

DISERTASI

**KINERJA METODE VAKUM KONSOLIDASI
PADA PERBAIKAN TANAH LUNAK**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan gelar Doktor Ilmu Teknik,
Bidang Ilmu Teknik Sipil



**RATNA DEWI
NIM . 03013682025014**

**PROGRAM STUDI ILMU TEKNIK
PROGRAM DOKTOR
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2024**

HALAMAN PERSETUJUAN

Dengan ini menyatakan bahwa disertasi Ratna Dewi yang berjudul "KINERJA METODE VAKUM KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH LUNAK" telah dipertahankan di hadapan sidang ujian tertutup Program Studi Ilmu Teknik Program Doktor, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya pada tanggal 29 Juli 2024.

Palembang, Juli 2024

Ditandatangani oleh Tim Penguji,

Ketua Tim Penguji:

Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T, M.T, IPM.
NIP. 197502112003121002

()

Anggota Tim Penguji:

1. Prof. Dr. Ir. Tommy Ilyas. M. Eng.
NIP. 195105051978021001

()

2. Dr. Ir. Imroatul Chalimah Juliana, ST., MT.
NIP. 197607112005012002

()

3. Dr. Ir. Saloma, ST., MT.
NIP. 197610312002122001

()

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T, M.T, IPM.
NIP. 197502112003121002

Koordinator Program Studi



Prof. Dr. Ir. Nukman, MT.
NIP. 195903211987031001

HALAMAN PENGESAHAN**KINERJA METODE VAKUM KONSOLIDASI
PADA PERBAIKAN TANAH LUNAK****LAPORAN DISERTASI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan gelar Doktor Ilmu Teknik,
Bidang Ilmu Teknik Sipil

Diusulkan oleh

RATNA DEWI
NIM . 03013682025014

Telah disetujui

Pada tanggal 2024

Promotor :

Prof. Dr. Ir. Anis Saggaf, MSCE, IPU, MKU, ASEAN-Eng, APEC-Eng
NIP. 196706151995121002

Ko-Promotor 1

Dr. Ir. Wiwik Rahayu, DEA
NIP. 196904211994032001

Ko-Promotor 2

Dr. Ir. Hanafiah, M.S
NIP. 195603141985031002

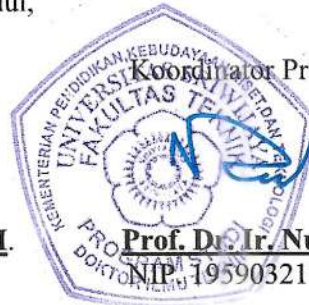
Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T, M.T, IPM.
NIP. 197502112003121002

Koordinator Program Studi



Prof. Dr. Ir. Nukman, MT.
NIP. 195903211987031001

Universitas Sriwijaya

Pernyataan Orisinalitas/Pernyataan Plagiarisme

Nama : Ratna Dewi
NIM : 03013682025014
Judul : Kinerja Metode Vakum Konsolidasi Pada Perbaikan Tanah Lunak

Dengan ini saya menyatakan keaslian disertasi ini. Disertasi ini dibimbing oleh seorang Promotor dan dua orang Ko-Promotor dan tidak melibatkan plagiarisme. Jika ditemukan adanya plagiarisme dalam disertasi ini, saya bersedia menerima sanksi akademik apapun sesuai dengan regulasi yang telah ditetapkan Universitas Sriwijaya atas konsekuensinya.

Palembang, Juli 2024



Ratna Dewi
NIM. 03013682025014

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah dan Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena atas berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan Laporan Disertasi yang berjudul “ Kinerja Metode Vakum Konsolidasi Pada Perbaikan Tanah Lunak”. Judul penelitian disertasi ini diambil karena untuk memberikan masukan dan atau pertimbangan pada semua pihak yang terlibat dalam upaya perbaikan tanah lunak dengan metode vakum konsolidasi untuk membangun konstruksi struktur dan infrastruktur. Penulisan Disertasi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Doktor Ilmu Teknik Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.

Penulis banyak mendapatkan bantuan dan dukungan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan Disertasi ini. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Anis Saggaf, MSCE, IPU, MKU, ASEAN-Eng, APEC-Eng, selaku Promotor yang telah memberikan masukan, bimbingan dan arahan dalam mengerjakan Disertasi ini.
2. Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T, M.T, IPM, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
3. Prof. Dr. Ir. Nukman, MT, selaku Ketua Program Studi Doktor Ilmu Teknik Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
4. Dr. Ir. Wiwik Rahayu, DEA, dan Dr. Ir. Hanafiah, M.S, selaku Ko-Promotor yang telah memberikan masukan, bimbingan dan arahan terhadap ide dari penelitian saya agar menjadi penelitian yang dapat menyumbangkan ide dalam bidang ilmu teknik sipil.
5. Prof. Dr. Ir. Tommy Ilyas. M. Eng (UI), dan Dr. Ir. Imroatul Chalimah Juliana, ST., MT., selaku penguji pada siding disertasi, terimakasih atas masukan dan arahan yang telah diberikan.
6. Dr. Ir. Saloma, ST., MT., selaku penguji pada siding disertasi dan Ketua Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya, terimakasih atas bantuan dan semangat yang diberikan dalam penyelesaian disertasi.
7. Adinda Yulia dan Yulinda, terimakasih atas dukungan dan doa nya.

8. Teman-teman BKU Sipil angkatan 2020/2021 Program Studi Doktor Ilmu Teknik, Bimo Barata, Mirka Pataras, Aztri Yuli dan Ika, terimakasih atas kebersamaan selama ini.
9. Seluruh Dosen Pengajar Program Studi Doktor Ilmu Teknik Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
10. Bapak/ibu dan teman-teman Dosen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya, terimakasih atas supportnya dan semangat yang telah diberikan.
11. Staff administrasi, Yuni dan Aang di Program Studi Doktor Ilmu Teknik Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
12. Terimakasih kepada mahasiswa bimbingan yang telah banyak membantu dalam pekerjaan di laboratorium: Aldi Herdian, Shinta Aprilia, Fitri Salsabila, M. Farhan, M. Iqbal Iwang Sadewa, Muhammad Reyhan, Jordan Patrick, Rizka Shafira, M. Naufal Aqil, Putri Hayatun Nufus dan Silmi Kaffa.
13. Terimakasih juga kepada Asisten dan teknisi laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
14. Terimakasih kepada Orangtua, Abdullah Yusuf dan Hj. Patariah (Palembang), Winhar Wanir dan Misoeresti (Bengkulu), serta saudara-saudara kandung dan saudara-saudara Ipar.

