PENGARUH PENAMBAHAN ABU AMPAS TEBU DAN MICROBIALLY INDUCED CALCITE PRECIPITATION TERHADAP SIFAT FISIK DAN KUAT GESER TANAH LEMPUNG EKSPANSIF

Pandhu Syaiful Ma"arif[1], Eding Iskak Imananto[2], dan Eri Andrian yudianto[3]

[1]Prodi Teknik Sipil, ITN Malang, Jl. Sigura-Gura No.2, Malang
Email: pandhusyaiful02@gmail.com
[2] Prodi Teknik Sipil, ITN Malang, Jl. Sigura-Gura No.2, Malang
Email: edingiskak@yahoo.com
[3]Prodi Teknik Sipil, ITN Malang, Jl. Sigura-Gura No.2, Malang
Email: eriandrianto@ftsp.itn.ac.id

ABSTRACT

Expansive clay soil is highly sensitive to changes in water content, showing large shrink-swell behavior and low bearing capacity that frequently damages the structures built above it. This study evaluates an eco-friendly stabilization method that combines Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) using Bacillus subtilis bacteria with sugarcane bagasse ash (SCBA), a silica-rich pozzolanic industrial waste. Soil samples were collected from Widang District, Tuban Regency, East Java, with an initial Liquid Limit of 68.07%, Plastic Limit of 27.49%, and Plasticity Index of 40.58%, classifying the soil as CH (inorganic clay of high plasticity). The optimum MICP bacterial concentration of 9%, established from previous research, was combined with SCBA variations of 0%, 5%, 10%, and 15% of soil weight, and cured for 3, 7, 14, and 28 days. Laboratory tests included Direct Shear, Unconsolidated Undrained (UU) Triaxial, and Unconfined Compressive Strength (UCS), supported by Two-Way ANOVA analysis. The combined treatment consistently reduced the Plasticity Index and increased cohesion, internal friction angle, and unconfined compressive strength through the formation of calcium carbonate (CaCO3) precipitates. The optimum condition was reached at 10% SCBA with MICP 9% and 28 days of curing, giving a PI reduction of 82.31%, an undrained cohesion increase of 81.03%, a Direct Shear strength increase of 70.46%, and a UCS increase of 74.49% compared to the untreated soil, while an excessive ash content of 15% reduced the stabilization performance.

Keywords: *Bacillus subtilis, Expansive Clay Soil, MICP, Sugarcane Bagasse Ash, Plasticity Index, Shear Strength.*

ABSTRAK

Tanah lempung ekspansif memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan kadar air, kembang-susut yang besar, dan daya dukung rendah, sehingga sering merusak struktur konstruksi di atasnya. Penelitian ini mengevaluasi metode stabilisasi ramah lingkungan yang mengombinasikan Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) menggunakan bakteri Bacillus subtilis dengan abu ampas tebu (AAT) sebagai limbah pozzolanik kaya silika. Sampel tanah diambil dari Kecamatan Widang, Kabupaten Tuban, Jawa Timur, dengan nilai awal Liquid Limit 68,07%, Plastic Limit 27,49%, dan Plasticity Index 40,58%, sehingga tergolong tanah CH (lempung tak organik berplastisitas tinggi). Konsentrasi bakteri MICP optimum sebesar 9%, yang mengacu pada penelitian terdahulu, dikombinasikan dengan variasi AAT 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat tanah, dengan masa pemeraman 3, 7, 14, dan 28 hari. Pengujian laboratorium meliputi Direct Shear, Triaxial Unconsolidated Undrained (UU), dan Unconfined Compressive Strength (UCS), yang didukung analisis Two-Way ANOVA. Perlakuan kombinasi ini secara konsisten menurunkan nilai Plasticity Index serta meningkatkan kohesi, sudut geser dalam, dan kuat tekan bebas melalui pembentukan endapan kalsium karbonat (CaCO3). Kondisi optimum dicapai pada campuran AAT 10% dengan MICP 9% dan masa pemeraman 28 hari, menghasilkan penurunan PI sebesar 82,31%, peningkatan kohesi undrained sebesar 81,03%, peningkatan kuat geser Direct Shear sebesar 70,46%, dan peningkatan UCS sebesar 74,49% dibandingkan tanah asli, sedangkan penambahan AAT berlebih (15%) menurunkan efektivitas stabilisasi.

