

## **SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW: PERBAIKAN TANAH LEMPUNG MENGUNAKAN VACUUM PRELOADING DENGAN PREFABRICATED VERTICAL DRAIN**

**Imtinan Nurfauziyah<sup>1</sup>, Andra Rakha Setyawan<sup>2</sup>, Arnandhika Arsyia Diwangkara<sup>3</sup>, Bambang Irawan<sup>4</sup>, Cahya  
Putra Permana<sup>5</sup>, dan Niken Silmi Surjandari<sup>6</sup>**

<sup>1,2,3,4,5,6</sup>Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret Surakarta, Jl. Ir. Sutami No.36,  
Jebres, Kec. Jebres, Kota Surakarta, Jawa Tengah

Email: [1imtinannurfa@student.uns.ac.id](mailto:1imtinannurfa@student.uns.ac.id)

[2rakha215@student.uns.ac.id](mailto:2rakha215@student.uns.ac.id), [3arnandhikaarsya@student.uns.ac.id](mailto:3arnandhikaarsya@student.uns.ac.id), [4bambang9b03@student.uns.ac.id](mailto:4bambang9b03@student.uns.ac.id),

[5cahyaputra69@student.uns.ac.id](mailto:5cahyaputra69@student.uns.ac.id), [6nikensilmisurjandari@staff.uns.ac.id](mailto:6nikensilmisurjandari@staff.uns.ac.id)

### **ABSTRAK**

**ABSTRAK.** Lempung dengan kadar air tinggi memiliki kekuatan yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi. Perbaikan lempung lunak perlu dilakukan untuk meningkatkan kekuatan geser dan mengurangi kompresibilitasnya. Salah satu metode yang digunakan untuk perbaikan tanah lempung adalah kombinasi *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dan *Vacuum Preloading*. Cara ini memiliki kemampuan mempercepat proses konsolidasi dibandingkan PVD konvensional. Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis efektifitas perbaikan tanah menggunakan PVD yang dikombinasikan dengan *vacuum preloading*. Metode penelitian menggunakan *systematic literature review* dengan menggunakan metode PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analysis*). Hasil penelitian memperlihatkan bahwa penggunaan *vacuum preloading* dan PVD secara bersamaan dapat mempercepat konsolidasi, mengurangi tinggi timbunan sehingga memberikan efisiensi waktu dan biaya. Namun, metode ini memiliki kelemahan diantaranya kemungkinan penyumbatan pada pori-pori PVD, penurunan dan pergeseran lateral tanah di area sekitar penanganan serta biaya awal yang cukup tinggi. Temuan ini penting untuk pertimbangan perencanaan pembangunan infrastruktur di atas tanah lempung lunak yang menggunakan kombinasi *Vacuum Preloading* dan PVD.

Kata kunci: *prefabricated vertical drain*, *vacuum preloading*, tanah lempung, *systematic literature review*

### **1. PENDAHULUAN**

Lempung lunak, lempung ekspansif, tanah organik, tanah yang mudah runtuh, dan tanah dispersif merupakan tanah-tanah bermasalah jika akan didirikan bangunan di atasnya. Tanah lempung ekspansif memiliki sifat kembang susut yang tinggi, yang menyebabkan penurunan struktur yang tidak merata, (**Bhurtel dan Eisazadeh, 2020**). Tanah organik mengandung bahan organik, berwarna gelap, dan cenderung mengalami penurunan yang besar ketika diberi beban. Tanah mudah runtuh memiliki struktur yang rapuh, memiliki porositas yang tinggi, dapat kehilangan kekuatan ketika terkena air. Tanah dispersif memiliki partikel lempung yang mudah terdispersi dalam air, mudah terjadi erosi dan keruntuhan tanah apabila terkena air. Lempung lunak memiliki kekuatan yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi yang mengakibatkan penurunan yang besar dan kegagalan pondasi saat dibebani. Perbaikan lempung lunak diperlukan untuk meningkatkan kekuatan geser dan mengurangi kompresibilitasnya, (**Bergado et al., 2020**).

