam memikul beban lalu lintas. CBR merupakan suatu perbandingan antara beban percobaan (*test load*) dengan beban Standar (*standard Load*) dan dinyatakan dalam persentase. Nilai CBR dikembangkan untuk mengukur kapasitas daya dukung, beban tanah dan beban perkerasan jalan. Nilai CBR dapat diketahui dengan 2 metoda yaitu Lapangan & Uji Laboratorium. Dalam penelitian ini, CBR didapat dari Uji Laboratorium. CBR hanya untuk jalan saja, dengan anggapan beban kendaraan adalah beban sementara (bukan beban tetap). CBR tidak untuk gedung, rumah, dan lain-lain (sebagai beban tetap), karena beban tetap juga menyebabkan *settlement*. Sedangkan CBR hanya untuk mengukur daya dukung tidak untuk penurunannya (Onyelowe et al., 2019).



Gambar 4. Kurva Hubungan antara Beban dan Penetrasi

Tanah dasar yang baik, untuk konstruksi perkerasan adalah tanah dasar yang berasal dari lokasi setempat atau dengan tambahan timbunan dari lokasi lain yang telah dipadatkan dengan tingkat kepadatan tertentu, sehingga mempunyai daya

dukung yang mampu mempertahankan perubahan volume selama masa pelayanan, meski terdapat perbedaan kondisi lingkungan dan jenis tanah setempat.

1.6.4 Limbah Ferronikel/Slag

Meningkatnya volume limbah industri, potensi dampaknya terhadap lingkungan dan penggunaan sumber daya dan energi yang tidak rasional telah menimbulkan kebutuhan untuk mengubahnya menjadi bahan yang berguna melalui daur ulang. Oleh karena itu, pemanfaatan abu dari terak yang dihasilkan perusahaan dan limbah kaca untuk memproduksi keramik kaca baru telah dilakukan bekerjasama dengan perusahaan asal Kanada. FLOGEN Technologies Inc. Dari sudut pandang analisis kualitatif, keramik kaca yang dihasilkan dari bahan-bahan ini telah menunjukkan kualitas tinggi dengan biaya produksi yang wajar serta kemungkinan penerapan yang menarik dan dampak positif terhadap perlindungan lingkungan (Ibrahimi et al., 2013).

Limbah terak metalurgi dan fly ash sebenarnya merupakan material yang sangat berharga dalam produksi banyak bahan konstruksi melalui teknologi daur ulang. Komposisi kimia dan mineralogi terak Fe-Ni serta data penelitian terbaru mengenai penggunaan terak feronikel dari Kavadarci dan abu dari Oslomej adalah contoh proses daur ulang ini. Gelas keramik baru yang diproduksi memiliki keunggulan dalam hal kekuatan terhadap pecah, daya tahan kimia yang tinggi, biokompatibilitas dan biaya produksi. Hasil penelitian sifat termal-mekanik di "AHN Group", membuktikan fakta bahwa selain kualitas (sifat dan komposisi) limbah tersebut, faktor utama kualitas produk adalah penyiapan bahan-bahan yang tepat. resep dan pengaturan sepenuhnya rasio proporsional komponen pencampuran, bahan pengatur komposisi struktural dan yang terpenting pengendalian prosedur dan metode pengobatan.

Nikel, logam yang banyak digunakan dengan sifat menguntungkan, merupakan kuncinya komponen industri. Misalnya, produksi baja tahan karat dalam bentuk feronikel mengkonsumsi hampir 65% logam nikel duni]. Sebagai produsen terkemuka dunia, Indonesia menyumbang 1.000.000 ton nikel pada tahun 2021. Sumber daya nikel global diklasifikasikan menjadi jenis laterit dan sulfida, dan terdapat pergeseran ke arah ekstraksi bijih nikel laterit karena menipisnya deposit sulfida. Sebagian besar endapan bijih nikel laterit terbentuk dari pelapukan batuan ultrabasa yang mengandung nikel dan sejumlah besar air bebas dan air terhidroksilasi. Besi atau Fe banyak ditemukan pada fase gotit, dimana Ni menggantikan atom Fe. Unsur-unsur lain seperti aluminium (Al), silikon (Si), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg) juga akan berasosiasi membentuk senyawa kadalit ($\text{Mg}_3(\text{SiO}_5)(\text{OH})_4$). (Sari et al., 2024)..