Disertasi ini saya persembahkan untuk suami tercinta, Hendriecktitolier, ST. dan anak-anak tersayang, Aisyah Nur Sapphira, Farsad Dzaky Achyar, Amirah Nailah Radeti. Terimakasih atas doa, cinta, kasih sayang dan pengorbanan waktu yang telah diberikan selama ini. Semoga laporan Disertasi ini dapat bermanfaat bagi mahasiswa pada Program Studi Doktor Ilmu Teknik Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya dan civitas akademika pada umumnya. Penulis menyadari adanya kekurangan dalam laporan Disertasi ini, sehingga semua saran dan kritik akan penulis terima dengan senang hati.

Palembang, 2024

Ratna Dewi

RINGKASAN

KINERJA METODE VAKUM KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH LUNAK

DISERTASI

Ratna Dewi, dibimbing oleh Promotor: Prof. Dr. Ir. Anis Saggaf, MSCE, IPU, MKU, ASEAN-Eng, APEC-Eng, Ko-Promotor I: Dr. Ir. Wiwik Rahayu, DEA, Ko-Promotor II: Dr. Ir. Hanafiah, M.S.

xi + 93 halaman, 14 Tabel, dan 57 Gambar

Kondisi tanah lunak yang sangat tidak mungkin bisa langsung digunakan untuk konstruksi apabila tidak ada perbaikan terlebih dahulu karena kompresibilitas yang tinggi akibat dari konsolidasi tanah yang merupakan pengaruh dari beban diatas tanah lunak. Metode perbaikan tanah lunak yang dilakukan untuk infrastruktur jalan tol yaitu dengan metode vakum konsolidasi. Karakteristik tanah lunak di ruas Tol Palindra sebagian besar termasuk dalam kategori tanah lempung lunak dengan ketebalan yang berbeda-beda. Kedalaman minimum sekitar 3,5m dan maksimum 23,5m. Sedangkan untuk kondisi ruas Tol PPKA dari kelima lokasi titik uji sebagian besar merupakan lahan gambut yang tebal, ketebalan tanah gambut bervariasi hingga > 7m. Kondisi lapisan gambut sangat lunak dengan klasifikasi *sapric peat* dan *high ash peat*.

Pemodelan vakum konsolidasi dilakukan pada kedua jenis tanah diatas. Kerapatan dan spesifik gravity tanah gambut lebih rendah dari tanah lempung, akan tetapi kadar air tanah gambut mencapai 7x lebih besar dari kadar air tanah lempung. Mikrostruktur tanah lempung menunjukkan bahwa masih terlihat macropori yang cukup jelas dengan ukuran sekitar $\pm 1\mu\text{m}$. Akan tetapi untuk mikrostruktur tanah gambut, masih terlihat serat-serat organik dan macropori jauh lebih besar dari tanah lempung. Sifat hidrolis tanah lempung baik arah vertikal maupun arah horizontal menunjukkan nilai 1000x lebih rendah dari tanah gambut. Begitupula sifat kompresibilitas tanah lempung didapatkan indeks kompresibilitas (C_c) dan angka pori jauh lebih rendah dari tanah gambut. Sedangkan untuk sifat mekanisnya, konsistensi kedua jenis tanah tersebut hampir sama yaitu termasuk konsistensi lunak – sangat lunak.

Perilaku sifat fisis tanah lempung setelah diperbaiki dengan metode vakum konsolidasi dilihat dari berkurangnya kadar air dimana yang di dekat PVD (16%) lebih tinggi dibanding yang lebih jauh dari PVD (12%) dan mendekati sama terhadap kedalaman sampel dari permukaan tanah. Sedangkan perubahan kadar air pada tanah gambut signifikan, terutama pada sampel yang jauh dari PVD dan semakin dalam sampel tanah kadar air semakin rendah, akan tetapi nilai kadar airnya masih diatas kadar air tanah lempung. Hal ini disebabkan karena

terperangkapnya air dalam micropori terutama dalam serat-serat organik yang tidak dapat dihisap sempurna oleh tekanan vakum. Pada tanah lempung ada fenomena migrasi butiran halus yang mendekati PVD akibat proses vakum yang ditandai dengan peningkatan persentase butiran lolos No. 200. Akibatnya, terjadi kepadatan lokal di dekat PVD dan peristiwa ini sangat mempengaruhi kinerja hisapan vakum pada tanah lempung. Ada keterkaitan analisa ini dengan mikrostruktur yang terbentuk, dimana mikrostruktur tanah lempung menunjukkan bahwa tidak terlihat lagi rongga-rongga kecil didekat PVD akan tetapi pada sampel dengan jarak 10cm dari PVD masih terlihat rongga-rongga kecil pipih dengan ukuran memanjang sekitar 0,1-0,5 μ m.

Permeabilitas tanah lempung dan tanah gambut terjadi penurunan yang disebabkan karena penghisapan air dengan pompa vakum menyebabkan terjadinya migrasi partikel tanah dimana peristiwa ini terkait dengan perubahan persentase tanah yang berbutir halus pada tanah lempung. Akan tetapi nilai permeabilitas tanah gambut setelah vakum masih dalam kondisi tanah yang mudah dilalui air. Hal ini selaras dengan hasil SEM, dimana pori-pori tanah masih terlihat jelas. Kondisi inilah yang menyebabkan tanah gambut masih dapat teraliri air jika tidak ada tindakan seperti membuat lapisan sealing/membran di pinggir tanah yang telah di vakum. Dan walaupun terjadi penurunan nilai Cc dan angka pori yang sangat signifikan, nilai Cc tersebut seperti nilai Cc tanah lempung sebelum diperbaiki, ini artinya masih terjadi penurunan yang merupakan efek long term settlement

Perilaku peningkatan kuat geser tanah lempung setelah diperbaiki hampir sama dengan perilaku tanah lempung. Akan tetapi nilai kuat geser tanah gambut setelah divakum masih terlihat rendah, hal ini yang menyebabkan masih terjadi penurunan pada tanah gambut setelah infrastruktur dibangun.

