



MENINGKATKAN STABILITAS LAHAN INDUSTRI PESISIR DENGAN METODE URUGAN BATU KAPUR

(Studi Kasus Geoteknik di JIPE, Gresik, Jawa Timur)

ENHANCING COASTAL INDUSTRIAL LAND STABILITY USING LIME STONE FILL METHOD

(A Geotechnical Case Study of JIPE, Gresik, East Java)

Heru Setiyo Cahyono¹, Eka Yudha Kurniawan², Mochammad Hendy Wicaksono³

¹Civil Engineering Study Program, Al-Rifa'ie Modern University of Indonesia (UMAIN), Jl. Ketawang No. 99, Gondanglegi, Malang, 65174, Indonesia.

^{2,3}Master of Civil Engineering Study Program, State University of Malang (UM), Jl. Cakrawala No.5, Lowokwaru, Malang, 65145, Indonesia.

Email: heruse180@mail.com

Received: 09 Mei 2025 Revised: 26 Juni 2025 Accepted: 01 Juli 2025 Published: 03 Juli 2025

ABSTRAK

Penelitian ini mengevaluasi batu kapur lokal sebagai solusi berkelanjutan untuk stabilisasi lahan reklamasi pesisir di JIPE, Gresik, yang menghadapi tantangan tanah lunak, plastisitas tinggi, dan penurunan permukaan. Melalui uji laboratorium (ASTM/SNI), eksperimen lapangan, dan pemodelan pada area 5 hektar, penelitian mengkaji kelayakan teknis, lingkungan, dan ekonomi material tersebut. Karakterisasi laboratorium menunjukkan sifat optimal Lime Stone: struktur bergradasi baik (65% kerikil, 30% pasir), kandungan karbonat 85%, dan kepadatan kering maksimum 19,8 kN/m³ pada kadar air optimum 12,5%. Implementasi lapangan mencapai pepadatan 95%, mengurangi penurunan segera 57% (12,3 mm vs. 28,7 mm pada tanah asli) dan membatasi penurunan konsolidasi hingga 45 mm dalam 10 tahun (sesuai SNI 8460:2017). Daya dukung ultimat meningkat menjadi 1.850 kPa (Faktor Keamanan = 9,25), melebihi kebutuhan industri, dengan konduktivitas hidraulik $1,2 \times 10^{-4}$ cm/s untuk mitigasi likuifaksi. Secara ekonomi, batu kapur menurunkan biaya material 30% (Rp. 85.000/m³) dan emisi transportasi 45%. Pemantauan lingkungan mencatat tidak ada dampak buruk pada air tanah (pH 6,8–7,2). Dengan skalabilitas sebesar 2.000.000 m³ dan ketahanan beban dinamis, Lime Stone menjadi alternatif berkelanjutan pengganti pasir dan kerikil. Temuan ini menawarkan model replikabel untuk pengembangan industri pesisir di negara berkembang yang selaras dengan SDG 9 dan 13.

Kata kunci: Daya Dukung, Kawasan Industri JIPE, Reklamasi Berkelanjutan, Stabilisasi Lahan Pesisir, Urugan Batu Kapur.

ABSTRACT

This study addresses challenges in coastal land reclamation (weak soils, high plasticity, subsidence) at Indonesia's JIPE, Gresik, by evaluating locally sourced limestone fill for stabilizing 5 hectares. A mixed-method approach (ASTM/SNI laboratory tests, field trials, modeling) assessed technical, environmental, and economic viability. Laboratory characterization showed limestone possesses optimal properties: well-graded granular structure (65% gravel, 30% sand), high carbonate content (85%), and maximum dry density (19.8 kN/m³) at 12.5% optimum moisture. Field implementation achieved 95% compaction, reducing immediate settlement by 57% (12.3 mm vs. 28.7 mm untreated) and limiting consolidation settlement to 45 mm over 10 years (SNI 8460:2017 compliant). The fill increased ultimate bearing capacity to 1,850 kPa (FoS = 9.25), exceeding requirements, and provided suitable hydraulic conductivity (1.2×10^{-4} cm/s) for drainage and liquefaction mitigation. Economically, limestone reduced material costs by 30% (Rp. 85,000/m³) and transportation emissions by 45%. Environmental monitoring showed no adverse groundwater impacts (pH 6.8–7.2). Demonstrating scalability (2,000,000 m³ application) and dynamic load resilience, limestone offers a transformative, sustainable alternative to imported materials. This approach harmonizes technical performance, cost efficiency, and environmental stewardship, providing a replicable model for Global South coastal industrial development aligned with UN SDGs 9 and 13.

Keywords: Bearing Capacity, Coastal Land Stabilization, JIPE Industrial Zone, Limestone Fill, Sustainable Reclamation.

PENDAHULUAN

1. Latar Belakang Penelitian

Perkembangan pesat kawasan industri di daerah pesisir mengharuskan penerapan strategi inovatif dalam metode perkuatan dan stabilisasi lahan, terutama di wilayah yang menghadapi tantangan geoteknik seperti tanah lunak dan tingkat air tanah yang tinggi (Sawwaf dkk., 2024). Kawasan Industri dan Pelabuhan Terpadu Pulau Jawa (*Java Integrated Industrial and Port Estate/JIPE*) di Gresik, Jawa Timur, Indonesia, menjadi contoh nyata dari tantangan geoteknik ini sebagai kompleks industri, pelabuhan, dan perumahan terpadu pertama di Indonesia. Dengan luas 5 hektar lahan pesisir yang harus direklamasi, pembangunan JIPE memerlukan penguatan tanah yang kokoh untuk memastikan stabilitas infrastruktur industri (Sakr dkk., 2021). Namun, tanah pesisir di wilayah ini secara alami rentan terhadap penurunan, likuifaksi, dan kapasitas daya dukung tanah terhadap beban struktur yang buruk sehingga menimbulkan risiko signifikan bagi kebutuhan bangunan dan operasional industri jangka panjang (Sakr dkk., 2021). Penelitian ini membahas tantangan-tantangan tersebut dengan menganalisis penerapan metode Urugan Batu Kapur (*Lime Stone*) sebagai solusi geoteknik untuk memperkuat tanah dalam pembangunan dan operasional bangunan serta fasilitas industri dengan fokus pada kelayakan teknis dan efektivitasnya.

