

PENGARUH NANO-MATERIAL DAN BIOPOLIMER TERHADAP KARAKTERISTIK TANAH LUNAK UNTUK DESAIN PERKERASAN JALAN

Salwa Siti Sanniyah
Teknik Sipil
Politeknik Negeri Bandung
salwa.siti.mtri22@polban.ac.id

Atmy Verani R. Sihombing
Teknik Sipil
Politeknik Negeri Bandung
atmyvera@polban.ac.id

Lindung Zalbuin Mase
Teknik Sipil
Universitas Bengkulu
imase@unib.ac.id

Ambar Susanto
Teknik Sipil
Politeknik Negeri Bandung
ambar.susanto@polban.ac.id

Andri Krisnandi Somantri
Teknik Sipil
Politeknik Negeri Bandung
andri_krisnandi@polban.ac.id

Yulianto Petrus Krisologus
Teknik Sipil
Politeknik Negeri Bandung
yulianto@polban.ac.id

Abstract

The effect of soft soil modification using nano-materials and biopolymers on road pavement design is discussed in this paper. The nano-materials and biopolymers used in this research are nano-lime and nano-silica, with the biopolymer in the form of chitosan from shrimp shells. First, soil mixed with nano-materials with 1-5 matrix variations and 4 variations of biopolymer mixture (0.05%, 0.1%, 0.15%, and 0.2%) were tested in the laboratory to determine the effect of nano-materials and biopolymers on soft soil characteristics, which are expressed by the Atterberg Limit and California Bearing Ratio. Next, the data obtained was used to design road pavement. This study shows that the addition of nano-materials and biopolymers improves soil characteristics, both at the Atterberg Limit and the California Bearing Ratio of the soil. This soil improvement can reduce the thickness of the road pavement by 18.18%.

Keywords: soft soil; nano-materials; biopolymers; road pavement; road

Abstrak

Pengaruh modifikasi tanah lunak menggunakan nano-material dan biopolimer terhadap desain perkerasan jalan dibahas pada tulisan ini. Nano-material dan biopolimer yang digunakan pada penelitian ini adalah nano-kapur dan nano-silika, dengan biopolimer berupa chitosan dari kulit udang. Pertama, tanah campuran nano-material dengan variasi matriks 1-5 dan 4 variasi campuran biopolimer (0,05%, 0,1%, 0,15%, dan 0,2%) diuji di laboratorium untuk mengetahui pengaruh nano-material dan biopolimer terhadap karakteristik tanah lunak, yang dinyatakan dengan Atterberg Limit dan California Bearing Ratio. Selanjutnya, data yang diperoleh digunakan untuk merancang perkerasan jalan. Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan nano-material dan biopolimer memperbaiki karakteristik tanah, baik pada Atterberg Limit maupun pada California Bearing Ratio tanah tersebut. Perbaikan tanah ini dapat mengurangi tebal perkerasan jalan sebesar 18,18%.

Kata-kata kunci: tanah lunak; nano-material; biopolimer; perkerasan jalan; jalan

PENDAHULUAN

Berdasarkan Atlas Sebaran Batu Lempung Bermasalah Indonesia, kawasan Pantai Utara (Pantura) Jawa Barat merupakan salah satu kawasan yang memiliki sebaran tanah lunak. Tanah lunak merupakan tanah kohesif yang sebagian besar terdiri atas butir-butir yang sangat kecil, seperti lempung dan lanau (Dewi et al., 2023). Keberadaan tanah lunak dapat menimbulkan permasalahan bagi infrastruktur di atasnya, termasuk perkerasan jalan. Tanah lunak memiliki nilai Indeks Plastisitas yang tinggi, yang menyebabkan pengembangan yang

sangat tinggi. Pengembangan tersebut akan mengakibatkan perubahan volume, yang dapat menyebabkan kerusakan pada infrastruktur yang dibangun di atasnya.

Akan lebih baik dilakukan perbaikan tanah lunak sebagai tanah dasar untuk aplikasi perkerasan jalan. Perbaikan tanah secara umum dapat diklasifikasikan menjadi 2 kategori, yaitu: (1) stabilisasi mekanik, misalnya pemadatan, getadan, dan geosintetik, dan (2) stabilisasi kimia, misalnya pencampuran atau injeksi pengikat semen (Makusa, 2012).

