

Micro-analysis Tanah Ekspansif yang Diperbaiki Secara Kimiawi

Anita Setyowati Srie Gunarti*¹, Fajar Prihesnanto²

¹Program Studi Doktor Ilmu Teknik Sipil, Universitas Brawijaya, Indonesia

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam 45, Bekasi, Indonesia

e-mail: *anitassgunarti@gmail.com

Received 16 November 2022; Reviewed 08 February 2023; Accepted 23 April 2023

Journal Homepage: <http://jurnal.borneo.ac.id/index.php/borneoengineering>

Doi: <https://doi.org/10.35334/be.v1i1.3078>

Abstract

Road construction on expansive soil faces many problems such as deflection, longitudinal cracks, circular cracks and spreading cracks in road construction due to the large nature of swelling and shrinkage. This study aims to identify changes in the mineralogy microstructure and chemical properties of the soil in chemically corrected expansive soils so that solutions for expansive soil improvement are obtained by utilizing local materials based on industrial waste, namely Fly ash and Waste Foundry Sand. The research method is in the form of laboratory experiments, namely Structure Electron Microscope and XRD tests on native soil and soil stabilized with Fly ash and Waste Foundry Sand to analyze mineral structure and chemical changes. The results of the analysis found that the effect of the two types of additives on expansive soils was descriptively significant. The addition of fly ash and WFS to the soil makes the pores and cracks filled with fly ash particles and some form of hydration. After the addition of Fly ash and WFS, ion exchange and pozzolanic reactions from fly ash occur to make the flake and flocculant structure of the soil cement into a crystal or block structure, thereby increasing the compactness and integrity of the soil sample.

Keywords: Waste, Foundry sand, Fly ash, Microstructure, Expansive soil

Abstrak

Konstruksi jalan di atas tanah ekspansif banyak menghadapi permasalahan seperti lendutan, retak memanjang, retak melingkar dan retak menyebar pada konstruksi jalan akibat sifat kembang susut yang besar. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi perubahan struktur mikro mineralogi dan sifat kimia tanah pada tanah ekspansif yang diperbaiki secara kimiawi sehingga didapatkan solusi perbaikan tanah ekspansif dengan memanfaatkan material lokal berbasis limbah industri yaitu Fly ash dan Waste Foundry Sand. Metode penelitian berupa eksperimen laboratorium yaitu uji Structure Electron Microscope dan XRD pada tanah asli dan tanah yang distabilisasi dengan Fly ash dan Waste Foundry Sand untuk menganalisis struktur mineral dan perubahan kimianya. Hasil analisis menemukan bahwa pengaruh kedua jenis aditif pada tanah ekspansif cukup signifikan secara deskriptif. Penambahan fly ash dan WFS pada tanah membuat pori-pori dan retakan terisi dengan partikel fly ash dan beberapa bentuk hidrasi. Setelah penambahan Fly ash dan WFS, terjadi pertukaran ion dan reaksi pozzolan dari fly ash membuat serpihan dan struktur flokulan semen tanah menjadi struktur kristal atau blok, sehingga meningkatkan kekompakan dan integritas sampel tanah.

Kata Kunci: Waste, Foundry sand, Fly ash, Microstructure, Tanah ekspansif

1. Pendahuluan

Kondisi infrastruktur transportasi berupa jalan di beberapa wilayah Jawa Barat kerap terjadi kerusakan dikarenakan tanah asli berupa tanah ekspansif. Selain masalah kembang-susut tanah, konstruksi teknik sipil di tanah ekspansif banyak menghadapi permasalahan seperti longsor, kegagalan dinding penahan tanah, deformasi, penurunan/settlement dan sebagainya. Saat ini sedang dibangun proyek pengembangan/perluasan kawasan industri wilayah Karawang Timur (lokasi penelitian ini dilakukan) yang mana tanah pada wilayah ini sebagian besar merupakan tanah ekspansif yang tidak memenuhi subgrade yang dipersyaratkan sehingga membutuhkan treatment sebelum dilakukan pelapisan selanjutnya.

Kawasan industri banyak menghasilkan limbah hasil sampingan industri/pabrik yang memerlukan pengelolaan sehingga dapat bermanfaat kembali terutama untuk perbaikan tanah. Limbah industri seperti *Waste Foundry Sand dan fly ash* yang memiliki kandungan khusus yang dapat mengubah perilaku tanah ekspansif.