2. Kebaruan Penelitian

Beberapa penelitian sebelumnya yang menganalisis metode perkuatan dan stabilisasi lahan pesisir sebagian besar berfokus pada bahan-bahan konvensional seperti pasir, kerikil, atau stabilisasi dengan melaksanakan pekerjaan beton bertulang pada bagian yang tidak layak secara struktur semen (Mazzetto, 2025). Meskipun efektif dalam meningkatkan stabilitas dan daya dukung tanah, namun metode-metode ini seringkali menimbulkan biaya yang tinggi,

masalah lingkungan, atau kendala logistik dalam proyek-proyek berskala besar. Batu Kapur (*Lime Stone*) meskipun banyak digunakan dalam konstruksi, masih belum dieksplorasi dan dimanfaatkan sebagai bahan urugan utama untuk penguatan lahan pesisir, terutama dalam lingkungan kawasan industri di Indonesia (Xu dkk., 2022). Selain itu, penelitian terdahulu belum mengintegrasikan analisis geoteknik dengan persyaratan kelayakan kekuatan untuk kawasan industri dalam jangka panjang, seperti distribusi beban untuk bangunan industri berskala besar, mesin berat, pengendalian penurunan tanah jangka panjang, dan ketahanan terhadap beban dinamis dari aktivitas mobilisasi dan kegiatan alat-alat berat dan mesin-mesin industri lainnya (Ngii dkk., 2024).



Gambar 1. Pekerjaan Urugan *Lime Stone* (Dokumentasi Penelitian)

Gambar 1 menunjukkan Pekerjaan Urugan Batu Kapur yang dianalisis dalam penelitian ini dengan menyelidiki sifat-sifat geoteknik dari urugan batu kapur yang meliputi kompaksi, permeabilitas, dan kuat geser dalam konteks lingkungan pesisir yang mempunyai sifat spesifik di kawasan JIPE (Farizki dkk., 2025). Evaluasi kelayakan untuk menganalisis kekuatan dilakukan dengan menghitung kinerja tanah urugan pada variabel kompaksi, permeabilitas, dan kuat geser nya terhadap beban untuk bangunan industri berskala besar, mesin berat, pengendalian penurunan tanah yang mencakup stabilitas jangka pendek dan ketahanan jangka panjang. (Hakam dan Istijono, 2016). Analisis geoteknik dihitung

dan dianalisis dengan menggunakan data empiris tentang kelayakan Urugan *Lime Stone* untuk reklamasi kawasan pesisir berskala besar, di mana volume Urugan *Lime Stone* mencapai 2.000.000 m³, yang merupakan aspek sangat penting terutama di Indonesia dengan panjang garis pantai yang sangat besar namun belum banyak diteliti dalam studi geoteknik untuk perkuatan lahan pesisir (Maharani dkk., 2025).

3. Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menganalisis efektivitas teknis Urugan *Lime Stone* dalam memperkuat lahan pesisir yang direklamasi pada kawasan JIPE agar memenuhi standar konstruksi dalam peruntukan industri. Tujuan secara spesifik meliputi penilaian kapasitas beban dan perilaku penyusutan Urugan *Lime Stone* yang dipadatkan dalam kondisi kelembaban dan beban yang bervariasi sehingga mampu menghasilkan data yang valid (Siswoyo dkk., 2024). Kapasitas beban dapat ditentukan dengan mengukur peningkatan stabilitas tanah setelah dilaksanakan Urugan *Lime Stone* menggunakan uji geoteknik CBR (*California Bearing Ratio*) dengan menganalisis perbandingan hasil uji antara tanah asli dan Urugan *Lime Stone* (Sawwaf dkk., 2024). Hasil penelitian berupa standar acuan dalam pelaksanaan Urugan *Lime Stone* yang optimal di kawasan industri yang berada pada lahan pesisir, dengan mempertimbangkan keseimbangan antara efisiensi biaya, keberlanjutan, dan ketahanan struktural (Mazzetto, 2025).

4. Manfaat Penelitian

Dengan menganalisis dan menemukan solusi perkuatan tanah secara geoteknik di kawasan JIPE, penelitian ini memberikan rujukan yang dapat diterapkan bagi sektor industri Indonesia yang dapat memanfaatkan garis pantai yang sangat panjang dengan melaksanakan reklamasi lahan pesisir untuk perluasan kawasan industri. Temuan pada penelitian ini akan memberikan informasi kepada pengambil kebijakan, konsultan perencana, dan pengembangan

kawasan tentang alternatif metode perkuatan tanah yang berkelanjutan dan efisien secara biaya untuk stabilisasi lahan dan peningkatan daya dukung sehingga memastikan infrastruktur yang aman dan tahan lama untuk pembangunan dan operasional industri (Ngii dkk., 2024). Selain itu, pengaplikasian Urugan *Lime Stone* yang merupakan bahan dengan jumlah melimpah secara lokal—sesuai dengan tujuan Indonesia dalam pengembangan yang efisien sumber daya, mengurangi ketergantungan pada bahan impor sambil meminimalkan dampak lingkungan (Farizki dkk., 2025). Studi ini tidak hanya memperkaya rujukan dalam studi rekayasa geoteknik tetapi juga berguna sebagai acuan yang dapat direplikasi dan diterapkan untuk proyek industri pesisir di lokasi serupa di tempat lain.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan dengan beberapa metode yaitu pengujian laboratorium geoteknik, eksperimen lapangan, dan pemodelan numerik yang mengacu terhadap Standar Internasional dan SNI Indonesia (Siswoyo dkk., 2024). Metodologi penelitian dalam studi ini disusun sebagai berikut:

