

Stabilisasi Tanah Lunak Menggunakan Campuran *Ferronickel Slag* dan Alkali

Soma Shaki Hadi Nugraha^{1*}, Dzulfikar Sani², Lisa Fitriyana³, Juny Andry Sulisty⁴

¹⁻⁴ Universitas Islam Sultan Agung Semarang, Indonesia

email: somashakiii@gmail.com¹, dzulfikarsani666@gmail.com²

Article Info :

Received:
08-01-2026
Revised:
18-02-2026
Accepted:
21-02-2026

Abstract

The Kendal Industrial Park (KIK), Central Java, is characterized by soft clay soil with low bearing capacity, requiring improvement before being used as a construction foundation. This study aims to determine soil classification, analyze the effect of ferronickel slag and alkali (NaOH and KOH) mixtures, and evaluate the potential of these mixtures as soil stabilization materials. The research was conducted experimentally in the laboratory through specific gravity tests, grain size distribution analysis, Atterberg limits, Standard Proctor compaction test, direct shear test, and California Bearing Ratio (CBR) test. The mixture variations used consisted of 10% ferronickel slag combined with alkali solutions of NaOH and KOH at concentrations of 6%, 8%, and 10%. The results showed that the original soil was classified as fine-grained soil with high plasticity and a CBR value of 5.6%, indicating low bearing capacity. The addition of ferronickel slag and alkali reduced soil plasticity and increased soil strength and bearing capacity. Therefore, the mixture of ferronickel slag and alkali has the potential to be used as an environmentally friendly alternative soil stabilization material.

Keywords: Soil Stabilization, Ferronickel Slag, Alkali, Clay Soil, CBR.

Abstrak

Kawasan Industri Kendal (KIK), Jawa Tengah, memiliki karakteristik tanah lempung lunak dengan daya dukung rendah sehingga memerlukan perbaikan sebelum digunakan sebagai dasar konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui klasifikasi tanah, menganalisis pengaruh campuran ferronickel slag dan alkali (NaOH dan KOH), serta menentukan potensi campuran tersebut sebagai bahan stabilisasi tanah. Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan pengujian specific gravity, analisis gradasi butiran, Atterberg limits, uji pemadatan Proctor standar, direct shear, dan California Bearing Ratio (CBR). Variasi campuran yang digunakan adalah ferronickel slag sebesar 10% dengan alkali NaOH dan KOH masing-masing 6%, 8%, dan 10%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanah asli tergolong tanah berbutir halus dengan plastisitas tinggi dan nilai CBR sebesar 5,6% yang menunjukkan daya dukung rendah. Penambahan ferronickel slag dan alkali mampu menurunkan plastisitas tanah serta meningkatkan kekuatan dan daya dukung tanah. Dengan demikian, campuran ferronickel slag dan alkali berpotensi digunakan sebagai alternatif bahan stabilisasi tanah yang lebih ramah lingkungan.

Kata kunci: Stabilisasi Tanah, Ferronickel Slag, Alkali, Tanah Lempung, CBR.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Kawasan Industri Kendal yang berlokasi di Jalan Raya KM 19, Kabupaten Kendal, Jawa Tengah, berkembang sebagai pusat aktivitas manufaktur yang berdiri di atas wilayah pesisir dengan karakteristik tanah lempung lunak yang dominan. Kondisi geoteknik di wilayah pesisir Jawa Tengah sebagaimana diuraikan oleh Abidin et al. (2013) menunjukkan kecenderungan deformasi tanah akibat konsolidasi alami serta perubahan beban permukaan yang berlangsung secara progresif. Fenomena penurunan muka tanah di kawasan pesisir Semarang yang diamati oleh Chaussard et al. (2013) memperlihatkan bahwa tanah lunak memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan tekanan efektif akibat aktivitas konstruksi. Andreas et al. (2017) mengemukakan bahwa akumulasi beban struktural di atas lapisan tanah kompresibel berpotensi mempercepat proses penurunan tanah yang berdampak terhadap stabilitas bangunan. Kasfari et al. (2018) juga mencatat bahwa wilayah pesisir Jawa Tengah mengalami dinamika deformasi tanah yang signifikan sebagai konsekuensi dari sifat kompresibilitas material lempung.

Karakteristik tanah lunak pada dasarnya ditentukan oleh struktur mikro dan distribusi ukuran butiran sebagaimana dijelaskan oleh Skempton (1953) dalam kajiannya mengenai hubungan mekanika

tanah dengan aspek geologi. Polidori (2015) menyatakan bahwa klasifikasi tanah anorganik untuk kepentingan rekayasa perlu mempertimbangkan indeks plastisitas dan tingkat kejenuhan sebagai parameter utama. Casagrande dan Fadum (1944) menegaskan bahwa perencanaan fondasi bangunan sangat dipengaruhi oleh kapasitas dukung tanah yang berkaitan erat dengan kondisi konsolidasi tanah dasar. Rahardjo et al. (2019) menguraikan bahwa perilaku tanah tidak jenuh berperan dalam menentukan respon deformasi terhadap beban struktural eksternal. Wanyan et al. (2017) juga menunjukkan bahwa pendekatan rekayasa sipil modern memerlukan integrasi analisis material untuk meningkatkan kinerja tanah dasar terhadap pembebanan.

Upaya peningkatan daya dukung tanah lunak dapat dilakukan melalui proses stabilisasi mekanis maupun kimiawi yang bertujuan memperbaiki struktur internal tanah. Skempton (1953) menjelaskan bahwa perubahan sifat fisik tanah melalui proses pencampuran material tambahan mampu meningkatkan kekuatan geser internal. Polidori (2015) mengemukakan bahwa modifikasi komposisi tanah dengan bahan aditif tertentu dapat memperbaiki stabilitas volumetrik tanah lempung. Rahardjo et al. (2019) menyatakan bahwa interaksi antara partikel tanah dan agen pengikat kimia berkontribusi terhadap peningkatan kohesi antarbutiran. Casagrande dan Fadum (1944) menegaskan bahwa peningkatan kapasitas dukung tanah dapat dicapai melalui proses stabilisasi yang efektif terhadap tanah dasar. Wanyan et al. (2017) memandang bahwa inovasi material stabilisasi menjadi salah satu pendekatan strategis dalam rekayasa geoteknik modern.

