

Stabilisasi Tanah Lempung Menggunakan *Tailing* Sebagai Material *Subgrade*

Jeanely Rangkang¹, Fery Sondakh², Enteng J. Saerang³

TKJJ, Teknik Sipil, Polimdo, Manado, 95252 ^{1,2}

D-III, Teknik Sipil, Polimdo, Manado, 95252 ³

E-mail: jeanely.rangkang@sipil.polimdo.ac.id

Abstrak

Penelitian bertujuan mengevaluasi pengaruh *tailing* terhadap daya dukung tanah lempung sebagai *subgrade*, ditinjau dari nilai California Bearing Ratio (CBR); peningkatan nilai CBR pada komposisi campuran lempung dan *tailing* adalah: 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, dan 0:100. Penelitian dilatar-belakangi kondisi lokasi tinjauan, dimana tercemarnya DAS Talawaan sebagai akibat dari illegal dumping material *tailing*. Aktivitas pertambangan yang berada di hulu Sungai Talawaan, mengakibatkan beban limbah terbesar mencemari DAS Talawaan. Studi eksperimental dilaksanakan di Laboratorium Uji Tanah Teknik Sipil Politeknik Negeri Manado. Material *tailing* dari Desa Talawaan Kecamatan Dimembe, Kabupaten Minahasa Utara. Tanah lempung dari perkebunan Kasuratan Buha Manado (ruas Jalan Kasuratan), karena pada ruas jalan dimaksud terjadi kerusakan jalan di beberapa titik, yang diasumsikan diakibatkan kemampuan dukung *subgrade* kurang memadai.

Nilai CBR tanah lempung murni sebesar 3%. Substitusi 25% lempung dengan *tailing*, memberikan nilai CBR sebesar 8%, dimana nilai ini lebih besar dari nilai persyaratan CBR minimal untuk perkerasan jalan sebesar 6%. Substitusi 50% lempung dengan *tailing*, memberikan nilai CBR sebesar 11,5%, dimana nilai ini memenuhi persyaratan minimal CBR untuk jalan tol sebesar 10%. Jadi, *tailing* dapat dimanfaatkan sebagai bahan stabilisasi tanah lempung untuk material *subgrade*. Disarankan, aplikasi pada tanah lempung dengan kondisi berbeda, harus didasarkan pada pengujian laboratorium, untuk hasil yang akurat.

Kata kunci—california bearing ratio, lempung lunak, *sub grade*, *tailing*

1 PENDAHULUAN

Material limbah sisa tambang (*tailing*) menjadi permasalahan lingkungan di hampir semua daerah yang memiliki area pertambangan (Gupta and Thomas, 2013; Triadriani, et al. 2014; Gundari, 2015; Alsharedah and El Naggat, 2016; Kalimantan dan Trihadiningrum, 2016; Sukarman dan Gani, 2017). Keberadaan *tailing* dalam bidang pertambangan tidak bisa dihindari, karena *tailing* merupakan satu jenis limbah yang dihasilkan dari kegiatan penambangan mineral-mineral berharga. Kandungan mineral yang ada pada *tailing* tak terelakkan, dikarenakan pengolahan bijih dalam usaha mendapatkan mineral yang dicari untuk dimanfaatkan industri pertambangan, tidak mungkin diperoleh semuanya atau 100% (Pohan, et al. 2007).

Kontrak karya logam berat yang dilakukan oleh PT. Meares Sopotan Mining dan PT. Tambang Tondano Nusajaya, memungkinkan kedua perusahaan yang bergerak dibidang

pertambangan melakukan kegiatan eksplorasi dan eksploitasi emas di wilayah Kabupaten Minahasa Utara. Selain itu, sejak tahun 1985 kegiatan PETI (Penambang Emas Tanpa Izin) sudah dilakukan oleh masyarakat setempat dan warga pendatang.

Desa Talawaan, Desa Tatelu, Desa Warukapas, Desa Tatelu Rondor dan Desa Wasian merupakan lokasi penambangan emas Tatelu yang terletak di Kecamatan Dimembe, dimana kelima desa tersebut berada pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Talawaan. Menurut Gunradi (2015), sebagian besar aktifitas pertambangan terdapat di bagian hulu Sungai Talawaan. Oleh sebab itu, beban limbah terbesar mencemari aliran Sungai Talawaan yang mengakibatkan tercemarnya sektor pertanian dan perikanan yang menggunakan aliran sungai tersebut, sebagai akibat dari *illegal dumping* (pembuangan) material limbah sisa tambang.

Uraian di atas yang melatar-belakangi pemanfaatan *tailing* sebagai material stabilisasi tanah lempung, guna meningkatkan nilai keteknikan tanah lempung, dalam hal ini kemampuan dukung tanah lempung sebagai material lapisan tanah dasar (*sub grade*) pada konstruksi perkerasan jalan. Hal ini diasumsikan mengingat komposisi *tailing* secara fisik terdiri dari 50% fraksi pasir halus dengan diameter 0,075– 0,4 mm, dan sisanya berupa fraksi lempung dengan diameter 0,075 mm (Pohan, 2008). Disamping itu, pemanfaatan *tailing* yang tergolong sebagai limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) kategori 2 sejalan dengan kebijakan pemerintah, yang tertuang dalam PP Nomor 18 Tahun 1999.