Kata kunci*: Bacillus subtilis,* Tanah Lempung Ekspansif, MICP, Abu Ampas Tebu, Plastisitas Index, Kuat Geser.

1. PENDAHULUAN

Tanah lempung ekspansif merupakan jenis tanah bermasalah yang memiliki potensi kembang-susut tinggi akibat perubahan kadar air, sehingga sering menimbulkan kerusakan pada infrastruktur seperti fondasi bangunan, jalan raya, dan saluran irigasi. Salah satu teknologi perbaikan tanah yang ramah lingkungan adalah Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) dengan memanfaatkan bakteri Bacillus subtilis yang mampu menghasilkan endapan kalsit (CaCO3) melalui proses biologis. Penelitian terdahulu pada tanah ekspansif asal Kabupaten Tuban menunjukkan bahwa kondisi optimum MICP dicapai pada campuran bakteri 9% dengan masa pemeraman 28 hari, namun peningkatan kuat geser yang dihasilkan dinilai masih kurang signifikan (Affandi et al., 2025).

Pada proses MICP, bakteri penghasil enzim urease menghidrolisis urea sehingga terbentuk ion karbonat (CO3 2-) yang bereaksi dengan ion kalsium (Ca2+) membentuk endapan kalsium karbonat (CaCO3). Endapan ini mengikat partikel tanah, meningkatkan kepadatan, serta memperbaiki sifat mekanis tanah, sehingga ekspansifitas menurun dan kuat gesernya meningkat.

Untuk meningkatkan efektivitas MICP, penelitian ini mengembangkan metode tersebut dengan penambahan abu ampas tebu (AAT), yaitu limbah hasil pembakaran ampas tebu pada industri gula yang kaya akan silika (SiO2) dan bersifat pozzolanik. Pemanfaatan AAT tidak hanya berpotensi memperbaiki sifat fisik dan mekanik tanah, tetapi juga mengurangi permasalahan limbah industri gula di Indonesia (Indriani et al., 2023). Kombinasi bahan pozzolan dan mikroorganisme melalui bioteknologi geoteknik menjadi alternatif stabilisasi tanah yang aman bagi lingkungan karena tidak menggunakan bahan kimia berbahaya (Lin Li et al., 2025).

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh kombinasi MICP dengan konsentrasi bakteri optimum 9% dan variasi AAT sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat tanah, serta masa pemeraman 3, 7, 14, dan 28 hari, terhadap sifat fisik (Plasticity Index) dan sifat mekanik (Direct Shear, Triaxial UU, dan UCS) tanah lempung ekspansif asal Kecamatan Widang, Kabupaten Tuban. Hasil penelitian diharapkan dapat menentukan persentase AAT optimum yang mampu memaksimalkan peningkatan kuat geser tanah, sekaligus memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode stabilisasi tanah yang berkelanjutan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Tanah Lempung Ekspansif

Tanah ekspansif adalah tanah yang memiliki potensi besar untuk mengembang ketika jenuh air dan menyusut saat mengering, akibat kandungan mineral lempung montmorillonite yang sangat menyerap air (Al-Rawas & Goosen, 2006). Potensi ekspansi tanah dapat diidentifikasi melalui nilai Plasticity Index (PI) yang diperoleh dari selisih Liquid Limit (LL) dan Plastic Limit (PL):

$$PI = LL - PL$$

Tabel 1. Potensi Ekspansi Tanah Berdasarkan Nilai PI (Sudjianto, 2015)

Plasticity Index (%)	Potensi Ekspansi
0 - 15	Rendah
15 - 35	Sedang
35 - 55	Tinggi
> 55	Sangat Tinggi

Nilai Kuat Geser Tanah

Kuat geser tanah adalah kemampuan tanah menahan geseran antarpartikel akibat gaya eksternal sebelum mengalami keruntuhan geser. Parameter ini dimodelkan dengan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\phi)$$

dimana:

τ = Kuat geser tanah

c = Kohesi

σ = Sudut geser dalam

ϕ = Tegangan normal pada bidang runtuh

dengan τ adalah kuat geser tanah, c adalah kohesi, ϕ adalah sudut geser dalam, dan σ adalah tegangan normal pada bidang runtuh. Pengukuran parameter kuat geser pada penelitian ini dilakukan melalui uji Direct Shear, Triaxial Compression (UU), dan Unconfined Compressive Strength (UCS) sesuai standar pengujian geoteknik (Hardiyatmo, 2010).

Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP)

MICP merupakan metode perbaikan tanah ramah lingkungan yang memanfaatkan bakteri penghasil enzim urease, seperti Bacillus subtilis, untuk menghidrolisis urea menghasilkan ion karbonat yang bereaksi dengan ion kalsium membentuk endapan kalsium karbonat (Whiffin et al., 2007; Van Paassen et al., 2010):

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow NH_4^+ + CO_3^{2-}$$
$$CaCl_2 + H_2O \rightarrow CaO + HCl$$
$$CO_3^{2-} + Ca^{2+} \rightarrow CaCO_3$$

dimana:

$CO(NH_2)_2$ = Urea

H_2O = Air

NH_4^+ = Amonia

$CaCl_2$ = Kalsium Klorida

CaO = Kalsium Oksida

HCl = Asam Klorida

CO_3^{2-} = Ion Karbonat

Ca^{2+} = Ion Kalsium

$CaCO_3$ = Kalsium Karbonat

Endapan $CaCO_3$ yang terbentuk berfungsi mengikat partikel tanah, mengurangi porositas, serta meningkatkan kepadatan dan kuat geser tanah. Bacillus subtilis adalah bakteri Gram-positif berbentuk batang yang dapat membentuk endospora sehingga tahan terhadap kondisi ekstrem, dan banyak ditemukan pada lapisan tanah atas maupun rizosfer tanaman.

Abu Ampas Tebu (AAT)

Abu ampas tebu merupakan limbah hasil pembakaran ampas tebu pada industri gula yang mengandung silika (SiO_2) dalam jumlah tinggi sehingga bersifat pozzolanik dan dapat meningkatkan kekuatan material konstruksi (Cordeiro et al., 2009). Selain sebagai bahan tambah beton, AAT dapat dimanfaatkan sebagai bahan stabilisasi tanah (Safiuddin et al., 2010).

Tabel 2. Kandungan Kimia Abu Ampas Tebu (Cordeiro et al., 2009)

Unsur	%	Unsur	%
Silika (SiO_2)	60 - 80	Magnesium Oksid (MgO)	1 - 4
Alumina (Al_2O_3)	4 - 10	alium Oksida (K_2	2 - 6
Besi Oksida (Fe_2O	1 - 5	Sulfat (SO_3)	< 2
alsium Oksida (Ca	2 - 8		

3. METODOLOGI PENELITIAN

Lokasi dan Waktu Penelitian

Sampel tanah ekspansif diambil di Kecamatan Widang, Kabupaten Tuban, Jawa Timur, pada kedalaman 0,5-1 m dari permukaan tanah asli. Abu ampas tebu diperoleh dari Pabrik Gula Kebon Agung, Kecamatan Pakisaji, Kabupaten Malang, dan diayak lolos saringan No.200. Bakteri Bacillus subtilis diperoleh melalui pembelian daring. Seluruh pengujian laboratorium dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Tanah, Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang, pada periode Februari-Mei 2026.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan meliputi alat uji Direct Shear, Unconfined Compressive Strength, dan Triaxial Compression (UU), ring dan silinder, desikator vakum, oven, piknometer, hidrometer, alat Casagrande dan grooving tools, mixer, serta timbangan digital. Bahan penelitian terdiri atas tanah lempung ekspansif, abu ampas tebu, kultur bakteri Bacillus subtilis, urea ($CO(NH_2)_2$), kalsium klorida ($CaCl_2$), dan air.