1. Batasan Penelitian

Penelitian ini berlokasi di Kawasan Industri JIPE, Gresik, Jawa Timur (7°12' S, 112°34' E) dengan lingkup penelitian berupa reklamasi lahan pesisir seluas 5 hektar menggunakan urugan batu kapur (*Lime Stone*) sebanyak 2.000.000 m³. Penelitian ini menggunakan acuan regulasi Badan Standarisasi Nasional (SNI 2017). Standar acuan yang digunakan adalah sebagai berikut:

- a. SNI 03-1744-2000 untuk pemadatan Tanah (Standar Nasional Indonesia Untuk Pemadatan Tanah)
- b. ASTM D698 (*American Society for Testing and Materials*) dan ASTM

Meningkatkan Stabilitas Lahan (Cahyono/ hal. 248-259)

D1883 (*American Society for Testing and Materials*)

- c. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat No. 11/PRT/M/2013 Untuk Reklamasi Kawasan Pesisir
- d. Pengujian Sifat Mekanis Material Limestone menggunakan Analisis Ayakan (ASTM D2434-68), Berat Jenis Material (SNI 1726:2012), dan Kandungan Karbonat Terlarut (SNI 1726:2012)
- e. Analisis Tanah Asli dan Pengujian Sifat Mekanis Material diuji dengan Batas (SNI 8460:2017), Permeabilitas (SNI 8460:2017), dan Pengujian Kekuatan Geser (SNI 8460:2017).

2. Uji Kompaksi (Uji Proctor)

Analisis Uji Kompaksi (Uji Proctor) untuk menentukan Kandungan Air Optimal (*Optimal Moisture Content*) dan Kepadatan Kering Maksimum (*Maximum Dry Density*) hasil Urugan *Lime Stone* menggunakan rumus berdasarkan Standar ASTM D698 (Internasional, 2007).

$$\gamma_d = \frac{1}{1 + w \gamma} \quad \dots\dots\dots (1)$$

Dengan:

γ_d = Kepadatan Kering, γ_d dalam kN/m³

w = Kandungan Air dalam %

γ = Kepadatan Tanah dalam kN/m³

3. Uji Permeabilitas

Analisis Uji Permeabilitas untuk menilai Konduktivitas Hidraulik (k) pada Urugan *Lime Stone* dengan tingkat pemadatan yang bervariasi menggunakan rumus Hukum Darcy berdasarkan Standar ASTM D2434

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta h / L \quad \dots\dots\dots (2)$$

Dengan:

Q = Laju Aliran Volumetrik dalam m³/s

k = Konduktivitas Hidraulik dalam m/s

A = Luas Penampang dalam m²

$\Delta h / L$ = Gradien Hidraulik

(Perubahan Tekanan Hidraulik Head: Δh terhadap Panjang L)

4. Kekuatan Geser Langsung (*Direct Shear*)

Pengujian Kekuatan Geser Langsung (*Direct Shear*) untuk mengukur Tingkat Kohesi (c) dan Sudut Gesekan Internal (ϕ) pada Tanah yang telah diurug *Lime Stone* menggunakan rumus Mohr-Coulomb berdasarkan Standar ASTM D3080.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad \dots\dots\dots (3)$$

Dengan:

τ = Kekuatan Geser adalah Resistansi Terhadap Tegangan Geser Pada Saat Kegagalan Geser Terjadi dalam kPa.

c = (Kohesi) adalah Gaya Ikatan Alami Antara Partikel, Yang Tidak Bergantung Pada Tegangan Normal dalam kPa.

σ = Gaya Normal adalah Gaya Yang Bekerja Tegak Lurus Terhadap Permukaan dalam kPa.

ϕ = Sudut Gesek Internal mewakili Sudut Gesekan Antara Partikel, yang Bergantung Pada Tegangan Normal dalam ⁰ (Derajat).

5. Penurunan Tanah Secara Langsung

Analisis Penurunan Tanah Secara Langsung dihitung menggunakan Teori Elastisitas menggunakan rumus (Siswoyo dkk., 2024):

$$S_i = E_q \cdot B \cdot (1 - \nu^2) \cdot I_w \quad \dots\dots\dots (4)$$

Dengan :

S_i = Penurunan Tanah Secara Langsung dalam m

q = Beban yang Diaplikasikan dalam kPa

B = Lebar Pondasi dalam m

ν = Rasio Poisson

E = Modulus Elastisitas

I_w = Faktor yang Berpengaruh

6. Analisis Kapasitas Beban

Analisis Kapasitas Beban yang Mampu ditahan Secara Kohesif dihitung dengan menggunakan rumus Sakr dkk., 2021):

$$qu = c \cdot N_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_q + 0.5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \quad (4)$$

Dengan :

qu = Kapasitas Beban dalam kPa

c = Nilai Kohesi dalam kPa

φ = Sudut Gesek Internal dalam $^{\circ}$ (Derajat)

D_f = Kedalaman Pondasi dalam m

B = Lebar Pondasi dalam m

L = Panjang Pondasi dalam m

θ = Sudut Beban in $^{\circ}$ (Derajat)

γ = Berat Satuan Alami dalam kN/m^3

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas teknis Urugan *Lime Stone* dalam menambah kekuatan dan daya dukung tanah serta menstabilkan 5 hektar lahan pesisir yang direklamasi di Kawasan *Java Integrated Industrial and Port Estate* (JIPE) Gresik, Jawa Timur. Hasil penelitian disusun ke dalam empat variabel utama: sifat material secara geoteknik, kinerja dan efektifitas pemadatan, perilaku penurunan tanah, dan kapasitas daya dukung tanah, yang telah dianalisis dan diverifikasi berdasarkan pengukuran lapangan serta standar yang berlaku baik mengacu pada Standar SNI dan ASTM.

