



Analisis Peningkatan Kuat Geser Tanah Pada Penambahan Geopolimer Abu Terbang

Stivianly R. P. Tumiwa^{#a}, Roski R. I. Legrans^{#b}, Alva N. Sarajar^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
^astivianlytumiwi@gmail.com, ^blegransroski@unsrat.ac.id, ^calva_sarajar@unsrat.ac.id

Abstrak

Pembangunan infrastruktur seringkali terhambat oleh kondisi tanah yang kurang stabil, seperti tanah pasir, yang rentan terhadap deformasi dan memiliki kuat geser rendah. Metode konvensional seperti penggunaan semen memiliki dampak lingkungan yang signifikan dan biaya yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas geopolimer berbahan dasar abu terbang sebagai alternatif ramah lingkungan untuk stabilisasi tanah pasir. Geopolimer, yang merupakan material pengikat aluminosilikat yang diaktifasi alkali, menawarkan kekuatan mekanik tinggi dan emisi karbon yang rendah. Penelitian ini menganalisis pengaruh penambahan geopolimer abu terbang dengan variasi 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% terhadap sifat fisik dan mekanik tanah pasir. Sampel tanah diambil dari Jl. Raya Manado Tomohon 90, Pineleng II, Minahasa, Sulawesi Utara. Material yang digunakan meliputi abu terbang kelas C dari PLTU Amurang, serta larutan natrium hidroksida (NaOH) 20M dan natrium silikat (Na₂SiO₃). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan geopolimer secara signifikan memengaruhi sifat tanah. Kuat geser tanah asli sebesar 0,05 kg/cm² meningkat menjadi 0,32 kg/cm² pada campuran 20% geopolimer, yang merupakan peningkatan paling signifikan. Peningkatan ini juga disertai dengan penurunan kadar air tanah dari 60,5% menjadi 43%. Konsistensi tanah berubah dari sangat lunak menjadi lunak pada penambahan 5% hingga 15% dan menjadi keras sedang pada 20% geopolimer. Analisis statistik (ANOVA) mengkonfirmasi bahwa penambahan geopolimer secara signifikan memengaruhi kuat geser tanah asli pada persentase optimal penambahan geopolimer sebesar 20%. Penelitian ini membuktikan bahwa geopolimer berbahan dasar abu terbang merupakan solusi yang efektif dan berkelanjutan untuk stabilisasi tanah pasir.

Kata kunci: kuat geser tanah, geopolimer, abu terbang, stabilisasi tanah, uji tekan bebas

1. Pendahuluan

Tanah pasir, dengan kohesi yang rendah dan permeabilitas yang tinggi, rentan terhadap deformasi dan kurang stabil untuk menopang struktur. Oleh karena itu, stabilisasi tanah diperlukan untuk meningkatkan daya dukung dan kuat gesernya pada proyek-proyek infrastruktur seperti jalan dan fondasi. Meskipun metode konvensional menggunakan semen umum digunakan, proses produksinya menyebabkan emisi CO₂ yang tinggi dan berdampak buruk pada lingkungan.

Geopolimer, pertama kali diperkenalkan oleh Joseph Davidovits, adalah reaksi aluminosilikat padat dengan larutan alkali hidroksida atau silikat berair pekat yang menghasilkan bahan alkali aluminosilikat sintetis. Geopolimer dapat menunjukkan beragam sifat dan karakteristik, termasuk kekuatan tekan yang tinggi, pengerasan yang cepat atau lambat, tahan asam, tahan api, dan konduktivitas termal yang rendah. Hal tersebut bergantung pada pemilihan bahan baku dan kondisi pemrosesan. Pemanfaatan geopolimer sebagai bahan substitusi semen banyak dilakukan pada penelitian beton.

Pengerasan pada geopolimer didasarkan pada mekanisme polimerisasi, dimana proses polimerisasi melibatkan reaksi kimia yang sangat cepat dalam kondisi basa pada mineral Si-Al, selanjutnya menghasilkan rantai polimer tiga dimensi dan struktur cincin yang terdiri dari Si-O-Al-O. Gel yang terbentuk mengandung kation alkali untuk memenuhi kekurangan aluminium-silikon. Fase kaya aluminium yang terbentuk menghasilkan produk gel tiga dimensi yang lebih stabil dan kaya silikon dalam bentuk Q⁴ (nAl), dimana pembentukan ini tergantung pada kondisi

perawatan aktivator.