Pemanfaatan Ferronickel Slag sebagai material stabilisasi alternatif memberikan potensi peningkatan kekuatan tanah melalui reaksi kimia pozzolanik yang terbentuk selama proses curing. Rahardjo et al. (2019) menjelaskan bahwa reaksi antara material silikat dengan aktivator alkali mampu menghasilkan ikatan sementasi pada struktur tanah. Skempton (1953) menunjukkan bahwa pembentukan endapan sekunder dalam pori tanah dapat meningkatkan stabilitas struktural tanah lunak. Polidori (2015) mengemukakan bahwa penggunaan material tambahan berbasis limbah industri dapat memberikan kontribusi terhadap peningkatan parameter mekanik tanah. Casagrande dan Fadum (1944) menegaskan bahwa modifikasi struktur tanah melalui stabilisasi kimia berpengaruh terhadap daya dukung fondasi bangunan. Wanyan et al. (2017) mengaitkan penggunaan material alternatif dengan efisiensi rekayasa konstruksi berkelanjutan.

Peran alkali seperti Natrium Hidroksida dan Kalium Hidroksida dalam proses stabilisasi tanah berkaitan dengan kemampuannya menginisiasi reaksi kimia antara partikel tanah dan Ferronickel Slag. Rahardjo et al. (2019) menguraikan bahwa aktivator alkali mampu mempercepat proses pengikatan partikel melalui pembentukan gel silikat. Skempton (1953) menyatakan bahwa pengurangan kadar air bebas dalam tanah berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan geser tanah. Polidori (2015) menegaskan bahwa perubahan komposisi kimia tanah berdampak terhadap karakteristik deformasi volumetrik. Casagrande dan Fadum (1944) menjelaskan bahwa stabilisasi kimia mampu meningkatkan ketahanan tanah terhadap perubahan beban struktural. Wanyan et al. (2017) menilai bahwa kombinasi material stabilisasi dapat meningkatkan performa tanah dasar dalam sistem fondasi bangunan.

Penelitian ini difokuskan pada identifikasi klasifikasi tanah di Kawasan Industri Kendal sebagai tanah lunak yang memiliki daya dukung rendah terhadap beban konstruksi. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi perubahan kapasitas dukung tanah setelah distabilisasi menggunakan campuran Ferronickel Slag dan aktivator alkali. Pengujian dilakukan guna mengamati respon tanah terhadap variasi komposisi campuran stabilisasi yang diberikan. Hasil penelitian diharapkan mampu menunjukkan komposisi campuran optimum yang memberikan peningkatan parameter mekanik tanah. Kajian ini diarahkan untuk menghasilkan metode stabilisasi yang efektif terhadap tanah lempung lunak di wilayah pesisir Kabupaten Kendal.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang bertujuan mengevaluasi pengaruh stabilisasi tanah lempung melalui pencampuran *Ferronickel Slag* (FS) dengan aktivator alkali berupa Natrium Hidroksida (NaOH) dan Kalium Hidroksida (KOH) terhadap sifat fisik serta mekanik tanah. Sampel tanah diambil dari Kawasan Industri Kendal (KIK), Kabupaten Kendal, Jawa Tengah, kemudian dilakukan pengujian di Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Universitas Sultan Agung. Data primer diperoleh melalui pengujian laboratorium, sedangkan data sekunder diperoleh dari studi literatur yang relevan dengan penelitian stabilisasi tanah. Tahapan pengujian meliputi Specific Gravity, Atterberg Limit, Sieve Analysis, Hidrometer, kadar air optimum, berat volume kering

maksimum (γ_d maksimum), Direct Shear, serta nilai California Bearing Ratio (CBR). Variasi campuran yang digunakan terdiri dari 10% Ferronickel Slag dengan kombinasi alkali sebesar 6%, 8%, dan 10% untuk masing-masing NaOH dan KOH.

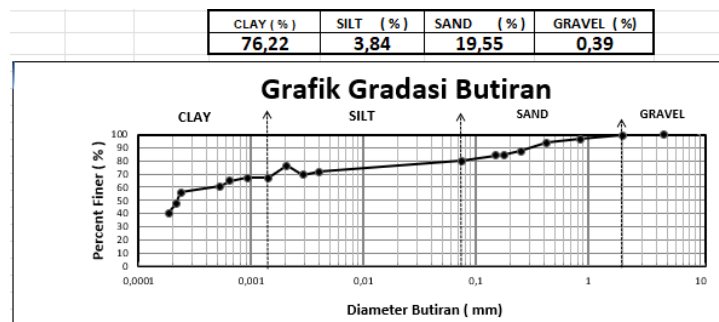
Pengujian laboratorium dilakukan berdasarkan standar SNI yang meliputi Specific Gravity (SNI 03-1964:2008), Atterberg Limit (SNI 1967:2008), Direct Shear (SNI 3420:2016), Proctor Standar (SNI 1742:2008), California Bearing Ratio (SNI 1744:2012), Sieve Analysis (SNI 7619:2012), serta Hidrometer (SNI 3423:2008). Uji Direct Shear dilakukan dengan variasi beban 8 kg, 16 kg, dan 24 kg untuk memperoleh parameter kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Uji Proctor Standar dilakukan untuk menentukan kadar air optimum dan berat volume kering maksimum tanah setelah stabilisasi. Uji CBR dilakukan untuk mengetahui peningkatan daya dukung tanah terhadap beban perkerasan setelah pencampuran material stabilisasi. Analisis data dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian tanah asli dengan tanah yang telah distabilisasi menggunakan campuran Ferronickel Slag dan alkali. Hasil perbandingan digunakan untuk mengidentifikasi peningkatan daya dukung tanah serta menentukan komposisi campuran optimum dalam proses stabilisasi tanah lempung lunak.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh kekuatan tanah yang dicampur dengan *Ferronickle Slag* dan Alkali sebagai bahan tambahan stabilisasi tanah dengan variasi 6% 8% 10%.

Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah berdasarkan hasil uji gradasi butiran di daerah Kawasan Industri Kendal memiliki kadar *clay* 76,22%, *silt* 3,84%, *sand* 19,55%, *gravel* 0,39%. Gambar 4.1 adalah grafik yang membutuhkan hasil tersebut.



Gambar 1. Grafik Gradasi Butiran

Melalui gambar 1 berat sampel yang lolos saringan No. 200 > 50% yaitu 80,07% dalam klasifikasi berbutir ha

Sifat Fisik Tanah Asli

Sifat fisik tanah asli ini adalah tanah lunak yang harus diperbaiki, maka dilakukan uji sampel untuk mengetahui nilai-nilai dan kadar pada tanah asli tersebut. Berikut tabel 1 menunjukkan hasil perhitungan data dari sampel pengujian tanah asli.