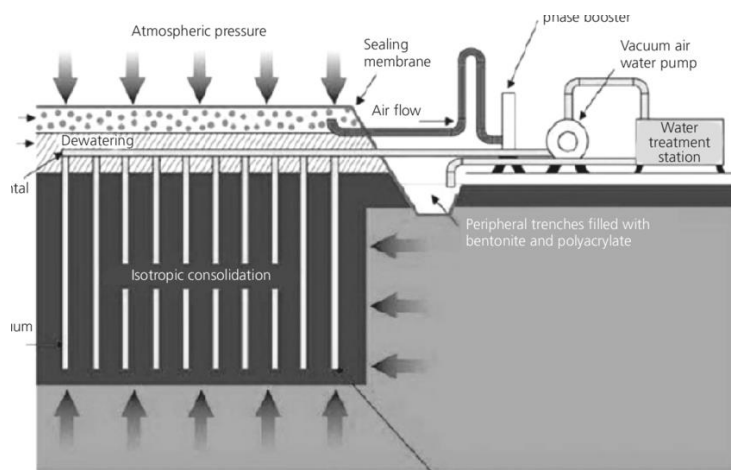
Salah satu metode yang digunakan dalam perbaikan tanah lempung adalah kombinasi *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dan *Vacuum Preloading*. Cara ini memiliki kemampuan mempercepat proses konsolidasi lebih baik dibandingkan PVD konvensional, (**Kumarage et al., 2018**). Metode *Vacuum Preloading* dikerjakan pertama kali oleh Royal Swedish Geotechnical Institute yang diusulkan oleh Kjellman (1952). Ide dasar dari metode *vacuum preloading* yaitu memadatkan tanah dengan mengurangi tekanan di dalam pori-porinya, sambil tetap menjaga tekanan agar tetap stabil. Hal ini menyebabkan tekanan efektif meningkat karena adanya penurunan tekanan atmosferik di dalam tanah. Metode *vacuum preloading* terdiri dari beberapa sistem yaitu sistem isolasi (*isolation system*), sistem drainase (*drainage system*), dan pompa penyedot (*vacuum pump*). *Vacuum Preloading* digunakan jika tanah pada saat konstruksi terjadi penurunan yang besar dengan waktu yang lama. Preloading akan

Corresponding Author

E-mail Address : [imtinannurfa@student.uns.ac.id](mailto:imtinannurfa@student.uns.ac.id)

mempercepat proses konsolidasi, memperkecil besarnya penurunan dan meningkatkan kekuatan geser pada tanah, (Saowapakpi boon *et al.*, 2010; Tian *et al.*, 2019).

Skema *vacuum preloading* dengan PVD diuraikan pada Gambar 1. Dalam kasus ini, sistem terdiri dari rangkaian drainase vertikal dan horizontal, di mana hubungan secara hidrolik terjadi melalui lapisan pasir, dan membran kedap air HDPE tebal sekitar 1 mm menutup sistem tersebut. Drainase horizontal berdiameter 50 mm, sedang drainase vertikal (*wick drain*) berdiameter 34 mm. Drainase vertikal maupun horizontal terhubung dengan tepi saluran keliling dan tertutup oleh sistem membran. Saluran keliling diisi air atau larutan bentonite untuk menjaga penutupan yang sempurna dari membran di bagian tepi zona yang akan di vakum. Pompa vakum terhubung dengan sistem peralatan yang akan membuang air ke saluran tepi. Dalam kondisi tertentu, untuk menjaga agar sistem membran tidak bocor dibutuhkan sistem dinding pemotong (*cut-off-wall*).



Gambar 1. Skema konsolidasi vakum dengan penutup membran di permukaan, (Masse *et al.*, 2001)

Pelaksanaan pekerjaan sistem vakum tersebut dimulai dengan menghamparkan lapisan pasir kasar, yang berfungsi sebagai landasan kerja (*platform*) dan sebagai lapisan drain (selimut pasir/*sand blanket*). Setelah itu, dipasang drainase vertikal (PVD) kemudian diikuti dengan pemasangan drainase horizontal serta alat-alat pelengkap yang lain. PVD dapat dipasang dengan pola susunan segitiga sama sisi atau bujur sangkar. Berbagai tipe drainase vertikal telah digunakan, seperti: drainase vertikal pracetak (*Prefabricated Vertical Drain, PVD*), pipa-pipa drainase dari pipa vakum Menard (*Menard vacuum transmission pipe, VIP*) dan drainase pasir (*sand drain*).