Persyaratan teknis tanah dasar ditentukan dengan pengujian CBR lapangan sesuai dengan SNI 1738-2011 atau CBR Laboratorium sesuai dengan SNI 1744-2012, masing-masing untuk perencanaan tebal perkerasan lama dan perkerasan jalan baru. Dalam spesifikasi Pd T-14-2003 tentang Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen dijelaskan bahwa apabila tanah dasar mempunyai CBR lebih kecil dari 2%, maka harus dipasang pondasi bawah yang terbuat dari beton kurus (*lean-mix concrete*) setebal 15 cm yang dianggap mempunyai nilai CBR tanah dasar efektif 5%.

Dalam beberapa tahun terakhir, perbaikan tanah menggunakan nano-material dan biopolimer telah digunakan. Stabilisasi nano meningkatkan struktur mikro dan makro tanah, efisiensi pemadatan, dan daya dukung tanah (Cuisinier et al., 2011). Bahan nano lebih optimal dibandingkan dengan bahan biasa, karena kemampuan nano yang lebih tinggi untuk flokulasi dan menggumpalkan partikel tanah dibandingkan dengan bahan yang bukan nano (Govindasamy et al., 2017).

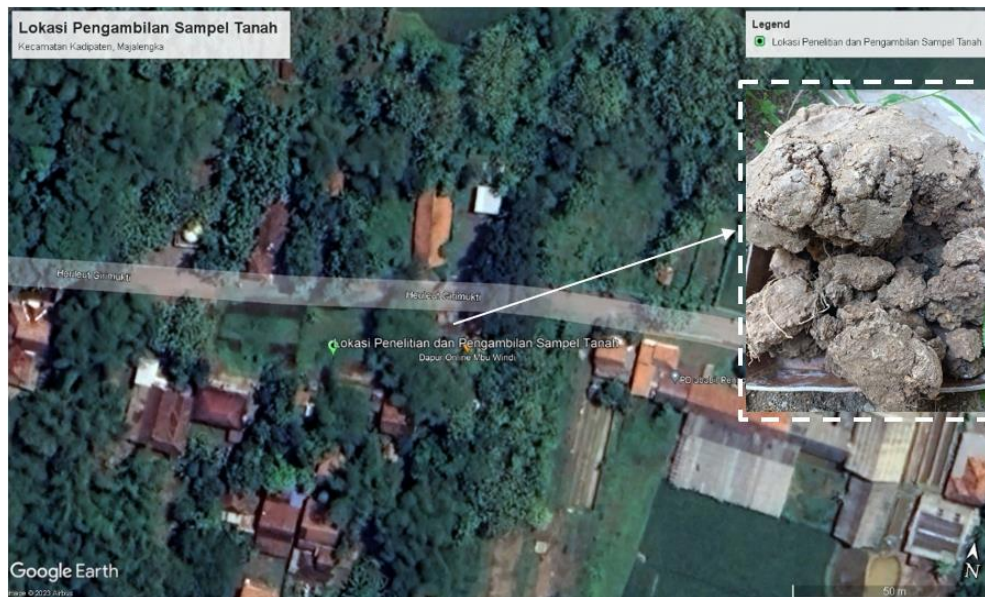
Nano kapur dapat meningkatkan kuat tekan yang signifikan pada tanah (Govindasamy et al., 2017). Peningkatan yang cukup besar dalam hasil pemadatan tanah juga dicapai dengan nano kapur dibandingkan dengan kapur biasa (Taha et al., 2019). Selain itu, penambahan nano silika dapat memberikan peningkatan kekuatan tanah, kepadatan tanah, dan penurunan *swelling* (Ghavami et al., 2021). Kekuatan CBR tanah yang ditambah dengan nano silika memberi peningkatan yang substansial dengan faktor 5,83 lebih tinggi (Buazar, 2019). Selain itu, penambahan biopolimer yang dihasilkan dari bahan-bahan organik, seperti limbah pertanian dan limbah industri pangan, dapat dilakukan untuk perbaikan tanah. Biopolimer seperti *chitosan* telah dilaporkan menjanjikan dalam memperbaiki sifat mekanik tanah (Hataf et al., 2017).