2 DASAR TEORI

2.1 Tanah Lempung

Semua konstruksi sipil didirikan di atas/di dalam tanah, oleh sebab itu pengetahuan tentang sifat-sifat dan perilaku tanah merupakan ilmu yang sangat penting yang harus dikuasai oleh seorang perencana struktur. Tanah secara umum mempunyai 3 peran penting dalam konstruksi teknik sipil, yaitu: sebagai bahan bangunan, sebagai pemikul beban, dan sebagai beban pada suatu struktur. Tanah dalam fungsinya sebagai pemikul beban yang akan menjadi fokus dalam uraian ini, dalam aplikasinya, yakni tanah sebagai lapisan tanah dasar pada konstruksi perkerasan jalan.

Menurut Wesley (1977), istilah “tanah” dalam mekanika tanah, mencakup semua bahan dari tanah, yakni dari lempung (*clay*) sampai batu-batuan yang besar. Untuk keperluan teknis, tanah dianggap merupakan suatu lapisan sedimen lepas, seperti: kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*), lempung (*clay*), atau suatu campuran dari bahan-bahan tersebut di atas. Tanah lempung (*clay*) memiliki nilai keteknikan yang rendah, sebab memiliki nilai perbedaan susut-muai yang besar, serta *compressibility* yang tinggi. Lempung atau tanah liat terdiri dari partikel yang sangat kecil, dan memiliki sifat kohesi (partikel atau butiran memiliki daya lekat antar butir atau saling menempel) dan plastisitas (sifat tanah yang memungkinkan material mengalami deformasi tanpa perubahan volume atau *rebound*, dan tanpa retak atau hancur) yang tidak ditemukan pada pasir atau kerikil. Selanjutnya, menurut Wesley (2009), tanah lempung yang agak kering, akan keras dan bersifat padat. Jika kadar air dari tanah tersebut meningkat, maka tanah akan mulai melunak dan memasuki tahap yang disebut semi-padat. Selanjutnya, dengan meningkatnya kadar air secara terus menerus, maka tanah lempung tersebut akan semakin lunak, akhirnya menjadi benar-benar plastis. Tanah lempung yang dalam keadaan

plastis, akan dapat dibentuk tanpa terjadi retak atau pecah, dan tanpa mengalami perubahan volume. Meningkatnya kadar air, maka tanah pada akhirnya akan menjadi lebih lunak, selanjutnya menjadi cair, sehingga akan sangat sulit untuk dipadatkan.

Sifat-sifat tanah lempung tersebut di atas yang membuat material tersebut harus direkayasa sebelum digunakan sebagai material lapis perkerasan konstruksi jalan. Salah satu cara rekayasa untuk meningkatkan nilai keteknikan lempung adalah dengan metode stabilisasi. Metode stabilisasi adalah dengan menambahkan suatu bahan tambah seperti: kapur, tras, semen, sirtu (pasir batu), serta bahan serat alamia maupun buatan (ijuk, sekam padi, serat dari sabut kelapa, *plastic fibre* dan lain-lain), yang bertujuan merekayasa sifat fisis lempung agar sifat mekanisnya (kekuatan dukung) meningkat.

2.2 *Material Limbah Sisa Tambang (Tailing)*

Material limbah sisa tambang atau *tailing* menjadi permasalahan lingkungan di hampir semua daerah yang memiliki area pertambangan. *Tailing* merupakan satu jenis limbah yang dihasilkan dari kegiatan penambangan mineral-mineral berharga, dimana keberadaannya dalam bidang pertambangan tidak bisa dihindari. Kandungan mineral pada *tailing* tersebut tidak bisa dihindari, karena pengolahan bijih untuk memperoleh mineral yang dapat dimanfaatkan tidak akan mencapai perolehan (*recovery*) 100%. Oleh sebab itu material *tailing* mengandung logam berat yang berbahaya bagi ekosistem, jika penanganan *tailing* tidak dilakukan secara proporsional, bahkan dibuang (*dumping*) secara sembarangan. Hal ini yang menjadi permasalahan lingkungan di banyak daerah yang memiliki industri pertambangan (Gupta and Thomas, 2013; Alsharedah and El Naggar, 2016).

Lebih lanjut, menurut Wang, et al. (2012), mengingat kandungan merkuri di dalam *tailing* sangat tinggi dan beresiko membahayakan kesehatan tubuh manusia, maka banyak dilakukan pengembangan terhadap upaya-upaya pengolahan *tailing* yang mengandung merkuri. Salah satu proses pengolahan yang dapat diaplikasikan untuk *tailing* mengandung merkuri yaitu melalui proses stabilisasi dan/atau solidifikasi (S/S). Kelebihan proses S/S dibandingkan teknik lainnya seperti vitrifikasi atau fitoremediasi adalah produk hasil S/S memiliki stabilitas fisik dan kimia jangka panjang yang baik karena kontaminannya terikat secara fisik maupun kimia dalam suatu material padat.

Untuk mengatasi permasalahan di atas, serta untuk mereduksi volume material *tailing*, maka pada penelitian ini *tailing* dimanfaatkan sebagai bahan stabilisasi tanah lempung, guna meningkatkan nilai keteknikan lempung, secara khusus sifat mekanisnya (daya dukung).

