

Potensi Biopolimer untuk Mengurangi Cracked Soil dan Meningkatkan Daya Dukung pada Tanah Lempung

The Potential of Biopolymers to Reduce Soil Cracking and Improve the Bearing Capacity of Clay Soils

Bagus Guritno^{1,*}, Mega Shine Payungallo², Dita Sabrina³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Indonesia

Abstrak

Struktur teknik sipil seperti jalan dan jembatan dibangun di atas permukaan tanah sehingga diperlukan fondasi tanah yang tepat untuk meningkatkan stabilitas struktur di atasnya; jika daya dukung dan kuat tekan tanah buruk, hal ini dapat merusak struktur jalan. Salah satu alternatif material yang digunakan adalah biopolimer, yaitu zat tambahan yang terbukti aman untuk perkuatan tanah. Pada penelitian ini, sampel tanah diambil dari ruas Jalan Karanggede–Juwangi, Kabupaten Boyolali, kemudian diuji sifat fisik dan mekaniknya serta dianalisis retakannya melalui pengeringan siklik. Hasil pengujian menunjukkan biopolimer dapat meningkatkan CBR hingga 25,33%, kuat tekan tanah hingga 912,59% (17,18 Kpa ke 156,80 Kpa), menurunkan nilai indeks plastisitas (PI) sebesar 66,25%, serta mengurangi lebar retak hingga 337,50% dan luas retak hingga 306,96%.

Kata Kunci

Biopolimer, stabilisasi, perkuatan tanah, pengeringan siklik, cracked soil.

PENDAHULUAN

Pada konstruksi infrastruktur seperti jalan dan jembatan yang langsung dibangun di atas permukaan tanah, kestabilan struktur sangat bergantung pada perancangan fondasi tanah yang tepat (1). Dalam pembangunan jalan, salah satu faktor yang menentukan stabilitas struktur jalan adalah material tanah yang ditimbun sebagai fondasi jalan (2). Tanah timbunan akan menjadi material pendukung beban di atasnya. Jika daya dukung tanah dan kuat tekan tanah tidak baik, maka dapat menyebabkan kerusakan pada struktur jalan (3).

Menurut (4), nilai daya dukung tanah berhubungan dengan parameter CBR (California Bearing Ratio) dan kuat tekan tanah (q_u). Saat mendesain timbunan, nilai daya dukung tanah mempengaruhi ketebalan perkerasan yang ada di atasnya. Semakin besar nilai daya dukung tanah, maka tebal perkerasan yang diperlukan semakin kecil (5). Oleh karena itu, diperlukan nilai daya dukung yang tinggi untuk meningkatkan konstruksi jalan. Menurut persyaratan yang tertera pada (6), persyaratan minimal nilai CBR pada tanah timbunan adalah $\geq 6\%$. Apabila nilai CBR masih di bawah 6%, maka tanah tersebut perlu dilakukan perbaikan tanah. Salah satu metode perbaikan tanah adalah melalui stabilisasi tanah. Stabilisasi tanah menjadi sangat relevan khususnya pada tanah lempung dengan plastisitas tinggi, yang umumnya memiliki daya dukung rendah dan rentan terhadap perubahan volume, sehingga diperlukan alternatif material perkuatan seperti biopolimer untuk meningkatkan kinerja teknisnya

*Koresponden : Bagus Guritno

 bagus.guritno@poliupg.ac.id

Stabilisasi tanah terdiri dari dua jenis, yaitu kimia dan fisika (7). Selama satu dekade terakhir, para peneliti telah mengembangkan topik penelitian yang ramah lingkungan (8–10). Adapun bahan tersebut adalah biopolimer, biopolimer merupakan material yang terbukti aman untuk diaplikasikan dan tidak mengganggu ekosistem tanah (11). Biopolimer merupakan aditif yang sangat efektif dan ramah lingkungan. Ikatan partikel antara biopolimer dan tanah dapat mengurangi hidrolik konduktivitas dan meningkatkan kohesi tanah. Selain itu, penggunaan biopolimer juga dapat meningkatkan kekuatan tanah yang dipengaruhi oleh konsentrasi, waktu pemeraman, dan jenis tanah yang digunakan (12). Kekuatan campuran biopolimer dengan tanah telah banyak diuji, terlihat bahwa aplikasi biopolimer dapat meningkatkan kuat tekan tanah asli dari 181 kPa menjadi maksimal 7.087 kPa dengan penambahan 4% bahan biopolimer XG.

