

STABILISASI TANAH GAMBUT DENGAN GEOPOLIMER HIBRID ABU TERBANG DAN PASIR

GUNAWAN WIBISONO^{1*}, WILDAN AZIZI¹, AGUS IKA PUTRA¹, SYAWAL SATIBI¹, MONITA OLIVIA¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau. Pekanbaru, Riau.

*Corresponding Author : ✉ g.wibisono@eng.unand.ac.id

Naskah diterima : 25 Agustus 2025. Disetujui: 23 November 2025. Diterbitkan : 7 Desember 2025.

ABSTRAK

Tanah gambut memiliki kadar air dan kemampatan tinggi serta daya dukung yang rendah. Stabilisasi tanah gambut dilakukan untuk meningkatkan daya dukung, menambah kepadatan dan kekuatan tanah. Material geopolimer merupakan salah satu bahan untuk stabilisasi tanah yang berasal dari bahan dasar diaktifkan dengan larutan aktivator seperti natrium hidroksida dan natrium silikat. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kuat tekan bebas, kadar air rata-rata dan kepadatan kering tanah gambut yang distabilisasi dengan campuran geopolimer hibrid abu terbang dan pasir. Parameter yang dikaji berupa molaritas NaOH sebesar 10M, 12M dan 14M, dan modulus silikat (rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) sebesar 1,5; 2,0; dan 2,5. Hasil kajian menunjukkan bahwa kuat tekan bebas tertinggi diperoleh untuk campuran dengan modulus silikat 2,5 (GP-12M-Ms2.5), yakni sebesar 23,68 kPa pada 28 hari. Pengujian *Unconfined Compressive Strength* (UCS) dilakukan setelah sampel diperam selama 7, 28 dan 56 hari. Kuat tekan bebas campuran GP-14M-Ms2 dengan molaritas 14M adalah sebesar 23,68 kPa pada 28 hari. Hal ini disebabkan oleh reaksi geopolimerisasi yang mengeluarkan ion OH^- untuk melarutkan bahan silika dan alumina pada abu terbang, dan modulus silikat (Ms) dapat meningkatkan pH geopolimerisasi dan mengikat partikel tanah lebih baik. Kadar tanah kering paling tinggi dihasilkan oleh campuran GP-12M-Ms2.5 untuk 7, 28 dan 56 hari. Pasir yang digunakan dalam stabilisasi tanah gambut dapat membantu peningkatan kepadatan karena dapat mengisi rongga-rongga tanah.

Kata kunci abu terbang, gambut, geopolimer hibrid, kuat tekan bebas, stabilisasi

1. PENDAHULUAN

Tanah gambut merupakan tanah organik terbentuk dari penguraian sisa tanaman yang tidak sempurna di lahan basah. Berdasarkan ASTM D4427-92 (ASTM International, 2002), tanah gambut diklasifikasikan sebagai tanah dengan kadar organik lebih dari 75%, kadar air tinggi, dan angka pori yang besar. Secara umum tanah gambut memiliki tingkat kemampumampatan tinggi dan daya dukung rendah sehingga konstruksi di atasnya dapat

mengalami penurunan sebagian atau keseluruhan. Untuk meningkatkan kekuatan tanah gambut agar dapat digunakan pada konstruksi maka diperlukan perbaikan tanah. Stabilisasi massa merupakan salah satu teknik mencampur tanah dengan bahan pengikat dalam volume besar untuk membuat tanah lebih homogen (Jendrysik et al., 2021). Teknik ini lebih efektif digunakan untuk stabilisasi gambut dalam massa besar karena bahan pengikat dimasukkan ke dalam tanah melalui teknik injeksi. Bahan pengikat yang telah dikaji dalam stabilisasi gambut berupa kapur (Yani et al., 2023) dan semen (Kamaluddin et al., 2022), bahan-bahan pozzolanik seperti abu terbang (Manthining et al., 2022), abu sekam (Gazali et al., 2023), dan abu sawit (Dwina et al., 2021). Akan tetapi tanah gambut yang mengandung kadar organik tinggi seperti asam humat dan fulvat dapat menurunkan pH tanah dan memperlambat proses stabilisasi terutama dengan semen atau kapur yang mengandung kalsium hidroksida (CaO) (Ma et al., 2016).

Material geopolimer merupakan hasil reaksi geopolimerisasi dari bahan dasar mengandung silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) diaktifkan dengan larutan aktivator dari campuran natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3) (Davidovits, 1994). Selain digunakan dalam material konstruksi seperti beton, geopolimer berpotensi sebagai bahan stabilisasi karena bersifat sebagai pengikat dan lebih tahan terhadap zat organik yang terdapat pada tanah. Penggunaan geopolimer *fly ash bottom ash* (FABA) dapat meningkatkan *Unconfined Compressive Strength* atau kuat tekan bebas tanah (UCS) pada tanah ekspansif sebesar 24,52 kPa (Wijaya et al., 2024). Hasil penelitian Fitriyani (Fitriyani, 2025) mengenai stabilisasi tanah menggunakan geopolimer pada tanah lempung organik memberikan hasil sebesar 1169,93 kPa setelah pemeraman selama 28 hari. Kajian lain (Rahayu et al., 2018) melaporkan peningkatan kuat tekan bebas pada tanah gambut yang distabilisasi dengan geopolimer abu terbang sebesar 42,96 kPa setelah pemeraman selama 10 hari. Hasil kajian tersebut membuktikan bahwa geopolimerisasi dapat terjadi pada berbagai tipe tanah meskipun memiliki kandungan organik berbeda-beda dan kecepatan reaksi berbeda karena komposisi bahan pengikat dan larutan aktivator yang digunakan.

Stabilisasi menggunakan geopolimer tidak terbatas menggunakan variasi bahan dasar maupun bahan pengikat. Penggunaan aditif semen Portland merupakan salah satu cara untuk mempercepat reaksi geopolimerisasi pada tanah. Tipe geopolimer yang menggunakan aditif CaO dari semen Portland tersebut dinamakan geopolimer hibrid. Hasil kajian sebelumnya menunjukkan bahwa geopolimer hibrid menggunakan modulus silikat (M_s) sebesar 1,5-2,5; molaritas natrium hidroksida (NaOH) sekitar 10-14M, dan persentase semen Portland sebanyak 20-30% (Olivia et al., 2023; Rizaldi et al., 2020; Wibisono et al., 2025). Selain menggunakan geopolimer, daya dukung dan kepadatan tanah dapat diperbaiki dengan menambahkan pasir. Hasil kajian lain menunjukkan bahwa penambahan pasir pada campuran tanah gambut dapat meningkatkan kepadatan tanah (Jihadakbar et al., 2024). Penggunaan parameter modulus silikat, molaritas NaOH dan persentase semen Portland untuk campuran geopolimer hibrid abu terbang dengan tambahan pasir untuk stabilisasi tanah gambut belum pernah dikaji sebelumnya. Oleh karena itu pada penelitian ini akan dilakukan studi kajian kekuatan tekan bebas tanah atau *Unconfined Compressive Strength* (UCS), evaluasi kadar air rata-rata dan kepadatan kering tanah gambut yang distabilisasi menggunakan geopolimer abu terbang menggunakan parameter molaritas natrium hidroksida yakni 10, 12, dan 14M, serta parameter modulus silikat sebesar 1,5; 2,0; dan 2,5. Pasir sebanyak 20% dari total volume ditambahkan ke dalam campuran geopolimer dan pengaruhnya pada tanah gambut hasil stabilisasi juga dikaji.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Material