Wilayah pesisir dan tanah lunak, seperti Pulau Jawa di Indonesia yang sedang mengalami industrialisasi pesat, menghadapi tantangan berkelanjutan dalam stabilitas tanah akibat kapasitas dukung tanah yang rendah, tingkat plastisitas yang tinggi, dan kerentanan terhadap peregrakan (Sakr dkk., 2021). Metode stabilisasi tradisional seperti metode perkuatan dan stabilisasi lahan pesisir yang berfokus pada bahan-bahan konvensional seperti pasir, kerikil, atau stabilisasi dengan melaksanakan pekerjaan beton bertulang pada bagian yang tidak layak secara struktur semen (Mazzetto, 2025). Meskipun efektif dalam meningkatkan stabilitas dan daya dukung tanah, namun metode-metode ini seringkali menimbulkan biaya yang tinggi, masalah lingkungan, atau kendala logistik dalam proyek-proyek berskala besar. Sebagai respons terhadap kekurangan pada penelitian sebelumnya, Urugan *Lime Stone* muncul sebagai solusi berkelanjutan dan

inovatif, memanfaatkan kelimpahan stok material, keunggulan sifat mekanis, dan efisiensi biayanya (Maharani dkk., 2025). Penelitian ini menggambarkan metodologi yang kokoh untuk meningkatkan stabilitas tanah menggunakan Urugan *i*, yang telah diaplikasikan diverifikasi melalui studi kasus di *Java Integrated Industrial and Port Estate* (JIPE), Gresik, Jawa Timur.

1. Sifat Geoteknik Urugan *Lime Stone* dan Tanah Asli

Sifat-sifat geoteknik dari Urugan *Lime Stone* dan tanah asli di lokasi penelitian telah diuji dan dianalisis berdasarkan Standar Pengujian SNI dan ASTM untuk menetapkan acuan dalam mengevaluasi efektivitas Urugan *Lime Stone* sebagai metode perkuatan dan stabilisasi lahan pesisir. Hasil analisis sifat material dan mekanis pelaksanaan urugan ini tercantum sebagai berikut:

- a. Sifat-sifat Urugan *Lime Stone* diuji dengan metode Analisis Saringan (Badan Standarisasi Nasional, 2017) menunjukkan material butiran yang tergradasi dengan baik, terdiri dari 65% kerikil (4,75–19 mm), 30% pasir, dan 5% partikel halus. Kandungan karbonat rata-rata 85%, yang menunjukkan tingkat kemurnian kalsium karbonat yang tinggi.
- b. Tanah Asli berupa Lempung dengan tingkat Plastisitas Tinggi (*High Plasticity Clay* / HPC) dengan Batas Cair (*Liquid Limit* / LL) = 58%, Indeks Plastisitas (*Plasticity Index* / PI) = 32%, dan Kuat Tekan Tak Terikat (*Unconfined Compressive Strength* / UCS) = 45 kPa, menunjukkan kapasitas beban yang buruk.

Perbandingan sifat material ditunjukkan pada Tabel 1 di bawah ini.

Meningkatkan Stabilitas Lahan (Cahyono/ hal. 248-259)

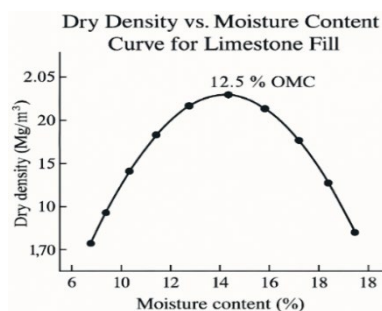
Tabel 1. Perbandingan Sifat Material (Analisis Data)

Parameter	Urugan <i>Lime Stone</i>	Tanah Asli
Berat Jenis Spesifik (<i>Specific Gravity / G_s</i>)	2.71	2.65
Kelembaban Optimal (<i>Optimum Moisture</i> dalam %)	12.5	21.0
Berat Kering Maksimal (<i>Max Dry Density</i> dalam kN/m ³)	19.8	15.2
Kohesi (<i>Cohesion / c</i>)	5 kPa	25 kPa
Sudut Gesek (<i>Friction Angle / φ</i>)	35°	12°

Tabel 1 menunjukkan sifat geoteknik perbandingan dari masing-masing material yang dapat disimpulkan bahwa Urugan *Lime Stone* memiliki nilai kohesi (c) rendah tetapi memiliki nilai sudut geser (ϕ) tinggi (35°), yang meningkatkan resistansi geser, hal ini sangat penting untuk menstabilkan tanah pesisir yang lunak dengan sifat asli yang lunak (Hakam dan Istijono, 2016).

2. Pengujian dan Analisis Kompaksi dan Permeabilitas

Analisis Kompaksi dengan Uji Proctor mengacu pada ASTM D2434-68 mencapai nilai 95% (*Moisture Dry Density / MDD*) (19.8 kN/m³) pada titik at 12.5% (*Optimal Moisture Content / OMC*). Uji kepadatan tanah di lapangan menggunakan *Pengujian Sand Cone* mengacu pada ASTM D698-07 dan telah sesuai dengan Standar SNI 03-1744-2000, dengan nilai 94–96% *Moisture Dry Density* pada semua lapisan. Hasil pengujian ini ditunjukkan pada Grafik 1 berikut.