Dalam studi sebelumnya, stabilisasi tanah biasanya dilakukan melalui serangkaian pengujian tanah di laboratorium, tetapi pada penelitian ini kebaharuan penelitian terletak pada penerapan pencitraan termal untuk mengkaji luasan dan lebar retakan (cracked soil) pada tanah di ruas jalan Karanggede–Juwangi, Kabupaten Boyolali, sepanjang siklus basah–kering. Melalui foto thermal, distribusi suhu permukaan dan pola retak dapat diidentifikasi dengan akurasi tinggi, sehingga memperlihatkan historis kerusakan tanah dalam kurun waktu tertentu akibat perubahan kelembaban dan difokuskan pada analisis parameter teknis berupa kuat tekan tanah sebagai faktor utama dalam menjamin kestabilan dan keandalan struktur jalan. Pendekatan ini belum banyak diterapkan dalam studi stabilisasi tanah menggunakan biopolimer.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan tahap persiapan, yakni kajian penelitian sebelumnya, survei kondisi lapangan, dan persiapan alat serta bahan penelitian. Adapun bahan yang digunakan terdiri dari tanah lokal yang berasal dari Jalan Karanggede – Juwangi, Kabupaten Boyolali dan bahan stabilisasi yang digunakan adalah biopolimer Chitosan (CHI), Guar Gum (GG), dan Xanthan Gum (XG). Setelah tahap persiapan, langkah selanjutnya adalah pengambilan sampel tanah. Teknik pengambilan sampel tanah melakukan metode hand boring untuk mengambil sampel tanah tidak terganggu (UDS) dan pengambilan tanah terganggu (DS) dengan alat bantu cangkul. Apabila sampel tanah sudah diambil, maka tahap selanjutnya yaitu pengujian tanah di laboratorium. Pada tahap ini akan dilakukan serangkaian pengujian tanah di Laboratorium Mekanika Tanah yang terdiri dari pengujian sifat fisis dan mekanis tanah. Pengujian laboratorium dilakukan pada dua kondisi, yaitu kondisi asli dan kondisi setelah ditambah biopolimer. Pengujian tanah asli terdiri dari densitas, analisa ukuran butir, atterberg limits, pemadatan, dan CBR laboratorium. Dari hasil pengujian tanah asli dapat ditentukan jenis dan karakteristik tanah.

Selanjutnya melakukan pengujian tanah kondisi tercampur atau setelah ditambah Biopolimer. Dengan variabel biopolimer yang digunakan yakni 1%, 2%, 3%, dan 4% dari berat tanah (12). Selain pengujian pada tanah yang telah ditambah biopolimer pengujian kuat tekan bebas juga dilakukan pada tanah asli (tanpa perlakuan). Nilai kuat tekan bebas tanah asli ini digunakan sebagai acuan dasar untuk menghitung peningkatan kekuatan akibat penambahan biopolimer. Pengujian yang dilakukan yaitu atterberg limits, kuat tekan bebas, dan CBR laboratorium. Sebelum dicampur pada tanah, biopolimer dilarutkan dalam air menggunakan mixer yang dilakukan selama 15 menit (13). kemudian, tanah dan larutan biopolimer dicampur dengan

teknik menguleni selama 5 – 8 menit. Setelah tercampur, pindahkan campuran tanah pada cawan untuk kemudian ditutup plastic wrap dan disimpan selama 24 jam untuk memperoleh penyerapan biopolimer yang lebih baik. Setelah 24 jam, tanah tersebut siap untuk diuji. Untuk pengujian CBR dan kuat tekan, tanah harus dipadatkan terlebih dahulu dalam cetakan/silinder sesuai standar pengujian.