2.3 *Penelitian Terkait*

Berdasarkan studi literatur yang dilakukan, ditemui beberapa penelitian yang terkait dengan stabilisasi tanah lempung/lempung lunak dengan berbagai material stabilisasi, diantaranya: UCS tanah lempung ekspansif yang distabilisasi dengan abu ampas tebu dan kapur, guna meningkatkan nilai keteknikan lempung ekspansif tersebut (Hatmoko dan Lulie, 2007). Selanjutnya, untuk meningkatkan daya dukung lempung ekspansif, Palar et al, (2013) mencampurkan (menstabilisasi) lempung dengan tras dan kapur. Budi et al., (2003) meneliti tentang pengaruh *fly ash* terhadap sifat pengembangan tanah ekspansif. Untuk aplikasi ke material jalan, Banta Chairullah (2011), melakukan penelitian untuk menelaah sejauh mana tanah lempung lunak dapat dimanfaatkan untuk material jalan raya. Tanah lempung lunak yang dijadikan bahan penelitian adalah tanah lempung CL dengan plastisitas sedang, yang menurut

AASHTO termasuk A-7-6. Nilai CBR tanah asli tersebut sangat rendah, yaitu 1,29% yang tidak memenuhi syarat sebagai lapisan *sub grade* jalan. Tanah tersebut distabilisasi dengan semen Portland pada kadar 3% sampai 15% terhadap berat kering tanah, dengan interval penambahan semen setiap 3%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanah lempung yang distabilisasi dengan 6% semen dapat dimanfaatkan *sub grade*. Sedangkan lempung yang distabilisasi dengan 12% semen dapat dimanfaatkan sebagai bahan LPA (*base course*) sesuai dengan syarat Bina Marga dan ketentuan AASHTO untuk jalan raya.

Sehubungan dengan material *tailing*, didapati beberapa penelitian seperti: Tampenawas et al., (2013) memanfaatkan *tailing* sebagai substitusi parsial semen untuk melihat peningkatan kuat tekan beton dengan agregat halus pecahan kaca dan pasir. Suatu studi tentang kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum dari tanah berpasir dan tanah lempung yang distabilisasi dengan *tailing* hasil pengolahan tembaga (Gupta and Thomas, 2013), dimana melalui pengujian Triaxial diperoleh sudut perlawanan geser (ϕ) sebesar 48° untuk kombinasi 50% tanah liat dan 50% *tailing* tembaga. Selanjutnya, sudut perlawanan geser (ϕ) $> 40^\circ$ untuk kombinasi 40% lempung dengan 60% *tailing* tembaga. Lebih lanjut dijelaskan bahwa pada kombinasi 30% lempung dengan 70% *tailing* tembaga merupakan kombinasi yang paling memuaskan untuk stabilisasi tanah lempung dengan *tailing* tembaga. Selanjutnya, Triadriani et al. (2014) meneliti tentang penggunaan tanah (*tailing*) yang tercemar merkuri limbah tambang emas yang sudah diremediasi, sebagai tanah untuk tanaman jagung. Xing et al. (2016), meneliti tentang pengaruh kehalusan *tailing* pada perkembangan struktur pori dari *Cemented Paste Backfill* (CPB). Studi ini menyelidiki pengaruh distribusi ukuran partikel pada pengembangan struktur pori pada sampel CPB. Oleh karena itu, studi ini menyajikan hasil eksperimen untuk dinilai pengaruh kehalusan *tailing* pada parameter penting dari tanah, yakni: porositas total, distribusi ukuran pori, dan diameter pori. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kehalusan *tailing* berpengaruh pada diameter kritis pori, dimana diameter kritis pori menurun seiring dengan lamanya waktu pengeringan. Jadi, hasil penelitian menunjukkan bahwa kehalusan *tailing* mempengaruhi sifat struktural pori dari CPB yang mengeras. Kalimantoro dan Trihadiningrum (2016) memanfaatkan *tailing* tambang emas rakyat Kulon Progo distabilisasi/solidifikasi dengan semen portland dan tanah tras guna meningkatkan kuat tekan, sehingga dapat direkomendasikan sebagai material struktur. Sukarman dan Gani (2017) meneliti tentang pemanfaatan lahan bekas tambang timah di Pulau Bangka dan Belitung sebagai media tumbuh komoditas pertanian. Pemanfaatan abu vulkanik dan *tailing* sebagai bahan stabilisasi tanah lempung untuk lapisan *sub grade* (Syahril, et al, 2019), dimana ada kecenderungan yang hampir sama antara peningkatan jumlah campuran stabilisasi dengan sifat keteknikan tanah, baik pengujian sifat fisis maupun mekanis tanah.

3 MATERIAL DAN METODE PENELITIAN

3.1 Material

Material *tailing* diambil dari Desa Talawaan Kecamatan Dimembe, Kabupaten Minahasa Utara. *Tailing* yang digunakan dalam penelitian ini dikumpulkan dari sisa penambangan emas PT. Meares Sopotan Mining dan PT. Tambang Tondano Nusajaya. Material diangkut dalam karung plastik ke laboratorium, dan kemudian disimpan dalam kantong kedap

udara untuk menghindari hidrasi sebelum digunakan. Selanjutnya, dilakukan serangkaian uji laboratorium untuk mengetahui sifat fisis dan mekanis dari material *tailing*. Tabel 1 memperlihatkan hasil pengujian sifat fisis dan mekanis *tailing*.

Tanah lempung di ambil dari perkebunan Kasuratan Buha (sekitar ruas Jalan Kasuratan) Kota Manado. Lokasi pengambilan tanah lempung lunak tersebut ditetapkan, karena pada ruas jalan di sekitar lokasi dimaksud terjadi kerusakan di beberapa titik badan jalan. Hal ini diasumsikan sebagai akibat dari kemampuan dukung lapisan tanah dasar (*sub grade*) yang kurang memadai. Gambar 1 di bawah ini memperlihatkan lokasi tempat pengambilan sample tanah lempung.

