



PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGGUNAKAN CAMPURAN FERRONICKLE SLAG DAN KALIUM SERTA NATRIUM HIDROKSIDA

ASWIN LIM^{1*}, EVAN DARIAN¹

¹Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, Indonesia

*Corresponding author: ✉ aswinlim@unpar.ac.id

Naskah diterima : 29 Maret 2022. Disetujui: 17 Oktober 2022

ABSTRAK

Tanah lunak merupakan salah satu tanah yang bermasalah pada dunia konstruksi karena memiliki kuat geser tanah yang rendah serta kompresibilitas yang tinggi. Perbaikan tanah merupakan salah satu solusi untuk menghadapi masalah ini. Pada penelitian ini, tanah Kaolin digunakan untuk memodelkan karakteristik tanah lunak. Material *ferronickel slag* yang merupakan limbah produksi nikel digunakan sebagai *binding agent*, pengganti semen yang sudah sering digunakan untuk perbaikan tanah. Selain itu, larutan alkali (kalium hidroksida dan natrium hidroksida) yang memiliki konsentrasi tinggi digunakan sebagai aktivator untuk mengaktivasi kaolin sehingga terjadi proses pembentukan geopolimer. Pada penelitian ini, massa slag yang digunakan adalah 10% dari massa kaolin, sedangkan larutan alkali yang digunakan adalah dengan variasi 6 M, 8M, dan 10M. Setelah kaolin dicampur dengan komposisi yang ditentukan, dilakukan masa curing selama 7, 14, dan 28 hari sebelum sampel dilakukan uji kuat tekan bebas. Dari hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa larutan natrium hidroksida lebih efektif digunakan sebagai aktivator, serta kuat tekan bebas sampel paling tinggi berada pada masa sampel berumur 28 hari setinggi 933 kPa dengan konsentrasi 8M. Sedangkan, nilai kuat tekan bebas dengan larutan kalium hidroksida adalah 896 kPa dengan konsentrasi 10M. Selanjutnya, uji *Scanning Electron Microscope* dan *X-Ray Fluoresence Spectrometer* juga dilakukan pada menginvestigasi ikatan kimia yang terjadi pada sampel. Dari uji SEM dan XRF, terbukti juga sampel campuran membentuk gugus/ikatan geopolymer, dan reaksi kimia terjadi. Penambahan Kalium Hidroksida akan menambah senyawa K_2O , dan penambahan natrium hidroksida akan menambah senyawa Na_2O . Hal ini dapat menjelaskan alasan meningkatnya kuat tekan bebas tanah campuran.

Kata kunci : Perbaikan tanah, tanah lunak; ferronickel slag; geopolymer; kuat geser tanah

1. PENDAHULUAN

Rendahnya kuat geser, kompresibilitas yang tinggi, permeabilitas yang rendah, kuat tekan yang rendah dan potensi untuk mengembang dengan adanya kadar air yang tinggi karena mengandung mineral seperti montmorilonit, bentonit, dan kaolin yang mampu menyerap air menjadi salah satu masalah utama dari tanah lunak (Bell, 1992). Stabilisasi tanah dilakukan untuk mempertahankan dan/atau meningkatkan kekuatan tanah dan menambah resistensi

tanah terhadap pelunakan akibat air dengan membuat partikel tanah saling mengikat antar satu dengan lain, membuat partikel tanah jadi kedap air, atau kombinasi dari keduanya (Sherwood, 1995). Proses stabilisasi yang paling sederhana adalah kompaksi dan pembuatan saluran drainase. Proses lain dari stabilisasi tanah adalah dengan meningkatkan gradasi dari ukuran partikel tanah dan peningkatan lebih lanjut dapat dicapai dengan menambahkan bahan pengikat terhadap tanah lunak tersebut (C.D.F. Rogers, 2015). Stabilisasi tanah dapat dicapai dengan beberapa metode. Metode-metode ini dapat dikategorikan menjadi dua, yaitu stabilisasi tanah secara mekanis dan stabilisasi tanah secara kimiawi.

Salah satu teknik yang populer digunakan untuk perbaikan tanah lunak adalah dengan stabilisasi menggunakan bahan kimia (Makusa, n.d.). Penggunaan semen adalah hal yang paling biasa dilakukan untuk menstabilkan tanah lunak. Akan tetapi, penggunaan semen memberi dampak buruk bagi lingkungan, sehingga meningkatkan kesadaran untuk mencari alternatif lain (Kuncoro & Djayaprabha, 2021). Oleh karena itu, para peneliti sebelumnya telah menginvestigasi penggunaan dari bahan sisa yang menjadi pengganti bahan semen (Rajalaxmi, n.d.) melakukan stabilisasi tanah merah dengan dengan penambahan *slag* dengan variasi persentase massa dan waktu *curing*. Campuran yang optimum adalah campuran dengan tambahan *slag* dengan persentase 10 % terhadap massa tanah merah pada umur *curing* 15 hari. Selain itu, (Elkhebu et al., 2018) menyimpulkan bahwa campuran dengan tambahan *fly ash* dengan persentase 40 % terhadap massa tanah lempung pada umur *curing* 28 hari. Dan yang terakhir, (Heah et al., 2013) menyatakan bahwa campuran yang optimum adalah campuran kaolin dengan penambahan larutan NaOH dengan konsentrasi larutan 12 M pada umur *curing* 3 hari. Disini dapat terlihat bahwa, terdapat variasi campuran yang bermacam-macam untuk mendapatkan campuran optimum.