Setelah pemeriksaan sifat mekanis tanah, dilakukan uji foto thermal pasca-pengeringan siklik untuk meniru fluktuasi kelembaban lapangan (14). Sampel tanah mengalami siklus basah-kering hingga mencapai kondisi keseimbangan, kemudian permukaannya dipotret dengan kamera inframerah terkalibrasi. Citra thermal yang diperoleh diproses melalui tahapan standar pengolahan (preprocessing, segmentasi, dan deteksi tepi) guna menandai area dengan difusi panas berbeda serta jalur retak mikro. Analisis histogram suhu dan peta kontur termal menyajikan distribusi gradien panas secara kuantitatif, yang selanjutnya dikorelasikan dengan perubahan porositas dan kadar air terperangkap. Dari hasil ini ditentukan parameter penting seperti laju titik retak kritis, sehingga memberikan gambaran komprehensif tentang perilaku termomekanik sampel tanah.

Setelah rangkaian pengujian tanah selesai, langkah berikutnya adalah mengevaluasi parameter plastisitas, daya dukung, dan olah foto termal untuk mengukur dampak penambahan biopolimer pada karakteristik tanah lokal Kabupaten Boyolali. Data plastisitas memberikan wawasan tentang perubahan konsistensi dan deformasi plastis tanah akibat aditif, sedangkan hasil uji daya dukung menilai kemampuan tanah dalam menopang beban setelah perlakuan. Sementara itu, analisis olah foto termal memetakan tingkat keretakan tanah yang mencerminkan interaksi biopolimer dengan butiran tanah di berbagai kondisi kelembaban. Dengan memadukan ketiga parameter tersebut, studi ini mampu mengkuantifikasi peningkatan stabilitas dan kekuatan tanah secara komprehensif. Pada tahap akhir, seluruh temuan dirangkum dalam kesimpulan yang menegaskan efektivitas biopolimer sebagai bahan stabilisasi.

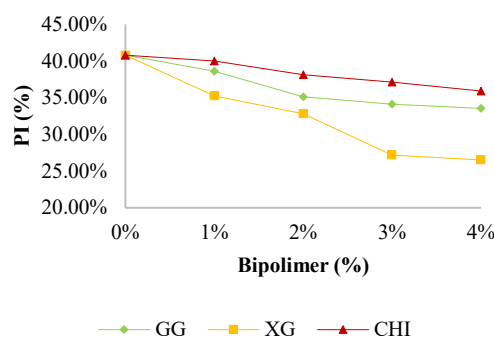
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengujian tanah lokal pada kondisi asli yang diambil dari Jalan Karanggede–Juwangi, Kabupaten Boyolali (Tabel 1), diperoleh nilai Liquid Limit (LL) sebesar 62,93% dan Plasticity Index (PI) sebesar 40,80%, yang menegaskan bahwa tanah ini memiliki tingkat plastisitas dan potensi pengembangan yang sangat tinggi. Nilai LL yang melewati ambang 50% menunjukkan kecenderungan tanah untuk menyerap air dalam jumlah besar sebelum berubah bentuk, sedangkan PI di atas 35% mengindikasikan rentang transisi yang lebar antara keadaan plastis dan semi-padat, sehingga risiko penyusutan dan pembengkakan akibat fluktuasi kelembaban menjadi signifikan. Berdasarkan Unified Soil Classification System (USCS), tanah ini diklasifikasikan sebagai CH (lempung dengan plastisitas tinggi) yang umumnya ditandai sifat kohesif kuat namun rentan terhadap retak susut; sedangkan menurut standar AASHTO, tanah masuk dalam kelompok A-7-6, yang dikenal menampilkan kinerja perkerasan rendah tanpa perlakuan stabilisasi karena deformasi volumetrik pada perubahan kadar air. Tanah dengan plastisitas tinggi yang digunakan sebagai lapisan pondasi jalan dapat mengalami perubahan volume besar saat kadar air berfluktuasi, sehingga berpotensi menimbulkan retak, gelombang, dan penurunan perkerasan.

