

EVALUASI PENGARUH TIMBUNAN DAN STOCKYARD PANCANG TERHADAP KEGAGALAN PANCANG (STUDI KASUS : PROYEK JEMBATAN X DI KALIMANTAN)

PATRICK MATHEUS^{1*}, DARWIN HARTONO², SUKAMTA³, KRESNO WIKAN SADONO⁴

Magister Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro^{1*}, Fakultas

Ilmu Pendidikan dan Pengetahuan Sosial, Universitas Indraprasta PGRI²

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro^{3,4}

Email: matheussiahaan@gmail.com¹, darwinhartono.state@gmail.com², kamt_id@yahoo.com³, kresnowikan@gmail.com⁴

DOI: <http://dx.doi.org/10.31869/rtj.v8i2.4722>

Abstract: *One of the bridge projects in Kalimantan is built on soft soil. Soft soil has poor bearing capacity, low shear strength and permeability, and high compressibility. One of the substructures of the bridge project, consisting of two spun pile points, experienced failure (exceeding the allowable inclination, indications of breakage at a depth of -8,000 mm, and failure to achieve the planned bearing capacity). The failure occurred after excavation for the pile cap was carried out. The additional load from preloading embankments and a spun pile stockyard, located 20,000 mm and 15,000 mm away, caused lateral deformation in the existing soil. This lateral deformation influenced additional deformation and bending moments in the failed spun piles. An evaluation of the additional load on the spun piles was conducted using the Finite Element Method with Plaxis 2D software. The additional load from the preloading embankments and stockyard was analyzed to determine its impact on the spun piles. The analysis showed that the additional load from the preloading embankments and stockyard caused lateral deformation, leading to deformation and bending moments in the spun piles. However, this additional load alone was not sufficient to cause failure in the spun piles.*

Keywords: *soft soil, spun pile, lateral deformation, bending moment*

Abstrak: *Salah satu proyek jembatan di Kalimantan berdiri diatas tanah lunak (soft soil). Tanah lunak memiliki daya dukung yang kurang baik, kuat geser dan permeabilitas yang rendah serta kompresibilitas yang besar. Salah satu struktur bawah proyek jembatan berupa 2 titik spun pile mengalami kegagalan (mengalami inklinasi lebih besar dari ijin, spun pile diindikasikan patah pada kedalaman -8.000 mm, dan tidak tercapainya daya dukung rencana). Kegagalan terjadi setelah dilakukan penggalian untuk pile cap. Adanya beban tambahan berupa preloading timbunan dan stockyard spun pile yang berjarak 20.000 mm dan 15.000 mm mengakibatkan terjadinya deformasi lateral pada tanah eksisting. Deformasi lateral mempengaruhi terjadinya deformasi dan Bending moment tambahan pada spun pile yang mengalami kegagalan. Evaluasi terhadap beban tambahan yang terjadi pada spun pile dilakukan menggunakan metode Finite Element menggunakan software Plaxis 2D. Beban tambahan dari preloading timbunan dan stockyard dianalisa untuk melihat pengaruh terhadap spun pile. Dalam analisa, beban tambahan berupa preloading timbunan dan stockyard mengakibatkan terjadinya deformasi lateral, menyebabkan deformasi dan Bending moment pada spun pile, namun beban tambahan ini belum dapat mempengaruhi spun pile hingga terjadi kegagalan.*

Kata Kunci: *tanah lunak, tiang pancang, pemukulan lateral, momen lentur*

A. Pendahuluan

Dilatarbelakangi pertumbuhan ekonomi yang kurang baik serta kondisi daerah yang kurang memiliki infrastruktur yang tersambung satu dengan yang lain, dilakukan Pembangunan Proyek Pembangunan di Kalimantan. Pembangunan ini merupakan upaya pemerintah melalui program kerja Direktorat Jenderal Bina Marga yang bertanggung jawab atas pelaksanaan kebijakan penyelenggaraan jalan nasional dan penguatan konektivitas nasional pada daerah-daerah 3T (Tertinggal, Terdepan, dan Terluar). Jembatan dibangun sepanjang $\pm 2.566,87$ m, 375 m berupa jalan pendekat sisi hulu berupa