Tabel 1. Data Pengujian Properties Tanah Asli

Sifat	Nilai	Satuan
Spesific Gravity (GS)	2,342	
Batas Cair (LL)	70,62	%
Batas Plastis (PL)	25,36	%
Indeks Plastis (IP)	45,26	%
Persenan Butiran tanah lolos saringan No.200	80,07	%
Kadar Air Optimum (Wopt)	26	%

Berat Volume Kering Maksimum (yd Max)	1,25	kN/m ³
Kohesi (c)	0,195	Kg/cm ²
Sudut Geser Dalam (Φ)	18,60	(°)
Nilai CBR	5,6	%
Clay	76,22	%
Silt	3,84	%
Sand	19,55	%
Gravel	0,39	%

Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026.

Hasil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa sampel uji tanah asli yang akan digunakan dalam penelitian ini memiliki daya dukung tanah yang rendah. Hal ini terlihat dari hasil Tabel 4.1 dimana hasil uji properties tanah seperti nilai sudut geser dalam (Φ) yang rendah yaitu 18,60 ° dan nilai IP sebesar 45,26% (Plastisitasnya tinggi). Selain itu klasifikasi tanah termasuk tanah berbutir halus dimana berat sampel yang lolos saringan No. 200 > 50% yaitu 80,07% .

Uji Atterberg Limits

Kadar air dalam tanah diukur melalui pengujian batas Atterberg, yang menjadi batasan diantara kondisi plastis dan cair. Berikut Tabel 2 adalah hasil analisis perhitungan data *liquid limit*.

Tabel 2. Nilai Perhitungan Batas Cair

Sampel	Jumlah Ketukan	No. Cawan	Berat Cawan (gr)	Cawan + T. Basah (gr)	Cawan + T.Kering (gr)	W (%)	LL (%)
T.Asli 100%	15	1	4,15	33,58	21	74,66	70,62
	23	2	4,11	35,5	22,45	71,16	
	35	3	4,27	38,85	24,85	68,03	
	47	4	4,1	39,15	25,25	65,72	
FS 10% Na 6% K 6%	10	1	4,35	35,12	22,81	66,68	48,75
	19	2	4,4	36,26	24,85	55,79	
	30	3	10,17	31,82	25,69	39,5	
	57	4	4,34	30,59	23,58	36,43	
FS 10% Na 8% K 8%	4	1	4,35	33,28	21,91	64,75	44,96
	20	2	4,4	28,9	19,85	58,58	
	30	3	10,17	34,32	27,82	36,83	
	70	4	4,34	32,55	26,01	30,18	
FS 10% Na 10% K 10%	5	1	4,12	46,42	31,56	54,15	40,63
	9	2	4,33	43,16	29,87	52,04	
	34	3	4,32	27,45	21,34	35,9	
	72	4	6,38	27,45	22,35	31,93	

Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026.

Berdasarkan hasil perhitungan batas cair pada tabel 2 maka dapat diperoleh hasil liquid kimit untuk sampel tanah di Kawasan Industri Kendal seperti pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil *Liquid Limit*

No	Sampel	LL (%)
1	Tanah 100%	70,62
2	FS 10% Na 6% K 6%	48,75
3	FS 10% Na 8% K 8%	44,96
4	FS 10% Na 10% K 10%	40,63

Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026.

Tujuan dari pemeriksaan ini adalah untuk mengetahui keadaan tanah pada batas plastis dengan keadaan padat. Analisis hasil eksperimen data batas plastis pada tabel 4

Tabel 4. Nilai perhitungan Batas Plastis

Sampel	No. Cawan	Berat Cawan (gr)	Berat Cawan + Tanah Basah (gr)	Berat Cawan + Tanah kering (gr)	W (%)	PL (%)
		(a)	(b)	(c)		
T.Asli 100%	5	4,4	7,02	06.49	25,36	25,36
FS 10% Na6% K 6%	5	4,48	13,52	11,56	27,68	27,68
FS 10% Na 8% K 8%	5	4,48	12,82	10,93	29,3	29,3
FS 10% Na 10% K10%	5	4,6	8,05	7,22	31,68	31,68

Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026.

Setelah diketahui batas cair dan batas plastisnya, maka dapat dihitung nilai indeks platis nya (IP) seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Indeks Plastisitas

Sampel	LL %	PL %	IP%
Tanah Asli	70,62	25,36	45,26
FS 10% Na 6% K 6%	48,75	27,68	21,06
FS 10% Na 8% K 8%	44,96	29,3	15,66
FS 10% Na 10% K10%	40,63	31,68	8,95

Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026.

Berdasarkan Tabel 5, pada kadar 6%, IP turun menjadi 21,06%, kemudian menurun lagi menjadi 15,66% pada kadar 8%, dan mencapai 8,95% pada kadar 10%.

Direct Shear

Untuk menentukan kohesi tanah dan sudut geser sampel, uji geser langsung dilakukan Hasil dari pengujian, untuk lebih jelasnya dapat dilihat parameter sebagai berikut adalah hasil perhitungan Direct Shear pada tabel 6 dengan hasil yang telah terlampir.

Tabel 6. Hasil perhitungan *direct shear* Tanah asli dan campuran FS dan Alkali

Sampel	Percobaan	Beban (kg)	Koreksi Beban (kg)	Pembacaan Dial	Tegangan Normal (σ_n)	Tegangan Geser (σ_s)
Tanah Asli	1	1	1,003	12	0,0417	0,208
100%	2	2	2,006	13	0,0844	0,2253
	3	4	4,123	14,5	0,169	0,2513
FS 10%	1	1	1,003	16	0,027	0,2773
Na 6%	2	2	2,006	17,5	0,054	0,3033
K 6%	3	4	4,123	18	0,108	0,312
FS 10%	1	1	1,003	17,5	0,276	0,3033
Na 8%	2	2	2,006	18	0,055	0,312
K 8%	3	4	4,123	19,5	0,11	0,11
FS 10%	1	1	1,003	19	0,0417	0,3293
Na 10%	2	2	2,006	20,5	0,084	0,3553
K 10%	3	4	4,123	22,5	0,169	0,39

Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026.

Setelah pengujian *Direct Shear*, kita dapat mengetahui nilai tegangan normal dan tegangan geser. Seperti yang ditunjukkan pada tabel 7 bahwa nilai tegangan normal dan tegangan geser semakin naik, terbukti jika Natrium dan Kalium dapat meningkatkan tegangan normal dan tegangan geser.