Tabel 1. Hasil Pengujian Tanah Kab. Boyolali

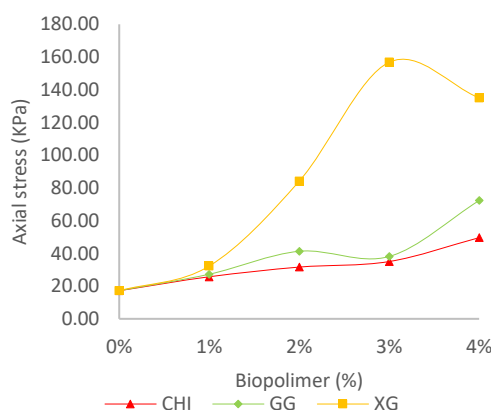
Pengujian Tanah	Hasil
Density, γ (kN/m ³)	14,91
Berat jenis, Gs	2,65
Batas plastis, PL(%)	22,13%
Batas cair, LL (%)	62,93%
Indeks plastisitas, PI (%)	40,80%
Kerikil (%)	0,00%
Pasir (%)	45,67%
Lanau (%)	32,89%
Lempung (%)	21,44%
Kadar air optimum, OMC (%)	25,05%
Berat kering optimum, γ_d (g/cm ³)	1,59
CBR laboratorium (%)	8,39%
Kuat tekan tanah (Kpa)	13,57
Klasifikasi tanah	Loam
Klasifikasi tanah	CH
Klasifikasi tanah	A-7-6

Seiring dengan peningkatan fraksi biopolimer dalam campuran tanah, batas cair (LL) cenderung menurun sementara batas plastis (PL) meningkat, sehingga indeks plastisitas (PI) berkurang secara berbanding terbalik dengan persentase biopolimer. Biopolimer XG terbukti paling efisien, mereduksi PI dari kategori pengembangan sangat tinggi ke tingkat sedang (26,52 %), sedangkan CHI dan GG hanya mampu menurunkan PI hingga masuk kategori pengembangan tinggi. Kurva pada Gambar 1 menggambarkan penurunan eksponensial PI hingga mencapai titik jenuh, menandakan bahwa XG membentuk jembatan molekular yang kuat pada dosis rendah, sementara CHI dan GG memerlukan proporsi lebih besar untuk mendekati efektivitas tersebut.



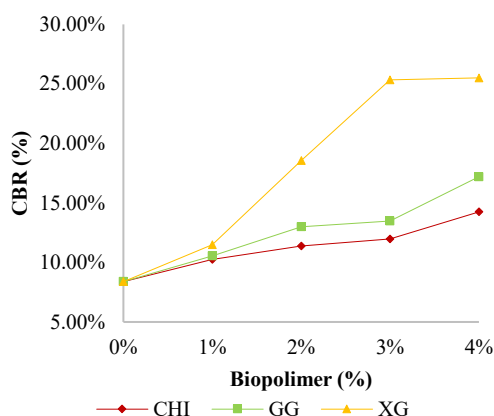
Gambar 1. Grafik Hubungan Nilai Pi dan Persentase Biopolimer

Gambar 2 mengilustrasikan bahwa penambahan biopolimer XG, CHI, dan GG secara signifikan meningkatkan nilai kuat tekan tanah; peningkatan paling dramatis tampak pada biopolimer XG dengan dosis optimal 3%, yang mampu meningkatkan kuat tekan hingga 912,59% dibanding tanah tanpa perlakuan (17,18 Kpa ke 156,80 Kpa), sedangkan biopolimer CHI dan GG mencapai nilai kuat tekan tertinggi pada konsentrasi 4%, masing-masing sebesar 49,60 kPa dan 72,29 kPa. Kurva XG menunjukkan kenaikan eksponensial hingga titik 3% sebelum melandai, menandakan bahwa dosis di atas itu tidak seefektif tahap sebelumnya, sementara CHI dan GG memerlukan konsentrasi lebih tinggi untuk memaksimalkan ikatan antarpartikel tanah. Perbedaan respons ini mengindikasikan bahwa struktur molekular XG lebih efisien dalam membentuk jembatan polimer-tanah pada kadar rendah, sedangkan CHI dan GG membutuhkan proporsi lebih besar untuk mencapai stabilisasi optimal.