Pada artikel ini, digunakan material *ferronickel slag*. Material ini merupakan residu dari industri stainless steel dan nikel (Saha et al., 2014). Jumlah residu feronickle slag di Indonesia cukup besar. Dalam memproduksi 1 ton nikel, akan dihasilkan sekitar 50 ton *ferronickel slag* (Sugiri, 2005). Beberapa studi terdahulu telah dilakukan untuk meneliti penggunaan ferronickel slag ini, antara lain menjadi material pengganti semen (Chen et al., 2020; Huang et al., 2017; Kim et al., 2019; Kuncoro & Djayaprabha, 2021).

Pada penelitian ini, *ferronickel slag* ini kemudian dicampur dengan larutan senyawa alkali yang berfungsi sebagai aktivator agar menjadi bahan yang memiliki sifat mengikat seperti semen. Larutan senyawa alkali yang digunakan adalah Kalium Hidroksida (KOH) dan Natrium Hidroksida (NaOH). Studi ini dilakukan untuk mengetahui molaritas optimum larutan KOH maupun NaOH serta efek dari penggunaan kedua larutan tersebut untuk meningkatkan kuat geser kaolin sebagai tanah lunak. Hasil uji kuat tekan bebas dari penggunaan larutan KOH maupun NaOH dan *ferronickel slag* juga dibandingkan dengan hasil uji kuat tekan bebas kaolin yang dicampur dengan *Portland Composite Cement* (PCC) pada proporsi campuran tertentu. Selanjutnya, uji *Scanning Electron Microscope* dan *X-Ray Fluorescence Spectrometer* juga dilakukan pada menginvestigasi ikatan kimia yang terjadi pada sampel.

2. METODA PENELITIAN

Seluruh aktivitas penelitian dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah. **Gambar 1** menunjukkan bahan utama dalam penelitian ini. Kaolin diperoleh dari toko bahan kimia. Kaolin yang digunakan terlebih dahulu dilakukan uji *index properties*, seperti kadar air, berat jenis, dan batas-batas *Atterberg* (ASTM D4318-05, 2005). Pada penelitian ini, digunakan mineral Kaolin sebagai representasi dari tanah lunak. Pertimbangan menggunakan mineral kaolin karena material homogen sehingga properties tanah dapat diketahui dengan baik, serta dipakai luas oleh peneliti-peneliti untuk memodelkan tanah lunak pada skala laboratorium. (Widjaja &

Lee, 2013, Alrubaye et al, 2017). Kalium hidroksida dan natrium hidroksida yang digunakan pada penelitian ini merupakan kalium hidroksida dengan bentuk *flake* dengan kadar 90 % yang didapatkan dari toko bahan kimia. Kalium hidroksida dan natrium hidroksida ini kemudian dilarutkan dengan aquades hingga sesuai dengan molaritas yang diinginkan.



Gambar 1. Bahan utama yang digunakan pada penelitian (a). Kaolin, (b). *Ferronickel slag*, (c). Kalium Hidroksida, (d). Natrium Hidroksida

2.1. Pembuatan Larutan Kalium Hidroksida dan Natrium Hidroksida

Kalium hidroksida yang sudah dipersiapkan masih berupa padatan, oleh karena itu dilakukan pembuatan larutan kalium hidroksida terlebih dahulu yang nantinya akan digunakan sebagai aktivator untuk stabilisasi kaolin dengan *ferronickel slag*. Alat dan bahan yang diperlukan dalam pembuatan larutan kalium hidroksida dapat dilihat pada Gambar 2. Tahapan-tahapan dalam pembuatan larutan kalium hidroksida:

1. Mempersiapkan kalium hidroksida padat yang diperlukan sesuai dengan molaritas yang diinginkan.
2. Memasukkan sejumlah kalium hidroksida padat tersebut ke dalam gelas ukur yang disesuaikan dengan molaritas yang diinginkan..
3. Melarutkan kalium hidroksida padat tersebut dengan aquades.
4. Memindahkan larutan kalium hidroksida tersebut ke dalam labu ukur berukuran 1000 ml dan menambahkan aquades sampai tanda batas.
5. Menunggu hingga larutan kalium hidroksida tersebut bersuhu ruangan dan tetap menjaga larutan tetap berada di tanda batas, karena larutan dapat berkurang akibat dari adanya reaksi eksoterm.

Langkah yang sama digunakan untuk membuat larutan natrium hidroksida. Adapun molaritas menyatakan jumlah mol zat terlarut yang ada dalam suatu larutan dengan volume tertentu. Untuk mendapatkan molaritas suatu larutan dapat menggunakan rumus berikut.

$$n = \frac{m}{Mr} \quad (1)$$

$$M = \frac{n}{V} \quad (2)$$

Dimana: n adalah Mol; m adalah massa senyawa (gram); Mr adalah massa atom relative (NaOH =40 dan KOH=56); M adalah molaritas, dan V adalah volume (liter).