Hubungan antara outlet untuk drainase horizontal dengan beberapa peralatan harus dibuat terhubung dengan baik ke membran. Untuk melindungi membran dari gangguan luar, lapisan pasir halus diurungkan di atas membran tersebut. Membran digelar dan segala sesuatu yang bisa mengakibatkan kebocoran pada membran ketika pompa vakum bekerja harus ditangani lebih dulu.

Pompa vakum dihidupkan dan sambungan-sambungan antarlembaran membran dicek terhadap bocoran. Isapan pompa vakum yang bekerja dalam lapisan pasir di bawah membran akan tersalur ke bawah melalui pipa vertikal. Pompa isap (vakum) menghasilkan tekanan negatif (relatif terhadap tekanan atmosfer) di dalam zona tanah yang lolos air di bawah membran penutup, dan di sepanjang kedalaman tanah yang dipasang drainase vertikal PVD. Tekanan vakum yang diterapkan bisa sampai 90 kPa, walaupun dalam praktek tekanan vakum yang sering digunakan hanya sekitar 80 kPa, (Chu *et al.*, 2008). Setelah tekanan vakum bekerja sepenuhnya, di atas membran dihamparkan tanah urug, dengan sebelumnya diletakkan lapisan pasir halus lebih dulu guna melindungi membran dari tusukan-tusukan yang bisa membuat membran tersebut sobek atau berlubang. Setelah itu, urugan tanah untuk timbunan dihamparkan di atas lapisan pasir halus tersebut, (Kelly dan Wong, 2009).

Beberapa penelitian menunjukkan hasil yang baik penggunaan PVD dan *vacuum preloading* dalam perbaikan tanah lempung. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektifitas perbaikan tanah menggunakan PVD yang dikombinasikan dengan *vacuum preloading*.

## 2. METODE

Penelitian ini menggunakan *systematic literature review* dengan menggunakan metode PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analysis*) melalui tiga tahap, yaitu *identification*, *screening*, dan

*included*. Penelusuran literatur dilakukan dengan cara mengakses database secara *online* dari Crossref melalui aplikasi *Publish of Perish*.

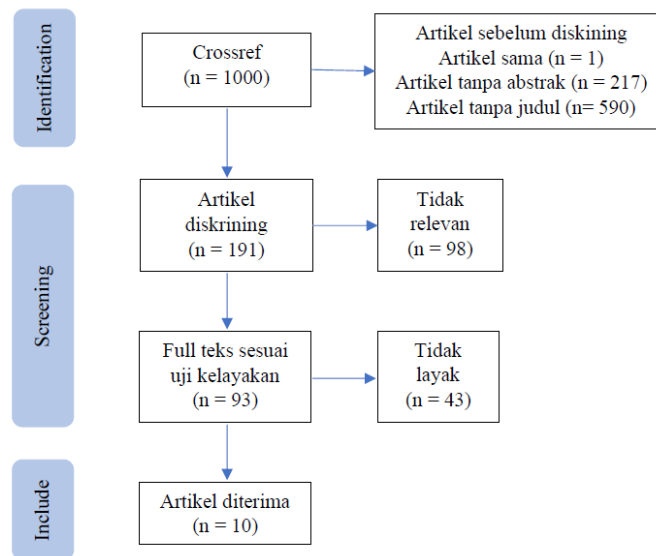
Pada awal pencarian dengan menggunakan keyword *prefabricated vertical drained, clay, dan vacuum preloading*. Kemudian dengan kriteria eksklusi periode publikasi dengan rentang tahun 2018 - 2024, dilakukan screening awal dengan mengeliminasi literatur yang mempunyai judul dan penulis yang sama, teks tanpa judul, dan teks tanpa abstrak. Pada tahap akhir dilakukan verifikasi dengan melihat kesesuaian topik dan kecukupan sampel dari daftar literatur.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Penelusuran literatur

Dari hasil penelusuran dengan *systematic literature review* diperoleh 1000 jurnal dan artikel dengan kata kunci *prefabricated vertical drained, clay, dan vacuum preloading*. Kemudian menggunakan menghapus jurnal yang mempunyai judul dan penulis yang sama (1), teks tanpa judul (590), dan teks tanpa abstrak (217) sehingga didapat 191 literatur.

Pada tahap akhir dilakukan penilaian dengan melihat kesesuaian judul dan kecukupan sampel. Penulis memperoleh 10 literatur dengan teks lengkap dan sesuai dengan kriteria yang ditetapkan, terdiri dari 3 literatur dalam bahasa Indonesia dan 7 literatur berbahasa inggris. Gambar 2 adalah alur penelusuran referensi.