Gambar 2. Grafik Hubungan Nilai Kuat Tekan Tanah dan Persentase Biopolimer

Gambar 3 memperlihatkan bahwa nilai CBR tanah meningkat seiring penambahan biopolimer, namun respons setiap polimer berbeda, XG secara efisien membentuk ikatan polimer-tanah yang kuat sehingga CBR melampaui ambang kategori baik (>20 %) pada konsentrasi 3 % (25,33 %) dan hanya sedikit bertambah pada 4 % (25,51 %), menandakan bahwa titik jenuh tercapai di konsentrasi rendah. Sementara itu, CHI dan GG meski meningkatkan CBR secara bertahap hingga mendekati batas atas kategori sedang, namun tidak pernah melewati 20 %, yang kemungkinan disebabkan oleh struktur molekular yang kurang optimal dalam mengisi pori-pori tanah dan membentuk jembatan antarpartikel pada kadar rendah.

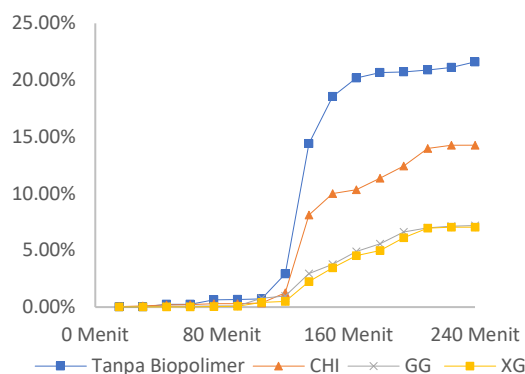


Gambar 3. Grafik Hubungan Nilai CBR dan Persentase Biopolimer

Analisis data pada Tabel 2 dan Gambar 4 mengungkap bahwa penambahan biopolimer secara signifikan menurunkan luas *cracked soil* baik pada suhu normal maupun suhu percepatan. Pada kondisi suhu ruang, sampel kontrol tanpa biopolimer menunjukkan retakan terluas mencapai 14,07 %, sedangkan penambahan biopolimer XG berhasil memangkasnya hingga hanya 4,82 %. Biopolimer CHI dan GG juga menampilkan efek reduksi dengan rentang luas retakan masing-masing 5,58 – 10,83 % dan 4,74 – 9,57 %, menegaskan kemampuan ketiganya dalam meningkatkan kohesi permukaan tanah. Ketika suhu pengujian dinaikkan ke 105 °C, luas retakan pada semua sampel meningkat seiring durasi pengeringan, pada tanah tanpa penambahan biopolimer luas retakan terjadi hingga 21,61 %, sementara tanah yang distabilisasi CHI, GG, dan XG hanya mengalami retakan secara berurutan sebesar 14,27 %, 7,19 %, dan 7,04 %. Perbedaan performa ini mencerminkan keunggulan struktur polimer XG yang mampu membentuk jaringan mikropori lebih homogen, menahan tegangan permukaan dan mencegah propagasi celah susut. Secara fisik, biopolimer berperan sebagai agen pengikat antarpartikel tanah melalui pembentukan film tipis dan jaringan mikropori yang menahan tegangan kapiler. Struktur polimer XG yang lebih fleksibel dan bercabang memungkinkan terbentuknya jaringan yang homogen, sehingga distribusi gaya tarik antarpartikel lebih merata dan propagasi celah susut dapat ditekan. Secara kimia, gugus hidroksil dan amina pada biopolimer seperti CHI dan GG berinteraksi dengan permukaan mineral tanah melalui ikatan hidrogen dan gaya elektrostatik, meningkatkan adhesi dan memperkuat kohesi antarpartikel. Kombinasi mekanisme fisik dan kimia ini menjelaskan mengapa penambahan biopolimer mampu menurunkan luas retakan secara signifikan, bahkan pada kondisi pengeringan ekstrem.