Di alam, bijih nikel laterit memiliki banyak lapisan dengan kandungan logam yang berbeda-beda pada setiap lapisannya. Karena kebutuhan energi teknologi pengolahan bijih nikel laterit lebih tinggi dibandingkan dengan pengolahan bijih sulfida. Proses pirometalurgi merupakan sumber utama produksi feronikel, yang menyumbang lebih dari 77% output global. Oleh karena itu, FeNi industry telah melakukan berbagai upaya serius selama beberapa tahun terakhir menuju pembangunan berkelanjutan, termasuk penghematan energi, perlindungan

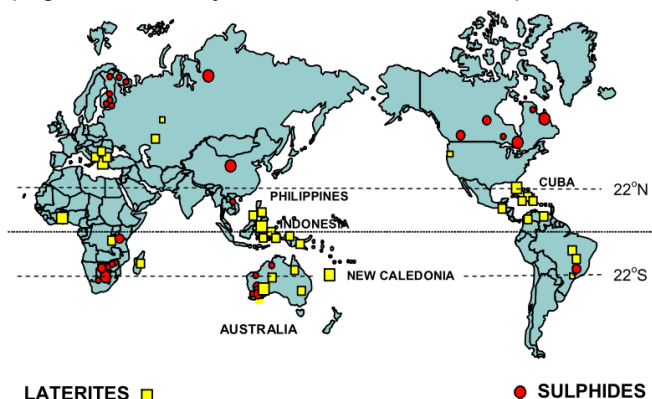
lingkungan, dan pemanfaatan bahan baku yang ada. Metode pengurangan selektif menawarkan pendekatan strategis untuk meminimalkan emisi gas rumah kaca (GRK).

Misalnya, pendekatan reduksi selektif, yang ditandai dengan pengayaan nikel yang signifikan pada paduan feronikel, memerlukan kontrol yang tepat terhadap potensi reduksi, termasuk faktor-faktor seperti rasio karbon terhadap bijih dan suhu reduksi. Oleh karena itu, metode reduksi selektif menawarkan solusi untuk mengurangi tingginya konsumsi energi pada proses pirometalurgi. Ini beroperasi pada suhu yang lebih rendah (1100°C hingga 1200°C). Metode ini tidak hanya menunjukkan kemajuan teknologi dalam produksi logam namun juga sejalan dengan tujuan keberlanjutan dengan mengurangi jejak lingkungan yang terkait dengan proses.

A. *Nickle Laterite (Low)*

Laterit adalah sisa hasil pelapukan kimia batuan di permukaan bumi, dimana berbagai mineral asli atau primer yang tidak stabil dengan adanya air, larut atau terurai dan terbentuk mineral baru yang lebih stabil terhadap lingkungan. Laterit penting sebagai tempat penyimpanan bijih yang ekonomis, karena interaksi kimia yang bersama-sama membentuk proses lateritisasi dalam kasus tertentu bisa sangat efisien dalam mengkonsentrasikan beberapa elemen. Contoh yang terkenal dari endapan bijih laterit yang penting adalah bauksit alumina dan endapan bijih besi yang diperkaya, namun contoh yang kurang dikenal mencakup endapan emas laterit (misalnya, Boddington di Australia Barat) (Evans, 1993).

Nikel laterit merupakan produk lateritisasi batuan kaya Mg atau ultrabasa yang mempunyai kandungan Ni primer 0,2-0,4% (Golightly, 1981). Batuan tersebut umumnya berupa dunit, harzburgit, dan peridotit yang terdapat dalam kompleks ofiolit, dan pada tingkat yang lebih rendah berupa komatiit dan batuan intrusi mafik-ultramafik berlapis dalam tatanan platform kratonik (Brand dkk, 1998). Proses lateritisasi menghasilkan konsentrasi 3 hingga 30 kali lipat dari kandungan nikel dan kobalt batuan induk. Proses, dan karakter dari laterit yang dihasilkan, dikendalikan pada skala regional dan lokal oleh faktor-faktor yang saling mempengaruhi dinamis seperti iklim, topografi, tektonik, jenis dan struktur batuan primer.