Waste Foundry Sand adalah pasir/debu hasil buangan produksi pembuatan cetakan pengecoran logam padat. *Waste Foundry Sand* (WFS) umumnya dibuang ke tempat pembuangan sampah. Namun, sifat keteknikan WFS membuatnya cocok untuk digunakan dalam sistem struktur jalan raya, yang dapat menyediakan jalan untuk high-volume reuse. Selain itu, WFS dari pengecoran besi hanya terkontaminasi secara minimal dan umumnya memenuhi kriteria peraturan untuk digunakan kembali dalam aplikasi geoteknik. Kleven, J. R., Edil, T. B., & Benson, C. H. (2000) mengevaluasi jenis limbah yang sama dengan WFS. Mereka menamakannya sebagai ESS. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ESS diklasifikasikan sebagai SP, SM, atau SP-SM (A-2-4 atau A-3 dalam AASHTO) dan harus dipadatkan hingga kering atau pada kadar air yang optimal dan, jika memungkinkan, dengan upaya pemadatan yang lebih tinggi. CBR ESS berkisar dari 4 hingga 40 dan rata-rata 20 saat dipadatkan dengan standar upaya pada kadar air yang optimal. Porsi perendaman selama tes CBR ternyata kecil untuk semua ESS. ESS yang dipadatkan pada kadar air optimal dengan upaya standar memiliki kuat tekan bebas yang berkisar antara 71 hingga 190 kPa.

Fox, P. J., & Mast, D. G. (1998) melakukan penelitian mengenai *Geotechnical Performance of Highway Embankment Constructed Using Waste Foundry Sand*. Hasil pengujian laboratorium dan lapangan WFS (*Waste Foundry Sand*) Auburn Foundry memberikan pedoman umum untuk pemilihan parameter geoteknik untuk desain awal *WFS embankments*. Dari perspektif geoteknik, hasil menunjukkan bahwa WFS dapat digunakan dengan sukses sebagai material pengisi tanggul untuk proyek jalan raya skala penuh.

Fly ash adalah material yang sangat halus dengan gradasi yang sangat uniform yang berasal dari sisa pembakaran batu bara. *Fly ash* termasuk material yang disebut dengan *pozzolanic material* karena mengandung bahan *pozzolan* seperti Silika (SiO₂), besi oksida (Fe₂O₃), Aluminium oksida (Al₂O₃), Kalsium oksida (CaO), Magnesium oksida (MgO), dan Sulfat (SO₄). Penambahan *fly ash* pada tanah ekspansif dimaksudkan agar terbentuk reaksi *pozzolanic*, yaitu reaksi antara kalsium yang terdapat pada *fly ash* dengan alumina dan silikat yang terdapat pada tanah, sehingga menghasilkan masa yang keras dan kaku. Penambahan *fly ash* (FA) selain memperkaya kandungan alumina dan silika pada tanah, juga memperbaiki gradasi tanah. Zhou, S. Q., dkk (2019) melakukan penelitian tanah ekspansif yang distabilisasi menggunakan *Fly ash* dan *lime* yang ditinjau dari mikrostrukturnya. Hasil uji SEM mengungkapkan bahwa struktur mikro tanah ekspansif yang stabil bervariasi dari struktur seperti serpihan dan flokulan yang tidak beraturan hingga struktur blok, dan kekompakan sampel tanah ditingkatkan. Hasil XRD menunjukkan bahwa kuarsa merupakan komponen utama tanah yang stabil.

Beberapa penelitian tanah ekspansif yang distabilisasi menggunakan limbah yang dianalisis dari sisi mikrostrukturnya juga telah dilakukan oleh Jain, A. K., & Jha, A. K. (2020). Hasil pemeriksaan fisiko-kimia dan mikro-analisis mengungkapkan bahwa perubahan gradasi, kohesi dan interlocking antar partikel, komposisi mineralogi, dan komposisi mikrostruktur, kimia dan unsur adalah faktor kunci dalam mengendalikan perilaku interaktif tanah yang diperbaiki dengan debu marmer. Abdelkader, H. A., dkk (2022) menyimpulkan yaitu analisis mikro menegaskan bahwa pembentukan beberapa puncak baru, perubahan morfologi tanah, dan perubahan elemen induk merupakan faktor utama dalam mengendalikan perilaku interaktif campuran tanah dengan debu granit. Penelitian mengenai stabilisasi tanah metode kimiawi menggunakan WFS maupun FA juga telah dilakukan oleh Gunarti, A. S.S (2020), Indiramma, P., dkk (2020), Kumar, A, dkk (2014), Manish, V.K.S (2021), Mohanty, S (2018), Mishra, B (2014), Venkatesh. J, dkk (2020), Cockca E (2021), Zha. F, dkk (2008), Bose. B, (2012).