Geopolimer umumnya dibentuk melalui reaksi bubuk aluminosilikat dengan larutan alkali silikat dan dipadatkan melalui polimerisasi ketika ion logam (M^{m+}) yang keluar dari pengisi menjembatani asam asetat silikat melalui reaksi dengan komponen cairan (Si, O, H). Geopolimer kemudian terpadatkan sebagai kristal polimerisasi yang menyusut dengan mengambil ion logam (M^{m+}) ke dalam struktur jembatan silikat asam asetat. Proses ini dikenal dengan istilah solidifikasi.

Cairan alkali, atau aktivator alkali, digunakan untuk mengaktifkan bahan utama. Ini merupakan faktor terpenting dalam memproduksi semen geopolimer melalui proses geopolimerisasi. Aktivator mendorong pengendapan dan kristalisasi spesies silika dan alumina yang ada dalam larutan. Mekanisme awal reaksi didorong oleh kemampuan larutan basa untuk melarutkan bahan pozzolan dan melepaskan silikon dan aluminium reaktif ke dalam larutan. Aktivator yang paling banyak digunakan adalah campuran natrium atau kalium hidroksida ($NaOH$, KOH) dan cairan sodium ($nSiO_2Na_2O$) atau cairan potassium ($nSiO_2K_2O$).

Abu terbang adalah salah satu bahan utama penting yang digunakan untuk membuat geopolimer. Abu terbang terdiri dari abu halus yang dihasilkan dari pembakaran batu bara bubuk di pembangkit listrik. Komposisi kimianya tergantung pada komposisi mineral gangue batubara (bagian anorganik batubara). Silika biasanya bervariasi dari 40 hingga 60% dan alumina dari 20% hingga 30%. Kandungan zat besinya cukup bervariasi. Alkali hadir dalam jumlah yang cukup besar dan kalium lebih banyak dibandingkan natrium.

Berdasarkan ASTM C618, terdapat dua jenis abu terbang yaitu abu terbang kelas F dan abu terbang kelas C. Perbedaan utama antara kedua kelas ini adalah jumlah kandungan kalsium, silika, alumina dan besi dalam abu. Abu terbang kelas F biasanya merupakan produk sampingan dari pembakaran batubara antrasit dan bitumen yang lebih keras dan lebih tua. Abu terbang kelas F bersifat pozzolan dan mengandung kurang dari 20% kapur (CaO). Memiliki sifat pozzolan, silika kaca dan alumina dari abu terbang kelas F memerlukan bahan perekat, seperti semen Portland, kapur tohor, atau kapur terhidrasi, dengan adanya air agar dapat bereaksi dan menghasilkan senyawa semen. Alternatifnya, penambahan aktivator kimia seperti cairan natrium silikat ke abu terbang kelas F dapat menyebabkan pembentukan geopolimer.

Abu terbang kelas C yang dihasilkan dari pembakaran batubara lignit atau sub-bituminous yang lebih muda, selain memiliki sifat pozzolan, juga memiliki sifat self-cementing. Dengan adanya air, abu terbang kelas C akan mengeras dan bertambah kuat seiring berjalannya waktu. Abu terbang kelas C umumnya mengandung kapur (CaO) lebih dari 20%. Berbeda dengan kelas F, abu terbang kelas C yang melakukan self-cementing tidak memerlukan aktivator. Kandungan alkali dan sulfat (SO_4) umumnya lebih tinggi pada abu terbang kelas C.