Tabel 2. Luas Retakan Pengeringan Siklik Suhu Normal

Benda Uji	Tanpa Biopolimer	CHI	GG	XG
1	12,05%	6,49%	7,65%	4,82%
2	12,01%	5,58%	4,74%	5,30%
3	14,07%	10,83%	9,57%	8,58%

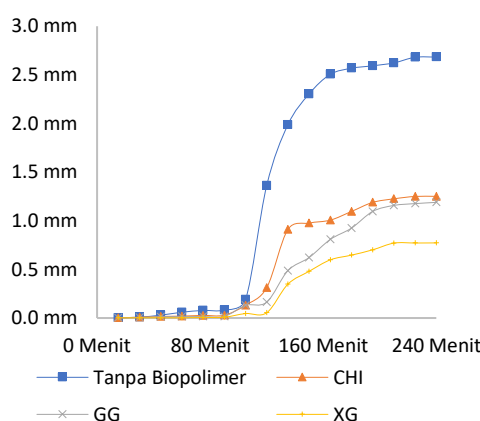


Gambar 4. Luas Retakan pada Pengeringan Siklik Suhu Percepatan

Analisis data pada Tabel 3 dan Gambar 5 mengungkapkan bahwa penambahan biopolimer secara signifikan dapat mereduksi lebar *cracked soil* baik pada suhu normal maupun kondisi percepatan. Pada suhu ruang, sampel kontrol tanpa biopolimer menunjukkan lebar retakan terbesar mencapai 2,0 mm, sedangkan tanah yang dicampur biopolimer XG dan CHI berhasil menurunkannya drastis menjadi 0,6 mm, mengindikasikan kemampuan keduanya menahan tegangan permukaan dan mempertahankan kohesi antar partikel tanah. Biopolimer GG juga efektif dengan rentang lebar *cracked soil* 0,7–0,9 mm, meski sedikit lebih tinggi dibandingkan XG dan CHI. Ketika suhu uji dinaikkan ke 105 °C, semua sampel mengalami pelebaran retakan akibat percepatan penguapan dan peningkatan tegangan susut; namun efisiensi biopolimer tetap terbukti dengan lebar *cracked soil* pada tanah tanpa perlakuan membengkak hingga 2,7 mm, sementara tanah yang distabilisasi CHI, GG, dan XG hanya menunjukkan lebar retakan masing-masing 1,3 mm, 1,2 mm, dan 0,8 mm. Hasil ini menegaskan keunggulan struktur jaringan polimer XG dan CHI yang lebih homogen dalam stabilisasi tanah yang efektif untuk mengurangi deformasi permukaan dan meningkatkan daya dukung pada kondisi pengeringan-pembasahan siklik.

Tabel 3. Lebar retakan pengeringan siklik suhu normal

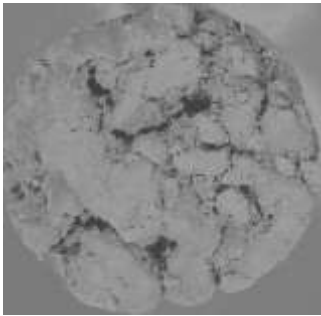
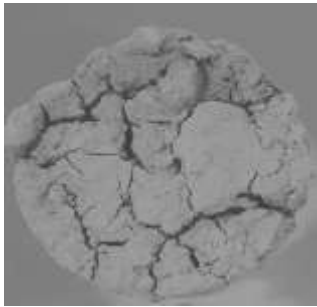
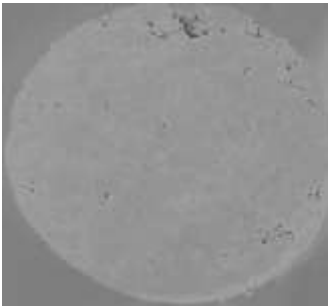
Benda Uji	Tanpa Bio polimer	CHI	GG	XG
1	2.0	0.6	0.7	0.6
2	1.4	0.6	0.7	0.6
3	1.0	0.6	0.9	0.8