Tanah gambut yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Rimbo Panjang, kabupaten Kampar, Provinsi Riau. Karakteristik fisik tanah gambut dapat dilihat pada **Tabel 1**. Tanah gambut memiliki kadar air tanah asli (w) di atas 300%, yakni sebesar 348,49%, dengan kadar serat 1,83%, kadar abu 2,40%, dan kadar organik sekitar 97,60%. Berdasarkan ASTM D4427-92 (ASTM International, 2002), tanah gambut ini termasuk tergolong saprik (kadar serat $<33\%$), kadar abu rendah ($<5\%$), dan kemampuan penyerapan air moderat ($>300\%$ dan $<800\%$).

Tabel 1. Karakteristik Fisik Tanah Gambut Rimbo Panjang

Jenis pengujian	Hasil uji
Kadar air tanah asli (w), %	348,49
Berat volume tanah (γ_{bulk}), kN/m^3	10,47
Berat volume kering (γ_d), kN/m^3	2,33
Berat jenis (Specific gravity)	1,44
Kadar serat, %	1,83
Kadar organik, %	97,60
Kadar abu, %	2,40

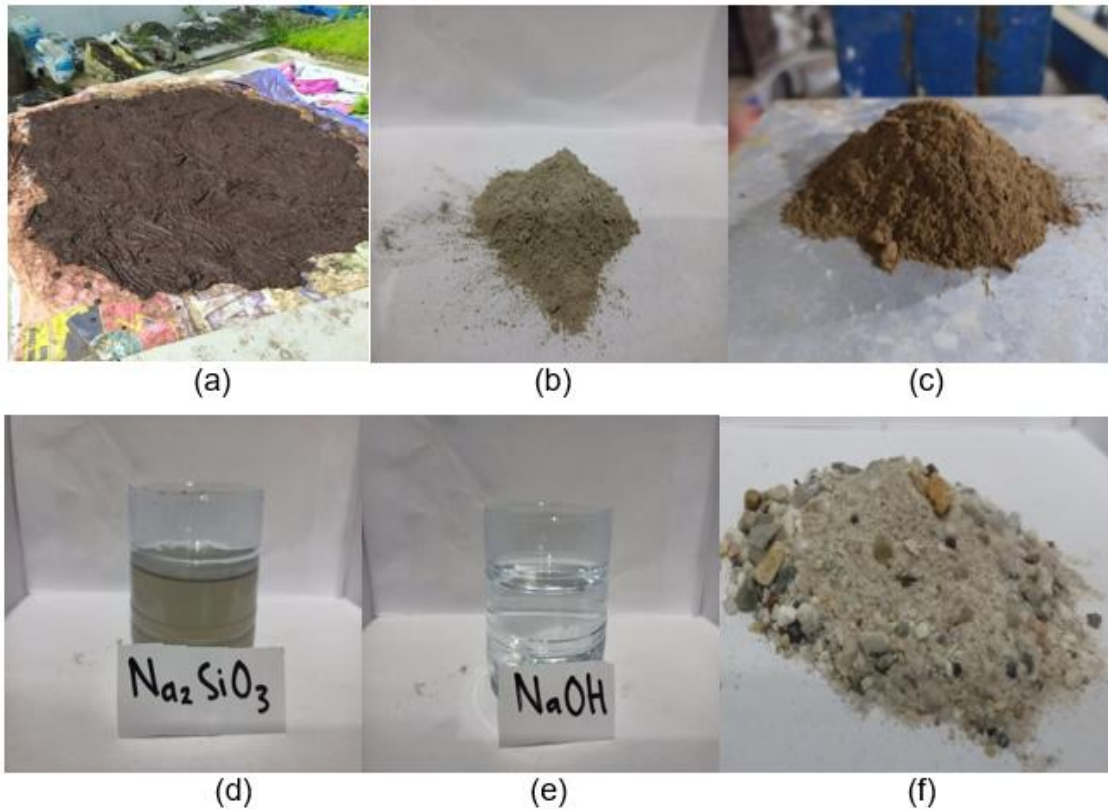
Bahan utama geopolimer hibrid yakni abu terbang berasal dari PLTU Tenayan Raya, kota Pekanbaru, Provinsi Riau. Semen tipe I yakni Portland Composite Cement (PCC) dari PT Semen Padang, Provinsi Sumatera Barat, digunakan untuk mempercepat reaksi bahan geopolimer hibrid. Karakteristik abu terbang dan semen PCC dapat dilihat pada **Tabel 2**. Kandungan silika (SiO_2) pada abu terbang sebanyak 41,21%, alumina (Al_2O_3) sebesar 21,87%, dan besi (Fe_2O_3) sebesar 16,48%. Menurut ASTM C618-25 (ASTM International, 2022), total ketiga senyawa kimia tersebut sebesar 79,56% atau lebih dari $>70\%$, sehingga dapat digolongkan bahan pozzolanik sebagai material dasar geopolimer hibrid abu terbang.

Tabel 2. Komposisi Kimia Abu Terbang dan Semen Portland Composite Cement (PCC)

Oksida (%)	Abu Terbang	Semen PCC
SiO_2	41,21	25,06
Al_2O_3	21,87	4,13
Fe_2O_3	16,48	3,12
CaO	11,17	52,96
MgO	2,45	1,25
K_2O	0,87	0,45
Na_2O	1,48	0,25
MnO_2	0,26	0,10
TiO_2	1,33	-
P_2O_5	0,46	-
SO_3	1,50	1,91
LOI	3,50	10,79

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 1**. Bahan kimia untuk aktivasi campuran geopolimer berupa natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3). Natrium silikat komersial untuk campuran larutan aktivator memiliki rasio SiO_2/Na_2O sebesar 2,19, terdiri dari Na_2O (14,5%), SiO_2 (31,8%), dan air (53,7%). NaOH

merupakan bubuk padat yang dilarutkan dalam air untuk mendapatkan molaritas tertentu (10M, 12M, dan 14M). Agregat halus atau pasir berasal dari Rimbo Panjang, Kabupaten Kampar, dengan berat jenis 2,67, modulus kehalusan 2,98 dan kadar air di bawah 1%.