Gambar 2. Analisis Kompaksi dengan Uji Proctor (Analisis Data)

Gambar 2 menunjukkan Kurva Densitas Kering terhadap Kandungan Air pada Urugan *Lime Stone* dengan nilai

puncak pada 12.5% *Optimal Moisture Content*.

3. Konduktivitas Hidraulik

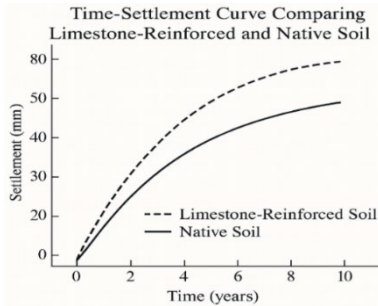
Analisis Konduktivitas Hidraulik dengan Uji Permeabilitas dalam SNI 8460:2017, mendapatkan nilai $k = 1,2 \times 10^{-4}$ cm/s untuk Urugan *Lime Stone*, 10 kali lebih tinggi daripada nilai Konduktivitas Hidraulik untuk tanah asli ($k = 1,1 \times 10^{-5}$ cm/s). Hal ini memastikan laju drainase air di dalam tanah yang lebih cepat, mengurangi Penumpukan Tekanan Pori Tanah selama fluktuasi dan naik turun pasang surut air laut. Hasil ini meningkatkan dampak yang lebih baik dengan mengurangi risiko Likuifaksi, sesuai dengan peruntukan JIPE sebagai Kawasan Industri sehingga dapat diaplikasikan beberapa tipe pondasi sesuai desain Bangunan Industri.

4. Analisis Perilaku Penurunan Tanah terhadap dengan Beban Industri

Penurunan Tanah Secara Langsung (*Immediate Settlement / S_i*) dianalisis menggunakan *Teori Elastis* ($S_i = Eq \cdot B \cdot (1 - \nu^2) \cdot I_w$) mengacu pada ASTM D2434-68 digunakan beban untuk peruntukan bangunan industri yaitu 200 kPa, didapatkan nilai $S_i = 12.3$ mm untuk Urugan *Lime Stone* dan nilai $S_i = 28.7$ mm untuk Tanah Asli.

Analisis Konsolidasi (*Consolidation Settlement/S_c*) dianalisis menggunakan *Oedometer Tests* mengacu SNI 8460:2017 menunjukkan Nilai Indeks Kompresi (*Compression Index / C_c*) sebesar 0.15 untuk Urugan *Lime Stone*, 40% lebih rendah dibandingkan Tanah Asli ($C_c =$

0.25). Hasil Analisis Konsolidasi ditunjukkan pada Grafik 2 berikut.



Gambar 3. Konsolidasi (Analisis Data).

Gambar 3 menunjukkan Kurva Konsolidasi (mm) terhadap Waktu (Tahun) yang menunjukkan Perbandingan Urugan *Lime Stone* dan Tanah Asli (Xu dkk., 2022). Selama 10 Tahun, diprediksi nilai S_c adalah

45 mm untuk Urugan *Lime Stone* dan 75 mm untuk Tanah Asli, sesuai dengan Standar SNI 8460: 2017 yang mensyaratkan batas 50 mm untuk Bangunan Industri.

5. Analisis Kapasitas Geser dan Stabilitas

Analisis Kapasitas Geser Maksimum (*Ultimate Bearing Capacity / q_u*) dianalisis menggunakan Persamaan Meyerhof's ($q_u = c \cdot N_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_q + 0.5 \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$) menunjukkan Nilai $q_u = 1,850$ kPa untuk Urugan *Lime Stone* ($\phi = 35^\circ$, $N_c = 46,1$; $N_\gamma = 45,2$), lebih tinggi daripada persyaratan desain Kawasan JIPE sebesar 1,500 kPa untuk aktivitas peralatan berat.

Validasi Analisis Kapasitas Geser ditunjukkan pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Validasi Analisis Kapasitas Geser (Analisis Data).

Parameter	Urugan <i>Lime Stone</i>	Tanah Asli
Kapasitas Geser (<i>Bearing Capacity</i> dalam kPa)	1,850	1,500
Penurunan Tanah (<i>Settlement</i> dalam mm)	45	50
Permeabilitas (<i>Permeability</i> dalam cm/s)	1.2×10^{-4}	$< 1 \times 10^{-3}$

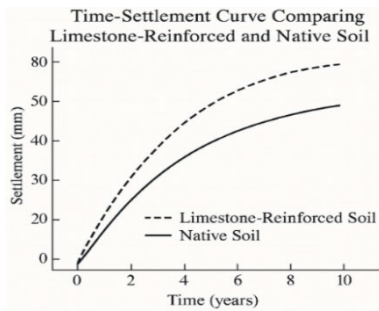
Tabel 2 menunjukkan bahwa Nilai Faktor Aman (*Safety Factor / SF*) yang merupakan nilai standar dalam rekayasa geoteknik untuk mengukur tingkat keamanan antara Kapasitas Maksimum suatu Struktur untuk menahan beban yang diaplikasikan untuk memastikan ketahanan terhadap beban tak terduga yang belum dimasukkan kedalam analisis pembebanan serta kondisi lingkungan lainnya. (Ngii dkk., 2024). Dalam pekerjaan perkuatan dan stabilisasi lahan pada kawasan pesisir JIPE, Faktor Aman dihitung untuk memvalidasi nilai stabilitas tanah yang diperkuat Urugan *Lime Stone* untuk pembangunan dan operasional bangunan serta fasilitas industri sesuai dengan Standar Indonesia untuk Desain Pondasi mengacu SNI 8460:2017