Gambar 2. Alat yang digunakan untuk pembuatan larutan kalium hidroksida

2.2. Pencampuran bahan

Tahap pertama dalam pembuatan sampel adalah pencampuran bahan terlebih dahulu dari bahan-bahan yang sudah dipersiapkan sebelumnya. Pencampuran bahan dilakukan dengan sebaik mungkin agar hasil campuran bersifat homogen. Adapun tahapan dalam pencampuran kaolin, ferronickel slag, dan larutan activator (KOH dan NaOH) adalah sebagai berikut:

1. Menimbang kaolin dan *slag* sesuai dengan komposisi yang direncanakan.
2. Mengaduk kaolin dan *slag* sampai homogen menggunakan mesin pengaduk (kondisi kering).
3. Menuangkan larutan aktivator secara bertahap sejumlah volume yang diperlukan agar kaolin mencapai batas cair sembari mengaduk campuran tersebut hingga homogen.

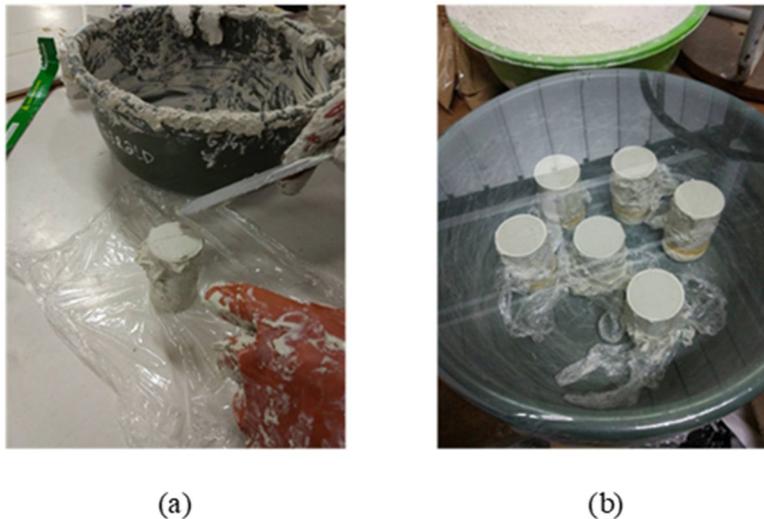
Menurut Sharma dan Bora (2003), kuat geser tanah niaralir pada kondisi batas cair adalah sebesar $1,7 \text{ kN/m}^2$, dimana nilai ini telah masuk dalam kategori tanah sangat lunak. Selain itu, pada kondisi batas cair, kualitas pencampuran sampel menjadi lebih homogen karena lebih mudah diaduk.

Selain itu, sampel campuran Kaolin dan semen juga dipersiapkan sebagai hasil perbandingan dengan campuran slag dan activator. Adapun tahapan dalam pencampuran kaolin dan semen adalah sebagai berikut:

1. Menimbang kaolin dan semen sesuai dengan komposisi yang direncanakan.
2. Mengaduk kaolin dan semen sampai homogen menggunakan mesin pengaduk (kondisi kering).
3. Menuangkan aquades secara bertahap sejumlah volume yang diperlukan agar kaolin mencapai batas cair sembari mengaduk campuran tersebut hingga homogen.

2.3. Proses mencetak dan perawatan (curing) sampel

Pembuatan sampel dilakukan dengan proses pengecoran terlebih dahulu. Pengecoran dilakukan dengan memasukkan campuran kaolin dengan *slag* dan larutan aktivator ataupun campuran kaolin dengan *portland composite cement* pada cetakan. Pada penelitian ini digunakan cetakan dari pipa PVC dengan diameter $1\frac{1}{4}$ inci. Tinggi sampel adalah 3 inci dan diameter sampel adalah $\frac{3}{2}$ inci. Pengecoran dilakukan untuk membuat sampel yang akan digunakan untuk uji kuat tekan bebas. Perawatan (*curing*) dilakukan dengan memasukkan sampel yang telah jadi ke dalam wadah yang kemudian wadah tersebut dibungkus dengan plastik pembungkus sehingga sampel yang ada di dalam wadah tidak mengalami kontak dengan udara di luar wadah tersebut. Foto mencetak dan merawat sampel disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Foto (a). mencetak sampel dan (b). perawatan sampel

2.4. Proses uji kuat tekan bebas (Unconfined Compression Test)

Uji kuat tekan bebas dilakukan untuk mengetahui kuat geser kaolin. Uji ini dilakukan dengan alat uji kuat tekan bebas pada benda uji yang sudah mengalami proses curing (Gambar 4). Tahapan-tahapan dalam pelaksanaan uji kuat tekan bebas (ASTM D2166-00, 2000):

1. Mengeluarkan sampel kaolin dari cetakan pipa PVC dengan bantuan alat ekstruder.
2. Mengukur dimensi seperti tinggi dan diameter dari sampel sebelum dan sesudah pelaksanaan uji kuat tekan bebas untuk mengetahui penyusutan sampel.
3. Meletakkan sampel pada alat uji.
4. Mengatur load dial dan displacement dial agar berada pada posisi nol.
5. Menyalakan mesin kemudian mencatat bacaan pada *displacement dial* serta *load dial*.