Gambar 1. Bahan yang Digunakan dalam Penelitian: (a) Tanah Gambut; (b) Semen PCC; (c) Abu Terbang; (d) Natrium Silikat; (e) Natrium Hidroksida; dan (f) Pasir

2.2. Rancangan Penelitian

Campuran geopolimer hibrid abu terbang dan pasir dirancang dengan variasi molaritas NaOH dan rasio modulus silikat atau M_s ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$). Natrium hidroksida sebagai parameter dengan molaritas 10, 12, dan 14 digunakan pada seri pertama. Sedangkan pada seri kedua, digunakan parameter natrium silikat dengan rasio 1,5; 2,0 dan 2,5. Variasi parameter yang digunakan merujuk pada penelitian sebelumnya oleh (Olivia et al., 2023; Rizaldi et al., 2020; Wibisono et al., 2025) untuk beton geopolimer hibrid menggunakan larutan aktivator natrium hidroksida dan natrium silikat. Semen PCC digunakan sebesar 20% dari total volume campuran. Pasir sebagai bahan campuran geopolimer hibrid digunakan sebanyak 10% dari total volume campuran. Pemeraman benda uji dilaksanakan pada umur 7, 28 dan 56 hari setelah geopolimer hibrid dicampurkan dengan tanah gambut. **Tabel 3** berikut memperlihatkan rancangan parameter geopolimer hibrid dengan pasir dan semen PCC.

Tabel 3. Rancangan Parameter Campuran Geopolimer Hibrid Abu Terbang dan Pasir

Mix	Molaritas NaOH (M)	Ms	PCC (%)	Pasir (%)	Pemeraman (hari)
Kontrol	0	0	0	0	7, 28 56
GP-10M-Ms2	10	2,0	20	10	7, 28 56
GP-12M-Ms2	12	2,0	20	10	7, 28 56
GP-14M-Ms2	14	2,0	20	10	7, 28, 56
GP-12M-Ms1.5	12	1,5	20	10	7, 28, 56
GP-12M-Ms2	12	2,0	20	10	7, 28, 56
GP-12M-Ms2.5	12	2,5	20	10	7, 28, 56

Tabel 4 memperlihatkan komposisi campuran beton geopolimer hibrid abu terbang dan pasir. Pada campuran kontrol hanya digunakan tanah gambut tanpa diberi larutan aktivator maupun abu terbang dan semen. Sampel GP-10M-Ms2 menunjukkan campuran geopolimer dengan molaritas 10M dan rasio Ms = 2. Jumlah bahan pada tiap campuran dihitung berdasarkan rancangan parameter pada **Tabel 3**. Untuk mendapatkan kondisi tanah gambut dengan kadar air lapangan (sekitar 300%), maka dilakukan perhitungan agar total air dalam campuran menjadi 300%. Kadar air total adalah kadar air tanah gambut, jumlah air pada larutan NaOH dan Na₂SiO₃, serta sisanya berupa air tambahan. Perhitungan persentase kebutuhan air campuran dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 4. Komposisi Campuran Geopolimer Hibrid Abu Terbang dan Pasir per m3

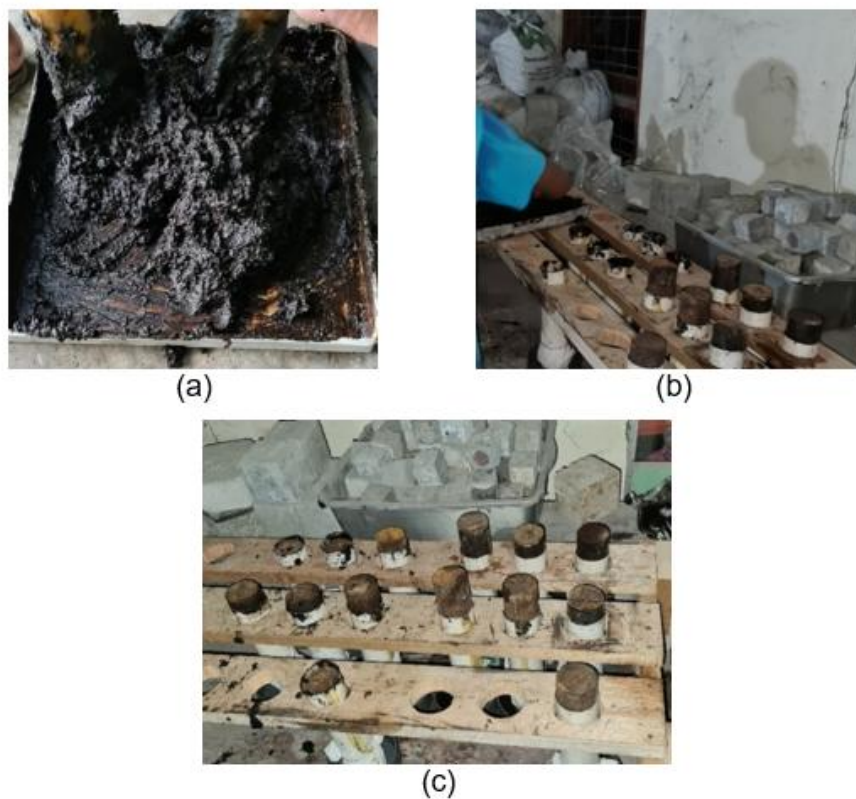
Mix	Tanah Gambut (gr)	Semen PCC (gr)	Abu Terbang (gr)	NaOH (gr)	Na ₂ SiO ₃ (gr)	Pasir (gr)	Air (gr)
Kontrol	3710,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	95,40
GP-10M-Ms2	3710,61	742,12	556,59	296,85	593,70	371,06	36,39
GP-12M-Ms2	3710,61	742,12	556,59	296,85	593,70	371,06	37,67
GP-14M-Ms2	3710,61	742,12	556,59	296,85	593,70	371,06	38,81
GP-12M-Ms1.5	3710,61	742,12	556,59	296,85	445,27	371,06	46,53
GP-12M-Ms2	3710,61	742,12	556,59	296,85	593,70	371,06	37,67
GP-12M-Ms2.5	3710,61	742,12	556,59	296,85	742,12	371,06	28,81

Tabel 5. Persentase Kebutuhan Penambahan Air Campuran

Mix	Kadar air tanah gambut (%)	Jumlah air pada larutan NaOH (%)	Jumlah air pada Na ₂ SiO ₃ (%)	Penambahan air (%)	Total air (%)
Kontrol	276,86	0	0	23,14	300
GP-10M-Ms2	276,86	5,71	8,60	8,83	300
GP-12M-Ms2	276,86	5,41	8,60	9,14	300
GP-14M-Ms2	276,86	5,13	8,60	9,41	300
GP-12M-Ms1.5	276,86	5,41	6,45	11,29	300
GP-12M-Ms2	276,86	5,41	8,60	9,14	300
GP-12M-Ms2.5	276,86	5,41	10,75	6,99	300