Meskipun telah banyak penelitian mengenai penambahan nano-material dan biopolimer, masih jarang penelitian yang mengganbungkan kedua bahan tersebut dalam perbaikan tanah untuk tanah dasar yang diaplikasikan pada perkerasan jalan. Penelitian ini berpusat pada modifikasi tanah lunak untuk perkerasan jalan, dengan pengujian pada sifat fisik tanah berupa Atterberg Limit, untuk mengetahui pengaruh nano-material dan biopolimer dalam mengurangi kembang susut tanah, dan CBR untuk mengetahui peningkatannya yang akan diaplikasikan pada perkerasan jalan. Desain perkerasan kaku pada penelitian ini menggunakan pedoman Bina Marga.

MATERIAL DAN METODE

Material

Pada penelitian ini, tanah lunak dipilih dari Jalan Pantura, di Kecamatan Kadipaten, Majalengka, Jawa Barat. Sampel tanah ditunjukkan pada Gambar 1. Tanah yang akan diuji *Atterberg Limit* dan CBR harus kering dan lolos ayakan No. 4 dan No. 40.



Gambar 1 Lokasi Penelitian

Nanomaterial adalah material yang memiliki struktur berdimensi sangat kecil, yakni berkisar antara 1 nm hingga 100 nm. Nano-material yang digunakan pada studi ini berupa nano-kapur dan nano-silika sebagai aditif.

Penelitian ini menggunakan biopolimer berupa chitosan, yang merupakan biopolimer alami dengan kelimpahan terbesar kedua setelah selulosa. Chitosan merupakan produk deasetilasi zat kitin, baik melalui proses reaksi kimia maupun reaksi enzimatik. Pada studi ini, chitosan yang digunakan berupa chitosan kulit udang.

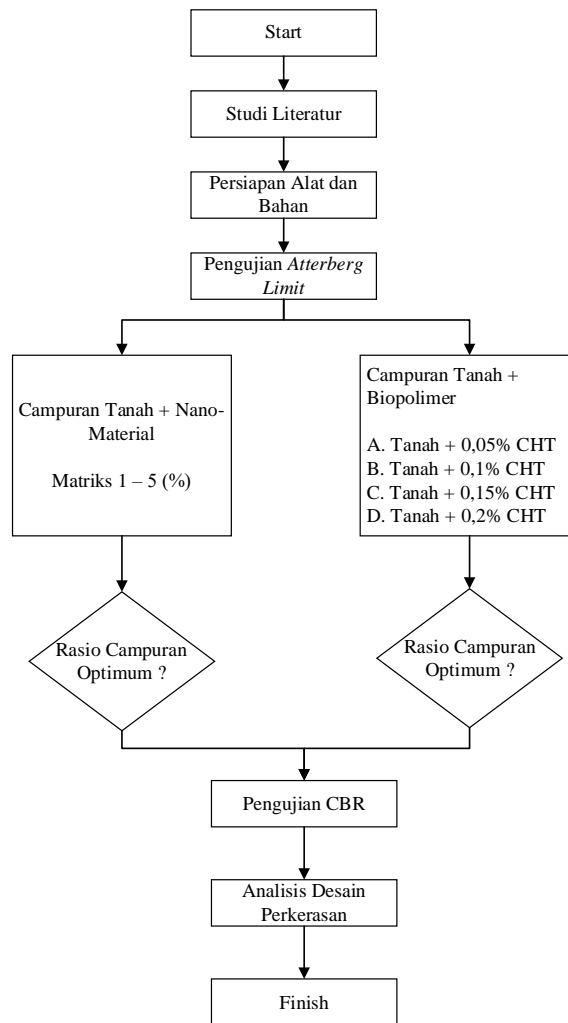
Metode

Tahapan penelitian ini diilustrasikan dalam bentuk diagram alir, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Penelitian ini diawali dengan persiapan alat dan bahan, penentuan variabel, pengujian tanah, dan perancangan tebal perkerasan kaku.

Persentase nano-material yang digunakan pada penelitian ini adalah seperti yang terdapat pada Tabel 1, sedangkan untuk biopolimer adalah 0,05%, 0,1%, 0,15%, dan 0,2% terhadap berat tanah. Persentase biopolimer tersebut didasarkan pada persentase yang digunakan oleh beberapa peneliti sebelumnya, yang telah membuktikan adanya penurunan nilai Indeks Plastisitas.