Tabel 1. Perbandingan Unsur Kimia Berbagai Tipikal Bahan Pengikat (Binders) menurut ASTM C989 (dalam persentase)

Bahan Pengikat (sebagai oksida)	Semen Tipe I	Abu Terbang Kelas C	Abu Terbang Kelas F
SiO_2	21.1	33.5	43.4
Al_2O_3	4.6	22.9	18.5
CaO	65.1	27.4	4.3
MgO	4.5	4.6	0.9
Fe_2O_3	2.0	6.1	29.9
SO_3	2.8	2.8	1.2

Beberapa penelitian telah menunjukkan efektivitas penggunaan geopolimer berbahan dasar abu terbang dalam meningkatkan kekuatan material. Sinolungan dkk (2008) telah meneliti penggunaan geopolimer berbahan dasar abu terbang pada proses solidifikasi tanah lempung lunak Ariake. Nishida dkk (2008) telah menggunakan geopolimer berbahan dasar abu terbang pada solidifikasi tanah lempung Bangkok. Legrans (2015) menggunakan abu Batubara PFBC (Pressurized Fluidized Bed Combustion) sebagai bahan dasar geopolimer untuk meningkatkan kuat geser niralir tanah lempung Ariake. Legrans dan Kondo (2015) menggunakan terak EAF (Electric Arc Furnace) sebagai bahan dasar geopolimer untuk meningkatkan kuat geser tanah kerukan dan tanah pasir lepas. Erfanto dkk (2020) menggunakan abu terbang dari PLTU sebagai bahan dasar geopolimer pada tanah pasir berlempung. Sengkey dkk (2024) menggunakan metode tekan bebas untuk menganalisis kuat geser tanah pasir. Penelitian-penelitian tersebut

menyimpulkan bahwa geopolimer berbahan dasar abu terbang dapat meningkatkan kuat geser niralir. Meskipun demikian, konsentrasi alkali aktivator dan rancangan campuran pembentuk geopolimer dari bahan dasar dan alkali aktivator dari penelitian-penelitian terdahulu berbeda sehingga berpengaruh terhadap besar capaian kuat geser niralir tanah setelah proses solidifikasi. Penelitian ini menggunakan abu terbang sisa produksi PLTU sebagai bahan dasar geopolimer dan alkali aktivator dari campuran larutan natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3), dengan tujuan untuk meningkatkan kuat geser niralir.

2. Bahan dan Metode

Penelitian ini merupakan studi eksperimental laboratorium yang dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah, Fakultas Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi.

2.1. Tanah

Berdasarkan analisis saringan, tanah yang digunakan didominasi oleh pasir, dengan persentase lolos saringan No. 200 kurang dari 50%. Hasil uji batas Atterberg menunjukkan tanah ini non-plastis, dan klasifikasi USCS mengidentifikasinya sebagai tanah pasir bergradasi buruk (SP). Sifat fisik tanah disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat Fisik Tanah

Sifat	Nilai
Kadar air tanah asli, w (%)	60,458
Berat jenis	2,631
Lolos No. 200 (%)	3.15
Batas Atterberg	NP

Sumber: Hasil Penelitian, 2025

2.2. Material Utama

Material utama dalam penelitian ini adalah abu terbang kelas C yang disuplai dari PLTU Amurang. Sifat-sifat abu terbang yang diperoleh dari uji laboratorium pada Badan Penelitian dan Standardisasi Industri di Indonesia yang bertempat di kota Manado, adalah sebagai berikut:

- $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 = 86,73\%$
- $CaO = 25\%$
- Berat satuan (kg/m^3) = 775,87

2.3. Aktivator

Cairan aktivator diperoleh dengan mencampurkan larutan natrium hidroksida (NaOH) 20M dan natrium silikat (Na_2SiO_3) dengan perbandingan NaOH terhadap Na_2SiO_3 adalah 5:2. Dengan demikian berat larutan natrium hidroksida adalah 2/5 berat larutan natrium silikat. Dalam penelitian ini digunakan larutan natrium hidroksida (NaOH) dengan konsentrasi 20 molar (20 M). Diketahui bahwa berat molekul (BM) NaOH adalah 40 gram/mol, sehingga jumlah NaOH padat yang dibutuhkan untuk membuat 1 liter larutan 20 M dapat dihitung sebagai berikut: Massa NaOH = $20\text{Mol} \times 40 \text{ gram/mol} = 800\text{gram}$

2.4. Geopolimer

Geopolimer dalam penelitian ini terbentuk dari alkali aktivator dan material dasar abu terbang dengan perbandingan 3:4.