Rancangan Campuran dan Prosedur Penelitian

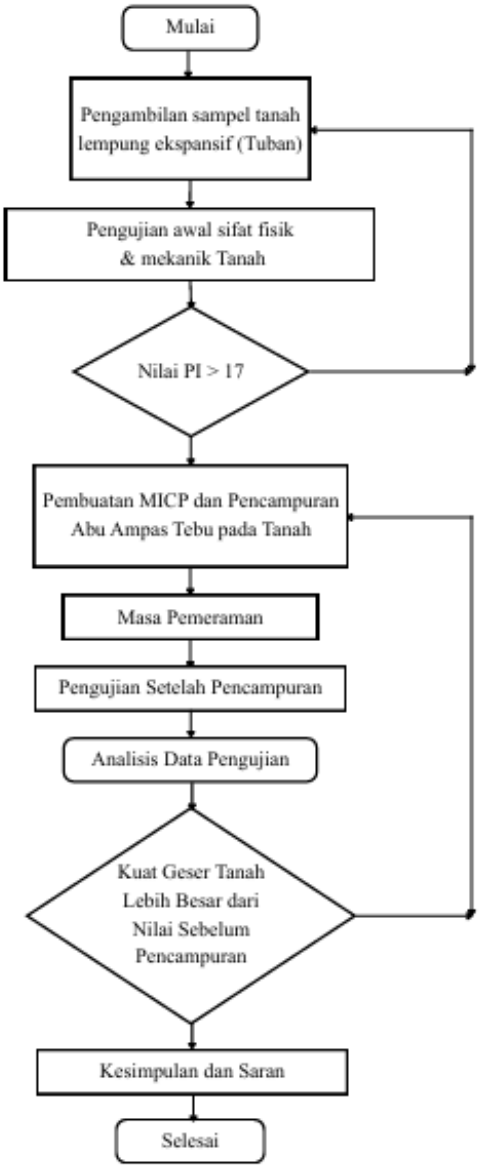
Konsentrasi larutan MICP yang digunakan adalah 9% dari kebutuhan air kondisi optimum, mengacu pada kondisi optimum penelitian terdahulu (Affandi et al., 2025). Konsentrasi tersebut dikombinasikan dengan variasi AAT sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat tanah kering (Kosat et al., 2023), sehingga diperoleh 16 kombinasi benda uji dengan masa pemeraman 3, 7, 14, dan 28 hari. Tahapan penelitian meliputi: (1) pengujian sifat fisik dan mekanik tanah asli untuk memastikan nilai PI > 17 sebagai syarat tanah ekspansif; (2) pembuatan larutan sementasi MICP dari urea dan $CaCl_2$; (3) pencampuran larutan MICP ke dalam tanah pada kondisi kadar air optimum hasil uji Proctor standar; (4) penambahan AAT sesuai variasi rencana; (5) pencetakan benda uji dan pemeraman dalam desikator tertutup pada suhu 20-25°C; serta (6) pengujian ulang sifat fisik dan mekanik tanah setelah perlakuan.

Alur penelitian secara umum adalah sebagai berikut: studi literatur dan penelitian terdahulu → persiapan alat dan bahan → pengambilan sampel tanah asli → pengujian sifat fisik dan mekanik awal (PI > 17) → pembuatan larutan sementasi MICP 9% → pencampuran tanah dengan MICP dan variasi AAT (0%, 5%, 10%, 15%) → pemeraman 3, 7, 14, dan 28 hari → pengujian sifat fisik dan mekanik setelah perlakuan → analisis data dan uji hipotesis Two-Way ANOVA → penarikan kesimpulan.

Metode Analisis Data

Analisis statistik menggunakan Two-Way ANOVA dengan Faktor A adalah variasi persentase AAT (0%, 5%, 10%, 15%) dan Faktor B adalah masa pemeraman (3, 7, 14, 28 hari), terhadap variabel dependen berupa nilai PI dan parameter kuat geser tanah. Hipotesis nol (H0) menyatakan tidak terdapat pengaruh signifikan dari masing-masing faktor maupun interaksinya, sedangkan hipotesis alternatif (H1) menyatakan sebaliknya. H0 ditolak apabila nilai F hitung lebih besar dari F tabel pada taraf signifikansi 5%.

Bagan Alir



4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat Fisik dan Mekanik Tanah Asli

Pengujian pendahuluan dilakukan untuk memastikan tanah asli tergolong tanah lempung ekspansif. Hasil pengujian sifat fisik dan mekanik tanah asli disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Sifat Fisik dan Mekanik Tanah Asli (Kontrol)