Tabel 1. Sifat Fisis Dan Mekanis Material *Tailing*

Sifat fisis dan mekanis	Nilai	Metode pengujian
Kadar air (w)	23,19 %	ASTM D 2216
Berat isi (γ)	2,002 gr/cm ³	ASTM D 2937-83
Berat jenis (Gs)	2,678	ASTM D 854
Analisa Ukuran Butir		
(Wet Sieves): Lolos # 10	99,90 %	ASTM D 422
Lolos # 40	98,72 %	
Lolos # 60	96,28 %	
Lolos # 200	60,91 %	
Atterberg limit: LL	0 %	(BS 1377:1975, Test 2-C, Test 3, Test 5)
PL	0 %	
LS	0 %	
Geser langsung: ϕ	37,13 °	
c	0,00 kg/cm ²	
Pemadatan : w_{opt}	21,30 %	ASTM D 1557
γ_{dmax}	1,582 gr/cm ³	
CBR design	19,6 %	ASTM D 1883-87

Gambar 1(a) dan (b) menunjukkan lokasi pengambilan sample tanah lempung yang ditandai dengan tanda panah, sedangkan yg ditandai dengan lingkaran warna merah menunjukkan beberapa titik pada ruas jalan yg mengalami kerusakan.



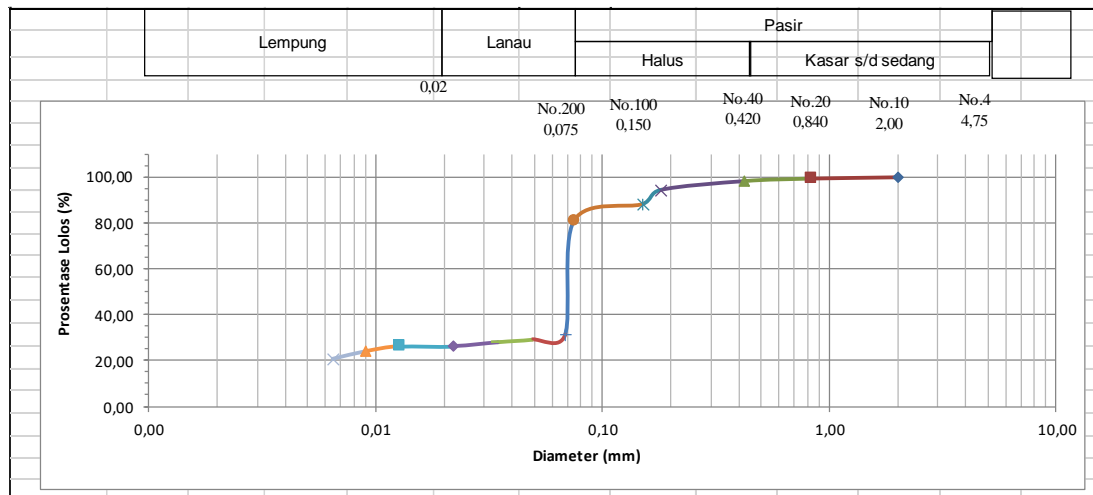
Gambar 1. Lokasi pengambilan sample tanah lempung

Selanjutnya, dilakukan serangkaian uji laboratorium untuk mengetahui sifat fisis dan mekanis dari tanah lempung. Tabel 2 memperlihatkan hasil pengujian sifat fisis dan mekanis tanah lempung.

Tabel 2. Sifat Fisis Dan Mekanis Tanah Lempung

Sifat fisis dan mekanis		Nilai	Metode pengujian
Kadar air (w)		38,25 %	ASTM D 2216
Berat isi (γ)		1,691 gr/cm ³	ASTM D 2937-83
Berat jenis (Gs)		2,467	ASTM D 854
Analisa Ukuran Butir			
(Wet Sieves): Lolos # 10		99,66 %	ASTM D 422
Lolos # 40		94,87 %	
Lolos # 60		87,01 %	
Lolos # 200		74,31 %	
Atterberg limit: LL		42,02 %	(BS 1377:1975, Test 2-C, Test 3, Test 5)
PL		24,97 %	
PI		17,05 %	
LS		8,40 %	
Pemadatan	: w_{opt}	26,00 %	ASTM D 1557
	γ_{dmax}	1,42 gr/cm ³	
CBR design		3,00 %	ASTM D 1883-87

Gambar 2 memperlihatkan grafik distribusi ukuran butir tanah lempung yang digunakan, dan merupakan gabungan antara uji analisa saringan dan uji hydrometer (untuk ukuran butir lolos saringan No. 200)