pekerjaan *soil improvement*, dilanjutkan dengan timbunan dan rigid, 340 m merupakan jembatan pendekat sisi hulu berupa *spun pile*, *pile cap*, pilar, *pier head*, girder beton, dan *deck slab*, 150 m berupa jembatan utama dari baja, 400 m merupakan jembatan pendekat sisi hilir berupa *spun pile*, *pile cap*, pilar, *pier head*, girder beton, dan *deck slab*, 350 m merupakan pile on slab berupa *spun pile* dan *decks slab*, 875 m berupa jalan pendekat sisi hilir berupa pekerjaan *soil improvement*, dilanjutkan dengan timbunan dan rigid. Lokasi Proyek Pembangunan Jembatan di Kalimantan berada di daerah dengan tipe tanah *soft soil*. *Pilecap* (struktur bawah) jembatan pendekat sisi hulu direncanakan menggunakan 15 titik *spun pile* dengan diameter 1 m untuk 1 pilecap dengan kedalaman rencana 30-35 m dengan berbagai variasi daya dukung aksial sesuai dengan posisi struktur.

Pada saat pengerjaan pilecap jembatan pendekat sisi hulu, terdapat kendala di struktur pilar 1 (P1). Kendala yang terjadi berupa kegagalan 2 titik tiang pancang dalam 1 *pilecap* setelah titik lain selesai dilakukan pemancangan dan akan dilakukan penggalian atau ekskavasi. Kegagalan berupa inklinasi pancang yang terjadi di lapangan (pergeseran 1000-1500 mm dari koordinat rencana) melampaui izin, daya dukung pancang tidak sesuai dengan daya dukung rencana (divalidasi menggunakan *pile driving analysis/ PDA test*), dan *spun pile* tidak utuh (dilakukan *pile integrity test/ PIT* pada 2 titik *spun pile* menunjukkan patah pada kedalaman 8 m dari tanah eksisting). Berdasarkan 3 kondisi dan kriteria tersebut, *spun pile* dianggap gagal terhadap rencana daya dukung pancang. Pengerjaan pemancangan *spun pile* pada struktur pilar 1 (P1) dilakukan bersamaan dengan timbunan *preloading* untuk *soil improvement* yang dilakukan pada STA 0+725 – STA 1+100. Penimbunan dilakukan sebagai *preloading* atau pembebanan untuk *soil improvement* dalam mempercepat konsolidasi. *Soil improvement* yang dilakukan berupa *Prefabricated vertical drain* (PVD). Pada area struktur pilar 1 (P1) juga digunakan sebagai *stockyard* atau penyimpanan sementara untuk *spun pile* yang akan digunakan pada struktur lain.

Proses penimbunan *preloading soil improvement* pada pilar 1 dilakukan secara bertahap. *Preloading* dilakukan sebanyak 6 lapisan dengan masing-masing lapisan setebal 400 mm, total ketinggian *preloading* sebesar 2.400 mm. Jarak dari ujung *preloading* dengan pancang yang mengalami patah sebesar 20.000 mm. *Stockyard spun pile* yang diletakkan disekitar area pilar 1 berupa *spun pile beton* (concrete *spun pile*) dengan panjang 10.000 mm dan diameter 1.000 mm. *Spun pile* diletakkan sepanjang 18.000 mm dan 4 tingkat (tinggi tumpukan 4.000 mm). Area *stockyard* menampung 72 buah *spun pile*. Kondisi patahnya *spun pile* terjadi pada titik A4 dan A5 pada Pilar 1 saat proses penggalian setelah keseluruhan *spun pile* selesai dilakukan pemancangan. Kejadian ini cukup mengkhawatirkan mengingat pondasi *spun pile* merupakan bagian struktur bawah yang mendistribusikan beban dari struktur atas ke tanah dan harus dilakukan beberapa langkah perbaikan baik berupa penggantian titik pancang maupun mitigasi untuk struktur-struktur pilar lainnya.

Kondisi struktur pada jembatan diatas perlu dievaluasi akibat pengaruh timbunan *preloading* dan *stockyard spun pile*. Pengaruh ini perlu dimodelkan karena timbunan *preloading* dan *stockyard spun pile* dapat memberikan tambahan beban dan dapat menyebabkan deformasi lateral pada area sekitarnya. Selain mengetahui penyebab kegagalan tersebut, melakukan langkah mitigasi berikutnya terhadap kondisi-kondisi kritis perlu dilakukan agar tidak terjadi kembali kegagalan struktur yang mengakibatkan kerugian bahkan korban jiwa. Melihat pada kegagalan struktur jembatan dalam menerima beban luar, dan terjadi *spun pile* yang patah pada Proyek Jembatan di Kalimantan, maka pemodelan yang sesuai dengan kondisi lapangan penting dilakukan.