2.3. Pembuatan Benda Uji dan Pemeraman

Benda uji berupa tanah gambut yang dicampur dengan geopolimer hibrid dan pasir menggunakan metode ALLU (ALLU Finland Oy, 2014). Metode ALLU merupakan stabilisasi massa dengan cara menambahkan bahan pengikat langsung ke dalam tanah gambut. Pada penelitian ini, agar kadar air tanah gambut tetap tinggi saat dicampur dengan material geopolimer hibrid abu terbang dan pasir, maka kandungan air ditetapkan sebesar 300%. Tanah gambut yang diambil langsung di lapangan disimpan dalam plastik dan ember tertutup rapat agar kadar air tanah tidak cepat berkurang. Kadar air awal tanah gambut dari lokasi sebesar 348,49%. Agar kadar air tanah gambut distabilisasi dengan geopolimer hibrid sebesar 300%, maka tanah gambut dikeringkan sebentar di bawah sinar matahari agar kadar air menjadi konstan sebesar 276,86%. Tanah gambut lalu disimpan kembali dalam ember tertutup rapat agar kandungan air menjadi tetap sebelum pembuatan sampel dilakukan.



Gambar 2. (a) Proses Pencampuran Sampel (b) Campuran Dimasukkan ke dalam Cetakan dan (c) Sampel Disusun di Rak Sampel Selama Umur Perawatan

Pembuatan benda uji dimulai dengan pembuatan larutan aktivator NaOH dan Na_2SiO_3 serta penyesuaian kadar air tanah gambut. Abu terbang, semen, pasir dicampurkan dalam kondisi kering sampai merata. Kemudian bahan kering tadi dicampurkan ke dalam tanah gambut, diaduk sebentar sebelum larutan alkali dituangkan ke dalam campuran (**Gambar 2** (a)). Campuran tanah gambut dan geopolimer hibrid serta pasir diaduk sampai rata lalu dimasukkan ke dalam cetakan silinder PVC yang telah dialasi dengan kain (**Gambar 2** (b)). Silinder dibagi menjadi tiga lapis dan tiap lapis diberi tusukan sebanyak 15 kali. Untuk membantu pemeraman, benda uji diberi silinder besi dengan ukuran 5x10cm dengan berat 1890 gram sehingga dapat menghasilkan beban sekitar 9 KPa. Sampel tanah diletakkan

pada rak sampel untuk proses pemeraman selama 7, 28 dan 56 hari (**Gambar 2 (c)**). Kadar air dijaga dengan menaruh bagian bawah sampel dalam wadah berisi air.

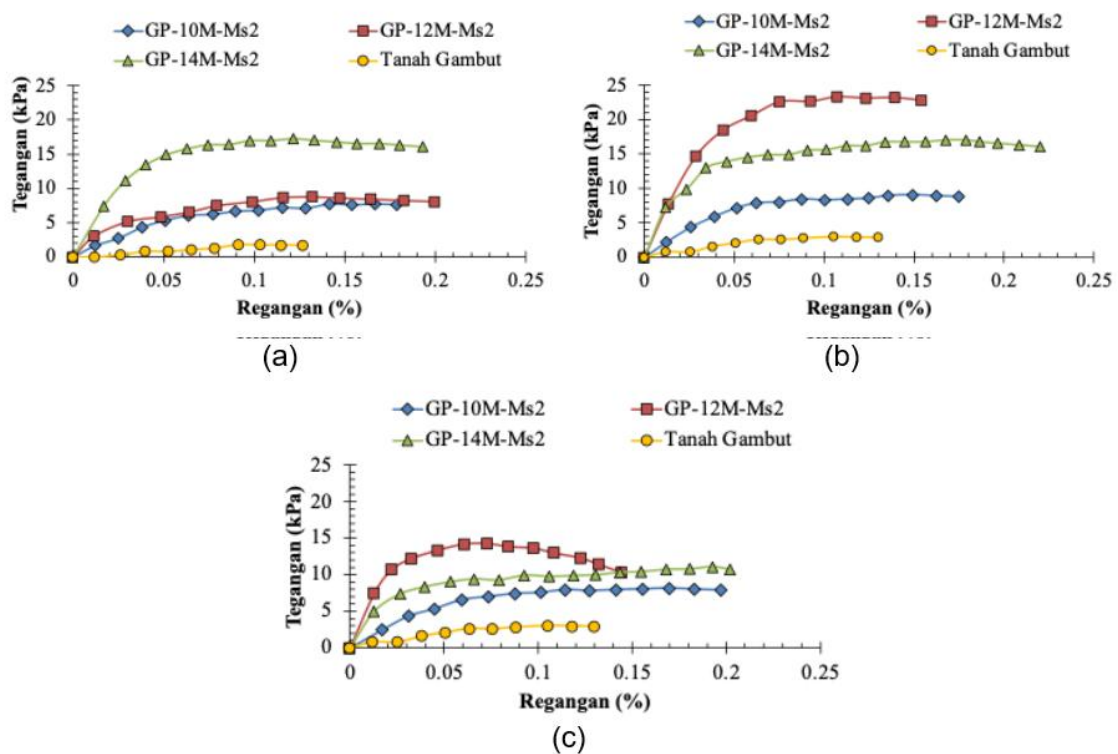
2.4. Pengujian

Unconfined Compressive Strength (UCS) atau kuat tekan bebas tanah merupakan tekanan maksimum yang dapat ditahan oleh tanah yang diberi beban tekan secara vertikal sampai tanah mengalami keruntuhan atau mencapai regangan tertentu sekitar 20% atau 0,2. Pengujian UCS dilakukan berdasarkan SNI 3638 (BSN, 2012). Sampel dipotong sepanjang 12cm, lalu ditimbang dan diuji tekan pada mesin penetrasi dengan kapasitas 4,45-ton dan kecepatan penetrasi 1,27 mm/menit. Kecepatan pembebanan dilakukan pada sampel sebesar 0,5-2% dari tinggi benda uji. Beban diberikan sampai terjadi patahan atau regangan mencapai 20%. Modulus elastisitas E50 ditentukan dari kurva regangan tegangan saat tegangan mencapai 50% dari tegangan maksimum, dan regangan dari nilai regangan saat tegangan 50% tercapai. Hasil pengujian berupa rata-rata dari tiga sampel untuk tiap campuran.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kuat Tekan Bebas