Persentase penurunan terhadap tinggi total terdapat perbedaan yang signifikan, total penurunan untuk tanah lempung sebesar 13,46mm dengan derajat konsolidasi sebesar 89,19%. Sedangkan untuk tanah gambut sebesar 39mm dan derajat konsolidasi sebesar 86,71%. Jika dibandingkan dengan hasil pemodelan numerik pada tanah lempung mendekati sama sebesar 14,8mm sedangkan untuk tanah gambut ada perbedaan penurunan yang signifikan yaitu sebesar 69,5mm. Berdasarkan hal tersebut, maka perlakuan pada tanah gambut dilanjutkan dengan penggunaan *soil preloading*. Kombinasi vakum konsolidasi dan *soil preloading* pada perbaikan tanah gambut tercapai penurunan total sebesar 65,36mm. Jika dibandingkan dengan hasil pemodelan dengan numerik penurunan total pada tanah gambut mendekati sama. Sehingga dalam perbaikan tanah dengan metode vakum konsolidasi yang perlu diperhatikan adalah: perilaku tanah yang akan diperbaiki, penggunaan lapisan sealing/membran serta kombinasi dengan *soil preloading*.

Keywords: Vakum konsolidasi, tanah lempung lunak, tanah gambut, penurunan tanah

Referensi: 52

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	6
1.3. Tujuan Penelitian.....	6
1.4. Ruang Lingkup Penelitian.....	6
1.5. Manfaat Penelitian.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1. Tanah Lunak.....	8
2.2. Konsolidasi.....	9
2.3. <i>Soil preloading</i> dengan <i>vertical drain</i>	11
2.4. <i>Prefabricated Vertical Drain</i>	14
2.5. Mekanisme Vakum Konsolidasi.....	16
2.6. Kombinasi <i>Vacuum Consolidation</i> dan <i>Soil preloading</i>	18
2.7. Keterbatasan Kinerja Vakum Konsolidasi.....	20
2.8. Metode Peningkatan Kinerja Vakum Konsolidasi.....	22
2.9. Lokasi Penelitian.....	24
2.10. Keterbaruan Hasil Penelitian Kinerja Vakum Konsolidasi pada jalan Tol.....	26
2.11. Teori Dasar Program Plaxis.....	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1. Studi Literatur.....	32
3.2. Pengumpulan Data.....	32
3.3. Pemodelan VCM skala laboratorium.....	32
3.4. Pemodelan Numerik.....	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	43
4.1. Karakteristik Tanah di Lokasi Tol Sumatera.....	43
4.1.1. Kondisi Tanah di Lokasi Ruas Tol Palindra.....	43
4.1.2. Kondisi Tanah di Lokasi Ruas Tol PPKA.....	44

4.2. Karakteristik Sampel Tanah Sebelum Vakum	47
4.2.1. <i>Soil Properties</i> Tanah Sebelum Vakum.....	47
4.2.2. Sifat Hidrolis dan Kompresibilitas Tanah Sebelum Vakum.....	50
4.2.3. Sifat Mekanis Tanah Sebelum Vakum	52
4.3. Hasil Pemodelan Numerik.....	52
4.4. Hasil Monitoring Proses Vakum Konsolidasi	54
4.4.1. Penurunan permukaan tanah	54
4.4.2. Tekanan air pori.	58
4.5. <i>Soil Properties</i> Tanah Setelah Vakum	60
4.5.1. Kadar air dan distribusi ukuran butiran	60
4.5.2. Mikrostruktur tanah	62
4.6. Sifat Hidrolis dan Kompresibilitas Tanah Setelah Vakum.....	64
4.7. Sifat Mekanis Tanah Setelah Vakum	67
4.8. Kondisi Tanah Setelah <i>Soil Preloading</i>	69
4.9. Pembahasan	71
4.9.1. <i>Soil properties</i> tanah	72
4.9.2. Sifat hidrolis dan kompresibilitas tanah.....	75
4.9.3. Sifat mekanis tanah.....	81
4.9.4. Penurunan permukaan tanah	82
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	89
5.1. Kesimpulan.....	89
5.2. Saran	91
DAFTAR PUSTAKA	92

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1. Metode Peningkatan kinerja vakum konsolidasi	3
Tabel 3.1. Input data pada program plaxis	42
Tabel 4. 1. Hasil uji vane shear	46
Tabel 4. 2. Hasil uji properties tanah pada lokasi ruas Tol PPKA	46
Tabel 4. 3. Soil propertis tanah	48
Tabel 4. 4. Parameter hidrolis dan kompresibilitas tanah sebelum divakum	50
Tabel 4. 5. Kadar air dan distribusi persentase lolos tanah lempung setelah diperbaiki.....	61
Tabel 4. 6. Kadar air dan distribusi butiran tanah gambut setelah diperbaiki.....	61
Tabel 4. 7. Permeabilitas tanah setelah diperbaiki	64
Tabel 4. 8. Rasio permeabilitas tanah setelah diperbaiki	65
Tabel 4. 9. Parameter konsolidasi tanah (C_c dan C_v) setelah diperbaiki.....	66
Tabel 4.10. Parameter konsolidasi tanah (e_0 dan C_α) setelah diperbaiki.....	67
Tabel 4.11. Nilai kuat geser tanah lempung setelah diperbaiki	68
Tabel 4.12. Nilai kuat geser tanah gambut setelah diperbaiki	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Efek dari beban tambahan pada kecepatan dan besar penurunan (Nicholson, 2015)	11
Gambar 2. 2. Kurva penurunan yang terjadi dengan dan tanpa vertikal drain (Nicholson, 2015)	13
Gambar 2. 3. Analog pegas dari proses konsolidasi (a) dengan beban tambahan; (b) di bawah beban vakum.(Chu et al., 2016).....	17
Gambar 2. 4. Gabungan urutan penerapan vakum dan beban timbunan, dan penurunan tanah pada proyek perbaikan tanah (Chu et al., 2016).....	19
Gambar 2. 5. Ilustrasi prinsip meminimalkan perpindahan lateral dengan kombinasi pembebanan tanggul dengan tekanan vakum (jichun chai, 2011)	19
Gambar 2. 6. General Layout Tol Palindra (PT. Geotekindo)	24
Gambar 2. 7. Ruas Tol Pematang Panggang – Kayu Agung	25
Gambar 2. 8. Ruas Tol Pematang Panggang – Kayu Agung dalam peta sebaran gambut di Kab. OKI.....	25
Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian	31
Gambar 3. 2. Diagram Alir Pemodelan VCM di laboratorium.....	33
Gambar 3. 3. Lokasi Pengambilan sampel tanah tak terganggu, (a) lokasi bahu jalan Tol Palindra. (b) lokasi dekat Tol PPKA	34
Gambar 3. 4. Bak untuk sampel tanah yang mewakili kondisi lapangan	35
Gambar 3. 5. PVD dan membran	36
Gambar 3. 6. Berbagai alat ukur yang digunakan	37
Gambar 3. 7. Proses Penjenuhan Tanah.....	37
Gambar 3. 8. Pemasangan PVD dan PHD	38
Gambar 3. 9. Bak uji dan sampel tanah beserta alat uji	39
Gambar 3.10. Potongan melintang bak uji dan sampel tanah beserta alat uji.....	40
Gambar 3.11. Ilustrasi Pengambilan Sampel Tanah dengan Jarak 5cm dan 10cm dari PVD	41
Gambar 4. 1. Lokasi titik pengujian di ruas Tol Palindra	43
Gambar 4. 2. Kondisi lapisan tanah di ruas Tol Palindra.....	43
Gambar 4. 3. Peta sebaran tanah gambut di kabupaten OKI	44
Gambar 4. 4. Lokasi Pengambilan sampel tanah	45
Gambar 4. 5. Kedalaman tanah gambut hasil pengeboran manual	45
Gambar 4. 6. Struktur tanah lempung (Hasil SEM) sebelum diperbaiki	49
Gambar 4. 7. Struktur tanah gambut sebelum diperbaiki orientasi vertical.....	49
Gambar 4. 8. Struktur tanah gambut sebelum diperbaiki orientasi horizontal.....	49
Gambar 4. 9. Garfik e-log p hasil pengujian konsolidasi tanah lempung.....	51
Gambar 4.10. Garfik e-log p hasil pengujian konsolidasi tanah gambut.....	51
Gambar 4.11. Kondisi tekanan air pori setelah proses vakum pada tanah lempung.	53
Gambar 4.12. Kondisi tekanan air pori setelah proses vakum pada tanah gambut.	53