Dalam tulisan ini, pemodelan terhadap beban-beban tambahan sesuai kondisi di lapangan dibuat menggunakan *software* Plaxis. Pemodelan akan meninjau safety factor timbunan *preloading*, safety factor tanah eksisting pada *stockyard spun pile*, deformasi lateral dan *Bending moment* yang terjadi pada *spun pile* karena pengaruh *preloading* dan *stockyard spun pile*. Deformasi dan *Bending moment* yang terjadi akibat *preloading* dan *stockyard* akan dikaji terhadap kapasitas moment *spun pile* sehingga dapat diketahui besarnya *Bending moment* yang terjadi dapat memicu terjadinya kegagalan *spun pile*.

B. Metodologi Penelitian

(G. Hidayat, 2011), (D. Hidayat & Hidayat, 2015), dan (Damarhadi et al., 2015) melakukan penelitian terhadap kerusakan abutment pada jembatan. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa penyebab terjadi kerusakan abutment jembatan dengan mengetahui berapa besar total displacement dan *Bending moment* yang terjadi pada tiang pancang. Jenis tanah di lokasi jembatan berada pada tanah lunak (soft soil). Penelitian ini membandingkan kondisi tanah eksisting sebelum adanya timbunan konstruksi dan pasca diberikan timbunan konstruksi. Safety factor pada tanah eksisting cukup besar ($SF \geq 1,3$) karena tanah tidak mengalami penambahan beban dan safety factor mengalami penurunan yang signifikan setelah konstruksi timbunan diberikan ($SF \leq 1,3$). Tinggi timbunan di lapangan melebihi tinggi timbunan kritis yang mampu dipikul tanah dasar yang telah diperkuat. Stabilitas timbunan tidak aman sehingga terjadi keruntuhan. Kelongsoran timbunan menyebabkan terjadinya pergeseran horizontal dan vertikal yang menyebabkan terjadinya desakan pada tiang pancang. Desakan ini menyebabkan *Bending moment* terjadi pada pile jembatan sehingga terjadi kegagalan struktur. Tanah timbunan diatas tanah eksisting akan menyebabkan tanah eksisting mengalami konsolidasi. Konsolidasi memiliki kaitan dengan beban yang diberikan dan waktu. Dua parameter ini akan menyebabkan terjadinya tahapan konsolidasi yang dimulai dari pemampatan awal, konsolidasi awal (primer), dan konsolidasi lanjutan. Selama fase ini, tanah eksisting akan mengalami deformasi baik arah vertikal maupun horizontal. Spun pile yang mendapatkan beban tambahan telah diteliti sebelumnya. Spun pile ini dianggap sebagai sebagai pancang pasif yang menerima beban. Perilaku dari pancang ini diteliti untuk melihat dampak dari beban tambahan yang terjadi. Penelitian dilakukan terhadap deformasi maupun *Bending moment* yang terjadi selama tahapan-tahapan tersebut atau sering disebut sebagai staging.

(Loganathan et al., 1993) dalam penelitiannya berjudul Deformation Analysis of Embankment menjelaskan hubungan antara komponen-komponen yang menyebabkan perbedaan deformasi yang terjadi selama tahapan-tahapan kenaikan timbunan. Selama waktu penimbunan dan tahapan konsolidasi dari timbunan, perubahan volume terjadi pada tanah pondasi (atau tanah dasar atau tanah eksisting), besaran perubahan ini tergantung pada beban yang diaplikasikan dan durasi waktu penimbunan. Perubahan volume terjadi pada arah vertikal dan lateral dihubungkan dengan penurunan dan pergerakan lateral pada tanah dasar (atau tanah eksisting) timbunan. Perubahan volume secara vertikal dan lateral pada pondasi timbunan dapat bervariasi pada berbagai tahap selama fase konsolidasi sesuai dengan pola disipasi tekanan air pori.