Perbaikan tanah yang dikembangkan pada paper ini yaitu perbaikan tanah ekspansif secara kimiawi menggunakan *Fly Ash* dan *Waste Foundry Sand*. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis sisi mikrostruktur tanah ekspansif yang distabilisasi menggunakan limbah industri untuk meningkatkan kinerja daya dukung *subgrade* konstruksi jalan dengan cara melakukan perbaikan tanah menggunakan bahan lokal hasil buangan industri sehingga akan mengurangi timbunan limbah, menekan biaya konstruksi karena mengurangi penggunaan material aditif standar seperti semen dan kapur. Penelitian ini difokuskan pada metode stabilisasi tanah ekspansif dengan menggunakan kombinasi dua jenis limbah industri yang ditinjau dari segi analisis mikrostruktur.

2. Metode Penelitian

Penelitian berupa eksperimen laboratorium dimulai dengan melakukan studi literatur dari limbah hingga pengembangan metode stabilisasi tanah ekspansif.

Tanah ekspansif yang diteliti berupa tanah ekspansif di lokasi proyek pengembangan kawasan industri Surya Cipta Karawang Timur, Jawa Barat. Dilakukan pengujian laboratorium di beberapa tempat. Pengujian XRD Kuantitatif di Laboratorium Teknologi Mineral Batubara (TEKMIRA) Bandung, sedangkan pengujian mikro-analisis dengan metode *Scan Electron Microscopy* (SEM) dan XRF oksidasi dilakukan di Laboratorium mineral dan material maju Universitas Negeri Malang.

Data mineralogi dan unsur kimia yang diperoleh dari hasil uji laboratorium meliputi kandungan mineral lempung, unsur kimia teroksidasi, deskripsi perbesaran *microscopis* lembaran mineral yang akan disajikan dalam bentuk tabel atau presentasi grafik sebagai dasar untuk mengambil keputusan. Data-data tersebut akan diolah lebih lanjut hingga diketahui karakteristik mikro pada tanah yang distabilisasi.

Kegiatan penelitian difokuskan pada uji SEM dan XRD pada tanah yang distabilisasi metode kimiawi menggunakan 2 jenis limbah pada porsi 10% WFS dan 9% FA terhadap berat kering tanah.

Uji mikro-analisis meliputi: mineralogi XRD Kuantitatif (hanya pada sampel tanah asli), *Scan Electron Microscope* EDX, dan XRF oksidasi pada tanah asli dan tanah stabilisasi.

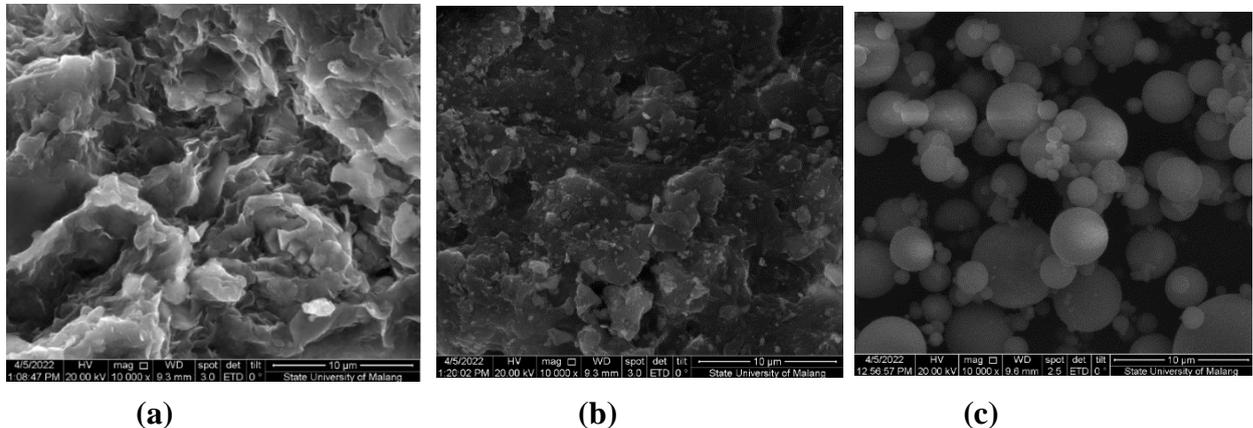
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Tanah Asli Dan Material Aditif

3.1.1 Structure Electrone Microscopic (SEM)

Foto *Structure Electrone Microscopic* pada Tanah Asli, *Waste Foundry Sand*, dan *Fly Ash* disajikan pada Gambar 1.