2.5. Tahapan Penelitian dan Rancangan Percobaan

Kegiatan Penelitian dilakukan dengan tahapan sebagai berikut: (i) percobaan sifat fisik; (ii) desain campuran; (iii) pembuatan geopolimer; (iv) campuran tanah dan geopolimer; (v) pengujian

kuat tekan bebas dan (vi) analisis terhadap hasil uji. Pengujian sifat fisik tanah dilakukan menurut standar ASTM untuk setiap jenis pengujian, yang bertujuan untuk mengetahui kadar air alami, berat jenis, distribusi ukuran partikel dan batas-batas Atterberg.

Dalam desain campuran, komposisi pasta geopolimer dihitung. Perbandingan campuran tanah-geopolimer ditentukan dengan komposisi sebagai berikut:

- Tanah asli + 0% Geopolimer
- Tanah asli + 5% Geopolimer
- Tanah asli + 10% Geopolimer
- Tanah asli + 15% Geopolimer
- Tanah asli + 20% Geopolimer

Penambahan geopolimer dihitung berdasarkan persentase berat tanah. Pengujian benda uji bertujuan untuk mengetahui kekuatan tanah-geopolimer pada setiap perlakuan. Instrumen uji tekan bebas digunakan untuk pengujian tersebut. Dalam menganalisis hasil, analisis statistik berupa analisis keragaman (ANOVA) digunakan untuk membantu dalam menarik kesimpulan sesuai dengan tujuan penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan geopolimer secara signifikan memengaruhi sifat tanah. Kuat geser tanah asli sebesar $0,05 \text{ kg/cm}^2$ meningkat menjadi $0,32 \text{ kg/cm}^2$ pada campuran 20% geopolimer, yang merupakan peningkatan paling signifikan. Peningkatan ini juga disertai dengan penurunan kadar air tanah dari 60,5% menjadi 43%. Konsistensi tanah berubah dari sangat lunak menjadi lunak pada penambahan 5% hingga 15% dan menjadi keras sedang pada 20% geopolimer. Analisis statistik (ANOVA) mengkonfirmasi bahwa penambahan geopolimer secara signifikan memengaruhi kuat geser niralir tanah asli.

Penelitian ini membuktikan bahwa geopolimer berbahan dasar abu terbang merupakan solusi yang efektif dan berkelanjutan untuk stabilisasi tanah pasir. pada Tabel 4. Konsistensi tanah ditunjukkan oleh nilai kuat geser niralir menurut Terzaghi dan Peck (Tabel 3).

Tabel 3. Kuat Geser Niralir berdasarkan Konsistensi Tanah (Terzaghi dan Peck, 1967)

Konsistensi	Kuat Geser Niralir, c_u (kPa)
Sangat Lunak	0 sd. 12.5
Lunak	12.5 sd. 25
Agak Kaku	25 sd. 50
Kaku	50 sd. 100
Sangat Kaku	100 sd. 200
Keras	> 200

Tabel 4. Rata-rata Kuat Geser Niralir pada Perlakuan

Perlakuan	w (%)	q_u (kg/cm^2)	c_u (kg/cm^2)
Tanah (SP, 0%)	35	0,109	0,05
Tanah + 5% Geopolimer	28	0,348	0,17
Tanah + 10% Geopolimer	31	0,427	0,21
Tanah + 15% Geopolimer	30	0,474	0,23
Tanah + 20% Geopolimer	29	0,634	0,31

Sumber: Hasil Penelitian, 2025

Pada ANOVA terlihat bahwa nilai F hitung (*F Value*) lebih besar dari nilai tabel F pada probabilitas kesalahan 1% dan 5% menurut banyaknya perlakuan dan ulangan (replikasi) pada setiap perlakuan. Dengan demikian dinyatakan bahwa penggunaan geopolimer secara sangat signifikan berpengaruh terhadap peningkatan kuat geser niralir tanah asli.