Setelah itu, Tabel 1 menyajikan rencana pengujian dan campuran sampel pada penelitian ini. Massa kaolin pada tiap campuran adalah 150 gr, volume larutan adalah 110,56 ml, dan variasi umur curing adalah 7,14, dan 28 hari untuk keseluruhan sampel. Total sampel yang disiapkan adalah 66 sampel dengan komposisi 33 sampel primer, dan 33 sampel cadangan (untukantisipasi sampel primer rusak).



Gambar 4. Pelaksanaan uji kuat tekan bebas

Tabel 1. Rencana pengujian dan variasi komposisi sampel uji

Sampel	Kadar Semen (%)	Kadar Slag (%)	Konsentrasi Larutan (M)		Tujuan
			KOH	NaOH	
A-6	-		6	6	Untuk mengetahui pengaruh campuran KOH dan NaOH terhadap kuat geser tanah
A-8	-	10	8	8	
A-10	-		10	10	
S-2	2	-	-	-	Sebagai data pembandingan
S-4	4	-	-	-	
S-6	6	-	-	-	
S-8	8	-	-	-	
S-10	10	-	-	-	

3. HASIL DAN DISKUSI

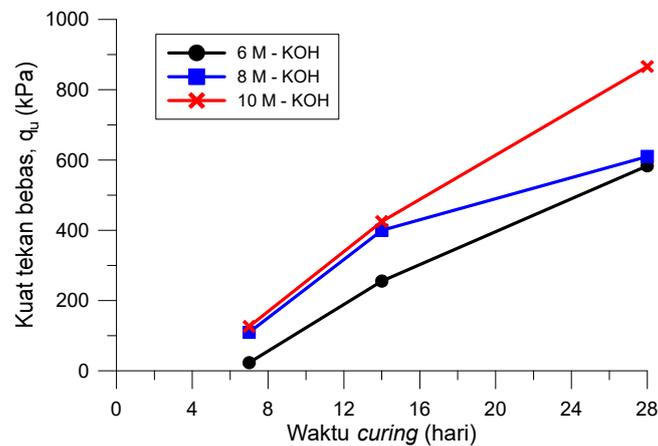
Index properties dari tanah Kaolin tersaji pada Tabel 2 seperti dibawah ini. Kadar alami kaolin yang digunakan adalah 0,63% dan berat jenis nya sebesar 2,55. Batas cair dan batas plastis adalah 73,7% dan 30%. Menurut klasifikasi Unified Soil Classification System (USCS), maka termasuk kaolin termasuk CH (*Clay high plasticity*).

Tabel 2. Index Properties Kaolin

Parameter	Nilai
Kadar air alami	0,63%
Berat Jenis	2,55
Batas Cair	73,70%
Batas Plastis	30%

3.1. Variasi waktu curing dan konsentrasi KOH

Gambar 5 menunjukkan bahwa campuran kaolin dengan *ferronickel slag* dan larutan KOH 6 M merupakan campuran yang memiliki nilai kuat tekan bebas yang paling optimum. Namun jika melihat dari tren yang ada pada Gambar 5, campuran kaolin dengan slag dan larutan KOH 10 M mempunyai tendensi untuk menjadi campuran yang mempunyai nilai kuat tekan bebas paling optimum. Karena dari campuran antara kaolin, *ferronickel slag* dan larutan aktivator kalium hidroksida terjadi reaksi pembentukan geopolimer yang menyebabkan sampel tersebut menjadi lebih padat oleh karena munculnya sifat saling mengikat seperti semen antar satu material dengan material lainnya. Kekuatan dari geopolimer yang terbentuk ini juga bergantung dari konsentrasi larutan aktivator yang digunakan juga. Konsentrasi dari larutan aktivator yang digunakan mempengaruhi pelepasan ion silikat dan aluminium yang berada pada partikel kaolin. Oleh karena itu, nilai kuat tekan bebas akan meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi larutan aktivator yang digunakan. Selain reaksi pembentukan geopolimer, terjadi juga proses hidrasi yang menyebabkan berkurangnya kadar air dalam sampel tersebut. Akibat dari berkurangnya kadar air dalam sampel, nilai kuat tekan bebas dari sampel tersebut juga meningkat akibat dari mengerasnya sampel. Berdasarkan konsep tersebut, maka dapat mendukung pernyataan sebelumnya yang menyatakan bahwa nilai kuat tekan bebas dari campuran kaolin dengan slag dan larutan aktivator 10 M seharusnya menjadi campuran yang mempunyai nilai kuat tekan bebas paling optimum.