Dalam penelitian ini, uji dilakukan sebagai analisis kualitatif atas perbedaan bentuk dan ukuran partikel penyusun masing-masing sample yang akan dikaitkan terhadap karakteristik pengembangan/swelling potensial dan kompresibilitas serta kuat tekannya. Pengujian tanah dengan metode *Scan Electron Microscopy* (SEM) dilaksanakan di Laboratorium Mineral dan Material Maju, Universitas Negeri Malang. Gambar 1 menunjukkan hasil pengujian fotomikrograf dengan perbesaran 10000 X.



Gambar 1. (a) Tanah asli, (b) WFS, (c) FA

Konsep dasar analisis SEM ini adalah menembak/meradiasi spesimen dengan berkas cahaya dari elektron yang dipercepat pada kondisi volume tinggi untuk menghasilkan citra partikel. Kontras pada citra SEM merupakan produk hamburan difraksi cahaya yang dihasilkan oleh berbagai variasi elemen struktur mikro. Secara visual foto gambar 1 (a) menunjukkan bahwa materi spesimen tersusun dari struktur lembaran-lembaran mineral yang dapat diklasifikasikan sebagai mineral lempung. Pada bagian bawah permukaan, sample menunjukkan tekstur lembaran mineral tampak menggumpal (*flocculate*), seperti lembaran kertas yang tertumpuk. Pada bagian permukaan, tekstur lembaran mineral tampak menyebar (*dispersion*) dengan ikatan antar lembaran yang lemah. Detail foto juga menunjukkan adanya perbedaan mineralogi dan tekstur masing-masing sample yang tentunya juga dipengaruhi oleh mineral penyusunnya. Gambar 1 (b) menunjukkan mikroskop SEM dari sampel WFS. Terlihat bahwa ia memiliki distribusi ukuran yang cukup homogen, bulat kompak partikel tanpa adanya tepi atau sudut yang ditandai. Kehadiran kecil proporsi butir yang berbeda dapat dicatat, dengan penampilan cair fase, yang dianalisis oleh XRF dan ditemukan terdiri dari Si, Ca dan O dengan asumsi mereka sebagai kalsium silikat (Quaranta NE, dkk, 2010).

Gambar 1(c) *Fly ash* sebagian besar terdiri dari partikel kaca, berongga, bulat, yang merupakan cenospheres (berdinding tipis, bola berongga); penampakan struktur mikronya. Meskipun partikel abu terbang pada dasarnya sama, variasi bentuk memang terjadi (dibulatkan ke sudut) dengan beberapa kristal mullite dan besi. Selanjutnya, tekstur permukaan tampak halus dan padat hingga sangat berpori, dan permukaannya terkadang memiliki lapisan seperti magnetit (Mustafa Al Bakri AM, dkk, 2013).

3.1.2 XRF Oksida

Unsur kimia pada tanah dan WFS serta FA disajikan pada Tabel 1. Dalam penelitian ini, uji dilakukan sebagai analisis kualitatif atas perbedaan bentuk dan ukuran partikel penyusun masing-masing *sample* yang akan dikaitkan terhadap karakteristik pengembangan/swelling *potential* dan kompresibilitas serta kuat tekannya. Pengujian tanah dengan metode *Scan Electron Microscopy* (SEM) dilaksanakan di Laboratorium Mineral dan Material Maju, Universitas Negeri Malang. Gambar 1 menunjukkan hasil pengujian fotomikrograf dengan perbesaran 10000 X.

Hasil yang diperoleh dari analisis XRD pada *Waste Foundry Sand* menunjukkan fase kristal yang ada pada pasir pengecoran limbah besi cor dan aluminium setelah pengecoran. Terlihat bahwa silika tetap menjadi komponen utama dari pasir pengecoran limbah. Namun, sifat pasir pengecoran komposit limbah aluminium mengungkapkan adanya fase baru sebagai hasil dari jejak logam yang didorong oleh operasi pengecoran. Pasir limbah besi cor terpapar dan mengungkapkan adanya fase kristal silika saja. Ini menyiratkan bahwa tidak ada fase kristal baru yang terbentuk di dalam limbah pasir setelah proses pengecoran. Dalam kasus pasir limbah cor aluminium, aluminium silikat ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) diidentifikasi sebagai fase termineralisasi baru. Kehadiran fase ini dapat dikaitkan dengan aluminium cair yang mencemari pasir selama proses pengecoran. Perbedaan intensitas puncak XRD yang diamati dari berbagai sistem pasir limbah dapat dikaitkan dengan perpindahan atom di dalam kristal yang disebabkan oleh suhu pengecoran yang tinggi (Raji, A., & Dzikunu, P., 2019).