Gambar 5 Distribusi Global Deposit Nikel Sulfida dan Laterit.

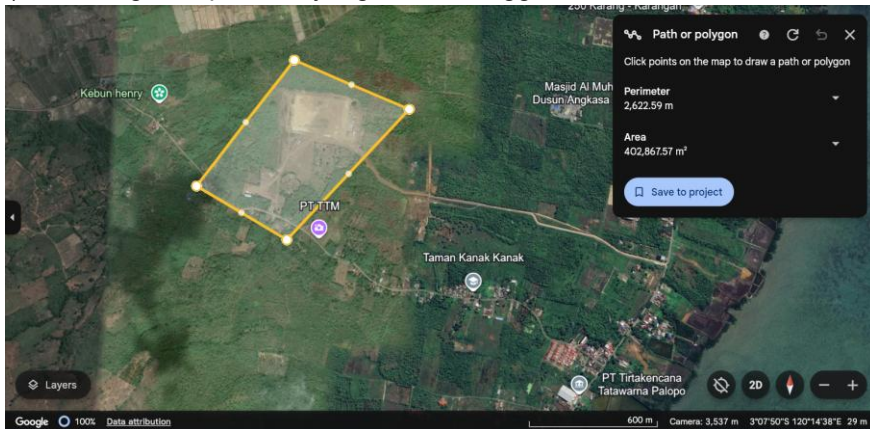
Nikel laterit berperan penting dalam industri nikel global dan saat ini menyumbang sekitar 40% dari total produksi nikel, yaitu sekitar 1 juta ton. Sekitar 70% dari seluruh sumber daya nikel di benua atau daratan terkandung dalam batuan laterit. Produksi nikel dari sumber-sumber laterit sebagai proporsi produksi nikel total (sulfida ditambah laterit) tetap konstan selama sepuluh tahun terakhir, namun diperkirakan akan meningkat seiring berjalannya waktu karena sumber daya sulfida yang mudah diperoleh semakin menipis. Hambatan utama terhadap pertumbuhan produksi nikel laterit yang lebih pesat adalah tingginya biaya modal untuk fasilitas pengolahan, tingginya kebutuhan energi pada jalur proses pirometalurgi, dan tantangan teknis dalam membuat pengolahan hidrometalurgi menjadi lebih efisien (Sari et al., 2024).

Proses hidrometalurgi, seperti proses karon, belerang pelindian tekanan asam, dan proses pelindian asam nitrat atmosferik (DNi), juga digunakan untuk ekstraksi nikel mencapai lebih dari 90 % pemulihan Ni menggunakan proses karon, sementara mencapai 97,22% ekstraksi Ni dengan pencucian asam klorida. Namun, metode hidrometalurgi dapat menghasilkan air limbah berbahaya, meningkatkan biaya karena diperlukan netralisasi asam. Reagen generasi baru, yang terdapat pada N-2-ethylhexylpyridine-3-formamide (MEH3), memungkinkan ekstraksi Ni(II) selektif dari larutan klorida tanpa penyesuaian pH, membantu pengurangan limbah dan hidrometalurgi bersih. Selain itu, cairan ionik sebagai pelarut ramah lingkungan menjanjikan untuk ekstraksi pelarut, sehingga mengurangi kebutuhan akan ekstraktan organik yang mudah menguap. Cairan ionik ini tidak hanya lebih ramah lingkungan tetapi juga mampu menggantikan ekstraktan organik yang mudah menguap, sehingga mengurangi risiko polusi udara dan memberikan kontribusi pada teknologi ekstraksi yang lebih berkelanjutan. (Sari et al., 2024)