Gambar 5. Lebar Retakan pada Pengeringan Siklik Suhu Percepatan

Berdasarkan hasil pengamatan pada Tabel 4, penambahan biopolimer pada suhu ruang terbukti secara signifikan mampu mengurangi luas maupun lebar retakan pada sampel tanah. Di antara jenis biopolimer yang diuji, XG menunjukkan kinerja paling unggul, dengan retakan yang hampir tidak tampak pada permukaan tanah. Efek positif ini diduga muncul karena jaringan biopolimer XG mampu meningkatkan kohesi antarpartikel dan menahan tegangan susut akibat penguapan air, sehingga mencegah terjadinya inisiasi dan propagasi retakan. Temuan ini menegaskan potensi besar penggunaan biopolimer XG sebagai agen stabilisasi tanah dalam rekayasa sipil, khususnya untuk meminimalkan deformasi permukaan serta mempertahankan integritas struktur tanah pada berbagai kondisi lingkungan.

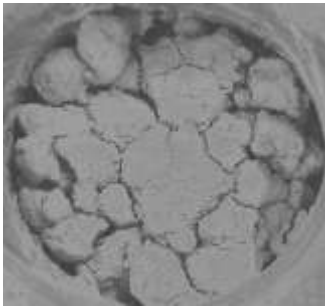
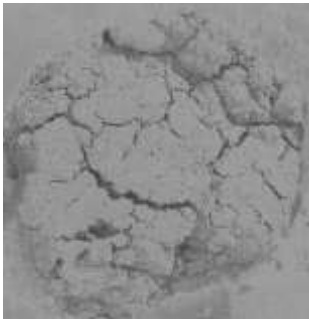
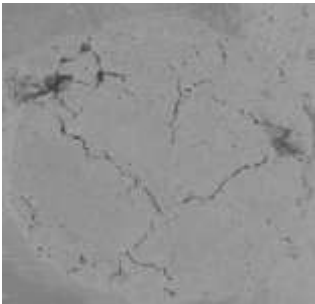
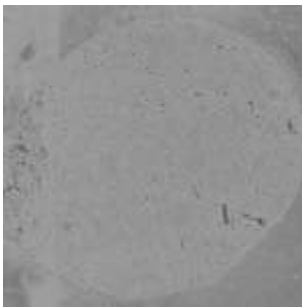
Tabel 4. Benda Uji Setelah Mengalami Pengeringan Siklik Suhu Ruang

Parameter	Gambar
Tanpa biopolimer	
CHI	
GG	
XG	

Berdasarkan hasil pengamatan pada Tabel 5, suhu percepatan terbukti meningkatkan lebar dan luas retakan pada sampel tanah. Namun demikian, penggunaan biopolimer tetap efektif dalam

mengurangi retakan, baik dari segi luas maupun lebar, pada sampel tanah yang diuji. Di antara jenis biopolimer yang digunakan, XG menunjukkan kinerja paling unggul dibandingkan CHI dan GG, karena mampu menekan retakan secara lebih signifikan meskipun pada kondisi pengeringan ekstrem.

Tabel 5. Benda Uji Setelah Mengalami Pengeringan Siklik Suhu Percepatan

Parameter	Gambar
Tanpa biopolimer	
CHI	
GG	
XG	

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian tanah asli di Jalan Karanggede–Juwangi, tanah tersebut diklasifikasikan sebagai tanah lempung CH menurut sistem USCS, dengan liquid limit 62,93 % dan Plasticity Index 40,80 %, yang menunjukkan plastisitas dan potensi pengembangan sangat tinggi. Pemberian biopolimer berhasil menurunkan tingkat pengembangan tanah. Biopolimer XG menurunkan indeks plastisitas hingga 66,25 % atau pada kategori