Gambar 2. Alur *systematic literature review* dengan metode PRISMA

#### Telaah literatur

Perbaikan tanah lempung menggunakan kombinasi PVD dan *vacuum preloading* merupakan salah satu cara yang paling banyak digunakan untuk mempercepat proses konsolidasi dan memecahkan masalah stabilitas lereng akibat timbunan yang cukup tinggi. Tabel 1 menunjukkan beberapa hasil penelitian yang menjadi acuan dalam penelitian ini.

Tabel 1 Hasil temuan literatur

No	Nama Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian (Asal negara)	Tempat Penelitian, Metode, Besar Sampel, Instrumen	Hasil
1.	Iqbal, et.al., (2020)	<i>Case-Based Reasoning</i> Pemilihan Metode Konstruksi Jalan di Atas Tanah Bermasalah Kedalaman 10 Sampai	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ruas Jalan Tol Pematang - Batang</li> <li>• Metode <i>Case Based Reasoning</i></li> <li>• Tanah bermasalah dengan kedalaman 10</li> </ul>	Metode <i>Case-Based Reasoning</i> (CBR) adalah pendekatan awal dalam memilih metode konstruksi jalan di atas tanah bermasalah,

No	Nama Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian (Asal negara)	Tempat Penelitian, Metode, Besar Sampel, Instrumen	Hasil
		Dengan 20 Meter (Studi Kasus: Proyek Jalan Tol Pemalang-Batang) di Indonesia	<p>meter sampai dengan 20 meter</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Penentuan variabel dilakukan dengan kajian literatur dan melakukan wawancara kepada pakar. Sistem pengolahan data berbasis web dengan menggunakan bahasa pemrograman PHP dan database yang menggunakan MySQL. Data teknis didapat dari data sekunder proyek.</li> </ul>	memerlukan dukungan data teknis lainnya. CBR memberikan peringkat <i>similarity</i> hasil perhitungan, pada kasus ini dengan metode <i>vacuum preloading</i> PVD dan PHD dinilai paling efektif dengan kecocokan 97,74%.
2.	Mario, et.al., (2020)	Studi Parametrik Jarak Pengaruh Penurunan dan Pergerakan Lateral Akibat <i>Vacuum Preloading</i> pada <i>Damage Area</i> Sekitar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidak dilampirkan</li> <li>• <i>Cross Sectional</i></li> <li>• 5 data N-SPT tanah</li> <li>• Denah lokasi, elevasi rencana jalan, <i>cross section</i> jalan, dan beban rencana lalu lintas : data perencanaan <i>main road</i> Tol Semarang-Demak. Data hasil uji <i>Standard Penetration Test</i> (SPT), bor log, sifat fisik tanah, sifat teknis tanah: data tanah</li> </ul>	Jarak pengaruh penurunan akibat <i>vacuum preloading</i> terhadap area di luar batas lahan perbaikan pada kedalaman 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, dan 30 m berturut-turut yaitu 9,8 m, 15 m, 18 m, 33,5 m, 49 m, dan 69 m. Jarak pengaruh pergerakan lateral akibat <i>vacuum preloading</i> terhadap area di luar batas lahan perbaikan pada kedalaman 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, dan 30 m berturut-turut yaitu 9,5 m, 16 m, 28 m, 49,5 m, 63 m, dan 83 m.
3.	Deris, et.al., (2022)	Modifikasi Perbaikan Tanah Dasar Tol Semarang-Demak : Metode <i>Vacuum Preloading</i> dengan <i>Prefabricated Vertical Drain</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tol Semarang-Demak</li> <li>• <i>Cross Sectional</i></li> <li>• 65 titik (STA. 21 + 100 sampai STA. 22 + 350)</li> <li>• Korelasi data investigasi lapangan untuk mendapat parameter tanah. Pemodelan <i>vacuum preloading</i> dengan berbagai kedalaman menggunakan Program Elemen Hingga</li> </ul>	Penggunaan <i>Vacuum Preloading PVD</i> dapat mempercepat waktu konsolidasi 90% dimana semula secara alami diperkirakan selama 256 tahun menjadi hanya 16 minggu. Metode ini juga mengurangi tinggi timbunan tanah secara signifikan, misalnya di STA. 21+950 apabila dengan <i>soil preloading</i> tinggi timbunan mencapai 10,637 meter menjadi hanya setinggi 7,767 meter.
4.	Peng Wang, et.all., (2019)	<i>Deformation characteristics of soil between prefabricated vertical drains under vacuum preloading</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sampel daerah reklamasi di Zhejiang, Cina Selatan</li> <li>• <i>Laboratory model experiment</i></li> </ul>	Studi ini menyelidiki perpindahan lateral tanah antara PVD yang diinduksi oleh <i>vacuum preloading</i> . Hasil uji