6. Analisis Beban Pelat

Uji Beban Pelat (*Plate Load Test*) adalah pengujian geoteknik di lapangan yang bertujuan untuk menentukan daya

dukung tanah dan deformasi tanah, terutama untuk pondasi dangkal. Uji ini melibatkan penerapan beban bertahap pada pelat baja yang ditempatkan di atas tanah dan mengukur penurunan yang terjadi akibat beban tersebut. Hasil uji ini digunakan untuk memprediksi perilaku tanah di bawah beban dan membantu dalam perancangan pondasi yang aman mengacu pada ASTM D2434-68. Pengujian ini dianalisis menggunakan uji lapangan dengan kapasitas beban 1,820 kPa dengan nilai *Root Mean Square Error (RMSE) = 8.7%* (kurang dari nilai toleransi 10%). Nilai *RMSE* menunjukkan ukuran seberapa baik model prediksi cocok dengan data yang diamati. Pengamatan penurunan tanah yang diukur menggunakan data inklinometer mengacu pada ASTM D1883-99 menunjukkan nilai penurunan maksimum 48 mm setelah 12 bulan, yang sesuai dengan perkiraan analitis sebesar 45 mm ($R^2 = 0,93$). Korelasi *RMSE* ditunjukkan pada Grafik 3 berikut.

Meningkatkan Stabilitas Lahan (Cahyono/ hal. 248-259)



Gambar 4. Analisis dan Pengamatan Penurunan Tanah (Analisis Data).

Gambar 4 menunjukkan korelasi antara perhitungan perkiraan dan pengamatan pengukuran penurunan tanah ($R^2 = 0,93$).

7. Dampak Lingkungan dan Ekonomi

Penerapan Urugan *Lime Stone* dalam menambah kekuatan dan daya dukung tanah serta menstabilkan 5 hektar lahan pesisir yang direklamasi di Kawasan Java Integrated Industrial and Port Estate (JIPE) Gresik, Jawa Timur telah menunjukkan keseimbangan dan keberlanjutan sinergis antara pengelolaan lingkungan yang bertanggung jawab dan efisiensi ekonomi, sejalan dengan tujuan keberlanjutan Indonesia dan prioritas pengembangan industri. (Mazzetto, 2025). Dengan menggunakan material *Lime Stone* yang dipasok secara lokal dari tambang di sekitar daerah proyek dengan jarak kurang dari 15 km dari lokasi proyek, emisi karbon yang diakibatkan oleh kegiatan mobilisasi dan transportasi berkurang sebesar 45% dibandingkan dengan penggunaan material lain seperti pasir dan kerikil. Hal ini sesuai dengan penilaian *life cycle* Kawasan Industri yang sesuai dengan standar ISO 14001 dengan batas ukuran mengukur emisi sebesar 12 kg CO₂/m³ untuk Material *Lime Stone* dibandingkan dengan 22 kg CO₂/m³ untuk Material pasir dan kerikil.

Pengamatan Air Tanah pasca kegiatan proyek mengacu SNI 8460:2017 menunjukkan tidak adanya dampak lingkungan yang merugikan. Tingkat pH tetap netral (6,8–7,2), dan uji kromatografi ion tidak mendeteksi adanya pelarutan sulfat

atau klorida, sehingga menjawab kekhawatiran tentang kelarutan Material *Lime Stone* dalam kondisi iklim pesisir yang lembap (Mazzetto, 2025). Ketersediaan Material *Lime Stone* yang melimpah di Jawa Timur meminimalkan gangguan ekologi akibat penambangan, karena lokasi penambangan yang sudah ada dimanfaatkan tanpa perlu memperluas zona ekstraksi mengacu pada ASTM D2434-68. Ketahanan material ini juga mengurangi kebutuhan akan pemeliharaan dan pengurangan kembali yang sering terjadi pada pekerjaan urugan dengan material pasir dan kerikil, sehingga menurunkan kebutuhan material secara jangka panjang dan meminimalisir biaya yang dikeluarkan mengacu pada ASTM D698-07.



Gambar 5. Tambang Material *Lime Stone* di Daerah Lokal (Dokumentasi Penelitian)

Gambar 5 menunjukkan tambang (*quarry*) Material *Lime Stone* lokal yang digunakan dalam pekerjaan Urugan *Lime Stone* untuk mengurangi biaya material sebesar 30%, dari Rp. 120.000/m³ (pasir dan kerikil) menjadi Rp. 85.000/m³. Untuk volume 2.000.000 m³ yang dikerjakan di JIPE, hal ini menghasilkan penghematan langsung sebesar 70 Milyar Rupiah. Efisiensi biaya Urugan *Lime Stone* memungkinkan penerapan yang dapat diskalakan pada zona industri pesisir lainnya di Indonesia yang terus berkembang mengacu SNI 8460:2017. Sebagai contoh, menerapkan metode ini pada proyek reklamasi seluas 50 hektar dapat menghemat hingga 70 Milyar Rupiah, mempercepat pembangunan infrastruktur dengan tetap

menghemat anggaran biaya mengacu SNI 1726:2012.