pengembangan sedang, sedangkan biopolimer CHI dan GG masih mempertahankan tanah pada kategori pengembangan tinggi. Dalam sudut pandang kekuatan mekanis tanah, hanya campuran dengan biopolimer XG yang mampu meningkatkan nilai California Bearing Ratio (CBR) sebesar 25,33 % menjadi klasifikasi “tingkat baik”, sedangkan penambahan CHI dan GG belum menunjukkan peningkatan signifikan pada nilai CBR. Optimalisasi stabilisasi juga terlihat pada pengujian kuat tekan, di mana dosis 3 % biopolimer XG menghasilkan peningkatan kekuatan tekan tanah hingga 912,59 %, dengan nilai kuat tekan mencapai 156,80 Kpa. Selain itu, penggunaan biopolimer, khususnya XG, Penambahan biopolimer terbukti efektif dalam mereduksi retakan (cracked soil) pada permukaan tanah. Pada kondisi suhu ruang, lebar retakan berkurang dari 2,0 mm tanpa biopolimer menjadi 0,6 mm dengan biopolimer (penurunan sebesar 337,50%). Sementara itu, pada kondisi suhu percepatan, retakan menyusut dari 2,7 mm menjadi 0,8 mm (penurunan sebesar 306,96%). Dengan demikian, penggunaan biopolimer mampu meminimalkan kerusakan permukaan akibat deformasi volumetrik.

DAFTAR PUSTAKA

1. Roy S, Kumar Bhalla S. Role of Geotechnical Properties of Soil on Civil Engineering Structures. Resources and Environment [Internet]. 2017;7(4):103–9. Tersedia pada: <http://journal.sapub.org/re>
2. Salimah A, Qaribullah I. Pengaruh Penambahan Kapur terhadap Nilai Plastisitas Tanah Lunak. Journal Of Civil Engineering As Applied Science (Rigid). 2022;1(1):26–30.
3. Hardiyatmo HC. Mekanika Tanah 1. 2002;
4. Helmi, Aprianto, Bachtiar V. Kolerasi Nilai California Bearing Ratio (CBR) Lapangan Dengan Menggunakan Alat Dynamic Cone Penetrometer (DPC) dan California Bearing Ratio (CBR) Mekanis. Jurnal. 2017;1–12.
5. Albajili F, Fatnanta F, Agus Nugroho S. Korelasi Antara Nilai Cbr Dan Nilai Kuat Geser Sebagai Tanah Timbun. Jom FTEKNIK. 2014;1(2):1–10.
6. Marga DJB. Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Dalam: Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. 2018. hlm. 1–50.
7. Panguriseng D. Dasar-Dasar Teknik Perbaikan Tanah. Pustaka AQ. 2017;(Agustus):240.
8. Bagheri P, Gratchev I, Rybachuk M. Effects of Xanthan Gum Biopolymer on Soil Mechanical Properties. Applied Sciences (Switzerland). 1 Januari 2023;13(2).
9. Shariatmadari N, Reza M, Tasuji A, Ghadir P, Javadi AA. Experimental study on the effect of chitosan biopolymer on sandy soil stabilization. E3S Web of Conferences. 16 Oktober 2020;195:6–11.
10. Mawarani LJ. Development Of Natural Starch-Based Biopolymers With Addition Of Beeswax As Environment-Friendly Plastics [Internet]. 2019 [dikutip 17 Februari 2022]. Tersedia pada: https://repository.its.ac.id/69888/1/Buku_TA_Fahmi_Mujahidin.pdf
11. Soldo A, Miletić M, Auad ML. Biopolymers as a sustainable solution for the enhancement of soil mechanical properties. Sci Rep. 1 Desember 2020;10(1).
12. Chen C, Peng Z, Gu J, Peng Y, Huang X, Wu L. Exploring environmentally friendly biopolymer material effect on soil tensile and compressive behavior. Int J Environ Res Public Health. 1 Desember 2020;17(23):1–13.

13. Soltani-Jigheh H, Bagheri M. Compressibility and Cracking Properties of soft Soils treated with a Polymeric Stabilizer. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement. 2021;
14. Izzo MZ, Miletić M. Sustainable Improvement of the Crack Resistance of Cohesive Soils. Sustainability. 19 Oktober 2019;11(20):5806.