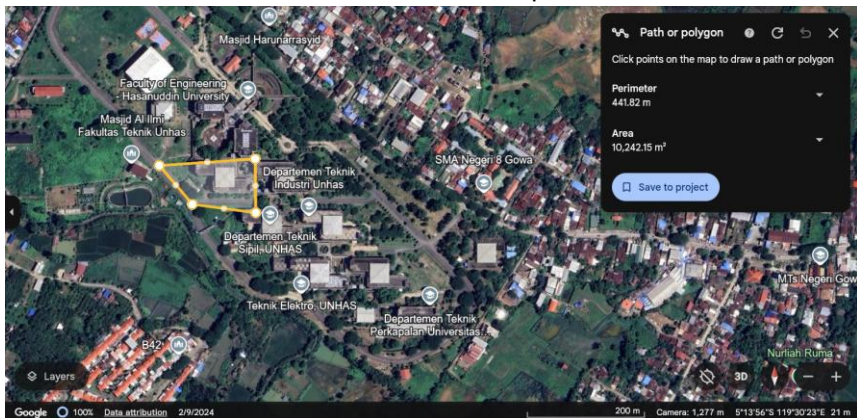
BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Jenis penelitian ini adalah penelitian eksperimen, dimana penelitian ini dilakukan di laboratorium Mekanika Tanah Teknik Sipil Universitas Hasanuddin dengan melakukan serangkaian pengujian pada benda uji yang terbuat dari campuran tanah lempung dari Kecamatan Palangga dan limbah baja dari PT. Bumi Mineral Sulawesi BMS Palopo. Campuran tanah lempung dengan limbah baja ini dibuat dengan perbandingan campuran yang bervariasi, kemudian di buat benda uji penelitian di laboratorium dengan campuran persentase penambahan limbah baja yang bervariasi. Praktek ini bertujuan untuk mengetahui nilai Nilai *California Bearing Ratio* (CBR) *Test* dengan kepadatan yang sama menggunakan *Standart Proctor Test*.



Gambar 6. Lokasi Pengambilan Limbah Ferronikel/slag di PT. Bumi Mineral Sulawesi BMS Palopo.



Gambar 7. Lokasi Penelitian Laboratorium Mekanika Tanah, Fakultas Teknik, Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin.

Uji sifat fisis, uji mekanis tanah, dan uji mekanis sampel dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan. Adapun waktu penelitian mengacu pada interval dan durasi yang telah ditetapkan berdasarkan standar pengujian yang digunakan.

2.1.1 Variabel bebas

Variabel bebas adalah variabel yang sengaja dipelajari pengaruhnya (dengan cara mengubah atau memanipulasi) terhadap variabel terikat. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah penambahan limbah baja (slag) dengan variasi campuran 100%, 30:70%, 20:80% dan 50:50%.

2.1.2 Variabel terikat

Variabel Terikat adalah variabel yang keadaannya akan tergantung pada variabel bebas. Sehingga variabel terikat pada penelitian ini adalah besarnya nilai CBR terhadap tanah ekspansif di daerah Kec. Palangga.

2.1.3 Variabel kontrol

Variabel Kontrol adalah perlakuan yang disamakan terhadap penelitian yang dilakukan. Variabel kontrol pada penelitian ini adalah tanah lempung, limbah baja (slag) dan kepadatan benda uji adalah kepadatan maksimal dari CBR.

2.2 Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini melibatkan penggunaan beberapa alat serta bahan pada berbagai tahapan penelitian, mulai dari perencanaan hingga pengujian pengolahan sampel. Adapun alat dan bahan yang digunakan diuraikan sebagai berikut.

2.2.1 Alat

Adapun alat yang digunakan pada penelitian ini ialah sebagai berikut:

1. Pengujian CBR

Alat-alat uji *California Bearing Ratio* (CBR) Test, meliputi : Mesin penetrasi (*loading machine*), Alat pengukur beban, Silinder, Piringan pemisah dari logam (*spacer disc*), Alat penumbuk tangan, Keping beban, Torak penetrasi dari logam, Dua buah arloji, Peralatan lain seperti talam, alat perata dan alat timbang.

2.2.2 Bahan

Adapun bahan yang digunakan sebagai berikut:

1. Tanah Lempung Ekspansif

Tanah yang digunakan yaitu tanah dari daerah Kec. Palangga yang sudah dikering oven selama 24 jam.

2. Limbah Baja (Slag)

Limbah baja yang digunakan dari PT. Bumi Mineral Sulawesi BMS Palopo.