Gambar 4.13. Output pemodelan vakum konsolidasi secara numerik pada tanah gambut dan tanah lempung	54
Gambar 4.14. Grafik hasil pengamatan dial penurunan (mm) tanah lempung terhadap waktu (jam) pada setaip dial pembacaan.....	55
Gambar 4.15. Grafik hubungan penurunan (mm) tanah lempung dengan waktu (jam) hasil pengamatan dial penurunan rata-rata.....	56
Gambar 4.16. Kondisi pemasangan membran pada model vakum.....	57
Gambar 4.17. Grafik hubungan settlement (mm) tanah gambut dengan waktu (jam)	57
Gambar 4.18. Grafik hubungan antara tekanan air pori tanah lempung terhadap waktu dengan tekanan vakum 70kPa.....	59
Gambar 4.19. Grafik hubungan antara tekanan air pori tanah gambut terhadap waktu dengan tekanan vakum 70kPa.....	59
Gambar 4.20. Hasil SEM tanah lempung setelah diperbaiki	62
Gambar 4. 21. Hasil SEM tanah gambut orientasi vertikal setelah diperbaiki	63
Gambar 4. 22. Hasil SEM tanah gambut orientasi horizontal setelah diperbaiki .	63
Gambar 4. 23. Settlement tanah yang terjadi saat pemberian <i>soil preloading</i>	69
Gambar 4. 24. Settlement total yang terjadi pada tanah gambut	70
Gambar 4.25. Grafik <i>soil properties</i> tanah lempung dan gambut.....	72
Gambar 4. 26. Pengamatan kadar air sebelum dan setelah divakum (a) tanah lempung dan (b) tanah gambut	73
Gambar 4. 27. Perubahan persentase lolos No. 40 dan 200 setelah di vakum (a) tanah lempung dan (b) tanah gambut.....	74
Gambar 4.28. Perubahan nilai permeabilitas setelah di vakum (a) tanah lempung dan (b) tanah gambut	76
Gambar 4. 29. Nilai C_c tanah lempung dan tanah gambut setelah diperbaiki	77
Gambar 4. 30. Nilai C_v tanah setelah diperbaiki (a) tanah lempung (b) tanah gambut	79
Gambar 4. 31. Nilai e_0 tanah lempung dan tanah gambut setelah diperbaiki	80
Gambar 4. 32. Nilai C_α tanah gambut setelah diperbaiki.	80
Gambar 4.33. Kuat Geser tanah lempung (a) dan tanah gambut (b) setelah diperbaiki dengan VCM.....	82
Gambar 4. 34. Persentase penurunan tanah setelah divakum.	83
Gambar 4. 35. Grafik untuk penentuan derajat konsolidasi metode Asaoka tanah lempung.....	83
Gambar 4. 36. Grafik untuk penentuan derajat konsolidasi metode Asaoka tanah gambut.....	85
Gambar 4. 37. Grafik hubungan persentase penurunan tanah dengan waktu (jam) hasil pemodelan numerik dan pengamatan dial penurunan	86
Gambar 4. 38. Persentase penurunan total tanah gambut hasil pemodelan dalam bak uji dan pemodelan numerik.....	87

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pengembangan kawasan pemukiman pada *problematic soil (soft soil)* menjadi perhatian khusus bagi ahli geoteknik. Hal ini karena terkait dengan kondisi tanah lunak yang sangat tidak mungkin bisa langsung digunakan untuk konstruksi apabila tidak ada perbaikan terlebih dahulu dimana banyak permasalahan yang ditimbulkan. Permasalahan tersebut diantaranya adalah muka air tanah yang tinggi, daya dukung tanah yang rendah, kompresibilitas yang tinggi akibat dari konsolidasi tanah. Perbaikan dilakukan bertujuan untuk meningkatkan kualitas dan daya dukung dari tanah yang dapat menyebabkan penurunan yang terlalu besar pada konstruksi di atasnya.

Permasalahan utama pada tanah lunak adalah air karena kompresibilitas yang tinggi disebabkan oleh pengaliran air yang “keluar” akibat terjadinya *excess pore water pressure* yang merupakan pengaruh dari beban di atas tanah lunak. Fenomena ini disebut peristiwa konsolidasi dimana akan berlangsung lama. Penggunaan *soil preloading* untuk mengurangi penurunan setelah konstruksi dibangun terbukti memberikan hasil yang memuaskan. Bahan yang digunakan dapat berupa timbunan tanah atau batu, air atau material lainnya yang mudah dipindahkan dan tersedia. Setelah penurunan selesai, beban timbunan dilepas dan pembangunan struktur dapat dimulai. Akan tetapi kekurangan metode ini adalah waktu yang diperlukan untuk penyelesaian settlement akibat konsolidasi membutuhkan waktu yang sangat lama, sehingga metode ini dikombinasikan dengan vertikal drain untuk mempercepat proses konsolidasi (Vyas & Shah, 2020).