Pencampuran tanah dilakukan dengan masing-masing bahan aditif terlebih dahulu, untuk mencari rasio optimum masing-masing campuran melalui pengujian Atterberg Limit. Selanjutnya dilakukan pencampuran terhadap masing-masing campuran rasio optimum untuk pengujian CBR.

Untuk membuat spesimen, kondisi tanah adalah permukaan kering, serta lolos saringan No. 4 dan No. 40. Nano-material dan biopolimer digunakan dalam persentase yang dibutuhkan dan dibuat dengan cara mencampurkan bahan aditif kedalam tanah kering tersebut. Proses pencampuran dilakukan selama 15 menit dengan menggunakan mixer. Hingga campuran tanah dengan bahan aditif siap digunakan.



Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

Tabel 1 Matriks Rasio Campuran Nano- Material

NS NK	1%	2%	3%	4%	5%
1%	1-1	1-2	1-5	1-4	1-5
2%	2-1	2-2	2-5	2-4	2-5
3%	3-1	3-2	3-5	3-4	3-5
4%	4-1	4-2	4-5	4-4	4-5
5%	5-1	5-2	5-5	5-4	5-5

METODOLOGI PENGUJIAN DAN PROGRAM EKSPERIMENTAL

Uji Atterberg Limit

Pengujian Atterberg Limit menurut ASTM D-318 digunakan untuk menentukan batas konsistensi, seperti batas plastis (PL), batas cair (LL), indeks plastisitas (PI), dan batas susut (SL). Pada studi ini Uji Atterberg Limit dilakukan pada tanah dengan campuran nano-material dan tanah dengan campuran biopolimer (lihat Gambar 3).



Gambar 3 Pengujian Atterberg Limit

Uji CBR Laboratorium

Kekuatan tanah diuji dengan mesin CBR sesuai dengan 10, 25, dan 56 tumbukan untuk setiap benda uji (lihat Gambar 4). Benda uji CBR dibuat pada kadar air optimum (OMC) dan berat kering maksimum (MDD) menggunakan metode pemadatan. Pada studi ini, pengujian CBR dilakukan dalam kondisi *Unsoaked* dan *Soaked* dengan beban 4,5 kg.



Gambar 4 Pengujian CBR

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Atterberg Limit

Pada Tabel 2 dan Tabel 3 disajikan hasil uji Atterberg Limit untuk tanah yang tidak diberi perlakuan dan tanah yang diberi perlakuan. Indeks Plastisitas pada tanah yang tidak diberi perlakuan memiliki derajat plastisitas yang tinggi. Penambahan nano-material dan biopolimer menurunkan Indeks Plastisitas. Begitupun ketika kedua rasio optimum masing-masing campuran digabungkan, diperoleh nilai Indeks Plastisitas yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan Indeks Plastisitas Tanah asli.

Tabel 2 Pengaruh Nano-Material terhadap Atterberg Limit

Rasio Nano-Material (%)			Nilai (%)			
Nano-Kapur	-	Nano-Silika	SL	LL	PL	PI
0	-	0	12,52	66,91	21,34	45,58
0	-	1	24,13	66,21	29,28	36,94
0	-	2	17,96	56,34	29,57	26,76
0	-	3	20,84	63,61	24,20	39,41
0	-	4	19,96	63,06	24,94	38,12
0	-	5	19,36	64,38	26,36	38,02
1	-	0	16,82	65,41	33,17	32,24
1	-	1	16,56	58,92	27,82	31,10
1	-	2	19,95	56,46	33,54	22,92
1	-	3	17,74	48,80	35,49	13,31
1	-	4	11,73	67,28	41,12	26,16
1	-	5	19,88	56,37	32,44	23,93
2	-	0	24,68	61,18	38,96	22,21
2	-	1	23,17	56,19	30,71	25,48
2	-	2	23,42	48,96	34,00	14,96
2	-	3	21,57	51,05	37,27	13,78
2	-	4	15,20	47,33	35,98	11,35
2	-	5	17,87	55,34	39,34	16,00
3	-	0	9,16	62,37	43,50	18,87
3	-	1	25,72	40,66	29,85	10,81
3	-	2	19,75	51,79	33,90	17,89
3	-	3	39,15	53,77	36,26	17,52
3	-	4	13,08	48,08	33,33	14,75
3	-	5	32,75	57,08	38,66	18,42
4	-	0	32,44	56,39	38,33	18,06
4	-	1	49,99	54,62	43,28	11,35
4	-	2	37,56	50,35	35,39	14,96
4	-	3	39,75	52,75	34,57	18,19
4	-	4	31,13	53,72	36,11	17,61
4	-	5	35,28	53,98	33,88	20,10
5	-	0	37,19	58,54	36,50	22,04
5	-	1	37,74	59,41	42,75	16,66
5	-	2	32,17	51,68	34,69	16,99
5	-	3	34,33	52,66	33,99	18,66
5	-	4	43,68	47,67	33,74	13,94
5	-	5	30,49	51,67	36,74	14,93