2.3 Prosedur Penelitian

Persiapan dan Pengambilan Bahan

1. Penyiapan tanah asli uji sifat fisis tanah dan uji sifat mekanis tanah

2. Persiapan tanah ekspansif modifikasi 50% tanah asli dan 50% bentonite
3. Uji kompaksi tanah ekspansif modifikasi (EM) dan ferronikel slag (FNS) 20% (FNS) + 80% (EM), 30% (FNS) + 70%(EM) dan 50% (FNS) + 50% (EM)
4. Uji CBR tanah ekspansif modifikasi (EM) dan ferronickel slag (FNS) 20% (FNS) + 80% (EM), 30% (FNS) + 70%(EM) dan 50% (FNS) + 50% (EM)



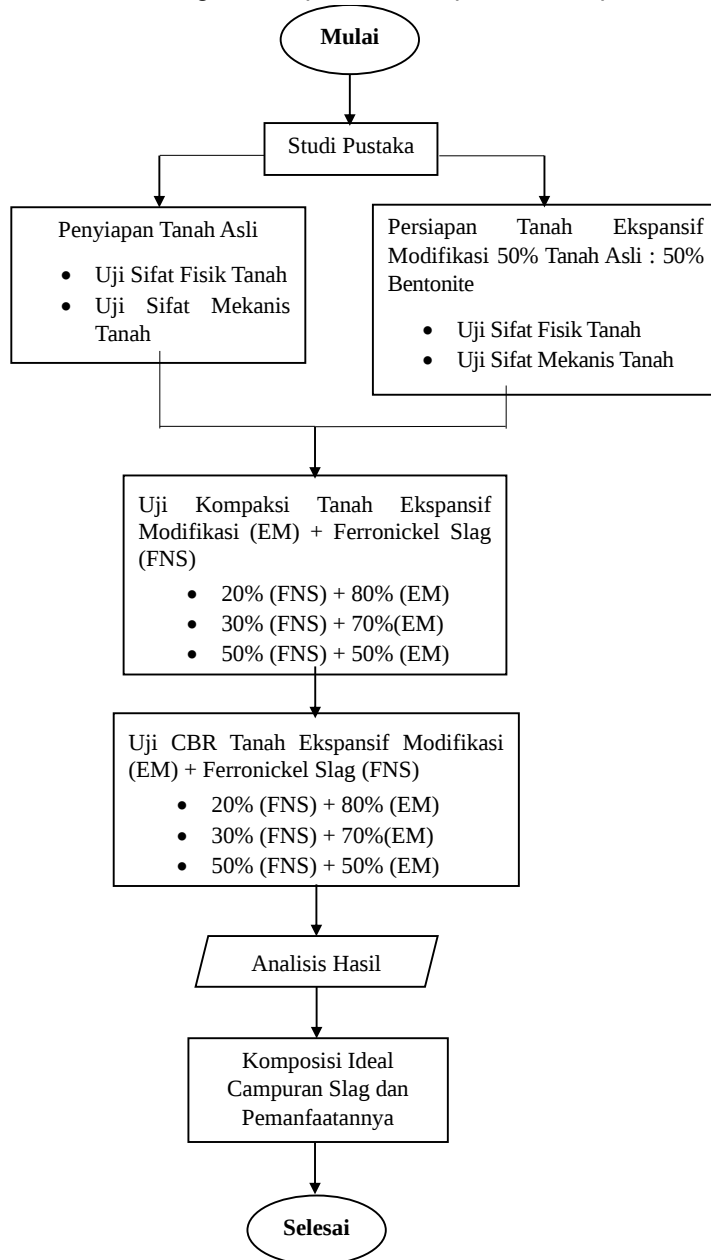
2.4 Metode Pengambilan Data

Dalam metode Penelitian Eksperimen ini penulis melakukan bentuk penelitian secara langsung pada sampel. Penelitian tersebut berupa:

1. Pengujian CBR, dengan melakukan tes kekerasan tanah pada tiap masing-masing campuran yang terdiri dari beberapa variasi campuran yang digunakan untuk mencari harga nilai CBR.
2. Pengujian CBR Rendaman, yang dimana itu dilakukan sama saja dengan penggunaan CBR kering hanya saja disini untuk CBR rendaman dilakukan hanya pada 56x tumbukkan dan rendam selama 4 hari dan mengambil data sampel perhari.

2.5 Flowchart Penelitian

Seluruh rangkaian kegiatan penelitian mulai dari persiapan sampai dengan tahap akhir diringkas dalam bentuk diagram alir penelitian seperti terlihat pada Gambar 24.



Gambar 1. Bagan alir penelitian