Penggunaan *soil preloading* dengan *vertical drain* ini juga masih ada kendala yaitu penggunaan area yang luas yang memerlukan material timbunan yang banyak, dapat terjadi ketidakstabilan lereng timbunan atau terjadi kelongsoran pada lereng timbunan, serta terjadi pergerakan arah horizontal yang cukup besar (Apriadi et al.,

2019). Namun, permasalahan tersebut dapat diatasi dengan *vacuum consolidation method*.

Vakum konsolidasi pertama kali diusulkan oleh Kjellman (Kjellman, 1952). Teknik ini mengkonsolidasikan tanah lunak dengan mengurangi tekanan air pori sambil mempertahankan tegangan total tetap konstan. Pengaruh vakum preloading setara dengan penerapan beban tambahan, yang dilakukan pada tahap awal proyek pembangunan konstruksi sehingga sewaktu dipakai tidak terjadi penurunan yang melewati batas toleransi. Tekanan vakum yang diterapkan sekitar 80 kPa.

Sejumlah penelitian tentang penggunaan vakum konsolidasi dalam proyek reklamasi lahan dan perbaikan tanah lunak telah dipublikasikan dalam beberapa dekade terakhir dan berkembang menjadi solusi yang layak dan lebih hemat biaya untuk proyek perbaikan tanah. Hal ini disebabkan tekanan vakum lebih efektif dari beban timbunan dalam mengurangi kadar air dan meningkatkan besarnya penurunan akhir konsolidasi dimana besarnya meningkat dengan meningkatnya tekanan vakum (Basha et al., 2015), waktu konsolidasi tanah juga lebih cepat dibandingkan dengan konvensional PVD (Krishnapriya et al., 2016).

Beberapa proyek yang menerapkan vakum konsolidasi untuk perbaikan tanah lunak antara lain: Tianjin New Harbour, China dengan luas perbaikan 1250m², dan Northeast New Railway, China (Qian et al., 1992), Ballina Bypass, Australia (Indraratna et al., 2010), Southern Expressway near Colombo, Sri Lanka (Karunawardena & Toki, 2014), Highway Project in Vietnam, (Seah et al., 2016). Di Indonesia, vakum konsolidasi telah diterapkan pada Proyek Pembangunan Summarecon City Area Bandung. Proyek ini berlokasi di Gedebage, Bandung dan dibangun di atas tanah yang dominan campuran lempung lunak dengan tanah organik (Wahyu & Mochtar, 2019), proyek perumahan di Kosambi City, Tangerang (Sastilaya & Sentosa, 2021), proyek perpanjangan runway Sultan Thaha Syaifuddin, Riau (Ahsan et al., 2021).

Namun, ada beberapa keterbatasan metode vakum konsolidasi yaitu: (1) waktu konsolidasi relatif lama untuk lempung lunak yang dalam karena permeabilitasnya

yang rendah, dan (2) tekanan vakum menurun dengan kedalaman yang menyebabkan hasilnya tidak memuaskan untuk tanah lunak yang lebih dalam (Chai et al., 2006). Akibat tekanan vakum dan aliran air, partikel tanah yang halus secara bertahap bermigrasi ke sekitar pipa PVD, membentuk lapisan permeabilitas yang rendah di dekat pipa drainase. Proses ini mengurangi tekanan vakum pada tanah, menyebabkan penyumbatan pipa drainase dan penurunan kapasitas drainase. Fenomena ini disebut dengan “*clogging*” yang terjadi di dekat PVD; daerah ini juga disebut zona *clogging*/penyumbatan dan dicirikan oleh kepadatan lokal dan permeabilitas yang rendah (Lei et al., 2017), (J. Wang et al., 2018), (Xu et al., 2020). *Clogging* menyebabkan kualitas perbaikan yang buruk dan hampir tidak ada konsolidasi tanah di luar zona.

Di sisi lain, karena efek temporal dan spasial dari transfer vakum suction pada ruang pori tanah dapat menyebabkan penurunan massa tanah yang tidak merata (Zhu et al., 2018). Permasalahan pasca vakum konsolidasi dengan PVD yang diterapkan juga terjadi pada pembangunan jalan Tol Palindra dan Pematang Panggang – Kayu Agung di Sumatera Selatan yang menggunakan vakum konsolidasi, terdapat lubang dan jalan bergelombang di beberapa titik (Supriyadi, 2019)

Beberapa penelitian berfokus pada pemecahan masalah-masalah untuk meningkatkan efisiensi metode vakum konsolidasi seperti terlihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 1. 1. Metode Peningkatan kinerja vakum konsolidasi

No.	Metode	Project	Referensi
1.	<i>Combined vacuum and surcharge preloading method (CV-SPM)</i> Keterbatasan tekanan vakum tidak bisa melebihi 1atm, sehingga diterapkan kombinasi timbunan tanah dan vakum ketika kebutuhan daya dukung lebih tinggi.	Yangtze River floodplain Proyek Reklamasi yang berlokasi diantara Fisherman Island dan muara Brisbane River Embankment widening project in Lianyungang, China	(Ding et al., 2019) (Indraratna et al., 2019) (Wu et al., 2020)