(Jeong et al., 2009), (M et al., 2020), dan (Li et al., 2025) melakukan penelitian terhadap perilaku pancang yang mengalami pembebanan timbunan yang menyebabkan pergerakan lateral. Penelitian ini berfokus pada respon yang bergantung pada waktu untuk melihat defleksi, bending moment, dan tekanan tanah pada group pancang selama konstruksi timbunan dalam periode jangka pendek dan jangka panjang pelaksanaan timbunan. Penelitian ini menampilkan defleksi dan *Bending moment* memiliki nilai maksimal karena pembebanan timbunan jangka pendek dan mulai berkurang menuju minimum pada pembebanan jangka panjang. Penurunan tanah mencapai penurunan / deformasi vertikal maksimal pada jangka panjang dikarenakan konsolidasi pada tanah lunak.

(Jeong et al., 2009), (Nie et al., 2014), (Yang et al., 2017), dan (Shen et al., 2023) meneliti perilaku pancang pasif terhadap penambahan timbunan diluar struktur konstruksi yang ada. Pondasi pancang eksisting dapat mengalami dampak dari konstruksi timbunan terdekat atau kegiatan penggalian terutama yang berada pada area dengan tanah lunak. Jarak antara timbunan atas dan pondasi pancang (disimbolkan dengan d) menjadi faktor penting yang menyebabkan gaya-gaya dalam dan pergeseran (displacement) pada system pondasi. Kesimpulan penelitian ini menyatakan bahwa gaya-gaya dalam dan pergeseran horizontal (horizontal displacement) pancang memiliki nilai yang semakin kecil dengan memperbesar jarak (d). Saat nilai jarak (d) kurang dari 4 kali kedalaman tanah lunak (h), pergerakan horizontal dari group pancang berkurang secara linear dan meningkat dengan cepat sesuai dengan rasio d/h . Saat nilai jarak (d) lebih besar dari 4 kali kedalaman tanah lunak (h), pergerakan horizontal dari pondasi mengalami penurunan dengan bertambahnya rasio d/h . Nilai d

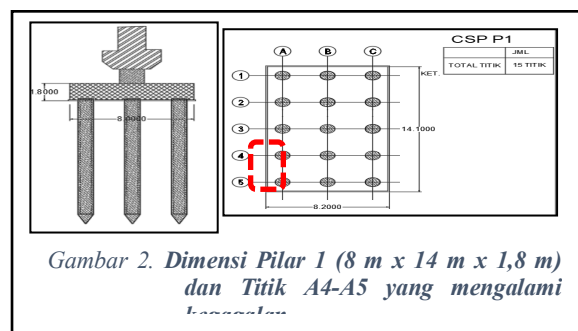
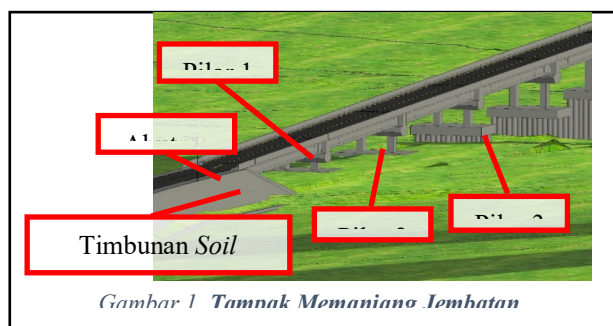
yang sesuai dapat ditentukan berdasarkan perpindahan maksimum yang diijinkan dari bangunan atau konstruksi di atasnya.

(Lay et al., 2020), (Aslam & Gofar, 2022), (Mulyawati et al., 2022), dan (Sumantri & Gofar, 2023) meneliti terkait pengaruh *preloading* berupa vacuum dapat memicu terjadinya deformasi pada tanah eksisting baik arah vertikal maupun arah horizontal. Deformasi lateral ini berdampak pada bangunan atau struktur disekitarnya dan menimbulkan kerusakan bila tidak ditangani dengan baik. Penelitian ini menggunakan analisis vacuum *preloading* menggunakan SIGMA/W, pendekatan 2D Multi Drain-Plane Strain dan diverifikasi dengan data hasil pemantauan inclinometer di lapangan. Pembacaan inclinometer di lapangan memberikan gambaran terjadinya pergeseran tanah secara lateral, hasil ini mirip dengan prediksi analisis deformasi lateral dengan jarak pengaruh tekanan vakum di sekitar area sebesar 13,5 m. Penelitian ini menginformasikan, pergeseran lateral akibat PVD dengan *preloading* timbunan dipengaruhi faktor: a.) magnitudo dan kecepatan pembebanan, b.) nilai undrained shear strength (SU) pada tanah, dan c.) karakteristik konsolidasi dan deformasi pada tanah lunak. Sedangkan pada *preloading vacuum* dipengaruhi faktor-faktor seperti: a.) magnitudo dan besar tekanan vacuum, b.) karakteristik konsolidasi dan deformasi pada tanah lunak.