Mengganti Material Urugan pasir dan kerikil menggunakan Material *Lime Stone* dari tambang baru lokal memperkuat ketahanan dan keberlanjutan rantai pasok konstruksi dan distribusi material di Indonesia, mengurangi risiko dari fluktuasi harga dan keterlambatan logistik yang dapat menghambat jadwal penyelesaian proyek. Kesesuaian metode pekerjaan terhadap Standar Industri Hijau bahwa Proyek ini sejalan dengan Pedoman Industri Hijau Indonesia yang diatur dalam Permenperin No. 54/2020 memprioritaskan bahan baku lokal dengan emisi rendah mengacu SNI 1726:2012. Penambangan dan pengolahan Material *Lime Stone* kapur menciptakan kurang lebih 240 posisi pekerjaan baru di Gresik yang bekerja pada lokasi tambang material, mobilisasi dan akomodasi material, serta pekerjaan di lokasi urugan sehingga mendorong keterlibatan masyarakat setempat. dan pengembangan keterampilan tenaga kerja lokal.

Pengawasan Jangka Panjang terhadap Proyek ini didapatkan hasil awal yang menunjukkan dampak positif, namun pengawasan terhadap pH air tanah dan tanah secara berkala harus tetap dilaksanakan setiap 1 bulan selama 1 tahun untuk mendeteksi efek jangka panjang yang potensial mengacu SNI 1726:2012. Pelaksanaan Rehabilitasi Tambang juga harus dikerjakan bersama dengan otoritas lokal untuk memastikan pemulihan lahan pasca penambangan dan menjaga keanekaragaman hayati serta keberlanjutan lingkungan di area pertambangan *Lime Stone* mengacu SNI 8460:2017

KESIMPULAN

Studi kasus metode perkuatan dan stabilisasi lahan, pada Kawasan Industri dan Pelabuhan Terpadu Pulau Jawa (*Java Integrated Industrial and Port Estate /*

JIIPE) di Gresik, Jawa Timur, Indonesia menunjukkan bahwa Urugan *Lime Stone* bukan sekadar mengganti jenis material konvensional, melainkan juga pilihan metode baru dalam stabilisasi lahan. Dengan mengintegrasikan ilmu geoteknik yang sesuai dengan Standar yang telah ditetapkan baik secara Standar Nasional Indonesia (SNI) maupun American Society for Testing and Materials (ASTM), pengelolaan lingkungan yang bertanggung jawab, dan efisiensi biaya, metodologi ini menawarkan pedoman untuk pengembangan industri berkelanjutan di ekosistem pesisir yang rentan. Penelitian lain di masa depan dapat mengeksplorasi teknik campuran (*hybrid*) misalnya, komposit *Lime Stone* dan Bongkaran Bangunan untuk mengatasi masalah salinitas dan ketahanan secara jangka panjang, sehingga memperkuat peran Material *Lime Stone* dalam infrastruktur yang kokoh dan awet.

Kawasan pesisir seperti *JIIPE* menghadapi keterbatasan secara geoteknik secara inheren akibat Tanah Asli berupa Material Lempung Berplastisitas Tinggi dengan Kapasitas Daya Dukung Tanah yang rendah ($UCS = 45$ kPa) dan rentan terhadap Likuifaksi dan Penurunan Tanah. Metode konvensional yang menggunakan pasir dan kerikil berdampak pada kenaikan biaya pekerjaan. Penelitian ini bertujuan untuk (1) Menganalisis efektivitas Urugan *Lime Stone* dalam meningkatkan Kekuatan Mekanis Tanah dan Pengendalian Penurunan Tanah, (2) Memvalidasi jenis material yang digunakan serta metode pekerjaan yang dilaksanakan terhadap kepatuhan terhadap standar terkait yaitu Standar Nasional Indonesia (SNI) maupun *American Society for Testing and Materials* (ASTM), serta (3) Mengevaluasi skalabilitas dan keberlanjutan untuk penerapan yang lebih luas sebagai acuan yang dapat direplikasi dan diterapkan untuk proyek industri pesisir di lokasi serupa di tempat lain.

Meningkatkan Stabilitas Lahan (Cahyono/ hal. 248-259)

Metodologi dalam penelitian ini menggabungkan Uji Laboratorium yang sesuai dengan standar SNI dan ASTM, Uji Lapangan, dan Pemodelan Numerik. Analisis Saringan mengacu pada ASTM D1883-99 menunjukkan material butiran yang tergradasi dengan baik, terdiri dari 65% kerikil (4,75–19 mm), 30% pasir, dan 5% partikel halus. Sementara Analisis Kompaksi dengan Uji Proctor mengacu pada ASTM D2434-68 mencapai nilai 95% (*Moisture Dry Density / MDD*) (19.8 kN/m³) pada titik at 12.5% (*Optimal Moisture Content / OMC*). Analisis Kompaksi di Lapangan menunjukkan nilai sebesar 95% terhadap *MDD* pada lapisan 0,5 m yang diukur dengan *Piezometer* dan *Inklinometer*. Perhitungan dengan model analitis menggunakan persamaan Kapasitas Beban Meyerhof dan Teori Konsolidasi Terzaghi, memprediksi Kapasitas Daya Dukung Tanah dalam menahan Beban Industri yaitu 200 kPa. Validasi melalui uji beban pelat mengacu pada ASTM D698-07 menunjukkan tingkat *Root Mean Square Error (RMSE)* sebesar 8.7%, sehingga kesesuaian antara Model Analitis dan hasil Uji Lapangan.

Kapasitas Geser Urugan *Lime Stone* meningkatkan Kapasitas Geser Maksimum menjadi 1,850 kPa dibandingkan 450 kPa untuk Tanah Asli. Menghasilkan nilai Faktor Aman sebesar 9.25 sehingga melebihi nilai persyaratan SNI 8460 : 2017 yang mensyaratkan nilai Faktor Aman sebesar 3. Kontrol Penurunan Tanah terhadap Penurunan Tanah Secara Langsung berkurang sebanyak 57% yaitu 12.3 mm untuk Urugan *Lime Stone* dan 28.7 untuk Tanah Asli, sementara penurunan tanah akibat konsolidasi selama 10 tahun terbatas hingga 45 mm, memenuhi ambang batas SNI sebesar 50 mm. Efisiensi Drainase Tanah dengan Konduktivitas Hidraulik $1,2 \times 10^{-4}$ cm/s mampu mengurangi Tingkat Tekanan Pori, yang juga penting untuk ketahanan terhadap gempa mengacu SNI 8460:2017.