Gambar 2. Distribusi ukuran butir tanah lempung

3.2 Metode Penelitian

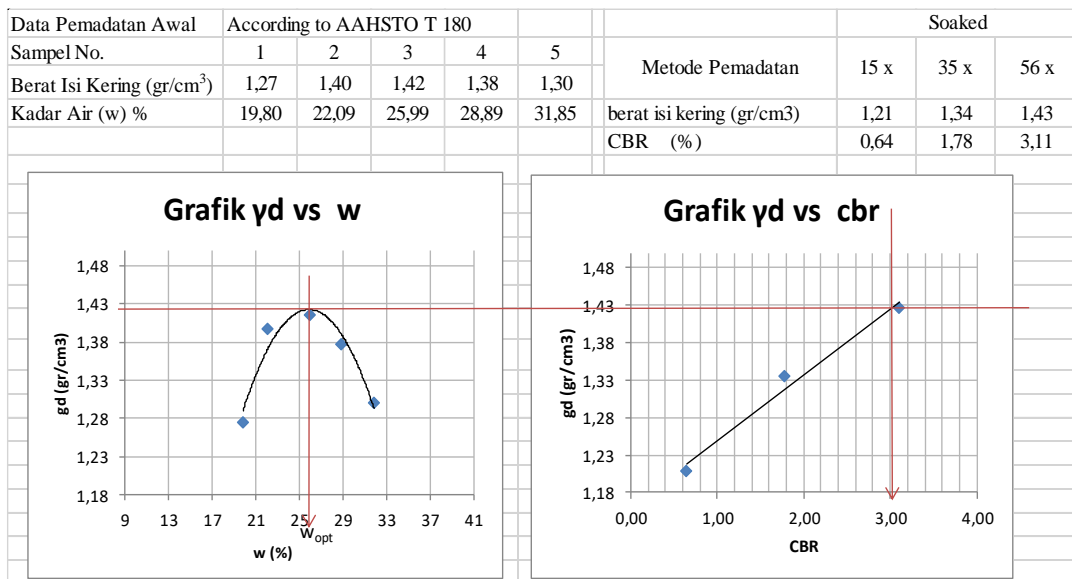
Untuk mengetahui pengaruh *tailing* terhadap peningkatan kemampuan dukung tanah lempung, diterapkan prinsip stabilisasi tanah dengan komposisi campuran antara tanah lempung dan *tailing*, sebagai berikut: 100% lempung : 0% *tailing*, 75% lempung : 25% *tailing*, 50% lempung : 50% *tailing*, 25% lempung : 75% *tailing*, dan 0% lempung : 100% *tailing*. Selanjutnya, variasi komposisi campuran antara tanah lempung dan *tailing* seperti tersebut di atas disiapkan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Ambil tanah seberat $\pm 4,5$ kg (pemadatan *modified*) kemudian tambahkan air sesuai dengan w_{opt} yang diperoleh pada pengujian *compaction*.
2. Masukkan tanah yang telah dicampur dengan air kedalam plastik kemudian ikat erat guna menghindari penguapan air, dan biarkan selama 24 jam.
3. Siapkan cetakan, alas, leher, dan masukkan papan pemisah dan letakkan kertas di atasnya.
4. Masukkan tanah ke dalam cetakan sebanyak 5 lapis
5. Tumbuk sampel per lapisan dengan cara yang sama seperti pada percobaan pemadatan.
6. Ratakan permukaan benda uji menggunakan pisau perata, dan kemudian lepaskan leher cetakan kemudian timbang berat cetakan + tanah sebelum direndam.
7. Ambil kadar air sampel sebelum direndam.
8. Untuk sampel CBR direndam, ikuti langkah-langkah berikut:
 - a. Ganti alas cetakan yang digunakan pada langkah (5) di atas dengan alas cetakan berlubang, jangan lupa pasang kertas saring.
 - b. Pasang dasar pengembangan berlubang pada permukaan sampel uji, serta beri keping beban 4,00 kg atau tergantung pada beban perkerasan.
 - c. Atur jam untuk mengukur pengembangan, dan atur bacaan ke nol.
 - d. Rendam benda uji, dengan permukaan air $\pm 2,5$ cm di atas permukaan benda uji, selama 4 x 24 jam (4 hari).
 - e. Catat waktu mulai dan selesai perendaman, dan baca besarnya pengembangan (*swelling*).
 - f. Lepaskan tripod dan perhatikan perkembangannya, lepaskan sampel uji, dan miringkan selama 15 menit.

- g. Bersihkan cetakan dari air yang tersisa, kemudian timbang, sampel siap untuk ditekan pada mesin/alat.
9. Lakukan pengujian CBR.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

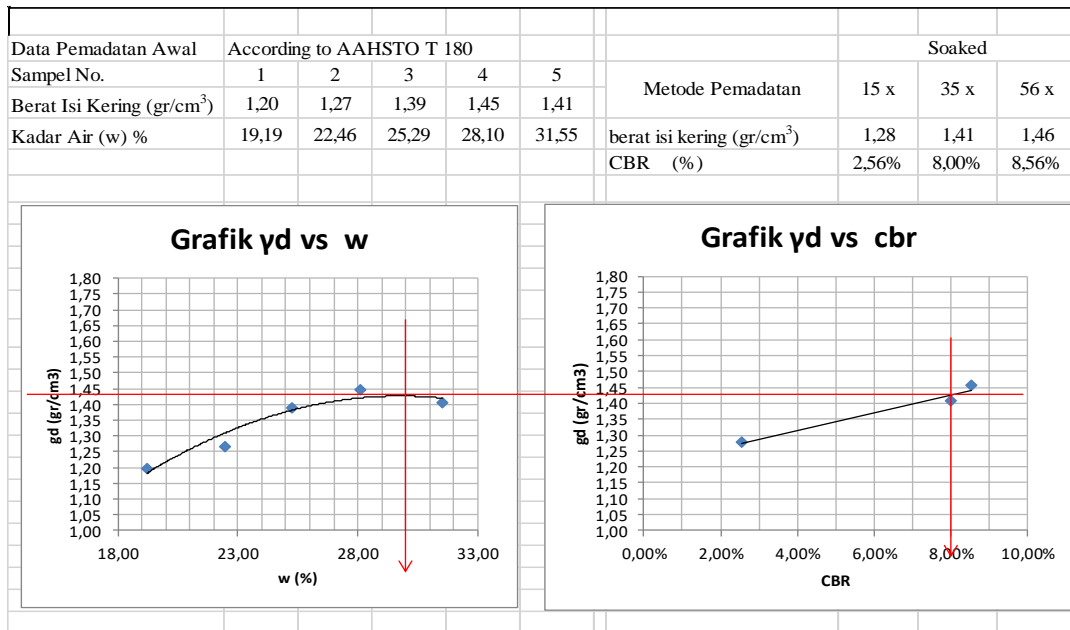
1. 100% lempung : 0% *tailing*, hasil yang diperoleh seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil pengujian CBR pada komposisi 100% lempung : 0% *tailing*