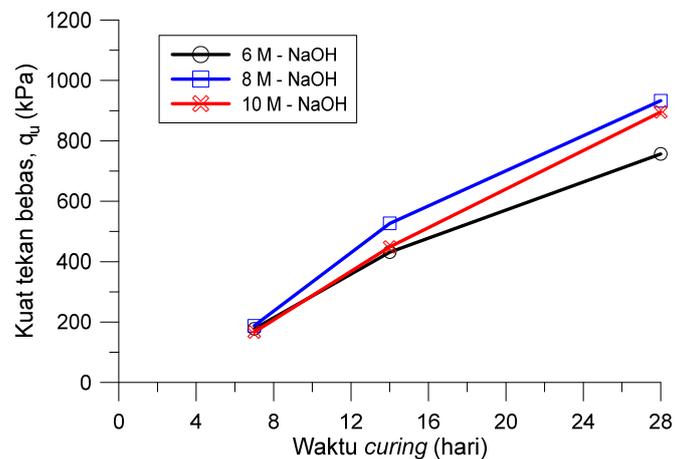


Gambar 5. Perbandingan nilai kuat tekan bebas dengan variasi waktu *curing* dan kadar konsentrasi KOH

3.2. Variasi waktu curing dan konsentrasi NaOH

Jika melihat dari tren yang ada pada Gambar 6, campuran kaolin dengan slag dan larutan NaOH 8 M mempunyai tendensi untuk menjadi campuran yang mempunyai nilai kuat tekan bebas paling optimum. Melihat dari tren yang ada, nilai kuat tekan bebas untuk variasi konsentrasi larutan natrium hidroksida 8 M lebih tinggi dari 6 M dan 10 M. Hal ini bisa disebabkan karena pada konsentrasi larutan natrium hidroksida 10 M terdapat ion Na⁺ yang berlebihan. Dalam proses proses geopolimerisasi, fungsi dari kation Na adalah untuk menyeimbangkan muatan negatif yang terbentuk akibat dari pembentukan ikatan ion Si-O-Al, selagi pada waktu yang sama OH⁻ terpakai untuk proses hidrolisis pada kaolin. Dalam konsentrasi larutan natrium hidroksida yang tinggi, terdapat ion Na⁺ dan OH⁻ yang lebih banyak juga. Oleh karena kaolin mempunyai reaktivitas yang rendah, kecepatan dari pelepasan ion dan perkembangan kekuatan kaolin tersebut juga lambat. Maka, ketika konsentrasi larutan natrium hidroksida yang lebih tinggi digunakan, sampel tersebut hanya mengandung sedikit ion yang mengalami pelepasan dan produk akibat dari reaksi sementasi, namun memiliki konten Na⁺ yang tinggi. Dengan kata lain, tidak terdapat cukup pembentukan ikatan ion Si-O-Al untuk diseimbangkan muatannya dengan ion Na⁺ yang terdapat pada jumlah yang banyak.

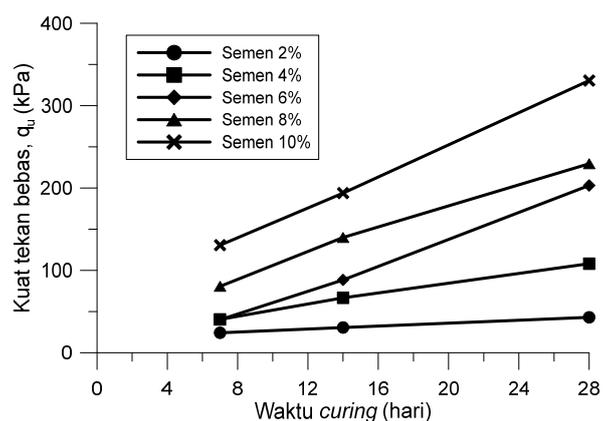
Oleh karena itu, pada penjelasan sebelumnya bahwa konsep yang mengatakan nilai kuat tekan bebas akan meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi larutan aktivator yang digunakan tidak selamanya tepat, tergantung dari jenis larutan aktivator yang digunakan juga. Selain reaksi pembentukan geopolimer, terjadi juga proses hidrasi yang menyebabkan berkurangnya kadar air dalam sampel tersebut. Akibat dari berkurangnya kadar air dalam sampel, nilai kuat tekan bebas dari sampel tersebut juga meningkat akibat dari mengerasnya sampel.



Gambar 6. Perbandingan nilai kuat tekan bebas dengan variasi waktu curing dan kadar konsentarsi NaOH

3.3. Variasi waktu curing dan kadar semen

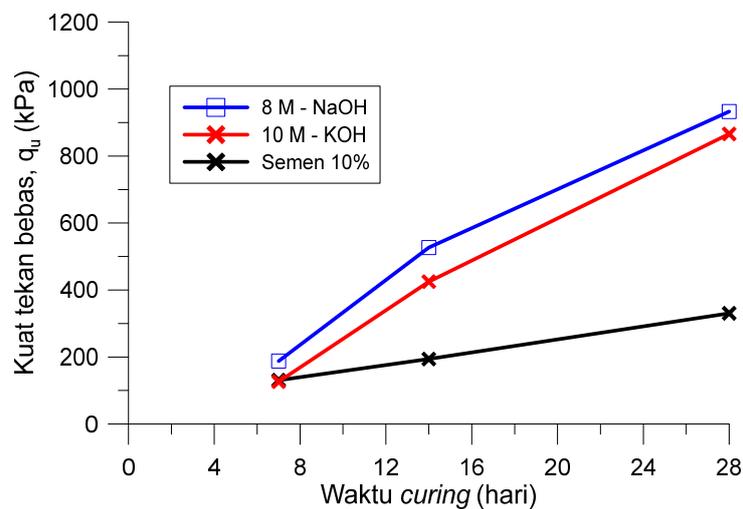
Gambar 7 menunjukkan nilai kuat tekan bebas kaolin dengan campuran variasi semen dan waktu curing. Terlihat bahwa kaolin dengan campuran kadar semen 10 % mempunyai tendensi untuk menjadi campuran yang mempunyai nilai kuat tekan bebas paling optimum. Karena dengan bertambahnya kadar semen dalam tanah akan membuat reaksi sementasi semakin kuat yang membuat proses hidrasi juga semakin cepat sehingga kadar air dalam sampel berkurang yang secara bersamaan juga membuat nilai kuat tekan bebas dari sampel tersebut meningkat.