Tabel 3 Pengaruh Biopolimer terhadap *Atterberg Limit*

Rasio Biopolimer (%)	Nilai (%)			
	SL	LL	PL	PI
0,05	14,78	69,42	39,93	29,49
0,1	25,18	62,45	47,64	14,81
0,15	15,93	66,57	47,99	18,58
0,2	24,42	81,75	53,57	28,18

Dari hasil yang terdapat pada Tabel 2 dan Tabel 3, ditentukan rasio optimum untuk campuran tanah dengan nano-material dilihat dari nilai Indeks Plastisitas (IP) dan Kembang Susut (SL) berada pada campuran 2% nano-kapur dan 4% nano-silika. Kemudian, berdasarkan campuran tanah dengan biopolimer, rasio optimum berada pada campuran 0,1% biopolimer. Kedua rasio tersebut dicampurkan kembali dan dilakukan pengujian Atterberg Limit kembali sehingga dihasilkan nilai Uji Atterberg Limit, seperti yang disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Pengaruh Nano-Material dan Biopolimer terhadap *Atterberg Limit*

Campuran		LL	PL	SL	PI
Nano-Kapur– Nano-Silika	Biopolimer				
2-4	0,1	49,56	38,77	21,47	10,78

Hasil pencampuran tanah dengan rasio optimum, yaitu 2% nano-kapur, 4% nano-silika, dan 0,1% biopolimer, terlihat bahwa Indeks Plastisitas dapat diturunkan sebanyak 76,25%, yang semula memiliki nilai Indeks Plastisitas untuk tanah asli 45,58% menjadi 10,78% untuk tanah campuran.

Uji CBR

Pengujian CBR Laboratorium dilakukan terhadap 2 sampel tanah, yaitu pada tanah asli dan pada tanah campuran, dengan campuran optimum yang sebelumnya didapatkan dari pengujian Atterberg Limit. Hasil pengujian menunjukkan bahwa CBR meningkat dengan adanya penambahan nano-material dan biopolimer, dengan peningkatan CBR mencapai 92,63%, yang berarti bahwa nano-material dan biopolimer terbukti dapat meningkatkan daya dukung tanah.

Tabel 5 Pengaruh Nano-Material Biopolimer terhadap CBR

CBR Design	Tanah Asli	Tanah + 2% Nano-Kapur, 4% Nano-Silika dan 0,1% Biopolimer
<i>Unsoaked</i>	1,61%	21%
<i>Soaked</i>	1,40%	19%

Perancangan Tebal Perkerasan Berdasarkan Metode Bina Marga

Pada studi ini perancangan perkerasan yang digunakan menggunakan prinsip desain tebal perkerasan kaku. Data lalu lintas didapatkan dari hasil survei pada Ruas Jalan Kadipaten–Jatibarang, Kabupaten Majalengka, tahun 2023.

Data Volume Lalu Lintas

Pada lokasi survei perhitungan dibagi menjadi 2 segmen ruas jalan, yaitu Segmen 1 (Arah Majalengka) dan Segmen 2 (Arah ke Lubuk Pakam). Hasil perhitungan volume lalu lintas disajikan pada Tabel 6. Untuk perancangan perkerasan jalan 2 lajur 2 arah, diambil faktor pertumbuhan lalu lintas sebesar 15%, dengan umur desain perkerasan jalan 20 tahun.