No	Nama Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian (Asal negara)	Tempat Penelitian, Metode, Besar Sampel, Instrumen	Hasil
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Model kaca plexiglass yang dilapisi minyak silikon pada bagian dinding, dua PVD yang dipasang pada rangka baja berjarak 80 cm, partikel besi merah</li> </ul>	laboratorium menunjukkan bahwa tanah di antara PVD mengalami perpindahan lateral selama <i>vacuum preloading</i> , membentuk tumpukan tanah berbentuk 'V' di sekitar PVD. Perpindahan lateral tanah mencapai nilai maksimum di antara PVD dan titik tengahnya.
4.	Andryan, et.al., (2018)	<i>Effectiveness study of prefabricated vertical drain using vacuum preloading and surcharge preloading</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Banjarmasin - Kalimantan Selatan</li> <li><i>Cross Sectional</i></li> <li>65 titik (STA. 21 + 100 sampai STA. 22 + 350)</li> <li>Korelasi data investigasi lapangan untuk mendapat parameter tanah. Pemodelan <i>vacuum preloading</i> dengan metode Asaoka pada berbagai kedalaman menggunakan Program Elemen Hingga</li> </ul>	Berdasarkan analisis derajat konsolidasi menggunakan prediksi metode Asaoka diperoleh waktu konsolidasi dengan <i>vacuum preloading</i> untuk mencapai derajat konsolidasi 90% adalah 74% lebih efisien dibandingkan dengan preloading biasa.
5.	Bin Hua Xu, et. al., (2020)	<i>Experimental study on the clogging effect of dredged fill surrounding the PVD under vacuum preloading</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sampel daerah reklamasi Lianyungang, Provinsi Jiangsu, China</li> <li><i>Laboratory model experiment</i></li> <li>Soft clay dengan angka pori, kasar air, dan kandungan lempung tinggi</li> <li>Peralatan model yang digunakan terdiri dari 4 bagian yaitu sel uji, sistem pemisah air-gas, peralatan kontrol vakum, dan pengukuran data. Struktur mikro sampel tanah uji diselidiki sebelum percobaan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM)</li> </ul>	Zona penyumbatan terbentuk di sekitar PVD saat pemberian vacuum preloading. Batas zona penyumbatan kira-kira 0,2 - 0,4 dari radius batas. Zona penyumbatan terbentuk karena pergerakan keseluruhan tanah menuju PVD, bukan partikel halus yang migrasi. Hal ini dapat mempengaruhi konsolidasi
6.	Yuangqiang, et. al., (2018)	<i>A new approach of vacuum preloading with booster PVDs to improve deep marine clay strata</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sampel pada proyek pintu air Ouwei</li> <li><i>Cross sectional</i></li> <li>Ketebalan lapisan lempung 20 m.</li> <li>Instrumen berupa pemantauan untuk</li> </ul>	Teknologi vacuum preloading dengan booster lebih efektif untuk memperbaiki lapisan tanah liat laut dalam dibandingkan vacuum preloading