Tabel 7. Hasil *Direct Shear* dan kohesi

No	Sampel	Kohesi (Kg/cm ²)	Sudut Geser Dalam (°)
1	Tanah Asli 100%	0,195	18,6
2	FS 10% Na 6% K 6%	0,273	21,33
3	FS 10% Na 8% K 8%	0,29	23,09
4	FS 10% Na 10% K 10%	0,312	25,09

Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026.

Berdasarkan Tabel 7, hasil uji *direct shear* menunjukkan bahwa penambahan FS, Na dan K berpengaruh positif terhadap parameter kuat geser tanah. Pada tanah Asli 100%, nilai kohesi sebesar 0,195 kg/cm² dan sudut geser dalam 18,6°, yang menunjukkan kuat geser tanah masih relatif rendah. Tanah dengan penambahan FS, Na dan K sebesar 6%, nilai kohesi meningkat menjadi 0,273 kg/cm² dan sudut geser dalam naik menjadi 21,33°. Peningkatan ini berlanjut pada kadar 8% dan 10%, di mana kohesi bertambah menjadi 0,29 kg/cm² dan 0,312 kg/cm², serta sudut geser dalam meningkat hingga 23,09° dan 25,09°.

Tabel 8. Data hasil uji laboratorium

Sampel	Nomor Percbaan	Volume Air (cc)	Berat Alat Tanah (gr)	+ No. Cawan	Berat Cawan (gr)	Berat Cawan + T.Basah (gr)	Berat cawan + T.Kering (gr)
					(a)	(b)	(c)
Tanah Asli 100%	I	0	9011	1	4,06	33,12	28,35
	II	100	9290	2	4,26	35,45	29,25
	III	300	9455	3	4,35	40,45	32,45
	IV	400	9235	4	4,25	42,45	33,25
	V	500	9085	5	4,08	45,45	33,75
FS 10% Na 6% K 6%	I	0	10648	6	4,65	40,56	35,08
	II	100	10755	7	4,21	45,43	38,78
	III	300	10852	8	4,07	39,7	33,59
	IV	400	10641	9	4,26	54,67	45,44
	V	500	10538	10	4,51	52,1	42,43
FS 10% Na 8% K 8%	I	0	10755	11	3,96	36,26	31,68
	II	100	10947	12	6,51	49,83	43,32
	III	300	10967	13	5,59	41,23	35,27
	IV	400	10745	14	10,99	67,04	56,05
	V	500	10657	15	8,55	50,29	41,74
FS 10% Na 10% K 10%	I	0	10597	16	3,49	33,12	29,63
	II	100	10843	17	4,01	33,94	29,95
	III	300	11027	18	4,25	34,10	29,92
	IV	400	11106	19	4,15	44,11	37,96
	V	500	10775	20	4,08	45,45	38,64

Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026.

Proctor Standart

Percobaan *Proctor Standart* ini menggunakan tingkat air yang berbeda untuk setiap sampel untuk menentukan kadar air tanah ideal (w_{opt}), berat volume basah ideal (γ_b), berat volume kering (γ_d), dan persentase pori/pori pada tanah sampel.

Tabel 9. Nilai Perhitungan *Proctor Standart* Tanah Asli, campuran Alkali dan *Ferronickle Slag*

Sampel	No. Percbaan	w (%)	GS gr/ cm ³	γ_b (gr/cm ³)	γ_d (gr/cm ³)	ZAV
Tanah Asli 100%	I	19,64	2,342	1,43	1,2	1,6
	II	24,81	2,342	1,56	1,25	1,48
	III	28,47	2,342	1,28	1,28	1,41
	IV	31,72	2,342	1,17	1,17	1,34
	V	39,43	2,342	1,05	1,05	1,22

Sampel	No. Percobaan	w (%)	GS gr/ cm ³	γ (gr/cm ³)	b γ_d (gr/cm ³)	ZAV
FS 10% Na 6% K 6%	I	18,01	2,497	1,87	1,59	1,72
	II	19,24	2,497	1,93	1,69	1,69
	III	20,7	2,497	1,97	1,65	1,65
	IV	22,41	2,497	1,87	1,6	1,6
	V	25,5	2,497	1,82	1,53	1,53
FS 10% Na 8% K 8%	I	16,52	2,531	1,91	1,64	1,78
	II	17,25	2,531	2	1,7	1,76
	III	19,19	2,531	2,01	1,65	1,7
	IV	21,14	2,531	1,9	1,57	1,65
	V	22,7	2,531	1,86	1,52	1,61
FS 10% Na 10% K 10%	I	13,65	2,564	1,78	1,56	1,9
	II	15,38	2,564	1,89	1,64	1,84
	III	16,28	2,564	1,98	1,7	1,75
	IV	18,19	2,564	2,02	1,7	1,7
	V	19,7	2,564	1,86	1,55	1,7

Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026.

Tabel 10. Hasil proctor *standart* dari tanah asli dan campuran FS dan Alkali

No	Sampel	wopt (%)	γ_d (gr/cm ³)
1	Tanah Asli 100%	26,00	1,25
2	FS 10% Na 6% K 6%	19,24	1,60
3	FS 10% Na 8% K 8%	18,00	1,68
4	FS 10% Na 10% K 10%	16,80	1,70

Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026.

California Bearing Ratio (CBR)

CBR (*California Bearing Ratio*) dipakai guna menghitung nilai daya dukung tanah dengan kepadatan maksimum.

Tabel 11 Hasil Pengujian Tanah asli dan Campuran Kalium dan natrium

Sampel	No	BeratAlat + Tanah (gr)	Berat Cawan (a)	Berat Cawan + T.Basah (b)	Berat Cawan + T.Kering (c)
Tanah Asli 100%	1	10221	4,03	15,32	12,98
FS 10% Na 6% K 6%	2	10841	4	40,25	34,42
FS 10% Na 8% K 8%	3	10978	4,18	41,83	35,78
FS 10% Na 10% K 10%	4	10938	4,03	14,69	13,12

Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026.

Analisis hasil perhitungan pengujian CBR, Tabel 12 menunjukkan hasil data CBR Unsoaked yang telah diuji dengan perhitungan di atas.

Tabel 12. Nilai CBR *Unsoaked* tanah asli dan campuran FS dan Alkali

Sampel	No	Berat Alat+ Tanah (gr)	Berat Alat (gr)	Kadar Air (%)	Berat Sempel Basah (gr)	y basah (gr/cm ³)	y kering (gr/cm ³)
Tanah Asli 100%	1	10221	6695	26,15	3476	1,6522	1,3098
FS 10% Na 6% K 6%	2	10841	6695	19,17	4137	1,9664	1,6505
FS 10% Na 8% K 8%	3	10978	6695	19,15	4283	20.358	1,7087
FS 10% Na 10% K 10%	4	10938	6695	17,27	4253	20.215	1,7238

Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026.