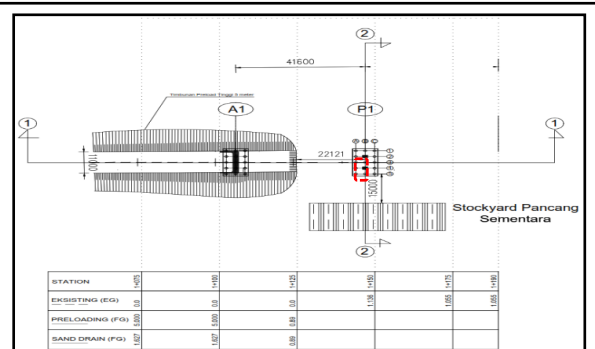
(Guo & Qin, 2010) melakukan pengujian terhadap pancang pasif yang menerima beban tambahan berupa timbunan diluar konstruksi. Penelitian ini menguji 14 model tiang pancang pasif yang diberikan variabel berupa diameter, besar beban vertikal pada pancang, dan kedalaman tanah model yang bergerak karena diberikan gaya luar lateral. Penelitian ini menampilkan hubungan momen lentur dan gaya geser maksimum (gaya dorong lateral) ketika pancang diberi gaya vertikal dan lateral secara bersamaan. Penelitian terdahulu sering menggunakan metode keseimbangan batas (Limit Equilibrium) untuk mendapatkan hubungan momen lentur maksimum dan gaya dorong lateral. Penggunaan metode ini secara signifikan memberikan nilai defleksi tiang dan momen lentur yang besar. Penelitian selanjutnya menggunakan metode elastis dan metode elastis-plastis (elastic-plastic). Metode ini memberikan nilai yang baik pada respon nonlinier tiang pancang pasif pada setiap pergerakan tanah. Namun pengaruh profil pergerakan tanah dan beban aksial dalam kondisi pra-kegagalan perlu diperhitungkan kembali. Penelitian ini menguji dalam skala yang kecil terhadap mekanisme interaksi tiang-tanah (pile-soil). Peneliti menyimpulkan momen maksimum memiliki hubungan dengan gaya geser maksimum. Diameter benda uji (dalam hal ini merujuk pada pancang) memiliki hubungan dengan besarnya momen lentur. Jarak beban lateral dengan benda uji (pancang) memberikan hasil yang cukup signifikan. Variasi terhadap jarak, memberikan besarnya momen lentur, geser, maupun deformasi yang berbeda-beda.

C. Pembahasan dan Analisa

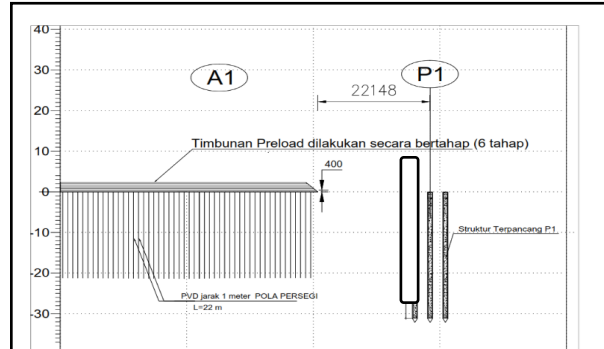
Pelaksanaan pemancangan spun pile di area pilar 1 dilakukan secara paralel dengan *soil improvement* berupa *preloading* timbunan untuk PVD dan digunakan untuk *stockyard spun pile*. Gambar 1 menampilkan penampang memanjang jembatan. Dibelakang abutment merupakan pekerjaan timbunan dan *preloading* timbunan untuk *prefabricated vertical drain*. Gambar 2 menampilkan dimensi pile cap Pilar 1, posisi titik A4 dan A5 merupakan spun pile yang mengalami kegagalan dan menjadi obyek dalam penelitian ini.