Gambar 7. Perbandingan nilai kuat tekan bebas dengan variasi waktu curing dan kadar semen

3.4. Perbandingan hasil kuat tekan bebas untuk campuran NaOH, KOH, dan semen

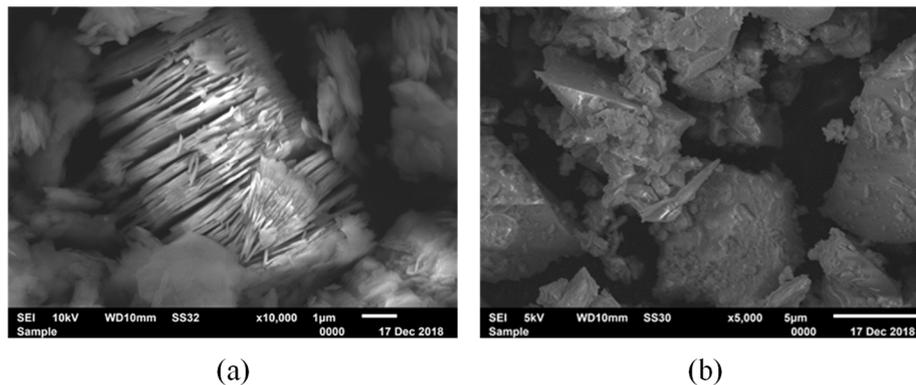
Gambar 8 menyajikan perbandingan nilai kuat tekan bebas dengan variasi campuran NaOH 8M, KOH 10M, dan semen 10%. Ketiga variasi tersebut merupakan campuran yang memberikan hasil kuat tekan maksimum pada masing-masing campuran. Campuran kaolin dengan kadar semen 10 % dijadikan sebagai pembanding terhadap kuat tekan dari campuran kaolin dengan *ferronickel slag* dan larutan aktivator. Terlihat jelas bahwa nilai kuat tekan bebas lebih besar pada sampel yang dicampur dengan *ferronickel slag* dengan campuran NaOH 8M. Pada masa curing 7 hari, nilai kuat tekan bebas antara campuran semen, KOH dan NaOH tidak memiliki perbedaan nilai kuat tekan bebas yang terlalu besar. Namun, seiring dengan bertambahnya waktu curing, nilai kuat tekan bebas menjadi berbeda antara kaolin yang dicampur dengan semen dan kaolin yang dicampur dengan *ferronickel slag* dan larutan aktivator. Peningkatan kuat tekan bebas tanah dengan campuran *ferronickel slag* dan larutan aktivator sekitar 300% dari nilai kuat tekan bebas dengan campuran semen. Hal ini merupakan hal yang cukup positif dan menjanjikan bahwa material ini sepertinya dapat menggantikan penggunaan semen dikemudian hari. Nilai kuat tekan bebas untuk campuran NaOH 8M pada masa curing 28 hari adalah sekitar 900kPa dimana ini setara dengan *undrained shear strength* tanah sebesar 450 kPa. Nilai ini sudah termasuk klasifikasi tanah keras.



Gambar 8. Perbandingan nilai kuat tekan bebas dengan variasi campuran optimum NaOH, KOH, dan semen

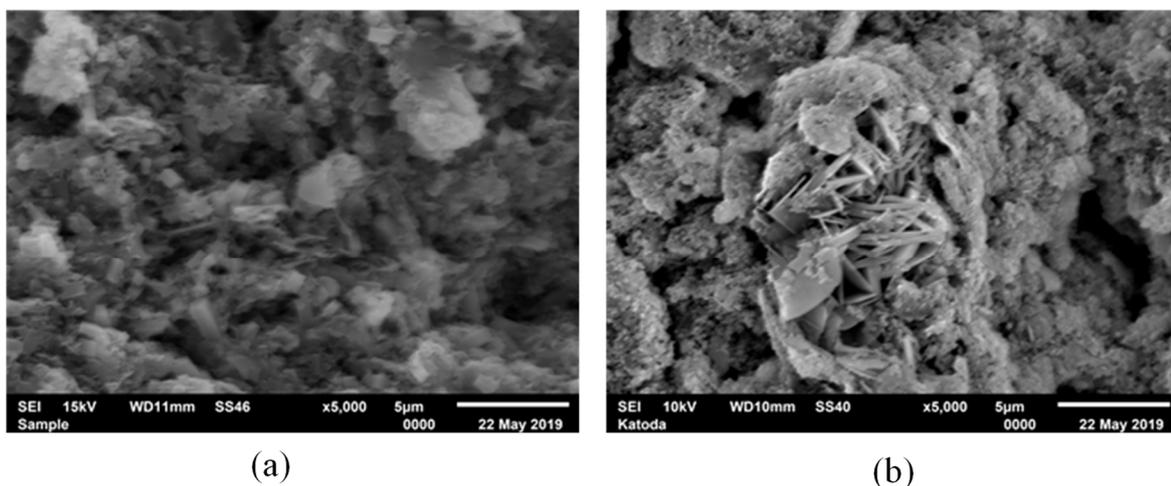
3.5. Hasil observasi Scanning Electron Microscope