Tabel 1. Komponen unsur kimia tanah asli, WFS, dan Fly ash.

Komponen Unsur	Tanah Asli (%)	WFS (%)	FA (%)
SiO ₂	52,6	93,7	35,9
Al ₂ O ₃	11	-	11
SO ₃	2,6	-	0,61
K ₂ O	2,23	0,52	1,67
CaO	1,87	1,65	13,6
TiO ₂	1,66	0,31	1,48
V ₂ O ₅	0,05	-	0,05
Cr ₂ O ₃	0,068	1,10	0,087
MnO	0,14	0,24	0,37
Fe ₂ O ₃	23,7	3,15	33,72
CuO	0,069	0,0051	0,068
ZnO	0,095	0,15	0,03

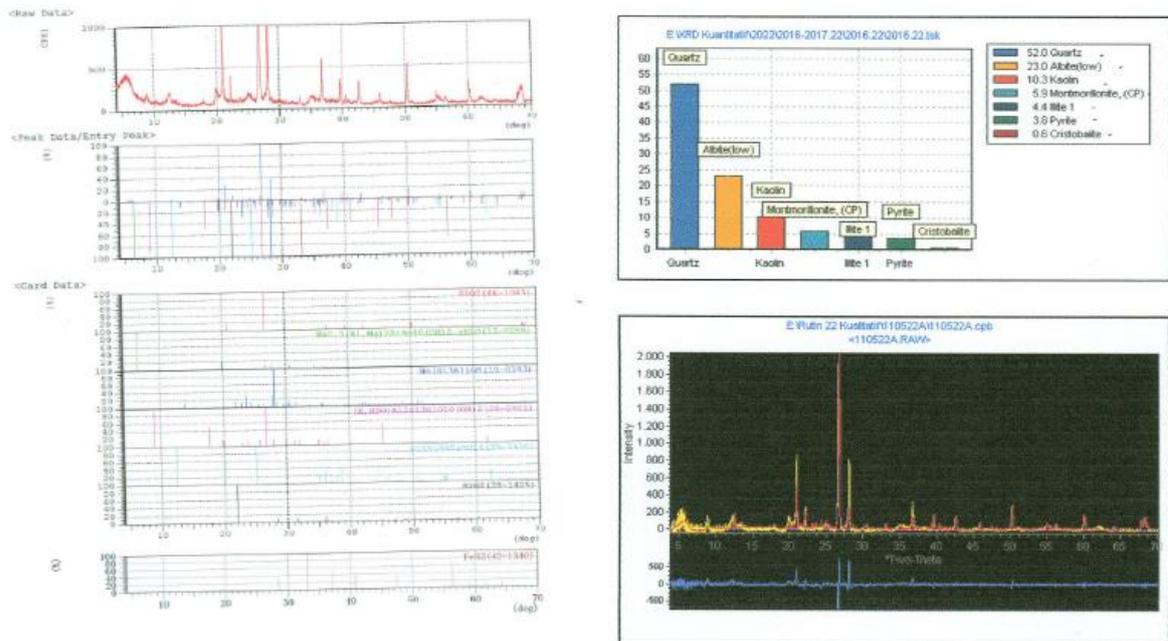
Analisis sampel *Fly Ash* dilakukan menggunakan XRD untuk mengetahui fasa yang terbentuk pada sampel, derajat kristanilitas sampel, parameter kisi kristal dan ukuran kristal sampel. Hasil difraktogram untuk *Fly ash* muncul beberapa puncak dengan intensitas yang lemah, hal ini menunjukkan bahwa dalam *Fly ash* masih terkandung oksida-oksida logam (Aisah S., dkk, 2018).

3.1.3 XRD Kuantitatif

Hasil XRD Kuantitatif disajikan pada Gambar 2. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk analisis komposisi fasa atau senyawa material dan juga karakterisasi kristal penyusun masing-masing *sample*. Dari hasil analisis uji ini diharapkan dapat dilakukan identifikasi secara semi kuantitatif kehadiran mineral-mineral yang menyebabkan tanah bersifat ekspansif terutama kelompok smectite dan illite yang sering diasosiasikan sebagai penyebab pengembangan.