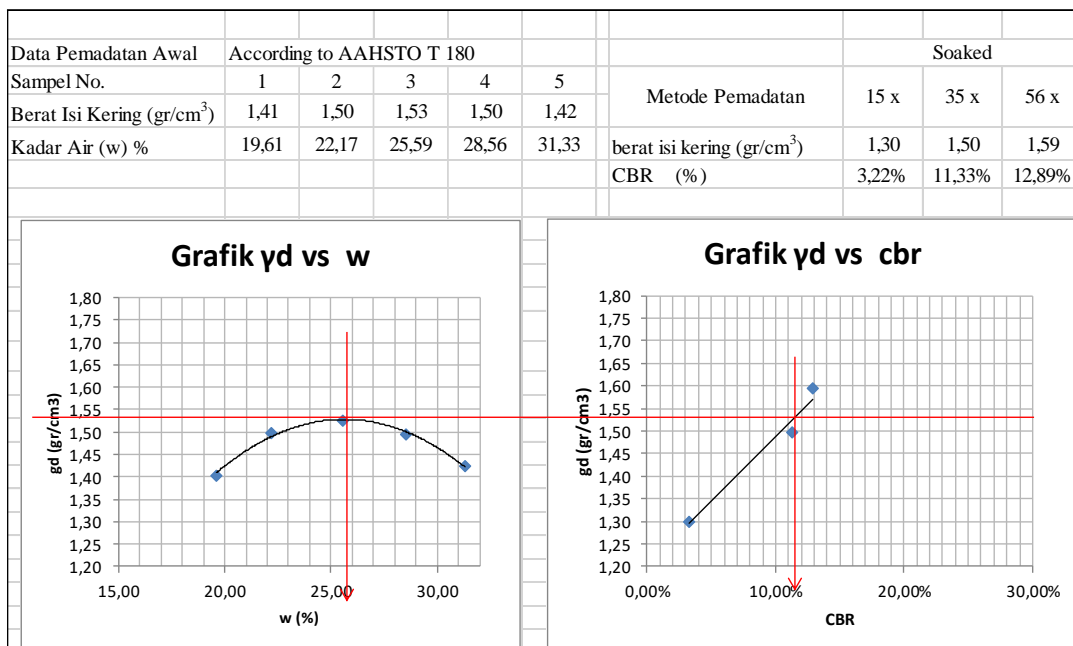
Gambar 3 di atas menunjukkan bahwa nilai CBR adalah 3%, w_{opt} sebesar 26,00%, dan $\gamma_{d_{max}}$ adalah 1,42 gr/cm³.

2. 75% lempung : 25% *tailing*, dengan mensubstitusi lempung dengan *tailing* sebesar 25%, maka diperoleh nilai CBR sebesar 8,00%, w_{opt} sebesar 30,00%, dan $\gamma_{d_{max}}$ adalah 1,422 gr/cm³, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 berikut.



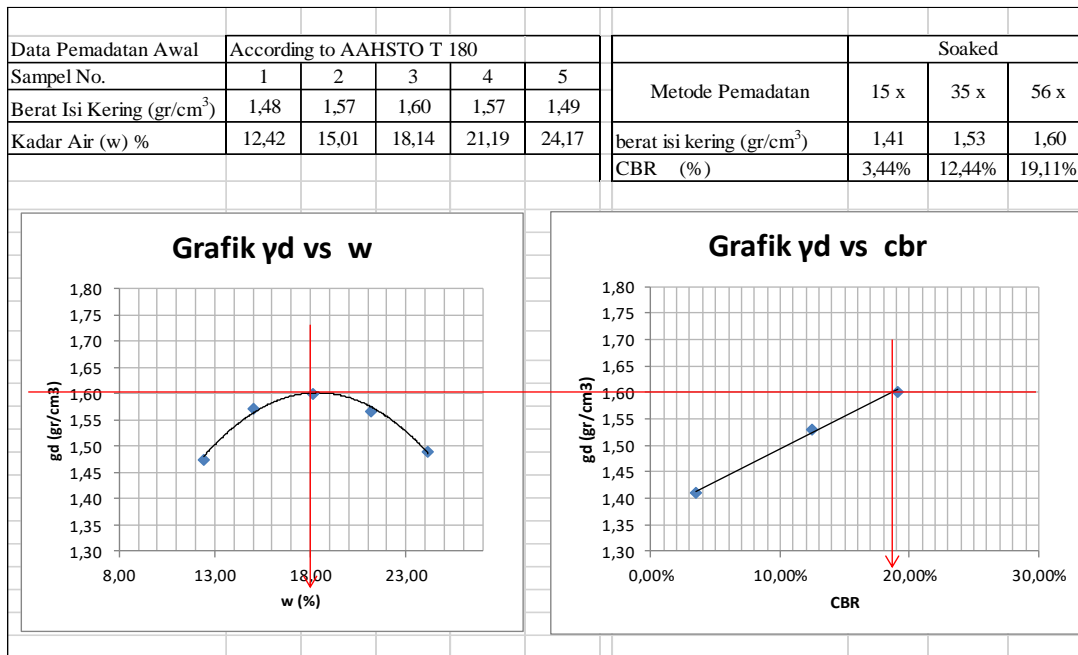
Gambar 4. Hasil pengujian CBR pada komposisi 75% lempung : 25% *tailing*