No.	Metode	Project	Referensi
2.	<i>A two-stage vacuum preloading method</i>	the Wenzhou land reclamation site in China	(J. Wang et al., 2018)
3.	<i>Step Vacuum Preloading</i> (5 stages : 10, 20,40,60, dan 80kPa) dapat mengurangi perpindahan horizontal partikel halus dan dapat menghindari clogging pipa drainase.	Reklamasi Binhai New Area, Tianjin, China	(Li et al., 2020)
4.	<i>Combined Vacuum Preloading with Pneumatic Fracturing (VPF) Method</i> Udara bertekanan tinggi disuntikkan ke dalam tanah sebelum dan selama tekanan vakum diberikan, yang menyebabkan keretakan pneumatik. Rekahan ini dapat meningkatkan permeabilitas massa tanah lunak secara signifikan dan mempercepat disipasi tekanan air pori. Metode VPF dapat mengurangi waktu konsolidasi dan meningkatkan efisiensi perbaikan lapisan tanah lunak yang dalam.	Proyek perbaikan jalan raya di Provinsi Jiangsu, Tiongkok	(Songyu et al., 2016)
5.	<i>A pressurizing system dan an improved vacuum system method</i> Metode <i>an improved vacuum system</i> menggunkan PVD terintegrasi dan konektor kedap udara baru untuk menghubungkan PVD langsung ke pipa vakum. <i>A pressurizing system/sistem</i> bertekanan meningkatkan proses konsolidasi ketika laju konsolidasi dengan vakum melambat	Laboratory test	(J. Wang, Cai, et al., 2016)
6.	<i>Electroosmosis-vacuum preloading</i> Teknik elektroosmosis diterapkan hanya pada tahap akhir konsolidasi vakum, dimana pada saat disipasi tekanan air pori berlebih dan percepatan penurunan menjadi lambat	Laboratory test	(J. Wang, Ma, et al., 2016)
7.	<i>Vacuum preloading combined with variable-spacing electro-osmosis (EO)</i> bermanfaat dalam menghilangkan tekanan air pori dan meningkatkan keseragaman konsolidasi tanah.	Laboratory test Laboratory dan numerik	(Fu et al., 2016) (Zhou & Deng, 2019)
8.	<i>Vacuum preloading combined with multiple-flocculant treatment</i> Sebelum vacuum diterapkan, penambahan kapur dan Anionic Polyacrylamide/APAM (multiple-flocculant) dalam jumlah tertentu pada tanah membuat partikel kecil membentuk massa yang lebih besar yaitu berflokulasi, sehingga meningkatkan angka pori dan permeabilitas. Hal ini mengakibatkan terbentuknya tanah alami baru yang lebih mudah dikonsolidasikan dengan vakum konsolidasi.	Laboratory test	(J. Wang et al., 2019)

No.	Metode	Project	Referensi
9.	Kombinasi Additif dan Electroosmosis pada vakum konsolidasi	Laboratory test	(Hu et al., 2020)
10.	<i>Stepped vacuum preloading combined with stepped voltage electro-osmosis (SVP-SVEO)</i> Secara efektif mengurangi penyumbatan PVD dan meningkatkan keseragaman konsolidasi tanah	Laboratory test	(F. Liu et al., 2020)
11.	<i>Air booster vacuum preloading (AVP) with pressurizing timing</i>	Laboratory test	(Anda et al., 2020)
12.	<i>Winged PVD (WPVD)</i> PVD baru menggunakan sayap yang sejajar dan tegak lurus dengan permukaan PVD Sayap meningkatkan area kontak WPVD dengan tanah dan berfungsi sebagai saluran drainase horizontal dan dapat mengurangi efek <i>clogging</i>	Laboratory test	(Fu & Chai, 2020)

Pada tabel diatas menyajikan metode-metode untuk penyelesaian permasalahan yang terjadi pada vakum konsolidasi yang diterapkan pada tanah lempung lunak / urukan untuk reklamasi pantai. Sedangkan karakteristik tanah di daerah ruas Tol di Sumatera Selatan selain berupa tanah lempung lunak, juga sebagian besar berupa tanah lempung organik dan gambut. Hal ini menjadi hipotesa apakah kerusakan jalan yang terjadi akibat dari kinerja vakum yang terhambat oleh adanya material halus dan organik pada tanah yang dapat menyebabkan “*clogging*”.

Berdasarkan hal tersebut diatas, maka dalam disertasi ini akan dilakukan penelitian kinerja vakum konsolidasi pasca konstruksi jalan tol. Kinerja vakum konsolidasi yang akan diteliti, didasarkan pada parameter: kecepatan dan besarnya penurunan konsolidasi yang terjadi, permeabilitas arah vertikal dan arah horizontal tanah di dalam dan di luar *smear zone*, parameter konsolidasi serta kuat geser tanah sebelum dan setelah tanah divakum, serta analisa kinerja vakum pada tanah lempung lunak dan pada tanah lempung organik.

Kinerja vakum konsolidasi akan diteliti dengan pemodelan skala laboratorium dan pemodelan secara numerik, serta meninjau kondisi tanah di lapangan sebelum dan setelah diberlakukan vakum konsolidasi.

1.2. Rumusan Masalah

Perumusan masalah penelitian adalah:

1. Bagaimana kondisi sebaran tanah lunak di Sumatera Selatan, khususnya dilewati jalan Tol Palindra dan Tol Pematang Panggang-Kayu Agung (PPKA).
2. Bagaimana karakteristik fisis, hidrolis dan mekanis tanah lunak sebelum dan setelah dilakukan perbaikan tanah dengan sistem vakum konsolidasi.
3. Bagaimana perilaku penurunan tanah lunak dengan sistem vakum konsolidasi dalam pemodelan skala laboratorium dan numerik.
4. Bagaimana penurunan tanah kombinasi vakum konsolidasi dan *soil preloading*.

1.3. Tujuan Penelitian

Maksud penelitian yang dilakukan adalah dapat menganalisis kinerja dari metode vakum konsolidasi dalam peningkatan daya dukung sebagai perbaikan tanah lunak.

Tujuan penelitian antara lain:

1. Mengidentifikasi sebaran tanah lunak di Sumatera Selatan, khususnya yang dilewati jalan Tol Palindra dan Tol Pematang Panggang-Kayu Agung (PPKA).
2. Menganalisis karakteristik fisis, hidrolis dan mekanis tanah lunak sebelum dan setelah dilakukan perbaikan tanah dengan sistem vakum konsolidasi.
3. Menganalisis perilaku penurunan tanah lunak dengan sistem vakum konsolidasi dalam pemodelan skala laboratorium dan numerik.
4. Menganalisis penurunan tanah kombinasi vakum konsolidasi dan *soil preloading*.