Tabel 13. Hasil Penetrasi Sampel Tanah campuran FS dan Alkali *Unsoaked*

t (menit)	Penurunan		Jumlah tumbukan 56x			
	(inch)	(mm)	Tanah asli 100%		FS 10% Na 6%-K 6%	
			Arloji bawah	Koreksi	Arloji Bawah	Koreksi
1/4	0,0125	0,32	4	37,56	5	46,96
1/2	0,025	0,64	9	84,52	10	93,91
1	0,05	1,27	12	112,69	20	187,82
1,5	0,075	1,91	18	169,04	35	328,69
2	0,1	2,54	22	206,6	47	441,38
3	0,15	3,81	26	244,17	61	572,85
4	0,2	5,08	30	281,73	69	647,98
6	0,3	7,62	35	328,69	82	770,06
8	0,4	10,16	42	394,42	91	854,58
t (menit)	Penurunan		Jumlah tumbukan 56x			
	(inch)	(mm)	FS 10% Na 8 %-K 8%		FS 10% Na 10%-K 10%	
			Arloji Bawah	Koreksi	Arloji Bawah	Koreksi
1/4	0,0125	0,32	8	75,13	9	84,52
1/2	0,025	0,64	18	169,04	19	178,43
1	0,05	1,27	28	262,95	30	281,73
1,5	0,075	1,91	40	375,64	42	394,42
2	0,1	2,54	53	497,72	58	544,68
3	0,15	3,81	63	591,63	68	638,59
4	0,2	5,08	75	704,33	83	779,45
6	0,3	7,62	87	817,02	92	863,97
8	0,4	10,16	95	892,15	104	976,66

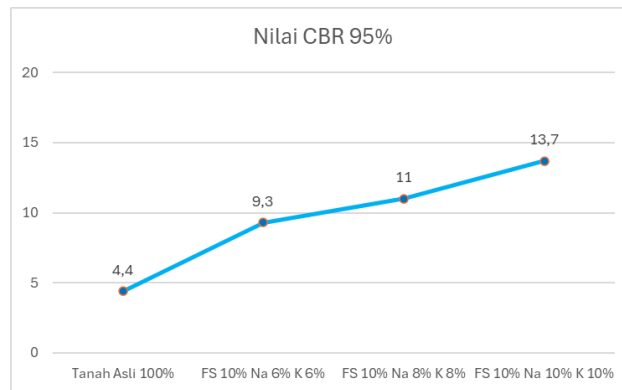
Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026.

Menurut data yang dikumpulkan dari penetrasi tanah asli dan kombinasi *Ferronicklr Slag*, Natrium dan Kalium 6%, 8%, dan 10%.

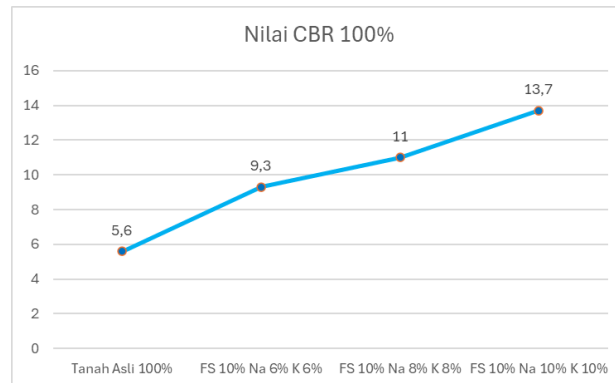
Tabel 14. Harga CBR (*unshoaked*) tanah asli dan campuran Na, K dan FS

Kode	Variasi	Beban koreksi 0,1"	bawah 0,2"	Harga CBR	
				0,1"	0,2"
S1	Tanah asli 100%	206,6	281,73	6,89	6,26
S2	Tanah 78% + FS 10% + Na 6% + K 6%	441,4	647,98	14,71	14,40
S3	Tanah 74% + FS 10% + Na 8% + K 8%	497,7	704,33	16,59	15,65
S4	Tanah 70% + FS 10% + Na 10% + K 10%	544,7	779,45	18,16	17,32

Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026.



Gambar 2. Grafik Nilai CBR 95%



Gambar 3. Grafik Nilai CBR 100%

Berdasarkan Gambar 2 dan Gambar 3, dapat diketahui bahwa penambahan alkali berpengaruh signifikan terhadap peningkatan nilai CBR tanah. Nilai CBR tanah asli yang relatif rendah meningkat secara bertahap seiring bertambahnya kadar alkali dari 6%, 8%, hingga 10%, dengan nilai CBR tertinggi diperoleh pada kadar alkali 10%. Hasil ini membuktikan bahwa stabilisasi tanah menggunakan alkali efektif dalam meningkatkan kekuatan dan daya dukung tanah.

Campuran Ferronickel Slag dan Aktivator Alkali Terbukti Meningkatkan Parameter Kuat Geser Tanah Lempung Lunak

Tanah lempung lunak yang berasal dari Kawasan Industri Kendal menunjukkan karakteristik plastisitas tinggi yang tercermin dari nilai batas cair dan batas plastis berdasarkan hasil pengujian

Atterberg Limit sesuai SNI 1967:2008. Nilai plastisitas tersebut berimplikasi langsung terhadap rendahnya parameter kuat geser tanah asli sebelum dilakukan stabilisasi sebagaimana dijelaskan oleh Skempton (1953) dalam relasi antara sifat indeks tanah dan perilaku mekaniknya. Parameter kohesi awal yang rendah serta sudut geser dalam yang kecil teridentifikasi melalui uji Direct Shear menggunakan variasi beban 8 kg, 16 kg, dan 24 kg. Kondisi tersebut memperlihatkan kecenderungan deformasi yang tinggi pada tanah lunak akibat lemahnya struktur internal partikel lempung sebagaimana juga disampaikan oleh Casagrande dan Fadum (1944).

Campuran Ferronickel Slag sebesar 10% dengan aktivator NaOH dan KOH dalam variasi 6%, 8%, dan 10% menunjukkan perubahan signifikan terhadap nilai kohesi tanah hasil stabilisasi. Peningkatan nilai kohesi terukur dari hasil pengujian Direct Shear SNI 3420:2016 pada seluruh variasi campuran yang diuji di laboratorium. Fenomena ini sejalan dengan temuan Lim dan Darian (2022) yang menyatakan bahwa material slag feronikel mampu meningkatkan kekuatan interpartikel tanah melalui mekanisme ikatan geopolymerisasi. Proses reaksi kimia antara kandungan silika pada slag dan aktivator alkali menghasilkan struktur matriks baru yang memperkuat massa tanah sebagaimana diuraikan oleh Kuncoro dan Djayaprabha (2021).