- 50% lempung : 50% *tailing*, setelah melakukan substitusi lempung dengan *tailing* sebesar 50%, diperoleh nilai CBR adalah 11,50%, w_{opt} sebesar 25,80%, dan $\gamma_{d_{\text{max}}}$ sebesar 1,53 gr/cm^3 , seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5.



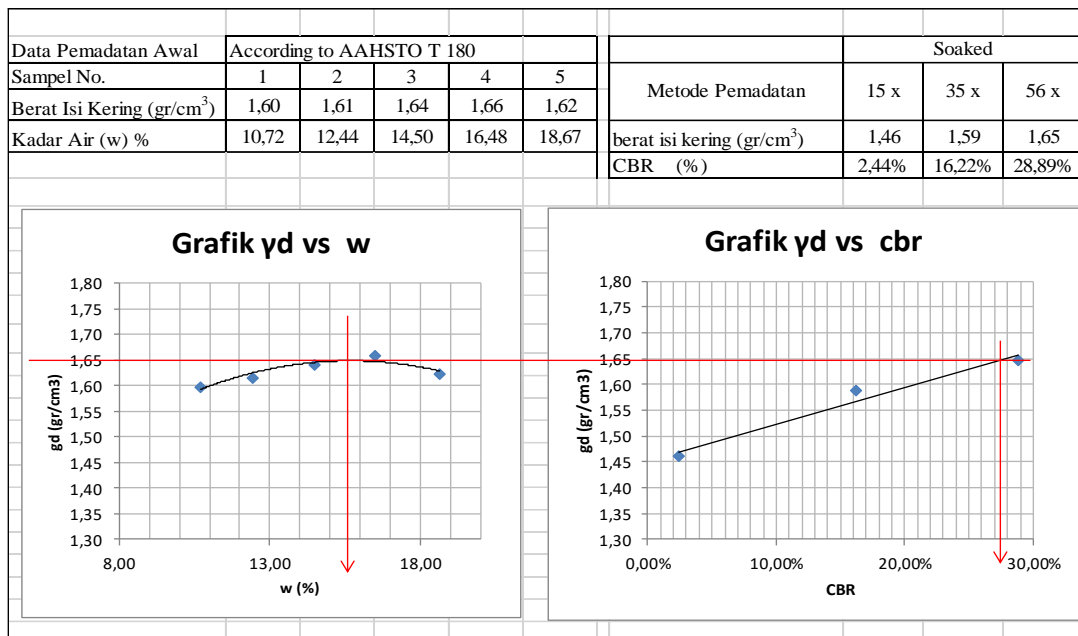
Gambar 5. Hasil pengujian CBR pada komposisi 50% lempung : 50% *tailing*

- 25% lempung : 75% *tailing*, pada komposisi ini diperoleh nilai CBR adalah 18,80%, w_{opt} sebesar 18,00%, dan $\gamma_{d_{\text{max}}}$ sebesar 1,6 gr/cm^3 . Gambar 6 memperlihatkan hasil dimaksud.



Gambar 6. Hasil pengujian CBR pada komposisi 25% lempung : 75% *tailing*

5. 0% lempung : 100% *tailing*, Gambar 7 memperlihatkan bahwa nilai CBR adalah 27,50%, w_{opt} sebesar 15,60%, dan $\gamma_{d_{max}}$ sebesar 1,65 gr/cm³.



Gambar 7. Hasil pengujian CBR pada komposisi 0% lempung : 100% *tailing*

Hasil pengujian CBR terhadap 5 variasi campuran tanah lempung dan *tailing* menunjukkan bahwa semakin besar proporsi substitusi *tailing*, maka nilai CBR semakin meningkat. Hasil ini sejalan dengan beberapa penelitian yang dilakukan terdahulu walaupun sumber *tailing* berbeda.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, maka dapat disimpulkan beberapa hal berikut:

1. Ada kecenderungan yang hampir sama antara peningkatan jumlah campuran material stabilisasi (*tailing*) dengan sifat keteknikan tanah lempung, seperti yang ditemukan pada beberapa penelitian yang terdahulu.
2. Peningkatan proporsi substitusi *tailing* berbanding lurus dengan peningkatan berat isi kering maksimum, dan nilai CBR.
3. Variasi campuran 75% tanah lempung : 25% *tailing*, memberikan nilai CBR sebesar 8%, dimana hasil ini adalah lebih besar dari nilai syarat minimal CBR untuk perkerasan jalan, yakni 6%.
4. Variasi campuran 50% tanah lempung : 50% *tailing*, menghasilkan nilai CBR sebesar 11,5%, dimana nilai ini memenuhi persyaratan minimal untuk jalan tol sebesar 10%.