Gambar 2 menunjukkan bahwa *sample* didominasi oleh 4(empat) mineral utama yakni: kuarsa (quartz), kaolinite, illite dan illite – smectite, dengan kadar yang bervariasi. Dimana kaolinite, Illite dan smectite merupakan kelompok mineral lempung utama. Uji XRD ini mengidentifikasi

keberadaan beberapa mineral lempung sensitif seperti montmorillonite, illite-smectite yang dikenal sebagai penyebab perilaku kembang susut tanah.

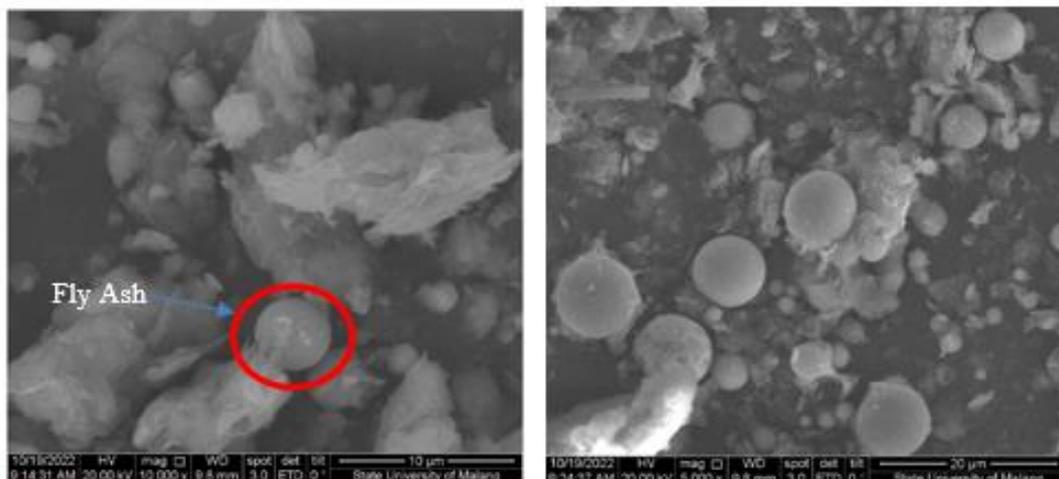


Gambar 2. XRD Kuantitatif

3.2 Tanah Stabilisasi

3.2.1 SEM Tanah Stabilisasi

Foto Structure Electrone Microscopic (SEM) disajikan pada gambar 3.



Gambar 3. Foto SEM tanah stabilisasi dengan 10% WFS dan 9% FA

Morfologi mikroskopis tanah ekspansif yang dimodifikasi oleh 10% WFS dan 9% FA ditunjukkan pada Gambar 3. Struktur tanah yang dimodifikasi lebih kompak daripada tanah polos, dan pori-pori atau retakan halus sampai batas tertentu diisi oleh partikel FA dan WFS serta mengalami hidrasi. Namun, karena hanya sejumlah kecil produk hidrasi, beberapa partikel FA memiliki sementasi yang

cukup dengan pori-pori. Pembesaran lebih lanjut dari gambar menunjukkan bahwa produk hidrasi *fly ash* (C-S-H) bereaksi dengan partikel tanah. Dengan demikian, partikel tanah serpihan asli disemen (proses sementasi) menjadi struktur blok yang kokoh/kaku, dan integritas partikel tanah meningkat (Zhou, S. Q., dkk, 2019).

3.2.2 XRF Oksida Tanah Stabilisasi

Perbandingan kandungan unsur kimia tanah stabilisasi dengan tanah asli disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan komponen unsur kimia tanah

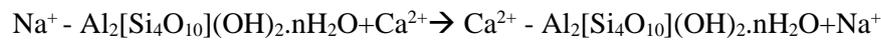
Komponen Unsur	Tanah Asli (%)	Tanah+10%WFS+9%FA (%)
SiO ₂	52,6	41,1
Al ₂ O ₃	11	11
SO ₃	2,6	-
K ₂ O	2,23	2,15
CaO	1,87	4,82
TiO ₂	1,66	1,45
V ₂ O ₅	0,05	0,065
Cr ₂ O ₃	0,068	0,079
MnO	0,14	0,15
Fe ₂ O ₃	23,7	29,3
CuO	0,069	0,076
ZnO	0,095	0,06

Tanah asli terdiri atas susunan kuarsa, dengan sejumlah kecil illite dan montmorillonit. Komponen utama tanah yang distabilisasi dengan 9% Fly ash dan 10% WFS yaitu sejumlah kecil berlintit selain kuarsa. Perbandingan komponen mineral sebelumnya dan setelah reaksi tercantum pada Tabel 2. Kandungan SiO₂ menurun secara signifikan dari 52,6% (tanah asli) ke 41,1% (Tanah asli + 10% WFS + 9% FA). Kandungan CaO meningkat secara signifikan dari 1,87% (tanah asli) ke 4,82% (Tanah+10% WFS + 9% FA).