Sudut geser dalam tanah hasil stabilisasi juga mengalami peningkatan yang ditunjukkan dari grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser hasil uji Direct Shear. Nilai ϕ yang meningkat mengindikasikan adanya perbaikan struktur granular akibat distribusi partikel slag yang mengisi rongga antar partikel tanah lempung. Rambak et al. (2025) menjelaskan bahwa slag nikel memiliki kemampuan sebagai filler sekaligus binder dalam sistem tanah teraktivasi alkali. Struktur tanah yang sebelumnya bersifat kohesif plastis berubah menjadi lebih padat dan stabil setelah proses pencampuran.

Reaksi antara NaOH dan KOH sebagai aktivator alkali mempercepat proses pembentukan gel aluminosilikat dalam campuran tanah dan slag. Chandra (2019) menjelaskan bahwa aktivator kalium dan natrium memiliki peran penting dalam meningkatkan kekuatan material berbasis geopolymer. Peningkatan ikatan kimia tersebut berdampak langsung terhadap peningkatan nilai kohesi efektif tanah. Kondisi ini memperlihatkan hubungan linier antara peningkatan konsentrasi alkali dan peningkatan parameter kuat geser.

Tanah asli yang memiliki tingkat kejenuhan tinggi menunjukkan perubahan perilaku mekanik setelah dilakukan stabilisasi dengan material berbasis alkali. Rahardjo et al. (2019) menegaskan bahwa mekanika tanah tak jenuh memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan komposisi kimia dalam matriks tanah. Penambahan Ferronickel Slag berkontribusi terhadap pengurangan kadar air efektif yang mempengaruhi daya rekat antar partikel. Hasil pengujian menunjukkan bahwa stabilisasi mampu mengurangi potensi deformasi plastis pada tanah lunak.

Perubahan nilai kuat geser tanah memiliki implikasi terhadap kemampuan tanah dalam menahan beban struktural di atasnya. Fitriyana et al. (2024) menyatakan bahwa peningkatan parameter kuat geser berkontribusi terhadap pengurangan potensi heave maupun settlement pada tanah lunak. Nilai kohesi dan sudut geser dalam yang meningkat menghasilkan kapasitas dukung tanah yang lebih baik dibandingkan kondisi tanah asli. Kondisi ini sangat relevan terhadap stabilitas konstruksi pada kawasan industri dengan tingkat kompresibilitas tinggi seperti di Kendal sebagaimana dicatat oleh Fadhlurrohmah et al. (2020).

Fenomena peningkatan kuat geser juga berkaitan dengan permasalahan penurunan muka tanah di wilayah pesisir Semarang dan sekitarnya. Abidin et al. (2013) menunjukkan bahwa karakteristik tanah lunak memiliki kontribusi besar terhadap fenomena land subsidence di kawasan pesisir. Chaussard et al. (2013) bahkan mencatat percepatan penurunan tanah akibat lemahnya struktur tanah pada wilayah industri. Stabilitas tanah hasil pencampuran Ferronickel Slag dan aktivator alkali menunjukkan potensi mitigasi terhadap permasalahan geoteknik tersebut sebagaimana juga didukung oleh Andreas et al. (2017).

Campuran Ferronickel Slag dan Aktivator Alkali Terbukti Meningkatkan Karakteristik Pemadatan Tanah Lempung Lunak

Tanah lempung lunak dari Kawasan Industri Kendal menunjukkan nilai kadar air optimum yang relatif tinggi sebelum dilakukan stabilisasi berdasarkan hasil uji Proctor Standar SNI 1742:2008. Nilai berat volume kering maksimum tanah asli berada pada kondisi rendah akibat dominasi fraksi halus hasil pengujian Sieve Analysis SNI 7619:2012 dan Hidrometer SNI 3423:2008. Karakteristik tersebut mencerminkan struktur tanah yang mudah mengalami perubahan volume akibat pembebanan

sebagaimana dijelaskan oleh Polidori (2015) dalam klasifikasi tanah anorganik untuk keperluan teknik. Perilaku ini berkorelasi dengan kondisi tanah kompresibel yang umum ditemukan pada kawasan pesisir industri di Semarang dan sekitarnya sebagaimana dicatat oleh Abidin et al. (2010).

Campuran Ferronickel Slag sebesar 10% dengan aktivator NaOH dan KOH sebesar 6%, 8%, dan 10% menunjukkan peningkatan signifikan terhadap berat volume kering maksimum tanah hasil stabilisasi. Nilai γ_d maksimum meningkat pada seluruh variasi campuran dibandingkan kondisi tanah asli berdasarkan hasil uji laboratorium. Lim et al. (2023) menjelaskan bahwa partikel slag memiliki sifat granular yang mampu meningkatkan kepadatan tanah melalui mekanisme pengisian rongga. Distribusi ukuran butir yang lebih baik menghasilkan struktur tanah yang lebih rapat setelah proses pemadatan.

Kadar air optimum tanah hasil stabilisasi mengalami penurunan dibandingkan tanah asli yang tidak dicampur material tambahan. Fenomena ini menunjukkan bahwa campuran Ferronickel Slag mampu mengurangi kebutuhan air dalam proses pemadatan tanah. Solikin (2021) menyatakan bahwa material berbasis slag dalam sistem geopolymer memiliki kemampuan menyerap dan mengikat air bebas dalam matriks campuran. Kondisi tersebut berdampak terhadap peningkatan efisiensi proses pemadatan di lapangan.

Aktivator NaOH dan KOH berperan dalam membentuk reaksi kimia yang meningkatkan ikatan antar partikel tanah dan slag selama proses pemadatan berlangsung. Djayaprabha dan Joti (2025) menjelaskan bahwa aktivasi alkali pada material berbasis slag mampu meningkatkan kekuatan struktur mikro melalui pembentukan gel silikat. Struktur tanah yang lebih padat terbentuk akibat proses ikatan kimia tersebut. Nilai berat volume kering maksimum yang meningkat mencerminkan peningkatan stabilitas internal tanah.