3.1.1. Pengaruh Molaritas NaOH

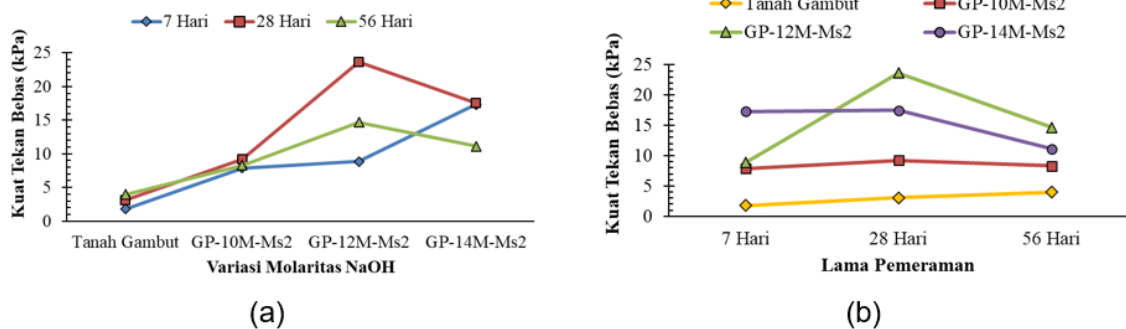


Gambar 3. Hubungan Tegangan dengan Regangan pada Tanah Gambut Distabilisasi dengan Geopolimer Hibrid dan Pasir dengan Variasi Molaritas NaOH Setelah Pemeraman pada (a) 7 Hari (b) 28 Hari dan (c) 56 Hari

Gambar 3 menunjukkan hubungan tegangan dengan regangan tanah yang distabilisasi dengan geopolimer hibrid dan pasir pada umur 7, 28 dan 56 hari. Parameter yang diamati berupa kepekatan larutan/molaritas NaOH untuk geopolimer hibrid abu terbang dan pasir dengan variasi 10, 12 dan 14M. Kuat tekan bebas tanah ditentukan dari titik puncak tegangan dari kurva tegangan-regangan hasil pengujian. Pada **Gambar 3** (a) dapat dilihat bahwa tanah gambut (kontrol) tanpa stabilisasi memiliki kuat tekan paling rendah. Pengaruh molaritas NaOH terhadap peningkatan kekuatan campuran pada umur awal pemeraman (7 hari). Campuran menggunakan NaOH 14M (GP-14M-Ms2) menghasilkan kuat tekan bebas yang lebih tinggi dibandingkan campuran kontrol, NaOH 10M (GP-10M-Ms2) dan 12 M (GP-12M-Ms2) sebesar 89.62%, 49.97%, dan 48,80%. Pada umur awal, reaksi geopolimerisasi lebih cepat terjadi pada campuran GP-14M-Ms2 sehingga peningkatan kuat tekan lebih dari 45% untuk semua campuran. Dosis larutan aktivator seperti molaritas NaOH memiliki peranan besar untuk melarutkan senyawa silika dan alumina pada permukaan abu terbang oleh ion OH^- . Hal ini didukung oleh penelitian sebelumnya yang menggunakan geopolimer dengan NaOH lebih dari 12M untuk stabilisasi tanah karena semakin tinggi molaritas maka campuran lebih reaktif dan memiliki kekuatan lebih tinggi (Wijaya et al., 2024) .

Pada **Gambar 3**(b) dan 3(c) dapat dilihat kenaikan kuat tekan bebas tanah campuran geopolimer menggunakan larutan NaOH 10 dan 12 M setelah pemeraman umur 28 hari. Campuran GP-12M-Ms2 menghasilkan kuat tekan bebas lebih tinggi dibandingkan campuran GP-14M-Ms2 dan GP-10M-Ms2. Peningkatan kuat tekan bebas campuran GP-12M-Ms2 pada umur 28 hari sebesar 87,08%, 61,07%, 26,82% dibandingkan kontrol, GP-10M-Ms2 dan GP-12M-Ms2. Setelah pemeraman selama 28 hari, proses perbaikan sifat mekanik terjadi dengan reaksi kimia lanjutan yang mengikat partikel dan memadatkan tanah gambut. Kuat tekan bebas yang lebih rendah terjadi pada GP-12M-Ms2 saat umur 7 hari dan meningkatkan kuat tekan sebesar 62,66% pada umur 28 hari. Pengaruh molaritas sedang (12M) dalam campuran geopolimer membantu stabilisasi berjalan lebih baik dengan bertambahnya waktu pemeraman. Sebelumnya, peneliti lain melaporkan molaritas NaOH sedang dapat menambah kekuatan secara bertahap karena reaksi geopolimerisasi yang lebih stabil dapat memadatkan tanah (Ayub & Khan, 2023). Sedangkan untuk GP-10M-Ms2 dengan molaritas rendah (10M), penambahan kekuatan hanya sebesar 4,85% pada umur 28 hari. Proses geopolimerisasi tidak terjadi dengan baik sehingga tidak dapat mengikat partikel tanah dan meningkatkan kekuatan. Penelitian kami sebelumnya pada tanah gambut memberikan trend yang sama karena produk reaksi geopolimerisasi tidak cukup untuk menambah kepadatan tanah hasil stabilisasi (Wibisono et al., 2025).

Kuat tekan bebas umumnya mengalami penurunan pada umur 56 hari untuk semua campuran. Kuat tekan bebas tertinggi pada campuran GP-12M-Ms2 sebesar 14,23 kPa dibandingkan campuran lain (**Gambar 4**). Pada umur 56 hari terjadi penurunan kuat tekan bebas sebesar 16.54% karena ikatan campuran melemah akibat reaksi geopolimer yang lebih lambat. Campuran GP-14M-Ms2 mengalami penurunan kuat tekan bebas cukup signifikan sebesar 34,95% dibandingkan kuat tekan pada umur 28 hari.



Gambar 4. Hubungan Kuat Tekan Bebas Tanah Gambut Distabilisasi dengan Geopolimer Hibrid dan Pasir terhadap (a) Variasi Molaritas NaOH dan (b) Lama Pemeraman