1.4. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan berfokus pada sifat fisis dan mekanis tanah lunak sebelum dan setelah dilakukan perbaikan dengan menggunakan metode vakum konsolidasi. Berdasarkan hal tersebut, batasan-batasan dalam analisis penelitian adalah sebagai berikut:

1. Sampel tanah lunak yang diteliti dilakukan pada sekitar ruas jalan Tol Palindra dan Tol Pematang Panggang Kayu Agung.

2. Identifikasi indeks properties tanah sebelum dan setelah dilakukan pemodelan vakum konsolidasi baik pada tanah lempung lunak maupun pada tanah lempung organik/gambut antara lain: kadar air, kerapatan, *specific gravity*, dan analisa distribusi tanah.
3. Pengamatan microstruktur sampel tanah dengan *Scanning Electron Micrograph* disingkat SEM sebelum dan setelah dilakukan vakum konsolidasi
4. Evaluasi permeabilitas tanah arah vertikal dan horizontal sebelum dan setelah dilakukan vakum konsolidasi.
5. Evaluasi parameter konsolidasi sebelum dan setelah dilakukan vakum konsolidasi.
6. Evaluasi kuat geser vane shear sebelum dan setelah dilakukan vakum konsolidasi.
7. Analisis penurunan tanah gambut kombinasi vakum konsolidasi dan *soil preloading*.
8. Analisis kinerja vakum konsolidasi dengan pemodelan numerik dengan metode finite elemen.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian yang dilakukan ditujukan agar mendapatkan temuan baru untuk peningkatan kinerja vakum konsolidasi yang diharapkan dapat menjadi bahan masukan dan atau pertimbangan pada perbaikan tanah lunak untuk membangun konstruksi struktur dan infrastruktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahsan, A. D., Yanti, G., & Megasari, S. W. (2021). Analisis Penurunan Tanah Menggunakan Metode Vacuum Consolidation Dengan Variasi Jarak Pemasangan Pvd. *Konstruksia*, 13(1), 54–68. <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/konstruksia/article/view/10072>
- Alaska Department of Transportation and Public Facilities. (2007). *Alaska Guide to Description and Classification of Peat and Organic Soil* (pp. 1–9). Alaska Department of Transportation and Public Facilities.
- Anda, R., Fu, H., Wang, J., Lei, H., Hu, X., Ye, Q., Cai, Y., & Xie, Z. (2020). Effects of pressurizing timing on air booster vacuum consolidation of dredged slurry. *Geotextiles and Geomembranes*. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.02.007>
- Apriadi, D., Barnessa, R. A., & Marsa, N. A. I. (2019). Finite Element Study of Vacuum Preloading and Prefabricated Vertical Drains Behavior for Soft Soil Improvement. *Jurnal Teknik Sipil*, 26(3), 189–194.
- ASTM. (2013). D 4427 – 13 : Standard Classification of Peat Samples by Laboratory Testing. In *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM International.
- Barron, R. A., Lane, K. S., Keene, P., Kjellman, W., & Barron, R. A. (2002). Consolidation of fine-grained soils by drain wells. *Geotechnical Special Publication*.
- Basha, A., Sakr, M. A. ., & Nimr, A. AL. (2015). An Experimental Study For The Effect of Vacuum Preloading on Soft Soil Improvement. *The Eighth Alexandria International Conference on Structural and Geotechnical Engineering (Aicsge8)*, September.
- Carrillo, N. (1942). Simple Two and Three Dimensional Case in the Theory of Consolidation of Soils. *Journal of Mathematics and Physics*. <https://doi.org/10.1002/sapm19422111>
- Chai, J. C., Carter, J. P., & Hayashi, S. (2006). Vacuum consolidation and its combination with embankment loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(10), 985–996. <https://doi.org/10.1139/T06-056>
- Chu, J., Yan, S., & Guo, W. (2016). Vacuum preloading methods: An update.

Geotechnical Engineering.

- Chu, J., & Yan, S. W. (2005). Chapter 3 Application of the vacuum preloading method in soil improvement projects. In *Elsevier Geo-Engineering Book Series* (Vol. 3, Issue C, pp. 91–117). [https://doi.org/10.1016/S1571-9960\(05\)80006-0](https://doi.org/10.1016/S1571-9960(05)80006-0)
- Ding, J., Wan, X., Zhang, C., He, Z., & Zhao, L. (2019). Case Study: Ground Improvement of Yangtze River Floodplain Soils with Combined Vacuum and Surcharge Preloading Method. *International Journal of Geomechanics*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001516](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001516)
- Fu, H., Cai, Y., Wang, J., & Wang, P. (2016). Experimental study on the combined application of vacuum preloading – variable-spacing electro-osmosis to soft ground improvement. *Geosynthetics International*, 24(1), 72–81. <https://doi.org/10.1680/jgein.16.00016>
- Fu, H. tao, & Chai, J. chun. (2020). Performance of a winged PVD (WPVD) for vacuum consolidation of soft clayey deposits. *Transportation Geotechnics*. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100370>
- Hansbo, S. (1979). Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains Consolidation de Sols a Grains Fins a l' Aide de Drains Prefabriques. *Proc of the 10th ICSMFE*.
- Hayashi, H., Hatakeyama, O., & Hashimoto, H. (2021). Reducing the secondary consolidation of peat ground using vacuum consolidation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 174(3), 173–184.
- Hu, J., Li, X., Zhang, D., Wang, J., Hu, X., & Cai, Y. (2020). Experimental Study on the Effect of Additives on Drainage Consolidation in Vacuum Preloading Combined with Electroosmosis. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1–11.
- Huat, B. B. K., Kazemian, S., Prasad, A., & Barghchi, M. (2011). A study of the compressibility behavior of peat stabilized by DMM: Lab model and FE analysis. *Scientific Research and Essays*, 6(1), 196–204. <https://doi.org/10.5897/SRE10.790>
- Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Baral, P., & Ameratunga, J. (2019). Performance of marine clay stabilised with vacuum pressure: Based on Queensland experience. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical*

- Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.11.002>
- jichun chai, john p. carter. (2011). *Deformation Analysis in Soft Ground Improvement*. Springer Dordrecht Heidelberg London New York.
- Karunawardena, A., & Toki, M. (2014). Performance of Highway Embankments Constructed Over Sri Lankan Peaty Soils. *International Journal of Integrated Engineering*, 6(2), 75–83.
- Kjellman, W. (1952). Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure. *Proceedings on Soil Stabilization Conference*, 258–263.
- Krishnapriya, P. B., Sandeep, M. N., & Antony, J. (2016). Efficiency of Vacuum Preloading on Consolidation Behaviour of Cochin Marine Clay. *Procedia Technology*, 24, 256–262.
- Lei, H., Lu, H., Liu, J., & Zheng, G. (2017). Experimental study of the clogging of dredger fills under vacuum preloading. *International Journal of Geomechanics*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001028](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001028)
- Li, J., Chen, H., Yuan, X., & Shan, W. (2020). Analysis of the effectiveness of the step vacuum preloading method: A case study on high clay content dredger fill in Tianjin, China. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/JMSE8010038>
- Liu, F., Li, Z., Yuan, G., Hu, X., Zhang, D., Du, Y., & Gou, C. (2020). Improvement of dredger fill by stepped vacuum preloading combined with stepped voltage electro-osmosis. *Marine Georesources and Geotechnology*. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1766606>
- Liu, S., Cai, Y., Sun, H., Geng, X., Shi, L., & Pan, X. (2021). Consolidation Considering Clogging Effect under Uneven Strain Assumption. *International Journal of Geomechanics*. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001898](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001898)
- MacFarlane, I. C. (1968). Physical behaviour of peat derivatives under compression. In *NRC Publications Record*.
- Mukherjee, S., Sahu, R. B., & Mukherjee, J. (2019). *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics* (Vol. 14). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-0559-7>
- Muslikah, S., & Yuliana, I. (2021). Karakteristik Sifat Fisik Tanah Gambut Ogan

- Komering Ilir. *Cantilever: Jurnal Penelitian Dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 10(2), 79–84. <https://doi.org/10.35139/cantilever.v10i2.107>
- Nicholson, P. G. (2015). Preconsolidation. *Soil Improvement and Ground Modification Methods*, 209–220. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-408076-8.00009-1>
- Qian, J. H., Zhao, W. B., Cheung, Y. K., & Lee, P. K. K. (1992). Computers and Geotechnics. *Computers and Geotechnics*, 13(2), 103–118.
- Sastilaya, J., & Sentosa, G. S. (2021). Metode Vacuum Consolidation Dengan Preloading Untuk Mempercepat Konsolidasi Tanah Pada Perumahan Di Tangerang. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 4(1), 171. <https://doi.org/10.24912/jmts.v0i0.10526>
- Seah, T. H., Kim, T. B., & Nguyen, T. D. (2016). Ground improvement via vacuum consolidation method in Vietnam. *Geotechnical Engineering*, 47(4), 80–88.
- Songyu, L., Dingwen, Z., Guangyin, D., & Wenjun, H. (2016). A New Combined Vacuum Preloading with Pneumatic Fracturing Method for Soft Ground Improvement. *Procedia Engineering*, 454–461. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.057>
- Supriyadi, B. (2019). *Baru Diresmikan Presiden, Jalan Tol Palindra Kondisinya Bergelombang*. www.sripoku.com. <https://palembang.tribunnews.com/2019/03/24/baru-diresmikan-presiden-jalan-tol-palindra-kondisinya-bergelombang>
- Tang, L. S., Song, J., Chen, H. K., Wang, Y., Yin, J. L., & Ye, J. L. (2017). Impacts of organic content and pH on consolidation of clayey dredger fill by vacuum preloading method. *Geosciences Journal*. <https://doi.org/10.1007/s12303-017-0006-8>
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (Third Edit). John Wiley & Son. Inc.
- Tjie-Liong, G. (2022). Errors in The Interpretation and Execution of Vacuum Preloading. *Proceedings of 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, May.
- Toha, F. X. (1989). Karakteristik Konsolidasi Lempung Lunak Banjarmasin. *National Symposium on Soft Soil and Landslides*.

- Vyas, S. D., & Shah, P. J. (2020). Review of formula for consolidation with prefabricated vertical drains, for a project. *Indian Journal of Geosynthetics and Ground Improvement*, 9(2), 30–37.
- Wahyu, A. L., & Mochtar, I. B. (2019). The effectiveness of vacuum preloading on eliminate secondary settlement; Case study in summarecon city bandung area's development project. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/279/1/012023>
- Wang, J., Cai, Y., Fu, H., Hu, X., Cai, Y., Lin, H., & Zheng, W. (2018). Experimental study on a dredged fill ground improved by a two-stage vacuum preloading method. *Soils and Foundations*, 58(3), 766–775. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.028>
- Wang, J., Cai, Y., Ma, J., Chu, J., Fu, H., Wang, P., & Jin, Y. (2016). Improved vacuum preloading method for consolidation of dredged clay-slurry fill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001516](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001516)
- Wang, J., Huang, G., Fu, H., Cai, Y., Hu, X., Lou, X., Jin, Y., Hai, J., Ni, J., & Zou, J. (2019). Vacuum preloading combined with multiple-flocculant treatment for dredged fill improvement. *Engineering Geology*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105194>
- Wang, J., Ma, J., Liu, F., Mi, W., Cai, Y., Fu, H., & Wang, P. (2016). Experimental study on the improvement of marine clay slurry by electroosmosis-vacuum preloading. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(4), 615–622. <https://doi.org/10.1016/j.geotxmem.2016.03.004>
- Wang, P., Han, Y., Wang, J., Cai, Y., & Geng, X. (2019). Deformation characteristics of soil between prefabricated vertical drains under vacuum preloading. *Geotextiles and Geomembranes*. <https://doi.org/10.1016/j.geotxmem.2019.103493>
- Wu, J., Xuan, Y., Deng, Y., Li, X., Zha, F., & Zhou, A. (2020). Combined vacuum and surcharge preloading method to improve lianyungang soft marine clay for embankment widening project: A case. *Geotextiles and Geomembranes*. <https://doi.org/10.1016/j.geotxmem.2020.10.013>
- Xu, B. H., He, N., Jiang, Y. Bin, Zhou, Y. Z., & Zhan, X. J. (2020). Experimental

study on the clogging effect of dredged fill surrounding the PVD under vacuum preloading. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(5), 614–624.

- Zhou, Y., & Deng, A. (2019). Modelling combined electroosmosis–vacuum–surcharge preloading consolidation considering large-scale deformation. *Computers and Geotechnics*. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.01.013>
- Zhu, W., Yan, J., & Yu, G. (2018). Vacuum preloading method for land reclamation using hydraulic filled slurry from the sea: A case study in coastal China. *Ocean Engineering*, 152, 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.063>
- Zulkifley, M. T. M., Ng, T. F., Raj, J. K., Hashim, R., Ghani, A., Shuib, M. K., & Ashraf, M. A. (2013). Definitions and engineering classifications of tropical lowland peats. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 72(3–4), 547–553. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0520-5>