No	Nama Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian (Asal negara)	Tempat Penelitian, Metode, Besar Sampel, Instrumen	Hasil
			mengukur tekanan vakum, pori tekanan air, penurunan, dan perpindahan lateral.	konvensional. Hal ini karena pada air booster vacuum preloading diterapkan perbedaan tekanan tambahan antara tabung booster dan PVD sehingga dapat memitigasi terjadinya penyumbatan dan meningkatkan kapasitas drainase PVD. Selain itu, penerapan air booster vacuum preloading dapat meningkatkan derajat konsolidasi
7.	Shuangxi, et. al., (2022)	<i>Vacuum preloading combined with surcharge preloading method for consolidation of clay-slurry ground: A case study</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sampel reklamasi di Zhuhai, China</li> <li>• <i>Case based reasoning</i></li> <li>• Luasan daerah reklamasi 11.35 km<sup>2</sup> dengan ketebalan lempung 30 m.</li> <li>• Instrumen berupa pemantauan lapangan, uji lapangan, dan uji laboratorium untuk mengevaluasi efek perlakuan dengan analisis derajat vakum, penurunan permukaan tanah, penurunan lapisan, derajat konsolidasi, perpindahan lateral, disipasi tekanan air pori berlebih, dan kekuatan geser baling-baling</li> </ul>	Kombinasi <i>vacuum surcharge preloading</i> lebih efektif dibandingkan dengan vakum konvensional. Derajat vakum dengan preloading lebih rendah dibanding vakum biasa dan menurun seiring kedalaman. Derajat konsolidasi meningkat sebesar 40,9%, perpindahan lateral sebesar 2,4 kali, koefisien air pori kurang dari 0,6, dan kuat geser <i>undrained</i> diperkuat sebesar 22,2 %.
8.	Zhafirah, et.al., (2020)	<i>Comparative analysis of soft soil consolidation time due to improvement using prefabricated vertical drain</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jalan Tol Kayu Agung-Palembang-Betung, Provinsi Sumatera Selatan</li> <li>• <i>Cross sectional</i></li> <li>• Ketebalan lapisan lempung 12 m.</li> <li>• Instrumen berupa data parameter tanah, konfigurasi PVD, dan variasi jarak antar PVD.</li> </ul>	Konfigurasi segitiga memberikan waktu penyelesaian konsolidasi yang lebih cepat jika dibandingkan dengan dengan pola persegi panjang. Sedangkan semakin kecil jarak antar PVD, maka waktu konsolidasi akan semakin berkurang.
9.	Salma, et. al., (2022)	<i>Long Term Effect Stud on Soft Clay Kendal Treated by Prefabricated Vertical drain with vacuum</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kolam ikan area Kendal</li> <li>• <i>Cross sectional</i></li> <li>• Timbunan 1,5 m dari lempung</li> <li>• Instrumen berupa data parameter tanah, besarnya tekanan vakum yang digunakan yaitu 90</li> </ul>	Setelah vakum dihentikan, tanah lunak akan mengalami rebound akibat hilangnya tekanan beban vakum dalam tanah. Efek swelling akan terjadi seiring waktu jika

No	Nama Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian (Asal negara)	Tempat Penelitian, Metode, Besar Sampel, Instrumen	Hasil
			kPa.	beban tidak diberikan di atas tanah. Penurunan sekunder akan tetap terjadi tetapi dengan tingkat yang jauh lebih kecil
10	Chenhui, et. al., (2019)	<i>Consolidation effect of prefabricated vertical drains with different lengths for soft subsoil under vacuum preloading</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sampel daerah Oujiang Estuary</li> <li>• <i>Laboratory model experiment</i></li> <li>• Diameter 0,6 m dan tinggi 1,2 m</li> <li>• Instrumen yang digunakan diantaranya data parameter tanah, dua tabung, piezometer, dan PVD dengan panjang 0,6 m dan 1,6 m</li> </ul>	PVD yang lebih panjang dapat mempertahankan tinggi tekanan vakum di lapisan yang dangkal dibandingkan dengan PVD yang lebih pendek sehingga menyebabkan tekanan pori tanah lebih besar dan konsolidasi tanah lebih baik di elevasi yang sama.

Hasil kajian pustaka dari 10 jurnal tersebut menunjukkan bahwa pada hasil penilaian Iqbal, et.al (2020), didapatkan kombinasi PVD dan *vacuum preloading* dinilai paling efektif untuk mengatasi tanah bermasalah yang akan digunakan untuk konstruksi jalan dibandingkan dengan metode-metode perbaikan yang lain dengan nilai kecocokan sebesar 97,74%.