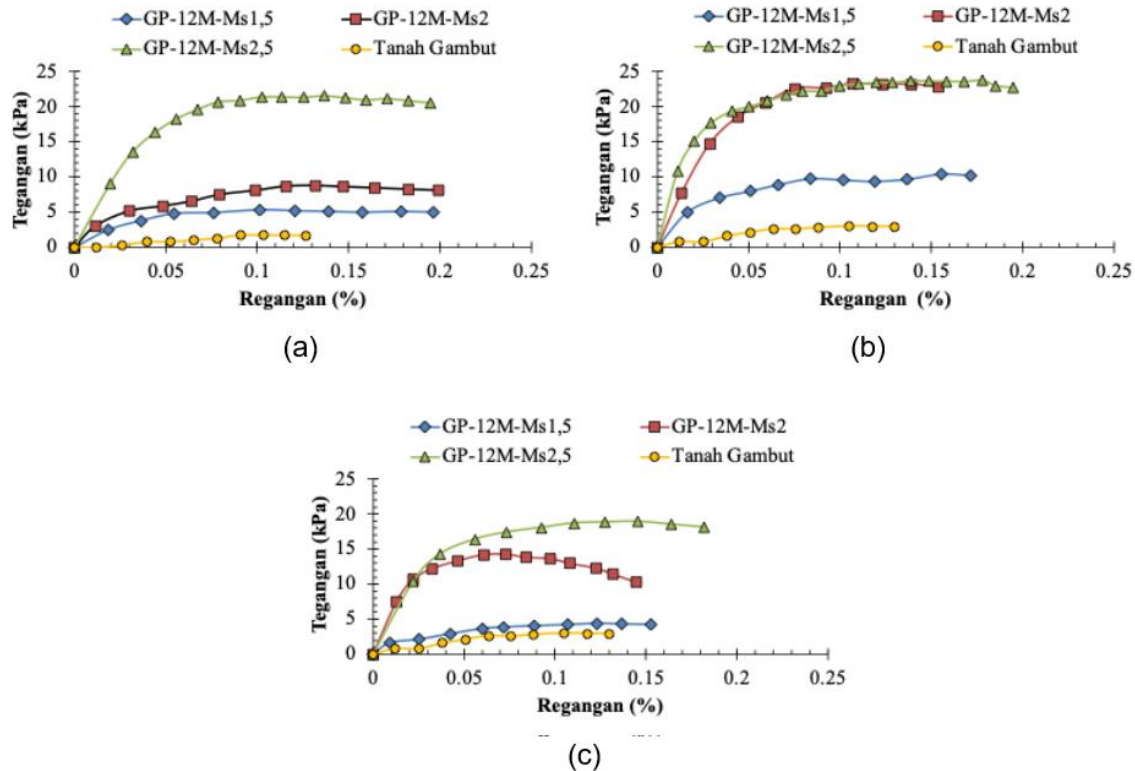
Kuat tekan bebas campuran GP-10M-Ms2 juga menurun sekitar 10,14% dibandingkan pada umur sebelumnya. Hal ini menunjukkan trend yang sama yaitu penurunan kekuatan akibat berkurangnya reaksi geopolimer dalam jangka panjang. Meski demikian, pada kajian ini, pasir yang ditambahkan dalam campuran turut membantu peningkatan kekuatan tanah. Kekuatan campuran menggunakan pasir umumnya lebih tinggi dibanding dengan tanah gambut tanpa stabilisasi. Partikel pasir dapat membantu meningkatkan kepadatan dengan mengisi rongga-rongga tanah sehingga kuat tekan bebas tanah mengalami peningkatan. Hal serupa juga ditemukan oleh peneliti lain (Yansasy et al., 2022) yang menggunakan pasir dan kapur untuk stabilisasi tanah gambut di daerah Palangka Raya.

3.1.2. Pengaruh Modulus Silikat

Modulus silikat merupakan rasio larutan natrium silikat dan natrium hidroksida yang umumnya digunakan sebagai salah satu parameter perancangan campuran geopolimer. **Gambar 5** menunjukkan hubungan tegangan-regangan tanah dengan variasi modulus silikat sebesar 1,5; 2; dan 2,5 pada umur 7, 28 dan 56 hari. Setelah 7 hari pemeraman (**Gambar 5(a)**), campuran GP-12M-Ms2,5 menghasilkan kuat tekan bebas tertinggi sebesar 21,37 kPa atau meningkat sekitar 91,64% lebih tinggi dibandingkan tanah gambut tanpa stabilisasi. Secara berturut-turut, kuat tekan bebas GP-12M-Ms1,5 dan GP-12M-Ms2 adalah 39,10% dan 19,65% lebih tinggi dibandingkan tanah gambut. Hal ini menunjukkan pengaruh larutan silikat dalam peningkatan kekuatan tekan tanah yang lebih besar. Penambahan larutan silikat (Na_2SiO_3) pada campuran geopolimer dapat meningkatkan pH campuran agar lebih basa dan pada kondisi tersebut reaksi geopolimerisasi biasanya terjadi lebih cepat (Ayub & Khan, 2023).

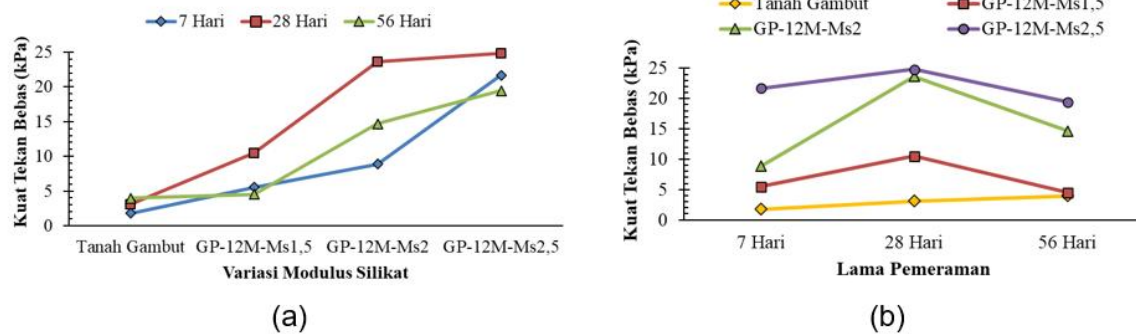
Setelah pemeraman pada umur 28 hari, pada **Gambar 5(b)** dapat dilihat bahwa campuran GP-12M-Ms2,5 memberikan kuat tekan bebas tanah tertinggi. Kuat tekan GP-12M-Ms2,5 setelah pemeraman 28 hari meningkat sekitar 9,71% dibandingkan dengan pemeraman umur 7 hari. Pada umur 28 hari, campuran GP-12M-Ms2 dan GP-12M-Ms2,5 memiliki kuat tekan bebas masing-masing sebesar 23,22 kPa dan 23,67 kPa. Kenaikan kuat tekan memperlihatkan bahwa pengaruh silikat lebih dominan pada umur 28 hari pemeraman. Studi mengenai geopolimer hibrid sebelumnya untuk tanah gambut (Wijaya et al., 2024) dan tanah liat (Nasrullah et al., 2024) memperlihatkan temuan yang sama. Penambahan Na_2SiO_3 atau modulus silikat tinggi (rasio di atas 2,5) membantu meningkatkan kuat tekan bebas material geopolimer karena bersifat mengikat seperti binder dan menaikkan pH tanah gambut yang distabilisasi. Kuat tekan campuran GP-12M-Ms1,5 sebesar 10,42 kPa

hanya meningkat sekitar 2,46% dari tanah gambut (kontrol). Hal ini menunjukkan bahwa modulus silikat terlalu rendah dan jumlah Na_2SiO_3 tidak cukup untuk membantu peningkatan kuat tekan.