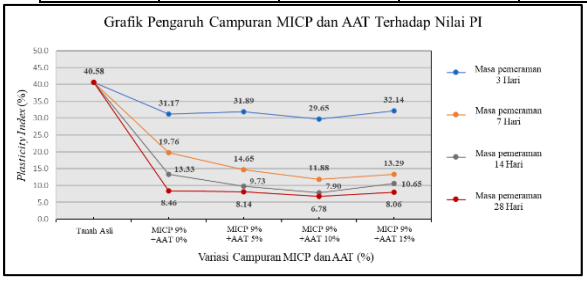
Parameter	Nilai
Kadar air rata-rata (%)	56,79
Berat jenis tanah (Gs)	2,696
Fraksi lempung (%)	59,34
Fraksi lanau (%) / pasir (%)	34,84 / 10,38
Klasifikasi USDA	Clay (Lempung)
Liquid Limit, LL (%)	68,07
Plastic Limit, PL (%)	27,49
Plasticity Index, PI (%)	40,58
Klasifikasi USCS	CH
Kadar air optimum Proctor (%)	23,85
Berat isi kering maks. γd (gr/cm3)	1,377
Tegangan geser, τ - Direct Shear (kgf/cm2)	0,542
Kohesi, c - Direct Shear (kgf/cm2)	0,442
Sudut geser dalam, ϕ - Direct Shear (°)	19,0
Kohesi undrained, cu - Triaxial UU (kgf/cm2)	0,270
Sudut geser dalam - Triaxial UU (°)	2,17
Kuat tekan bebas, qu - UCS (kgf/cm2)	0,508

Nilai PI sebesar 40,58% menunjukkan tanah tergolong CH (lempung tak organik berplastisitas tinggi) dengan potensi kembang-susut yang tinggi, sehingga memenuhi syarat sebagai tanah ekspansif (PI > 17) untuk dilanjutkan pada tahap stabilisasi dengan MICP dan AAT.

Pengaruh terhadap *Plasticity Index (PI)*

Tabel 4. Nilai PI (%) pada MICP 9% + Variasi AAT (Kontrol tanah asli = 40,58%)

AAT	3 Hr	7 Hr	14 Hr	28 Hr
0%	31,17	19,76	13,33	8,46
5%	31,89	14,65	9,73	8,14
10%	29,65	11,88	7,90	7,18
15%	32,14	13,29	10,65	8,06



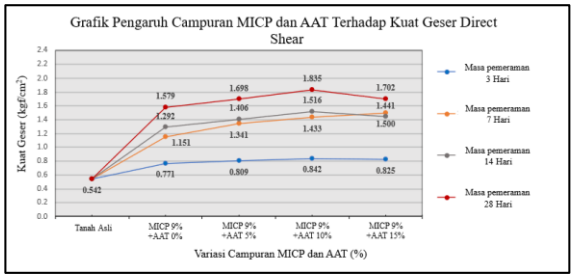
Gambar 1. Grafik pengaruh MICP dan Abu Ampas tebu Terhadap Nilai PI

Nilai PI pada seluruh variasi campuran menurun secara konsisten seiring bertambahnya masa pemeraman. Penurunan paling optimal terjadi pada variasi AAT 10% dengan masa pemeraman 28 hari, yaitu menjadi 7,18% atau turun 82,31% dari kondisi tanah asli. Pada variasi AAT 15%, nilai PI kembali naik menjadi 8,06% (turun 80,14%), yang mengindikasikan penambahan AAT melebihi 10% mulai mengurangi efektivitas stabilisasi. Penurunan PI ini terjadi karena kandungan silika dan alumina pada AAT bersifat pozzolanik dan menjadi sumber kalsium tambahan yang mempercepat pengendapan kalsit (CaCO3), sekaligus mengurangi kadar air yang dapat diserap oleh partikel lempung.

Pengaruh terhadap Kuat Geser (Direct Shear)

Tabel 5. Tegangan Geser Maksimum (kgf/cm2) - Direct Shear (Kontrol = 0,542 kgf/cm2)

AAT	τ 3 Hr	τ 7 Hr	14 Hr	28 Hr
0%	0,771	1,151	1,292	1,579
5%	0,809	1,341	1,406	1,698
10%	0,842	1,433	1,516	1,835
15%	0,825	1,500	1,441	1,702



Gambar 2. Grafik pengaruh MICP dan Abu Ampas Tebu terhadap kuat geser Direct Shear