Gambar 9 menunjukkan gambar Hasil *scanning electron microscope* pada (a) kaolin (b) *ferronickel slag*. Dapat terlihat bahwa morfologi dari kaolin murni adalah seperti lempengan berlapis yang saling bertumpukan antara satu dengan yang lainnya. Sedangkan, bentuk dari *ferronickel slag* adalah berbentuk *spherical*. Bentuk ini akan menjadi acuan untuk mencari kandungan *slag* pada hasil foto SEM dari campuran kaolin dengan *ferronickel slag* dan larutan aktivator.



Gambar 9. Hasil *scanning electron microscope* pada (a) kaolin (b) *ferronickel slag*

Gambar 10 menyajikan foto struktur mikroskopis campuran kaolin dengan *ferronickel slag* dan KOH, serta kaolin dengan *ferronickel slag* dan NaOH. Terlihat dari seluruh foto bahwa terbukti terjadi reaksi geopolymer dimana partikel kaolin sudah tidak terlihat jelas. Yang terlihat jelas adalah gumpalan-gumpalan yang terlihat membungkus mineral kaolin yang merupakan hasil dari reaksi geopolymer.



Gambar 10. Hasil *scanning electron microscope* pada kaolin yang dicampur dengan (a) *ferronickel slag* dan KOH dan (b) *ferronickel slag* dan NaOH.

3.6. Hasil observasi X-Ray Fluorescence Spectrometer

Uji *X-Ray fluorescence* dilakukan untuk mengetahui seperti apa komposisi senyawa penyusun material yang digunakan dalam penelitian ini. Uji ini dilakukan untuk kaolin itu sendiri, *ferronickel slag*, kaolin yang telah dicampur dengan *ferronickel slag* serta larutan aktivator. Hasil uji XRF tersaji pada Tabel 3. Susunan SiO_2 dan Al_2O_3 dalam sampel kaolin berada dalam jumlah yang sangat besar, bahkan untuk gabungan kedua senyawa tersebut menjadi 95% dari senyawa penyusun mineral kaolin. Hal ini sesuai dengan penjelasan bahwa kaolin merupakan materi *pozzolan* yang natural. Susunan SiO_2 dan Al_2O_3 dalam sampel *ferronickel slag* berada dalam jumlah yang besar, hal ini menandakan bahwa *ferronickel slag* merupakan materi *pozzolan*. Ketika sampel dicampurkan antara kaolin, *ferronickel slag* serta larutan KOH, susunan SiO_2 dan Al_2O_3 dalam sampel kaolin dengan slag dan larutan KOH berkurang dibandingkan dengan sampel kaolin murni, terutama untuk kandungan senyawa SiO_2 . Hal ini

mungkin disebabkan akibat dari reaksi geopolimer yang terjadi dalam sampel tersebut sehingga kandungan senyawa SiO_2 dan Al_2O_3 berkurang, dan oleh karena menggunakan aktivator berupa larutan KOH, maka terjadi penambahan kadar senyawa K_2O dalam sampel tersebut dibandingkan dengan sampel kaolin murni. Untuk hasil analisis XRF Kaolin dengan Ferronickle slag serta larutan NaOH, susunan SiO_2 dan Al_2O_3 juga berkurang. Hal ini mungkin disebabkan akibat dari reaksi geopolimer yang terjadi dalam sampel. Oleh karena menggunakan aktivator berupa larutan NaOH, maka terjadi penambahan kadar senyawa Na_2O dalam sampel tersebut dibandingkan dengan sampel kaolin murni.

Tabel 3. Hasil uji XRF Kaolin, *ferronickle slag*, dan campuran kaolin, *ferronickle slag* serta aktivator

Kaolin Murni		Ferronickle Slag		Kaolin+Slag+KOH		Kaolin+Slag+NaOH	
Komponen	Kadar (%)						
Al_2O_3	39,5	Al_2O_3	13,46	Al_2O_3	30,3	Al_2O_3	36,2
SiO_2	55,2	SiO_2	62,57	SiO_2	39	SiO_2	49,1
P_2O_5	0,87	MgO	1,51	Na_2O	0,111	Na_2O	7,97
K_2O	1,65	MnO	0,07	MgO	0,55	MgO	0,645
CaO	0,24	K_2O	2,72	K_2O	25,8	K_2O	1,04
TiO_2	0,61	CaO	6,66	SO_3	0,409	SO_3	0,346
Fe_2O_3	1,74	Na_2O	1,65	CaO	2,31	CaO	2,86
Ga_2O_3	0,02	TiO_2	0,53	TiO_2	0,405	TiO_2	0,427
Rb_2O	0,03	P_2O_5	0,1	MnO	0,069	Cr_2O_3	0,073
Y_2O_3	0,04	SO_3	0,16	Fe_2O_3	0,994	MnO	0,101
ZrO_2	0,04	Fe_2O_3	4,93	Rb_2O	0,022	Fe_2O_3	1,15
Hilang Pijar	0,06	Cr_2O_3	0,01	SrO	0,015	Rb_2O	0,014
		CuO	0,01	Y_2O_3	0,019	SrO	0,011
		NiO	0,004	ZrO_2	0,014	Y_2O_3	0,023
		PbO	0,004			ZrO_2	0,019
		Rb_2O	0,012			Hilang Pijar	0,021
		SrO	0,04				
		ZnO	0,012				
		ZrO_2	0,029				
		Hilang Pijar	5,5				