Gambar 5. Hubungan Tegangan dengan Regangan pada Tanah Gambut Distabilisasi dengan Geopolimer Hibrid dan Pasir dengan Variasi Modulus Silikat Setelah Pemeraman pada (a) 7 Hari, (b) 28 Hari dan (c) 56 Hari

Pada hari ke-56, semua variasi campuran menunjukkan penurunan kuat tekan bebas (**Gambar 5(c)**). Campuran GP-12M-Ms2 dan GP-12M-Ms2,5 masing-masing menunjukkan kuat tekan sebesar 18,94 kPa dan 14,31 kPa. Trend yang sama juga diperlihatkan oleh GP-12M-Ms1,5. Penurunan kuat tekan pada umur 56 hari disebabkan oleh proses geopolimerisasi yang semakin lemah dengan bertambahnya hari sehingga tidak mengikat tanah gambut dengan baik. Akan tetapi, penurunan untuk campuran dengan variasi modulus silikat tidak terlalu besar dibandingkan dengan campuran menggunakan variasi natrium hidroksida (NaOH) (**Gambar 6**). Hal ini disebabkan modulus silikat dapat mengikat partikel tanah lebih baik dibandingkan menggunakan NaOH dengan molaritas tinggi. Temuan yang sama dikonfirmasi dengan kajian geopolimer untuk stabilisasi tanah lunak (Ayub & Khan, 2023). Penggunaan pasir sebagai campuran dalam stabilisasi juga dapat meningkatkan kepadatan tanah meskipun pada umur 56 hari sudah tidak dapat mempertahankan kekuatan tekan akibat reaksi stabilisasi yang semakin melemah.



Gambar 6. Hubungan Kuat Tekan Bebas Tanah Gambut Distabilisasi dengan Geopolimer Hibrid dan Pasir terhadap (a) Variasi Modulus Silikat dan (b) Lama Pemeraman

3.2. Kadar Air dan Kepadatan Kering

Kadar air dan kepadatan kering tanah selama pemeraman untuk semua campuran dapat dilihat pada **Tabel 6**. Kadar Air dan Kepadatan Kering. Kadar air tanah gambut saat diambil dari lapangan sangat tinggi, yaitu sekitar 348%, dan setelah dikeringkan menjadi 300%. Peningkatan kadar air tanah gambut sebesar 24,16% dan 0,47% terjadi saat pemeraman selama 28 hari dan 56 hari. Sedangkan kepadatan kering rata-rata per hari terus berkurang dari 3,44 kN/m³ menjadi 3,14 kN/m³ setelah 56 hari pemeraman karena penguapan tanah yang lambat selama masa pemeraman sehingga kadar air tetap tinggi.

Tabel 6. Kadar Air dan Kepadatan Kering

Sampel	Kadar Air Rata-rata (%)			γ _d Rata-rata (kN/m ³)		
	7 Hari	28 Hari	56 Hari	7 Hari	28 Hari	56 Hari
Tanah Gambut	215.87	240.03	240.50	3.44	3.15	3.14
GP-10M-Ms2	96.76	118.64	120.95	6.94	6.36	6.10
GP-12M-Ms2	117.61	109.10	108.78	6.32	6.66	6.56
GP-14M-Ms2	99.64	101.35	101.96	6.73	6.95	6.89
GP-12M-Ms1.5	128.81	120.36	117.52	5.70	6.13	5.72
GP-12M-Ms2	117.61	109.10	108.78	6.32	6.66	6.56
GP-12M-Ms2.5	93.36	101.16	108.25	7.14	6.89	6.54

Tiga campuran stabilisasi tanah mengalami peningkatan kadar air rata-rata, yakni campuran GP-10M-Ms2, GP-14M-Ms2, dan GP-12M-Ms2,5. Peningkatan kadar air terjadi untuk tanah yang distabilisasi menggunakan larutan NaOH dengan molaritas kurang dari 12M. Untuk campuran dengan molaritas rendah (10M), kadar air biasanya lebih tinggi dan jumlah NaOH lebih sedikit sehingga reaksi geopolimerisasi berjalan lebih lambat sehingga kadar air campuran terus bertambah. Pada campuran GP-14M-Ms2, kenaikan kadar air tidak terlalu tinggi pada 28 dan 56 hari setelah tanah distabilisasi dengan geopolimer. Peningkatan kadar air cukup signifikan pada campuran GP-12M-Ms2,5 sehingga kepadatan kering lebih tinggi. Secara umum, saat dicampur dengan material geopolimer dan diperam, kadar air mengalami penurunan akibat reaksi kimia yang membutuhkan air untuk meningkatkan kekuatan (Ayub & Khan, 2023). Akan tetapi pada campuran tersebut terjadi peningkatan kadar air dan peningkatan kuat tekan bebas. Hal ini terjadi karena sifat larutan natrium silikat yang lebih basa dan bersifat sebagai perekat pada partikel tanah. Kepadatan kering tanah GP-12M-Ms2,5 lebih tinggi dibandingkan campuran lain yaitu meningkat sebesar 3,70 kN/m³ dibandingkan kontrol pada pemeraman 7 hari. Peningkatan ini terjadi

karena pasir dalam campuran geopolimer membantu memadatkan dengan mengisi rongga tanah gambut.

4. KESIMPULAN

Tanah gambut dapat distabilisasi menggunakan material geopolimer hibrid abu terbang dan campuran pasir untuk memperbaiki kuat tekan bebas tanah. Pada penelitian ini digunakan dua seri campuran geopolimer, menggunakan variasi molaritas NaOH dan rasio modulus silikat. Hasil kajian menunjukkan bahwa semakin tinggi molaritas NaOH (GP-14M-Ms2), maka semakin tinggi kuat tekan bebas tanah yang distabilisasi dengan geopolimer hibrid. Kepekatan larutan NaOH membantu reaksi geopolimerisasi yang lebih cepat dan reaktif sehingga dapat meningkatkan kuat tekan bebas tanah pada umur pemeraman 28 hari sebesar 23,30 kPa, dengan kenaikan sebesar 674,09% dibandingkan sampel kontrol. Sedangkan kuat tekan bebas tertinggi untuk campuran dengan modulus silikat tertinggi yakni GP-12M-Ms2.5 sebesar 23,68 kPa pada 28 hari. Hasil ini meningkat 685,86% dibandingkan kontrol karena semakin banyak jumlah Na_2SiO_3 dalam larutan aktivator maka pH larutan semakin basa dan mempercepat reaksi geopolimerisasi. Selain itu natrium silikat bersifat seperti perekat yang dapat mengikat partikel tanah dengan baik. Kadar air rata-rata campuran setelah pemeraman umur 7, 28 dan 56 hari bervariasi tergantung kadar molaritas NaOH dan jumlah silikat. Lama pemeraman menurunkan kepadatan kering namun meningkatkan kuat tekan bebas akibat reaksi geopolimerisasi berlanjut. Penggunaan pasir dalam campuran geopolimer hibrid abu terbang dapat meningkatkan kepadatan tanah karena mengisi rongga-rongga tanah yang distabilisasi (GP-12M-Ms2.5). Kedua campuran geopolimer hibrid dengan pasir berpotensi untuk digunakan pada aplikasi stabilisasi tanah gambut dalam skala besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada mahasiswa peneliti Batch 09, Laboratorium Mekanika Tanah dan Laboratorium Struktur atas bantuan penyelesaian pembuatan sampel dan analisis data.