Tabel 5. Analisis Keragaman (ANOVA) (Steel dan Torrie, 1980)

Source of Variation	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Value	F Table	
					P < 0,05	P < 0,01
Mixture Ratio	4	0,368	0,092	2103,98		
Experimental Error	45	0,002	4,384		2,58	3,77

Sumber: Hasil Analisis, 2025

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa penambahan geopolimer berbahan dasar abu terbang secara signifikan memengaruhi sifat fisik dan mekanik tanah pasir. Kuat geser tanah asli sebesar $0,05 \text{ kg/cm}^2$ meningkat secara substansial menjadi $0,32 \text{ kg/cm}^2$ pada campuran 20% geopolimer, yang juga mengubah konsistensi tanah dari sangat lunak menjadi keras sedang. Peningkatan kekuatan ini terutama disebabkan oleh penurunan kadar air tanah dari 60,5% menjadi 43%. Melalui analisis statistik (ANOVA), terbukti bahwa penambahan geopolimer menghasilkan perbedaan yang sangat signifikan pada kuat geser dengan persentase optimal dari penambahan geopolimer ini adalah 20%. Penelitian ini juga menegaskan bahwa penggunaan alkali aktivator yang terdiri larutan natrium hidroksida (NaOH) 20M dan natrium silikat (Na_2SiO_3) dan abu terbang (*fly ash*) kelas C sisa produksi PLTU, untuk membentuk geopolimer dapat meningkatkan kuat geser niralir pada tanah pasir bergradasi buruk (SP).

Referensi

- Wallah, S.E., Rangan, B.V. (2006): Low Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long Term Properties, Research Report GC2, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- Rangan, B.V. (2008): Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *Research Report GC4*, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- Ikeda Ko., Mikuni Akira. (2006): Recent Development of Geopolymers from Viewpoint of Carbon Dioxide Emission and Waste Management Problems, *Trans. MRS-J.*, 31, 319-324.
- Sinolungan, M., Koumoto, T., Kondo F., Zhao Y. (2008): Solidification of Soft Ariake Clay by Mixing with Fly Ash-Based Geopolymer, *Journal of Transactions of The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering*, Tokyo, 5(76), 257, 35-41.
- Khale Divya, Chaudhary Rubina. (2007): Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing Its Development: A Review, *Journal of Material Science*, 42, 729-746.
- Kong Daniel, L.Y., Sanjayan Jay, G. (2008): Damage Behavior of Geopolymer Composites Exposed to Elevated Temperatures, *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, 30, 986-991.
- Nishida, K., Koumoto, T., Suwanvitaya, P., Suwanvitaya, P., Kondo, F. (2008): Compressive Strength Characteristics of Soft Bangkok Clay Stabilized by Fly Ash-Based Geopolymer, *Proceeding of the 2nd Technology and Innovation for Sustainable Development Conference*, Thailand, 164-167.
- Legrans, R.R.I. (2015). "Strength Improvement of Soft Ariake Creek Clay Through Solidification by PFBC Coal Ash-based Geopolymer." *Tekno*, 13, No. 63, 99-101.
- Legrans, R. Kondo, F. (2015). "Strength improvement of dredged soil through solidification by Eaf Slag-based geopolymer." *Bulletin of Faculty of Agriculture, Saga University*, 100, 33-41.
- Legrans, R.R.I. (2015). "Solidification of Sand for Strength Improvement." *Tekno*, 13, No. 63, 81-85.
- Steel Robert G.D., Torrie James H. (1980): Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach, International Student Edition, *McGraw-Hill Kogakusha*, 2, 137-143,153-158,172-176,185-189,239-250,272-278,365-372,577,580,588,597.
- Erfanto, A., Legrans, R.R.I., Sarajar, A. N. (2020). Pengaruh Penambahan Geopolymer Berbahan *Fly Ash* Sengkey, G. G. G. (2024). Penggunaan Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash) Untuk Meningkatkan Kuat Geser Tanah. TEKNO, 22(88).
- Dari PLTU Terhadap Kuat Geser Pada Tanah Pasir Berlempung. TEKNO – Volume 18 Nomor 76 – Desember 2020, 15, 1-8.
- Parapaga, R. T., Sarajar, A. N., Legrans, R. R. I. (2018). PENGARUH PENAMBAHAN ZEOLITE TERHADAP KUAT. Jurnal Sipil Statik Vol.6 No.7 Juli 2018, 501-509.