Perubahan komposisi mineral dapat disimpulkan sebagai berikut: untuk montmorillonit terdiri dari dua: lapisan Si-O tetrahedron dan satu lapisan Al-OH oktahedron untuk merupakan struktur kristal tipe 2: 1, yang terutama bergantung pada gaya van der Waals untuk hubungan antar kristal. Al³⁺ diOktahedron Al-OH sering digantikan oleh kation rendah lainnya seperti sebagai Mg²⁺, dan Si⁴⁺ dalam Si-O tetrahedron sering digantikan oleh Ca²⁺, oleh karena itu, muatan negatif tambahan muncul di antara kristal yang dapat menarik kation lain (Na⁺, K⁺, dll.) dan ion hidrasi mereka untuk mengisi antara kristal untuk membentuk *water film*, sehingga memperbesar jarak untuk mencapai tujuan ekspansi.

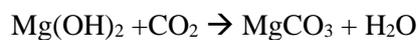
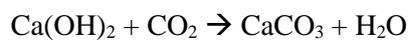
Ketika FA dan WFS ditambahkan ke tanah ekspansif, struktur mikro tanah lempung (terutama montmorillonit) sangat berubah. Alasannya adalah *fly ash* bereaksi dengan air untuk membentuk Ca²⁺ yang cukup besar. Relatif tinggi Ca²⁺ menggantikan K⁺ dan Na⁺ dalam partikel lempung melalui pertukaran ion untuk mengurangi ketebalan lapisan air tanah partikel. Secara bersamaan, lingkungan basa dibentuk oleh hidrasi/semantasi *fly ash* mendorong pertukaran ion. Hal tersebut

adalah alasan utama untuk mengurangi potensi pengembangan tanah (Zhou, S. Q., dkk, 2019). Reaksi kimia yang relevan dapat diringkas sebagai berikut (Zhou, S. Q., dkk, 2019):
Perkukaran ion,

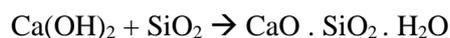


Alasan peningkatan kekuatan tanah dapat diringkas bahwa kapur bereaksi dengan CO₂ di udara untuk membentuk bahan karbon untuk mengkarbonisasi tanah. SiO₂ aktif dalam partikel lempung bereaksi lambat dengan Ca(OH)₂ membentuk kalsium silikat hidrat (C-S-H), yang keduanya bisa ada di lingkungan air. Gel diproduksi dan secara bertahap berubah menjadi kristal berserat pada tahap selanjutnya. Sebagai jumlah meningkat, kristal saling bersilangan untuk membentuk struktur rantai, sehingga mengisi pori-pori partikel untuk meningkatkan kekuatan (Zhou, S. Q., dkk, 2019). Rumus reaksi ditulis sebagai berikut (Zhou, S. Q., dkk, 2019):

Karbonasi:



Reaksi Pozzolan:



4. Kesimpulan

Analisis struktur mikro dan komposisi mineral menunjukkan bahwa tanah asli sebagian besar bersisik dan struktur flokulan dengan pori-pori dan retakan yang jelas. Penambahan FA dan WFS membuat pori-pori dan retakan terisi dengan partikel FA dan beberapa bentuk hidrasi. Setelah penambahan FA dan WFS, terjadi pertukaran ion dan reaksi pozzolan dari FA membuat serpihan dan struktur flokulan semen tanah menjadi struktur kristal atau blok, sehingga meningkatkan kekompakan dan integritas sampel tanah. Dalam penelitian ini, efek stabilisasi FA dan WFS pada tanah ekspansif diselidiki pada campuran acak. Namun, hanya varian 10% WFS dan 9% FA saja yang diambil untuk dilakukan pemeriksaan mikrostruktur. Perlu dipertimbangkan dan diselidiki lebih lanjut dengan varian yang lebih beragam agar dapat diperbandingkan untuk analisis yang lebih dalam.