DAFTAR PUSTAKA

- ALLU Finland Oy. (2014). Allu Stabilisation System - Mass Stabilisation Manual. <https://nzstirrers.com/wp-content/uploads/2014/02/ALLU-Ramboll-Mass-Stabilisation-Ma-1.pdf>
- ASTM International. (2002). ASTM D4427-92 Classification of Peat Samples by Laboratory Testing. <https://doi.org/10.1520/D4427-92R02E01>
- ASTM International. (2022). ASTM C618-22 Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. <https://doi.org/10.1520/C0618-22>
- Ayub, F., & Khan, S. A. (2023). An overview of geopolymer composites for stabilization of soft soils. *Construction and Building Materials*, 404, 133195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133195>
- BSN. (2012). SNI 3638:2012 Metode pengujian kuat tekan bebas tanah kohesif. <https://pesta.bsn.go.id/produk/detail/9100-sni36382012>
- Davidovits, J. (1994). High-alkali cements for 21 st century concretes. American Concrete Institute, ACI Special Publication, SP-144.
- Dwina, D. O., Nazarudin, N., Kumalasari, D., & Fitriani, E. (2021). Stabilisasi Tanah Gambut Dengan Penambahan Kapur dan Fly Ash Sisa Pembakaran Cangkang Sawit Sebagai Subgrade Jalan. *Fondasi : Jurnal Teknik Sipil*, 10(1), 24. <https://doi.org/10.36055/fondasi.v10i1.10275>

- Fitrayani, S. N. (2025). Pemanfaatan Geopolimer Berbahan Fly Ash untuk Stabilisasi Tanah dan Dampaknya terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas [S1 Tesis, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa]. <https://eprints.untirta.ac.id/47062/>
- Gazali, A., Adawiyah, R., Perdana, M. G., Hairunisa, H., & Yuanda, A. A. (2023). Stabilisasi Tanah Gambut Menggunakan Penambahan Kapur Dan Abu Sekam Padi Ditinjau Terhadap Nilai Kuat Tekan Dan Kuat Geser (Studi Kasus: Kecamatan Sungai Tabuk, Kabupaten Banjar, Provinsi Kalimantan Selatan). *Jurnal Kacapuri : Jurnal Keilmuan Teknik Sipil*, 5(2), 517. <https://doi.org/10.31602/jk.v5i2.9487>
- Jendrysik, K., Jończyk, M., & Kanty, P. (2021). Mass stabilization as a modern method of substrate strengthening. *Materials Today: Proceedings*, 38, 2068–2072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.143>
- Jihadakbar, J., Adnan, A., & Mustakim, M. (2024). Pengaruh Penambahan Pasir terhadap Tingkat Kepadatan dan Daya Dukung Tanah. *Jurnal Penelitian Rumpun Ilmu Teknik*, 3(3), 153–162. <https://doi.org/10.55606/juprit.v3i3.4241>
- Kamaluddin, K., Marwan, M., Firmansyah, R., & Permatasari, N. (2022). Stabilisasi Tanah Gambut Menggunakan Campuran Semen Terhadap Nilai Cbr Dengan Uji Laboratorium. *Buletin Utama Teknik*, 17(2), 225–229. <https://jurnal.uisu.ac.id/index.php/but/article/view/4968>
- Ma, C., Chen, B., & Chen, L. (2016). Effect of organic matter on strength development of self-compacting earth-based construction stabilized with cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.018>
- Nasrullah, A., Ardiansyah, D., & Gautama, O. (2024). Pengaruh Rasio Na_2SiO_3 : Naoh Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Tanah Liat . *Jurnal Ilmiah Bering*, 13(2), 65–75. <https://ejournal.pppmitpa.or.id/index.php/bering/article/view/291>
- Olivia, M., Pratama, R. S., Giri, F. R., Sitompul, I. R., Kamaldi, A., Wibisono, G., & Saputra, E. (2023). The Effect of Portland Cement on Fly Ash Bottom Ash Geopolymer Hybrid Concrete Exposed to Peat Water Environment. *Journal of Applied Materials and Technology*, 3(2). <https://doi.org/10.31258/jamt.3.2.24-33>
- Rahayu, W., Damoerin, D., & Hayyan, A. (2018). Pengaruh Geopolimer Untuk Meningkatkan Kuat Geser Tanah Gambut. *Jurnal Teknik Sipil*, 25(3), 187. <https://doi.org/10.5614/jts.2018.25.3.3>
- Rizaldi, N., Rusadi, A. I., Wibisono, G., Saputra, E., & Olivia, M. (2020). Studi Parametrik Kuat Tekan Mortar Geopolimer Abu Terbang Parametric Study of Compressive Strength Fly Ash Geopololymmer Mortar. *Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau*, 18(2).
- Manthining, W. Z., Sarie, F., & Hendri, O. (2022). Pengaruh Penambahan Kapur, Abu Terbang (Fly Ash), Dan Styrofoam Terhadap Nilai Kepadatan Dan Cbr Tanah Gambut. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil TRANSUKMA*, 4(2), 69–75. <https://doi.org/10.36277/transukma.v4i2.96>
- Wibisono, G., Oktariyansa, R., & Olivia, M. (2025). Studi Parametrik Kekuatan Tanah Gambut Distabilisasi dengan Geopolimer Abu Terbang Hibrid. *Jurnal Teknik Sipil Terapan (JTST)*, 7(1), 44–53. <https://doi.org/10.47600/jtst.v7i1.1001>
- Wijaya, M. F., Ismanti, S., & Satyarno, I. (2024). Physical and Mechanical Properties of Fly Ash-Bottom Ash Geopolymer Mixtures on Expansive Clay Soil Stabilization as a Subgrade Material. *Civil and Environmental Engineering*, 20(2), 890–904. <https://doi.org/10.2478/cee-2024-0065>
- Yani, A., Hazanawati, H., & Sahriyal, S. (2023). Stabilisasi Tanah Gambut Dengan Menggunakan Campuran Kapur Studi Kasus : Ruas Jalan Rengat - Bukit Meranti Kecamatan Rengat Kabupaten Indragiri Hulu. *Jurnal Sipil Terapan*, 1(1), 133–140. <https://doi.org/10.58169/jusit.v1i1.176>
- Yansasy, E. P., Sarie, F., & Gandi, S. (2022). Uji Kepadatan Dan CBR Laboratorium Dalam Upaya Meningkatkan Kepadatan Dan Daya Dukung Tanah Gambut Yang Distabilisasikan Dengan Pasir Dan Kapur . *Jurnal Teknika: Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Keteknikan*, 5(2), 10–20. <https://e-journal.upr.ac.id/index.php/JT/article/view/7644>