4. KESIMPULAN

Uji laboratorium pencampuran kaolin dengan ferronickel slag serta larutan activator (KOH dan NaOH) telah berhasil dilakukan. Hasil pencampuran juga dibandingkan dengan campuran konvensional yaitu kaolin dan semen. Kekuatan sampel diuji dengan uji kuat tekan bebas, serta ikatan kimiawi yang terjadi dibuktikan dengan uji *scanning electron microscope* (SEM) dan uji *X-Ray diffraction spectrometer* (XRF).

Dari hasil pengujian, nilai kuat tekan bebas tertinggi diperoleh dari sampel dengan campuran ferronickel slag serta NaOH 8M, diikuti campuran ferronickel slag serta KOH 10M. Kedua campuran ini memiliki kuat tekan bebas hamper 300% lebih besar dari campuran kaolin dan semen pada masa *curing* 28 hari. Namun pada masa *curing* 7 hari, kuat tekan bebas ketiga

campuran ini relatif sama (tidak berbeda signifikan). Dari uji SEM dan XRF, terbukti juga sampel campuran membentuk gugus/ikatan *geopolymer*, dan reaksi kimia terjadi. Hal ini dapat menjelaskan alasan meningkatnya kuat tekan bebas tanah campuran. Dari dua temuan diatas, campuran *ferronickel slag* dan larutan aktivator (baik NaOH maupun KOH) cukup menjanjikan untuk diaplikasikan lebih lanjut pada skala percobaan yang lebih luas.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih atas dukungan pendanaan penelitian dari Ikatan Alumni Teknik Sipil (IATS) Universitas Katolik Parahyangan. Selain itu, ucapan terimakasih juga dihaturkan untuk PT. Growth Java Industry sebagai penyedia *Ferronickel Slag*.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM D2166-00. (2000). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. In *ASTM International*. ASTM International.
- ASTM D4318-05. (2005). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. In *ASTM International*.
- Bell, F. G. (1992). *Engineering Properties of Soils and Rocks*. Butterworth Heinemann.
- C.D.F. Rogers, and S. G. (2015). Modification of clay soils using lime. *Lime Stabilisation*, 99–114.
- Chen, Y., Ji, T., Yang, Z., Zhan, W., & Zhang, Y. (2020). Sustainable use of ferronickel slag in cementitious composites and the effect on chloride penetration resistance. *Construction and Building Materials*, 240, 117969. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117969>
- Elkhebu, A., Zainorabidin, A., Bakar, I. H., Huat, B. B. K., Abdeljouad, L., & Dheyab, W. K. (2018). *Alkaline Activation of Clayey Soil Using Potassium Hydroxide*. 10, 84–89.
- Heah, C. Y., Kamarudin, H., Bakri, A. M. M. Al, Bnhussain, M., Luqman, M., Nizar, I. K., Ruzaidi, C. M., & Liew, Y. M. (2013). *Kaolin-based geopolymers with various NaOH concentrations*. 3. <https://doi.org/10.1007/s12613-013-0729-0>
- Huang, Y., Wang, Q., & Shi, M. (2017). Characteristics and reactivity of ferronickel slag powder. *Construction and Building Materials*, 156, 773–789. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.038>
- Kim, H., Hong, C., & Yong, K. (2019). Feasibility of ferronickel slag powder for cementitious binder in concrete mix. *Construction and Building Materials*, 207, 693–705. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.166>
- Kuncoro, A., & Djayaprabha, H. S. (2021). *The Effect of Sodium Hydroxide Molarity on the Compressive and Splitting Tensile Strength of Ferronickel Slag-Based Alkali Activated Mortar*. 27(2), 151–160.
- Makusa, G. P. (n.d.). *STATE OF THE ART REVIEW SOIL STABILIZATION METHODS AND MATERIALS*. Lulea University of Technology, Sweden.
- Rajalaxmi, B. (n.d.). *STABILIZATION OF RED SOIL USING BLAST FURNACE SLAG* (Issue 110). National Institute of Technology Rourkela.
- Saha, A. K., Khan, M. N. N., & Sarker, P. K. (2014). Value added utilization of by-product electric furnace ferronickel slag as construction materials : A review. *Resources, Conservation, and Recycling*, 134, 10–24.
- Sherwood, P. T. (1995). *Soil stabilization with cement and lime*. Crowthorne, Berks.
- Sugiri, S. (2005). Penggunaan terak nikel sebagai agregat dan campuran semen untuk beton mutu tinggi. *Jurnal Infrastruktur Dan Lingkungan Binaan*, 1(1), 1–8.