Tabel 6 Volume Lalu Lintas (Kend/Hari)

No.	Jenis Kendaraan	Volume Kendaraan	
		Arah Majalengka	Arah Sumedang
1	Sepeda Motor	6955	2515.2
2	Mobil Penumpang	2346	8256
3	Bus Kecil	552	960
4	Bus Besar	138	192
5	Truk 2 sumbu 4 roda	1104	3648
6	Truk 2 sumbu 6 roda	1863	3840
7	Truk 3 sumbu	414	1728
8	Kendaraan Tidak Bermotor	52	496
Jumlah		13424	44272
Jumlah 2 Arah		57696.2	

Penentuan Koefisien Distribusi

Penentuan koefisien distribusi didasarkan pada jenis jalan, yang merupakan jalan 2 lajur 2 arah. Koefisien distribusi didapat sebesar 0,5, berdasarkan SKBI 2.3.26.1987 atau SNI 03-1732-1989.

Jumlah Kendaraan JK_{NH} (kend) dan Jumlah Sumbu JS_{KN}

Jumlah kendaraan dan jumlah sumbu kendaraan dihitung sebagai berikut:

$$R = \frac{(1+i)^{UR} - 1}{e^{\log(1+i)}} \quad (1)$$
$$= 109,948$$
$$JK_{NH} = 14475$$
$$JS_{KNH} = 31092$$
$$JK_N = JK_{NH} \times 365 \times R$$
$$= 580896187.6 \text{ kendaraan}$$
$$JS_{KN} = JS_{KNH} \times 365 \times R$$
$$= 1247752972 \text{ kendaraan}$$

Repetisi Kumulatif Beban Sumbu

Repetisi kumulatif beban sumbu selanjutnya dihitung dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 7.

Beban Sumbu dengan Faktor Keamanan (F_{KB})

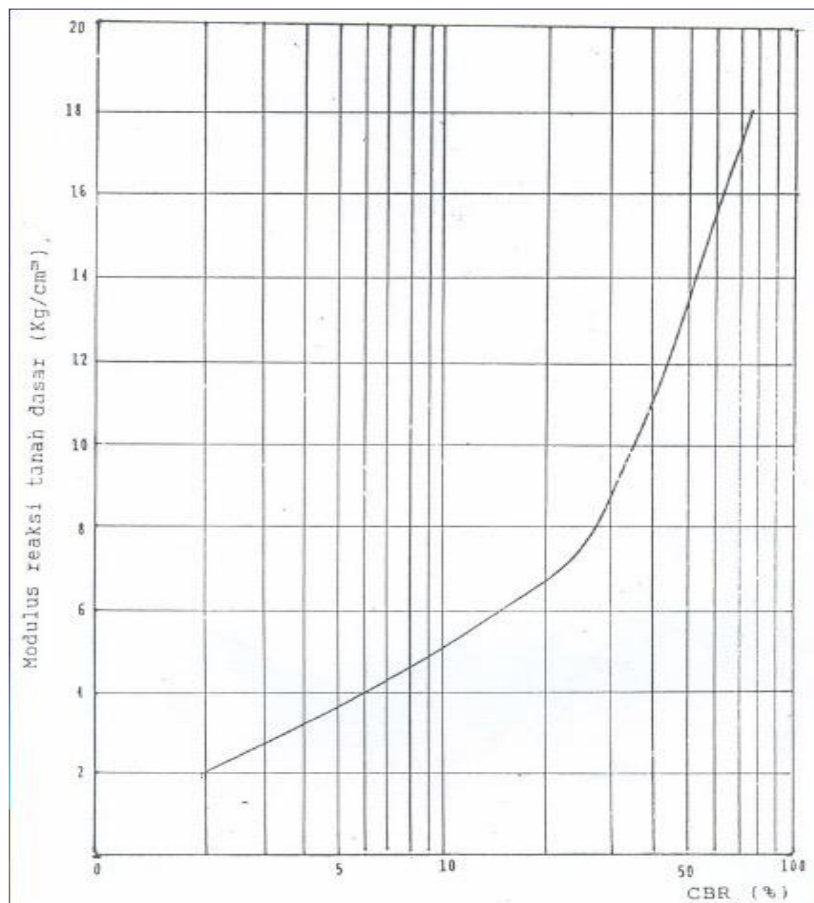
Faktor keamanan yang digunakan adalah $F_{KB} = 1,1$. Hasil perhitungan repetisi kumulatif beban sumbu dengan faktor keamanan dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 7 Repeatsi Kumulatif Beban Sumbu