Penelitian yang dilakukan oleh Deris, et.al (2020), menyatakan bahwa penggunaan *vacuum preloading* dan PVD dapat mempercepat waktu konsolidasi 90% dimana waktu alami konsolidasi selama 256 tahun menjadi hanya 16 minggu. Dalam penelitian ini juga mengungkapkan bahwa penggunaan *vacuum preloading* dan PVD dapat mengurangi tinggi timbunan (*preloading*) dimana semula dibutuhkan 10,637 m menjadi hanya 7,676 m. Sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Andryan et.al (2020), pada ruas jalan Banjarmasin-Kalimantan Selatan menggunakan metode Asaoka diperoleh waktu konsolidasi dengan *vacuum preloading* akan lebih efisien hingga 74% dibanding dengan *preloading* biasa. Dalam penelitian lain yang dilakukan oleh Shuangxi, et.al (2022), memberikan alternatif kebutuhan konsolidasi yang lebih cepat dengan penambahan beban (*surcharge preloading*) dibanding dengan *vacuum preloading* konvensional. Dengan ditambahkannya *surcharge preloading* dan kombinasi *vacuum* terbukti derajat konsolidasi meningkat sebesar 40,9%, perpindahan lateral menjadi 2,4 kali, koefisien air pori kurang dari 0,6, dan kuat geser *undrained* diperkuat sebesar 22,2%.

Penggunaan PVD dalam penanganan tanah lempung dapat divariasikan baik dari segi konfigurasi atau pola, jarak antara PVD maupun panjang PVD. Hasil penelitian Zharifah et.al (2020), memberikan hasil bahwa konfigurasi segitiga memberikan waktu penyelesaian yang lebih cepat jika dibandingkan dengan pola persegi panjang. Sedangkan semakin kecil jarak antara PVD, maka waktu konsolidasi akan semakin berkurang. Penelitian Chenhui, et.al (2019), juga memberikan alternatif pemakaian PVD dengan perbandingan ukuran panjang. Dalam penelitian ini, Chenhui menyimpulkan bahwa PVD yang lebih panjang dapat mempertahankan tinggi tekanan vakum di lapisan yang dangkal dibandingkan dengan PVD yang lebih pendek sehingga menyebabkan tekanan pori tanah lebih besar dan konsolidasi tanah lebih baik di elevasi yang sama.

Hasil penelitian Mario, et.al (2020), menyimpulkan bahwa penggunaan *vacuum preloading* dan PVD dapat mengakibatkan penurunan tanah dan pergerakan lateral tanah di sekitar area penanganan. Sejalan dengan penelitian oleh Peng Wang et.al (2019), melalui eksperimental di laboratorium dapat disimpulkan bahwa tanah di antara PVD mengalami perpindahan lateral selama *vacuum preloading*, membentuk tumpukan tanah berbentuk 'V' di sekitar PVD. Perpindahan lateral tanah tersebut mencapai nilai maksimum di antara PVD dan titik tengahnya.

Meskipun pemakaian *vacuum preloading* dan PVD dinilai lebih efektif dibanding metode lain, tetapi dalam penelitian oleh Salma, et.al (2022), menyatakan bahwa setelah vakum dihentikan, tanah lunak akan mengalami *rebound* akibat hilangnya tekanan beban vakum dalam tanah, sehingga tanah mengembang jika tidak dibebani.

Penelitian lain oleh Bin Hua Xu, et.al (2020) menyatakan bahwa pori-pori di permukaan PVD mungkin adanya penyumbatan saat pemberian tekanan *vacuum*. Penyumbatan tersebut terbentuk karena pergerakan keseluruhan tanah menuju PVD, bukan partikel halus yang migrasi. Terbentuknya zona penyumbatan tersebut akan mengurangi efektifitas PVD karena mengganggu proses drainase. Menjawab kekurangan tersebut, Yuangqiang, et.al, dalam

penelitiannya mengusulkan penggunaan *air booster* pada *vacuum preloading* yaitu dengan menerapkan perbedaan tekanan tambahan antara tabung *booster* dan PVD sehingga dapat mengatasi sumbatan dan meningkatkan kapasitas drainase sehingga derajat konsolidasi juga semakin meningkat.

#### 4. KESIMPULAN

Dari semua literatur yang ditelaah pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa penggunaan metode *vacuum preloading* dengan PVD merupakan metode yang paling direkomendasikan untuk perbaikan tanah bermasalah termasuk lempung. Proses konsolidasi tanah lempung dengan metode PVD berlangsung singkat hanya memakan waktu beberapa bulan. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai konsolidasi singkat menggunakan metode ini dapat bervariasi tergantung pada beberapa faktor seperti konfigurasi PVD, kedalaman PVD, jarak antara PVD, dan tekanan vakum yang diterapkan. Penggunaan vakum juga dapat mengurangi tinggi timbunan yang diperlukan sehingga mengurangi risiko keruntuhan lereng timbunan. Hal ini juga dapat memberikan efisiensi biaya dan waktu karena pengurangan dalam jumlah bahan dan waktu konstruksi.