Tanah yang memiliki berat volume kering maksimum lebih tinggi menunjukkan daya dukung yang lebih baik terhadap beban konstruksi di atasnya. Chen dan Sentosa (2020) mengemukakan bahwa kepadatan tanah memiliki hubungan langsung dengan permeabilitas dan stabilitas tanah terhadap pembebanan eksternal. Penurunan porositas akibat proses stabilisasi berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan mekanik tanah. Kondisi ini menjadi faktor penting dalam pembangunan infrastruktur pada tanah lunak di kawasan industri.

Kondisi pemadatan tanah hasil stabilisasi juga berkaitan dengan potensi penurunan muka tanah akibat eksploitasi lahan industri. Kasfari et al. (2018) mencatat bahwa perubahan struktur tanah akibat aktivitas konstruksi dapat mempercepat proses land subsidence. Struktur tanah yang lebih padat memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi jangka panjang. Stabilitas tersebut menjadi indikator penting dalam mitigasi penurunan muka tanah sebagaimana juga dijelaskan oleh Andreas et al. (2017).

Perbaikan karakteristik pemadatan tanah menunjukkan bahwa penggunaan Ferronickel Slag dengan aktivator alkali memberikan dampak positif terhadap performa geoteknik tanah lunak. Wanyan et al. (2017) menekankan pentingnya integrasi inovasi material dalam rekayasa sipil untuk meningkatkan kualitas tanah dasar konstruksi. Peningkatan nilai γ_d maksimum pada seluruh variasi campuran mengindikasikan efektivitas metode stabilisasi yang digunakan. Kondisi ini memperlihatkan bahwa stabilisasi tanah berbasis slag dapat menjadi solusi alternatif dalam pembangunan berkelanjutan sebagaimana dikemukakan oleh Rambak et al. (2025).

Campuran Ferronickel Slag dan Aktivator Alkali Terbukti Meningkatkan Nilai Daya Dukung Tanah Berdasarkan Uji CBR

Tanah lempung lunak dari Kawasan Industri Kendal menunjukkan nilai California Bearing Ratio yang rendah pada kondisi asli berdasarkan hasil pengujian SNI 1744:2012. Nilai CBR yang kecil mencerminkan keterbatasan tanah dalam menahan beban lalu lintas maupun struktur perkerasan di atasnya. Karakteristik tersebut sejalan dengan kondisi tanah kompresibel pada wilayah pesisir yang rentan terhadap deformasi sebagaimana dijelaskan oleh Chaussard et al. (2013). Fenomena ini berkaitan erat dengan tingginya tingkat penurunan muka tanah di kawasan industri sebagaimana dilaporkan oleh Abidin et al. (2013).

Campuran Ferronickel Slag sebesar 10% dengan aktivator NaOH dan KOH dalam variasi 6%, 8%, dan 10% menunjukkan peningkatan nilai CBR yang signifikan dibandingkan tanah asli. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa seluruh variasi campuran mengalami peningkatan kapasitas dukung setelah proses stabilisasi dilakukan. Lim dan Darian (2022) menyatakan bahwa slag feronikel mampu

meningkatkan kekuatan tanah melalui reaksi geopolymerisasi yang memperbaiki struktur internal tanah. Kondisi ini berdampak langsung terhadap peningkatan ketahanan tanah terhadap penetrasi beban.

Peningkatan nilai CBR berkorelasi dengan perubahan struktur mikro tanah akibat reaksi antara slag dan aktivator alkali. Kuncoro dan Djayaprabha (2021) menjelaskan bahwa aktivasi natrium hidroksida mampu mempercepat pembentukan matriks aluminosilikat dalam campuran material berbasis slag. Struktur tanah yang lebih kaku terbentuk setelah proses curing berlangsung. Nilai penetrasi beban yang lebih kecil pada uji CBR menunjukkan peningkatan daya tahan tanah terhadap deformasi plastis.

Tanah hasil stabilisasi menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap pembebanan berulang yang umum terjadi pada konstruksi jalan dan kawasan industri. Casagrande dan Fadum (1944) menekankan bahwa kapasitas dukung tanah sangat dipengaruhi oleh kekuatan struktur internal partikel penyusunnya. Ikatan kimia baru yang terbentuk akibat aktivasi alkali meningkatkan resistensi tanah terhadap tekanan eksternal. Nilai CBR yang meningkat mencerminkan peningkatan stabilitas lapisan tanah dasar.

Perubahan nilai CBR juga dipengaruhi oleh peningkatan kepadatan tanah hasil stabilisasi berdasarkan hasil uji Proctor. Chen dan Sentosa (2020) menjelaskan bahwa tanah dengan kepadatan tinggi memiliki daya dukung yang lebih baik terhadap beban struktural. Penurunan porositas akibat pencampuran slag berkontribusi terhadap peningkatan kapasitas dukung tanah. Kondisi ini sangat penting dalam mendukung stabilitas konstruksi pada tanah lunak di kawasan industri.

Potensi penurunan muka tanah di wilayah Kendal dapat diminimalisasi melalui peningkatan kapasitas dukung tanah dasar. Fadhlurrohman et al. (2020) mencatat bahwa aktivitas pembangunan industri berkontribusi terhadap deformasi tanah dalam jangka panjang. Struktur tanah yang telah distabilisasi memiliki ketahanan lebih tinggi terhadap tekanan beban statis maupun dinamis. Stabilitas tersebut menjadi indikator penting dalam mitigasi risiko settlement sebagaimana dijelaskan oleh Andreas et al. (2017).

Nilai CBR yang meningkat menunjukkan bahwa stabilisasi menggunakan Ferronickel Slag dan aktivator alkali memberikan pengaruh positif terhadap performa geoteknik tanah lunak. Rambak et al. (2025) menegaskan bahwa slag nikel memiliki potensi sebagai material konstruksi ramah lingkungan dalam rekayasa tanah berkelanjutan. Solikin (2021) juga menjelaskan bahwa sistem material berbasis alkali mampu meningkatkan kekuatan mekanik melalui reaksi kimia yang stabil. Kondisi ini memperlihatkan bahwa stabilisasi tanah berbasis slag dapat menjadi alternatif efektif dalam meningkatkan daya dukung tanah lunak pada kawasan industri.