Ucapan Terima Kasih

Terimakasih penulis haturkan kepada Universitas Islam 45 Bekasi Indonesia, atas Pendanaan Hibah penelitian Internal Universitas Islam 45, terutama kepada Jajaran LPPM, sehingga penelitian ini dapat terselesaikan.

Daftar Pustaka

Abdelkader, H. A., Ahmed, A. S., Hussein, M. M., Ye, H., & Zhang, J. (2022). An Experimental Study on Geotechnical Properties and Micro-Structure of Expansive Soil Stabilized with Waste Granite Dust. *Sustainability*, 14(10), 6218.

- Aisah S, Zulfikar Z, Sulistiyo YA. (2018). Sintesis Silika Gel Berbasis Fly Ash Batu Bara PLTU Paiton Sebagai Adsorben Zat Warna Rhodamin B. BERKALA SAINSTEK. 2018 May 31;6(1):31-5.
- Bose B. (2012) Geo-engineering properties of expansive soil stabilized with fly ash. *Electron J Geotech Eng.* 2012;17 J.
- Cokca E. (2001). Use of class c fly ashes for the stabilization of an expansive soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* 2001 Jul;127(7):568-73.
- Fox, P. J., & Mast, D. G. (1998). Geotechnical performance of highway embankment constructed using waste foundry sand.
- Gunarti, A. S.S., Nuryati, S., Muttaqin, P. A., & Raharja, I. (2020). Unconfined compression strength of soil using silica sand waste and dust sand foundry as a stabilizer. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1517). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1517/1/012028>
- Indiramma, P., Sudharani, C., & Needhidasan, S. (2020). Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment—An experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 22, 694-700.
- Jain, A. K., & Jha, A. K. (2020). Geotechnical behaviour and micro-analyses of expansive soil amended with marble dust. *Soils and Foundations*, 60(4), 737-751.
- Kleven, J. R., Edil, T. B., & Benson, C. H. (2000). Evaluation of excess foundry system sands for use as subbase material. *Transportation research record*, 1714(1), 40-48.
- Kumar, A., Sharma, R. K., & Singh, B. (2014). Compaction and sub-grade characteristics of clayey soil mixed with foundry sand and fly ash and tile waste. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, (spl).
- Manish, V. K. S. (2021). Use of Waste Foundry Sand (WFS) and Crushed Waste Glass (CWG) on Stabilization of Black Cotton Soil-Review.
- Mishra, B. (2014). A Study on characteristics of subgrade soil by use of foundry sand and Iron turnings. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, ISSN (Online), 2319-7064.
- Mohanty, S. (2018). Stabilization of Expansive Soil Using Industrial Waste: Fly Ash. *Civil Engineering Research Journal*, 3(2). <https://doi.org/10.19080/cerj.2018.03.555606>
- Mustafa Al Bakri AM, Abdulkareem OA, Kamarudin H, Khairul Nizar I, Abd Razak R, Zarina Y, Alida A. (2013). Microstructure studies on the effect of the alkaline activators of fly ash-based geopolymer at elevated heat treatment temperature. In *Applied Mechanics and Materials 2013* (Vol. 421, pp. 342-348). Trans Tech Publications Ltd.
- Quaranta NE, Lalla NS, Caligaris MG, Boccaccini AR, Vieira CM. (2010). Ceramic tiles adding waste foundry sand to different clays. *Waste Management and Environment V. Transaction on Ecology and Environment.* 2010 Jun 16;140:99-108.
- Raji, A., & Dzikunu, P. (2019) *Characterisation Of Waste Foundry Sand From Some Selected Small Scale Foundries In Ghana.* 2019
- Venkatesh J, Chinnusamy K, Muruges S. (2020). A Review Paper on Comparative study of Expansive Sub-Grade Stabilization using Industrial Wastes like Foundry Sand, Quarry Dust, Demolition Wastes and Rubber Scrap. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020 Nov 1* (Vol. 955, No. 1, p. 012062). IOP Publishing.
- Zha F, Liu S, Du Y, Cui K. (2008). Behavior of expansive soils stabilized with fly ash. *Natural hazards.* 2008 Dec 1;47(3):509-23.

Zhou, S. Q., Zhou, D. W., Zhang, Y. F., & Wang, W. J. (2019). Study on physical-mechanical properties and microstructure of expansive soil stabilized with fly ash and lime. *Advances in Civil Engineering*, 2019.