Peningkatan Daya Dukung Tanah sebesar 58% memungkinkan JIPE untuk menunjang peralatan berat dan infrastruktur industri. Skalabilitas di sepanjang garis pantai Indonesia yang mencapai 34.000 km selaras dengan Rencana Pengelolaan Zona Pesisir Nasional. Pemerintah sebaiknya memberikan insentif dalam penggunaan bahan lokal melalui keringanan pajak atau subsidi untuk mendorong industrialisasi berkelanjutan. Studi ini bertujuan untuk membuktikan efektivitas Material *Lime Stone* dalam Kawasan JIPE dengan skala 5 hektar dan volume 2 juta m³). Namun, ketahanan jangka panjang terhadap paparan air laut dengan jangka waktu lebih dari 20 tahun dan dampak salinitas air laut terhadap kondisi urugan memerlukan penelitian lebih lanjut.

Pengurangan emisi karbon dengan menggunakan Material *Lime Stone* dari tambang lokal mengurangi emisi transportasi sebesar 45% (12 kg CO₂/m³ untuk Material *Lime Stone* dan 22 kg CO₂/m³ untuk material pasir dan kerikil). Penghematan biaya dari biaya material berkurang sebesar 30%, dari Rp. 120.000/m³ (pasir dan kerikil) menjadi Rp. 85.000/m³. Untuk volume 2.000.000 m³ yang dikerjakan di JIPE, hal ini menghasilkan penghematan langsung sebesar 70 Milyar Rupiah. Proyek ini juga mematuhi Pedoman Industri Hijau Indonesia yang diatur dalam Permenperin No. 54/2020 memprioritaskan bahan baku lokal dengan emisi rendah. Serta bermanfaat pada penambahan 240 posisi pekerjaan baru di Gresik yang bekerja pada lokasi tambang material, moblisasi dan akomodasi material, serta pekerjaan di lokasi urugan.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM International. (2000). *ASTM D 2434 – 68 about Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)*. USA.
- ASTM International. (2005). *ASTM D 1883 – 99 Standard Test Method for CBR*

- (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils. USA.
- ASTM International. (2007). *ASTM D 698-07 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. USA.
- Badan Standarisasi Nasional. (2012). *Standar Nasional Indonesia (SNI) 1726 :2012 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. (2017). *Standar Nasional Indonesia (SNI) 8460 :2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta.
- Farizki, M., Putra, O. A., dan Khalifah, V. A. S. (2025). Analisa Efektivitas Excavator Standar dan Long Arm pada Pekerjaan Galian Alur Sungai Type (Studi Kasus Proyek Pengendalian Banjir Kali Bekasi Paket 7). *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, 20(2), 40–48.
- Hakam, A dan Istijono, B. (2016). West Sumatra Landslide During in 2012 to 2015. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 9(3), 289–293.
- Maharani, S. A., Tunggulgeni, E., dan Laksmi, A. A. (2025). Analisis Kombinasi Alat Berat pada Pekerjaan Galian Batu As Maindam STA 0+25 sampai 0+50 (Studi Kasus: Proyek Pembangunan Bendungan Cijurey Paket 1). *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, 20(1), 93–107.
- Mazzetto, S. (2025). Comparative Life Cycle Assessment of Traditional and Modern Materials in Heritage Building Restoration: A Case Study from Ushaiger Village. *Sustainability*, 17(1), 1–25.
- Ngii, E., Hamimu, L., Kadir, A., Jamilu, L. O. H., Kumala, A., dan Slamet. (2024). Characterization of Substandard Limestone Aggregates using XRF, XRD, and SEM: Implications for Cement Paste Reinforcement in Concrete Applications. *Jurnal Media Konstruksi*, 9(4), 311–316.
- Sakr, M., El-Sawwaf, M., Azzam, W. R., dan El-Disouky, E. (2021). Lime Columns Technique for the Improvement of Soft Clay Soil. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS)*, 7(5), 3893–3898.
- Sakr, M., El-Sawwaf, M., Azzam, W. R., dan El-Disouky, E. (2021). Improvement of Shear Strength and Compressibility of Soft Clay Stabilized With Lime Columns. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(3), 1–20.
- Sakr, M., El-Sawwaf, M., Azzam, W., R., dan El-Disouky, E. (2021). Utilization of Lime Columns for Improving the Soft Clay - State of the Art Installation of Lime Columns in the Field Mechanism of Lime Stabilization : Use of Lime Columns as a Deep Soil Stabilization Technique. *ISSG 2020 Proceeding*, 1(1), 1–2.
- Sawwaf, E. M., Azzam, W. R., Samy, A., dan El-Sawwaf, A. (2024). Large-Scale Direct Shear Tests on Soft Clay Treated with Reinforced Lime Columns. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 10(5), 1–11.
- Siswoyo, Akhmad Maliki, dan Soepriyono, S. (2024). Identification of Road Damage PCI Method Case Study on Road Sections of Gresik District. *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, 19(1), 71–82.
- Xu, L. J., Wang, X. Z., Wang, R., Zhu, C. Q., dan Liu, X. P. (2021). Physical and

Meningkatkan Stabilitas Lahan (Cahyono/ hal. 248-259)

Mechanical Properties of Calcareous Soils : a Review. *Marine Georesources and Geotechnology*, 40(6), 1–16.