No.	Beban Sumbu	Jumlah Sumbu	Persentase Sumbu Beban	Repetisi Kumulatif
1	Beban sumbu 2 ton (STRT)	4788	15	9607360782
2	Beban sumbu 3 ton (STRT)	1842	6	3696064862
3	Beban sumbu 4 ton (STRT)	5703	18	11443353913
4	Beban sumbu 4 ton (STRG)	4788	15	9607360782
5	Beban sumbu 5 ton (STRT)	3984	13	7994094685
6	Beban sumbu 5 ton (STRG)	2142	7	4298029823
7	Beban sumbu 6 ton (STRG)	5703	18	11443353913
8	Beban sumbu 15 ton (STdRG)	2142	7	4298029823

Tabel 8 Repeatsi Kumulatif Beban Sumbu dengan Faktor Keamanan

No.	Beban Sumbu	Beban Sumbu dengan F_{KB} (ton)
1	Beban sumbu 2 ton (STRT)	2,2
2	Beban sumbu 3 ton (STRT)	3,3
3	Beban sumbu 4 ton (STRT)	4,4
4	Beban sumbu 4 ton (STRG)	4,4
5	Beban sumbu 5 ton (STRT)	5,5
6	Beban sumbu 5 ton (STRG)	5,5
7	Beban sumbu 6 ton (STRG)	6,6
8	Beban sumbu 15 ton (STdRG)	16,5

**Gambar 5** Hubungan antara CBR dan Modulus Reaksi Tanah Dasar (k)

Tegangan yang Terjadi

Kekuatan tanah dasar dinyatakan dengan Modulus Reaksi Tanah Dasar (k). Nilai k dapat didekati dengan nilai CBR, dengan menggunakan grafik yang terdapat pada Gambar 5.

Untuk CBR Tanah Asli (*Soaked*):

CBR *Soaked* = 1,4%

Tebal Pelat = 22 cm

k = 2 kg/cm²

Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9 Repetisi Izin Tegangan yang Terjadi dan Jumlah Persentasi *Fatigue* Tanah Asli

No.	Beban Sumbu, $fk = 1,1$	Perbandingan Tegangan		Jumlah Repetisi Izin Tegangan yang Terjadi	Jumlah Persentase <i>Fatigue</i>
1	Beban sumbu 2 ton (STRT)	-	-	-	-
2	Beban sumbu 3 ton (STRT)	-	-	-	-
3	Beban sumbu 4 ton (STRT)	13/40	0,300	-	-
4	Beban sumbu 4 ton (STRG)	-	-	-	-
5	Beban sumbu 5 ton (STRT)	14/40	0,350	-	-
6	Beban sumbu 5 ton (STRG)	-	-	-	-
7	Beban sumbu 6 ton (STRG)	15/40	0,375	-	-
8	Beban sumbu 15 ton (STdRG)	19,9/40	0,498	-	-
Total					-

Karena jumlah persentase *fatigue* kurang dari 100%, berarti tebal pelat beton 22 cm memenuhi syarat.

Untuk CBR Tanah Campuran (*Soaked*)

CBR *Soaked* = 19%

Tebal Pelat = 18 cm

k = 6,2 kg/cm²

Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 1 Repetisi Izin Tegangan yang Terjadi Dan Jumlah Persentasi *Fatigue* Tanah Campuran

No.	Beban Sumbu, $fk = 1,1$	Perbandingan Tegangan		Jumlah Repetisi Izin Tegangan yang Terjadi	Jumlah Persentase <i>Fatigue</i>
1	Beban sumbu 2 ton (STRT)	-	-	-	-
2	Beban sumbu 3 ton (STRT)	-	-	-	-
3	Beban sumbu 4 ton (STRT)	14/40	0.350	-	-
4	Beban sumbu 4 ton (STRG)	-	-	-	-
5	Beban sumbu 5 ton (STRT)	17/40	0.425	-	-
6	Beban sumbu 5 ton (STRG)	-	-	-	-
7	Beban sumbu 6 ton (STRG)	15/40	0.375	-	-
8	Beban sumbu 15 ton (STdRG)	19/40	0.475	-	-
Total					-

Karena jumlah persentase *fatigue* kurang dari 100%, artinya tebal pelat beton 18 cm memenuhi syarat.

Resume Tebal Perkerasan

Tebal perkerasan yang dihitung berdasarkan tanah asli dan tebal perkerasan yang dihitung berdasarkan tanah campuran memiliki perbedaan 18,18% (lihat Tabel 11).