Nilai kohesi dan sudut geser dalam juga meningkat konsisten terhadap masa pemeraman. Pada masa pemeraman 28 hari, kohesi tertinggi dicapai variasi AAT 10% sebesar 1,698 kgf/cm2 (naik 73,97% dari kontrol 0,442 kgf/cm2), dengan sudut geser dalam 27,6° (naik 31,16% dari kontrol 19°). Tegangan geser maksimum tertinggi juga terjadi pada variasi AAT 10% masa pemeraman 28 hari sebesar 1,835 kgf/cm2 atau meningkat 70,46% dari kontrol. Penambahan AAT hingga 15% justru menurunkan nilai-nilai tersebut, menunjukkan komposisi 10% merupakan kadar optimum pada uji Direct Shear.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Tanah lempung ekspansif asal Kecamatan Widang, Kabupaten Tuban tergolong tanah CH berplastisitas tinggi dengan PI awal 40,58%. Penambahan abu ampas tebu (AAT) sebagai pozzolan kaya silika bersama MICP 9% terbukti efektif menurunkan nilai PI dan meningkatkan kohesi serta kuat geser tanah melalui pembentukan endapan kalsium karbonat (CaCO3).

2. Kombinasi AAT dan MICP secara konsisten menurunkan nilai PI serta meningkatkan parameter kuat geser (kohesi, sudut geser dalam, dan kuat tekan bebas) seiring bertambahnya persentase AAT dan lamanya masa pemeraman, sebagaimana dikonfirmasi oleh hasil uji Two-Way ANOVA (H1 diterima pada seluruh parameter uji).

3. Kondisi optimum dicapai pada campuran AAT 10% dengan MICP 9% dan masa pemeraman 28 hari, menghasilkan penurunan PI sebesar 82,31%, peningkatan kohesi undrained 81,03%, peningkatan kuat geser Direct Shear 70,46%, dan peningkatan UCS 74,49% dibandingkan tanah asli. Penambahan AAT melebihi 10% (yaitu 15%) justru menurunkan efektivitas stabilisasi, sehingga persentase 10% direkomendasikan sebagai kadar optimum kombinasi AAT dan MICP untuk stabilisasi tanah lempung ekspansif.

DAFTAR PUSTAKA

Affandi, A., Eri, D., & Yudianto, A. (n.d.). Penerapan Microbially Induced Calcite Precipitation Pada Tanah Ekspansif Serta Pengaruhnya Terhadap Nilai Kuat Geser Tanah. In *Student Journal Gelagar*.

Alya Faza Shadrina. (2026). *"Stabilisasi Tanah Lempung Menggunakan Abu Tebu Dan Bakteri Bacillus Subtilis Untuk Meningkatkan Sifat.*

Amer Ali Al-Rawas, & Mattheus F.A. Goosen. (2006). *Expansive Solis: Recent Advances in Characterizion and Treatment* . CRC Press.

Braja, M. D., Noor, T. E., & Indrasurya, B. M. (1995). *Mekanika Tanah Jilid 1 (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis).* Gadjah Mada University Press.

Braja, M. D., Noor, E., & Mochtar, I. B. (1995). *Mekanika Tanah Jilid 2*. Erlangga.

Braja M. Das, & Khaled Sobhan. (2014). *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning.

Casagrande, A. (1948). *Classification and identification of soils. Transactions of the*

American Society of Civil Engineers, 113(1), 901–930

Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., & Fairbairn, E. de M. R. (2009). Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. *Cement and Concrete Research*, *39*(2), 110–115. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.005

Gunawan Theodosius, & Margaret Saleh. (2009). *Teori Soal dan Penyelesaian Mekanika Tanah*. Delta Teknik Group.

Hardiyatmo, H. C. (2001). *Mekanika Tanah I*. Gadjah Mada University Press.

Hardiyatmo, H. C. (2012). *Mekanika tanah I*. Gadjah Mada University Press.

Indriani, A. M., Utomo, G., & Syahputra, M. R. (2023). Pengaruh Siklus Basah Kering terhadap Perilaku Mekanik Tanah Lempung Stabilisasi Biosementasi dengan Bakteri Bacillus Subtilis. *CIVED*, *10*(2), 416–427. https://doi.org/10.24036/cived.v10i2.399

Kholidiah Siagian, N., & Ellida Novita Lydia, dan. (2024). *Jurnal Teknik Sipil : Rancang Bangun Pengaruh Penambahan Abu Tankos Sawit Dan Abu Ampas Tebu Pada Tanah Lempung Ekspansif Terhadap Pemadatan Tanah The Influence Of Adding Empty Palm Fruit Bunch Ash And Sugarcane Bagasse Ash To Expansive Clay Soil On Soil Compaction*. http://doi.org/xxxWebsite:https://ejournal.um-sorong.ac.id/index.php/rancangbangun