6. SARAN

Hasil penelitian ini hanya merupakan studi kasus untuk tanah lempung dengan sifat fisis dan mekanis seperti yang diuraikan di atas. Untuk aplikasi pada kondisi tanah lempung yang lain, harus selalu didasarkan pada analisis hasil pengujian laboratorium, untuk mendapatkan hasil yang akurat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Politeknik Negeri Manado melalui P3M yang sudah memfasilitasi pembiayaan Skema Penelitian Wajib/Mandiri bagi tenaga pendidik yang ada dilingkungan Politeknik Negeri Manado.

DAFTAR PUSTAKA

- Budi, G. S., Cristanto, A. dan Setiawan, E., (2003), Pengaruh fly ash terhadap sifat pengembangan tanah ekspansif, *Civil Engineering Dimension*, Vol. 5 No.1 pp.20-24.
- Chairulla, B., (2011), Stabilisasi tanah lempung lunak untuk material tanah dasar sub grade dan sub base jalan raya. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala*, Vol. 1 No. 1, pp. 61-70.
- Chandra, G. R. and Thomas, B. S., (2013), A study on the optimum moisture content and maximum dry density of sandy and clayey soil stabilized by copper tailings, *Research in Civil and Environmental Engineering*, Issue:1 pp.123-138.
- Gunradi, R., (2015), Penelitian sebaran merkuri dan unsur logam berat di wilayah pertambangan rakyat, kabupaten minahasa utara, provinsi Sulawesi utara, Kelompok Penyelidikan Konservasi, Pusat Sumber Daya Geologi <http://psdg.geologi.esdm.go.id/kolokium/2015/konserv/5.pdf>.
- Hatmoko, J. T. dan Lulie, Y., (2007), UCS Tanah Lempung Ekspansif yang Distabilisasi dengan Abu Ampas Tebu dan Kapur. *Jurnal Teknik Sipil* Vol. 8 No. 1, p.64-77

- Kalimantoro, T. T. dan Trihadiningrum, Y., (2016), Stabilisasi/solidifikasi tailing tambang emas rakyat Kulon Progo menggunakan semen portland dan tanah tras, *Jurnal Teknik ITS* Vol. 5, No. 2, pp.248-254.
- Palar, H., Monintja, S., Turangan, A. E., dan Sarajar, A. N., (2013), Pengaruh Pencampuran Tras dan Kapur Pada Lempung Ekspansif Terhadap Nilai Daya Dukung, *Jurnal Sipil Statik*, 1, 6:390-399
- Pohan, M. P., (2008), Tinjauan pemanfaatan tailing tambang bijih untuk bahan bangunan sebagai solusi di bidang konstruksi, *Pusat Sumber Daya Geologi*, http://psdg.bgl.esdm.go.id/buletin_2008/MPPohan_tailing.pdf.
- Pohan, M. P., Denni W., Sabtando J. S. dan Asep A., (2007), Penyelidikan potensi bahan galian pada tailing PT. Freeport Indonesia di Kabupaten Mimika, Propinsi Papua, *Proceeding Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan dan Non Lapangan Tahun 2007*, Pusat Sumber Daya Geologi.
- Presiden Republik Indonesia, (1999) *Peraturan Pemerintah Nomor 18 Tahun 1999, tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun*. Jakarta.
- Sukarman dan Gani, R. A., (2017), Lahan bekas tambang timah di Pulau Bangka dan Belitung, Indonesia dan kesesuaiannya untuk komoditas pertanian, *Jurnal Tanah dan Iklim*, Vol. 41 No. 2, pp.21-33.
- Syahril, S., Somantri, A. K. and Haziri, A. A., (2019), Study of stabilized soil clay soil characteristics using volcanic ash and tailing as subgrade layers, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 830 (2020) 022043.
- Tampenawas, R. J., Manalip, H., Pandaleke, R. dan Khosama, L. K., (2013) Optimalisasi konsentrasi tailing sebagai substitusi parsial semen terhadap kuat tekan beton beragregat halus pecahan kaca dan pasir. *Jurnal Sipil Statik*, Vol.1, No. 2, pp.70-76.
- Triadriani, L. N., Handayanto, E, dan Utami, S. R., (2014) Penggunaan caladium bicolor, paspalum conjugatum, dan comelina nudiflora untuk remediasi tanah tercemar merkuri limbah tambang emas serta pengaruhnya terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman jagung, *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, Vol. 1 No. 1 pp.69-78
- Wang J., Feng X., Anderson C. W. N. and Shang L., (2012), Remediation of Mercury Contaminated Sites – A Review. *Journal of Hazardous Materials* 221-222 pp.1-18.
- Wesley L. D., (1977), *Mekanika Tanah*, cetakan ke VI Badan Penerbit Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Wesley L. D., (2009), *Fundamentals of soil mechanics for sedimentary and residual soils*. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Xing, K., Zhou, X., Wang, X., Wang, T., Hou, H. and Zhou, M., (2016), Effect of tailings fineness on the pore structure development of cemented paste backfill, *Construction and Building Materials* vol. 126 pp.345–350.
- Yazeed and El Naggat, (2016), Mining tailing stabilization using waste materials, *Resilient Infrastructure*, London, June 1- 4, 2016.