KESIMPULAN

Keseluruhan tahapan pengujian stabilisasi tanah menunjukkan bahwa sampel tanah yang diambil dari Kawasan Industri Kendal, Kecamatan Brangsong, Kabupaten Kendal, Jawa Tengah tergolong dalam klasifikasi tanah berbutir halus berdasarkan sistem USCS, sehingga memiliki karakteristik daya dukung rendah pada kondisi awal. Hasil pengujian laboratorium memperlihatkan bahwa penambahan Ferronickel Slag dan aktivator alkali berupa Natrium Hidroksida serta Kalium Hidroksida mampu meningkatkan daya dukung tanah yang ditunjukkan melalui perubahan parameter sifat fisik dan mekanik pada pengujian properties tanah, Direct Shear, Atterberg Limit, Proctor, serta California Bearing Ratio (CBR). Peningkatan tersebut mengindikasikan terjadinya perbaikan struktur tanah akibat proses stabilisasi yang berlangsung selama masa curing. Variasi campuran material stabilisasi memberikan pengaruh yang berbeda terhadap nilai kekuatan tanah setelah perlakuan. Komposisi campuran Ferronickel Slag 10% dengan NaOH 10% dan KOH 10% menghasilkan peningkatan paling optimal terhadap daya dukung tanah dan termasuk dalam kategori baik berdasarkan hasil pengujian laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Sidiq, T. P., & Fukuda, Y. (2013). Land subsidence in coastal city of Semarang (Indonesia): characteristics, impacts and causes. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 4(3), 226-240. <https://doi.org/10.1080/19475705.2012.692336>.
- Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Sidiq, T. P., Gamal, M., Murdohardono, D., & Supriyadi, Y. F. (2010). Studying land subsidence in Semarang (Indonesia) using geodetic methods. In *FIG Congress* (pp. 11-16).

- Andreas, H., Abidin, H. Z., Gumilar, I., Sidiq, T. P., & Yuwono, B. (2017, July). Adaptation and mitigation of land subsidence in Semarang. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1857, No. 1, p. 060005). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.4987088>.
- Casagrande, A., & Fadum, R. E. (1944). Application of soil mechanics in designing building foundations. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 109(1), 383-416. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0005694>.
- Chandra, D. (2019). Analisa Pengaruh Aktivator Kalium Dan Kondisi Material Pada Beton Geopolymer Dari Limbah B3 Fly Ash Batubara Terhadap Kuat Tekan. *Jurnal Rekayasa*, 9(2), 73-90. <https://doi.org/10.37037/jrftsp.v9i2.41>.
- Chaussard, E., Amelung, F., Abidin, H., & Hong, S. H. (2013). Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction. *Remote sensing of environment*, 128, 150-161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.015>.
- Chen, P., & Sentosa, G. S. (2020). Analisis perbandingan nilai koefisien permeabilitas tanah uji lapangan dan uji laboratorium. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 97-108. <https://doi.org/10.24912/jmts.v3i1.7071>.
- Djayaprabha, H. S., & Joti, S. (2025). Kajian Pemanfaatan Slag Feronikel dan Silica Fume Sebagai Pengganti Sebagian Semen Terhadap Kekuatan Tekan dan Tarik Belah Mortar Struktural. *Journal of Sustainable Construction*, 4(2), 42-47. <https://doi.org/10.26593/josc.v4i2.9223>.
- Fadhlurrohmah, B., Prasetyo, Y., & Bashit, N. (2020). Studi Penurunan Muka Tanah di Kawasan Industri Kendal Dengan Metode Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS InSAR) Menggunakan Citra Sentinel 1-A Tahun 2014-2019. *Jurnal Geodesi Undip*, 9(2), 155-166. <https://doi.org/10.14710/pilars.v25i2.25Y.25p>.
- Fitriyana, L., Ni'am, M. F., Jabra, M. M. M., & Mulya, E. R. (2024, April). Heave in the Soil due to Driving Pile Foundations. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1321, No. 1, p. 012036). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1321/1/012036>.
- Kasfari, R., Yuwono, B. D., & Awaluddin, M. (2018). Pengamatan Penurunan Muka Tanah Kota Semarang Tahun 2017. *Jurnal Geodesi Undip*, 7(1), 120-130. <https://doi.org/10.14710/jgundip.2017.19315>.
- Kuncoro, A., & Djayaprabha, H. S. (2021). The Effect of Sodium Hydroxide Molarity on The Compressive and Splitting Tensile Strength of Ferronickel Slag-Based Alkali-Activated Mortar. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 27(2), 151-160. <https://doi.org/10.14710/mkts.v27i2.32706>.
- Lim, A., & Darian, E. (2022). Perbaikan Tanah Lunak Menggunakan Campuran Ferronickel Slag Dan Kalium Serta Natrium Hidroksida. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 18(3), 202-213. <https://doi.org/10.25077/jrs.18.3.202-213.2022>.
- Lim, A., Renaldy, A., & Kristian, D. (2023). Soil Improvement of Petobo Silty Sand using Ferronickel Slag and Alkaline Activators. *Applied Research on Civil Engineering and Environment (ARCEE)*, 4(02), 73-83. <https://doi.org/10.32722/arcee.v4i02.5714>.
- Polidori, E. (2015). Proposal for a new classification of common inorganic soils for engineering purposes. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(6), 1569-1579. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9922-4>.
- Rahardjo, H., Kim, Y., & Satyanaga, A. (2019). Role of unsaturated soil mechanics in geotechnical engineering. *International Journal of Geo-Engineering*, 10(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s40703-019-0104-8>.
- Rambak, E. P., Wardani, A., Darwis, M., Rahman, L., Simanjutak, R. A. H., Badia, B. A., & Idris, M. (2025). Studi Literatur: Potensi Pemanfaatan Slag Nikel sebagai Material Alternatif Ramah Lingkungan dalam Konstruksi Berkelanjutan. *Media Konstruksi*, 10(1), 140-148. <https://doi.org/10.33772/jmk.v10i1.155>.
- Skempton, A. W. (1953). Soil mechanics in relation to geology. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, 29(1), 33-62. <https://doi.org/10.1144/pygs.29.1.33>.
- Solikin, M. (2021). Analisis Pemakaian Kombinasi Fly Ash Tipe F Dan Slag 1: 1 Pada Beton Geopolymer Dengan Na₂SiO₃ Dan NaOH Sebagai Alkali Aktivator: Sebuah Kajian Literatur. *Dinamika Teknik Sipil: Majalah Ilmiah Teknik Sipil*, 14(1), 13-20. <https://doi.org/10.23917/dts.v14i1.15274>.

Wanyan, Y., Chen, X., & Olowokere, D. (2017). Integration of artificial intelligence methodologies and algorithms into the civil engineering curriculum using knowledge-based expert systems: A case study. *Engineering Education Letters*, 2017(1), 3. <https://doi.org/10.5339/eel.2017.3>.