Namun, metode ini juga memiliki beberapa kelemahan diantaranya pori-pori pada permukaan PVD memungkinkan adanya penyumbatan. Area sekitar penangan juga mungkin mengalami dampak seperti penurunan dan pergeseran lateral tanah. Faktor lain yang juga menjadi pertimbangan bahwa pemasangan *vacuum preloading* dengan PVD memerlukan biaya awal yang cukup besar serta peralatan dan teknologi khusus.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. Niken Silmi Surjandari, S.T., M.T. atas bimbingan, saran, dan koreksi yang diberikan selama proses penelitian ini. Semoga hasil penelitian ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Bergado, D.T. *et al.* (2020) 'Microstructures within and outside the smear zones for soft clay improvement using PVD only, vacuum-PVD, thermo-PVD and thermo-vacuum-PVD', *Geotextiles and Geomembranes*, 48(6), pp. 828–843.
- Bhurtel, A., Salifu, E. and Siddiqua, S. (2024) 'Composite biomediated engineering approaches for improving problematic soils: Potentials and opportunities', *Science of The Total Environment*, 914, p. 169808.
- Cai, Y. *et al.* (2018) 'New approach of vacuum preloading with booster prefabricated vertical drains (pvds) to improve deep Marine Clay Strata', *Canadian Geotechnical Journal*, 55(10), pp. 1359–1371.
- Feng, S. *et al.* (2023) 'Vacuum preloading combined with surcharge preloading method for consolidation of clay-slurry ground: A case study', *Marine Georesources & Geotechnology*, 42(4), pp. 348–361.
- Iqbal, M. and Soekiman, A. (2020a) 'Case-based reasoning Pemilihan Metode Konstruksi Jalan di Atas Tanah Bermasalah Kedalaman 10 sampai dengan 20 meter', *Jurnal Infrastruktur*, 6(2), pp. 77–89.
- Kumarage, P.I. and Gnanendran, C.T. (2019a) 'Long-term performance predictions in ground improvements with vacuum assisted prefabricated vertical drains', *Geotextiles and Geomembranes*, 47(2), pp. 95–103.
- Lay, M.O., Sumarli, I. and Iskandar, A. (2020) 'Studi Parametrik Jarak Pengaruh Penurunan Dan Pergerakan lateral AKIBAT vacuum pre-loading pada damage area sekitar', *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 3(4), p. 1091. doi:10.24912/jmts.v3i4.8753.
- Lou, C. *et al.* (2019) 'Consolidation effect of prefabricated vertical drains with different lengths for soft subsoil under vacuum preloading', *Advances in Civil Engineering*, 2019, pp. 1–12.
- Ni, J. and Geng, X.-Y. (2022) 'Radial consolidation of prefabricated vertical drain-reinforced soft clays under cyclic loading', *Transportation Geotechnics*, 37, p. 100840.
- Ralindra, D.F. (2022) 'Modifikasi Perbaikan tanah dasar tol semarang–demak: Metode vacuum preloading dengan prefabricated vertical drain', *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 20(2), p. 163.
- Saowapakpiboon, J. *et al.* (2010) 'Measured and predicted performance of prefabricated vertical drains (pvds) with and without vacuum preloading', *Geotextiles and Geomembranes*, 28(1), pp. 1–11.
- Suhendra, A. *et al.* (2018a) 'Effectiveness study of prefabricated vertical drain using vacuum preloading and surcharge preloading', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 195, p. 012004.
- Tian, Y. *et al.* (2019) 'Analytical solutions for vacuum preloading consolidation with prefabricated vertical drain based on elliptical cylinder model', *Computers and Geotechnics*, 116, p. 103202.
- Wagner, J.F., 2013. Mechanical Properties of Clays and Clay minerals, *Developments in Clay Science*. Elsevier.
- Wang, P. *et al.* (2019) 'Deformation characteristics of soil between prefabricated vertical drains under vacuum preloading', *Geotextiles and Geomembranes*, 47(6), pp. 798–802.