Tabel 11 Desain Tebal Perkerasan

No.	Tanah	CBR Desain	Tebal Pelat	Satuan
1	Tanah Asli	1,4%	22	cm
2	Tanah + 2% nano-kapur + 4% nano-silika + 0,1% biopolimer	19%	18	cm

KESIMPULAN

Pada studi ini dikaji pengaruh nano-material dan biopolimer dalam mengurangi kembang susut tanah dan meningkatkan CBR tanah yang diterapkan pada perancangan perkerasan jalan. Studi ini menunjukkan bahwa bahwa modifikasi tanah lunak menggunakan nano-material dan biopolimer dapat memengaruhi desain perkerasan, khususnya untuk desain perkerasan kaku.

Pada pengujian *Atterberg Limit*, pengaruh penambahan nano-material dan biopolimer menunjukkan hasil yang signifikan pada perubahan Indeks Plastisitas atau penyebab kembang susut tanah. Indeks Plastisitas yang semula bernilai 45,58% menjadi 10,78%, atau dengan pekatan lain bahan nano-material dan biopolimer dapat mengurangi nilai Indeks Plastisitas sebesar 76,25%. Demikian pula dengan CBR tanah, baik CBR *Soaked* maupun CBR *Unsoaked*. Dengan CBR Tanah Asli bernilai 1,4% dan CBR Tanah Campuran bernilai 19%, artinya penambahan nano-material dan biopolimer meningkatkan nilai CBR tanah sebesar 92,63%. Peningkatan nilai CBR ini dapat mengurangi tebal perkerasan jalan sebesar 18,18%

DAFTAR PUSTAKA

- American Society for Testing and Materials. 2018. *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils; ASTM D4318-17e1*. West Conshohocken, PA.
- Badan Standardisasi Nasional. 1989. *Tata Cara Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur Jalan Raya dengan Analisa Metode Komponen; SNI 03-1732-1989*. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2011. *Cara Uji CBR (California Bearing Ratio) Lapangan; SNI 1738:2011*. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2012. *Metode Uji CBR Laboratorium; SNI 1744: 2012*. Jakarta.
- Buazar, F. 2019. *Impact of Biocompatible Nanosilica on Green Stabilization of Subgrade Soil*. Scientific Reports, 9 (1): 2–10.

- Cuisinier, O., Auriol, J.C., Le Borgne, T., dan Deneele, D. 2011. *Microstructure and Hydraulic Conductivity of A Compacted Lime-Treated Soil*. *Engineering Geology*, 123 (3): 187–193.
- Departemen Pekerjaan Umum. 1987. *Petunjuk Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur Jalan Raya dengan Metode Analisa Komponen; SKBI-2.3.26.1987 UDC: 625.73 (02)*. Lampiran Nomor 12, Keputusan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 378/KPTS/1987. Jakarta.
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. 2003. *Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen; Pd T-14-2003*. Jakarta.
- Dewi, A., Amalia, D., dan Mase, L.Z. 2023. *Experimental Study of a Cohesive Soil Modified by Polyacrylamide on Local Soils in West Java, Indonesia*. *Transportation Infrastructure Geotechnology*: 1–24.
- Ghavami, S., Naseri, H., Jahanbakhsh, H., dan Moghadas Nejad, F. 2021. *The Impacts of Nano-SiO₂ and Silica Fume on Cement Kiln Dust Treated Soil as A Sustainable Cement-Free Stabilizer*. *Construction and Building Materials*, 285: 122918.
- Govindasamy, P., Taha, M.R., Alsharaf, J., dan Ramalingam, K. 2017. *Influence of Nanolime and Curing Period on Unconfined Compressive Strength of Soil*. *Applied and Environmental Soil Science*, 2017 (9): 1–9.
- Hataf, N., Ghadir, P., dan Ranjbar, N. 2017. *Investigation of Soil Stabilization Using Chitosan Biopolymer*. *Journal of Cleaner Production*, 170: 1493–1500.
- Makusa, G.P. 2012. *Soil Stabilization Methods and Materials in Engineering Practice: State of the Art Review*. DiVA Publications. Uppsala University. Uppsala.
- Taha, M.R., Govindasamy, P., dan Alsharaf, J. 2019. *Some Geotechnical Behaviour of Silty Clay Improved with Lime and Nanolime*. *E3S Web of Conferences*, 92: 1–6.