Gambar 3 menampilkan tampak atas pekerjaan. Abutment 1 (disimbolkan A1) belum dikerjakan, pada area tersebut dilakukan pekerjaan *preloading* timbunan untuk soil improvement. Potongan memanjang *preloading* timbunan dan Pilar 1 ditampilkan pada Gambar 4. Dibagian bawah gambar 3 menampilkan posisi *stockyard spun pile* yang berada di dekat Pilar 1. Potongan melintang *stockyard spun pile* dan Pilar 1 ditampilkan pada Gambar 5. Gambar 4 menampilkan potongan memanjang *preloading* timbunan dan pilar 1. Ketinggian timbunan 2.400 mm dilakukan bertahap sebanyak 6 lapis dengan ketinggian masing-masing 400 mm. Jarak kaki timbunan *preloading* dengan spun pile A4-A5 sebesar 22.000 mm.

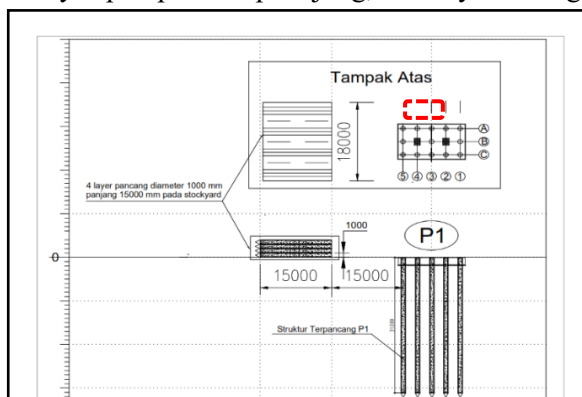


Gambar 3. Tampak Atas Preloading Timbunan dan Stockyard Spun Pile terhadap Posisi



Gambar 4. Potongan Memanjang Preloading Timbunan

Gambar 5 menampilkan potongan melintang *stockyard spun pile* dan pilar 1. Ketinggian stockyard sebesar 4.000 mm, dengan dimensi 15.000 mm x 18.000 mm. Area tersebut menampung 72 buah concrete spun pile berdiameter 1.000 mm dan panjang 15.000 mm. Jarak antara ujung *stockyard spun pile* dengan spun pile A5 sebesar 15.000 mm. Gambar 6 menampilkan dokumentasi spun pile dengan kode A4 dan A5 yang mengalami kegagalan karena inklinasi yang lebih dari ijin, tidak utuhnya spun pile sampai ujung, dan daya dukung yang tidak sesuai rencana.



Gambar 5. Potongan Melintang Stockyard Spun Pile dan Pilar 1



Gambar 6. Dokumentasi Spun Pile A4 dan A5 yang mengalami kegagalan

Soil improvement merupakan salah satu langkah yang digunakan untuk memperbaiki kualitas tanah eksisting yang akan menjadi dasar atau pondasi dari suatu konstruksi. Proyek pembangunan jembatan di Kalimantan menggunakan metode *prefabricated vertical drain (PVD)*. Penggunaan metode PVD ini ditujukan untuk mempercepat konsolidasi tanah eksisting melalui proses percepatan keluarnya air pori (disipasi) ke permukaan. Percepatan ini dilakukan dengan memasukkan pipa-pipa pipih ke dalam tanah eksisting dan memberikan pembebanan (*preloading*) diatasnya. *Preloading* ini akan menekan air pori tanah eksisting dan akan mengalir naik keatas (karena ada tekanan dari atas). Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, metode *soil improvement* menggunakan *prefabricated*

vertical drain dan diberikan *preloading* baik berupa timbunan maupun *vacuum*, akan memberikan dampak terjadinya deformasi vertikal dan lateral. Proses percepatan konsolidasi menggunakan metode PVD memiliki kaitan dengan beberapa parameter seperti koefisien alir air pori tanah, *void ratio*, *poisson ratio* tanah eksisting, dan lain-lain. Salah satu parameter tersebut adalah waktu tunggu. Waktu tunggu merupakan waktu yang diperlukan air pori untuk mengalami disipasi melalui pipa-pipa pipih.

Pelaksanaan proyek jembatan di Kalimantan ini melaksanakan waktu untuk menunggu air pori mengalami disipasi. Tabel 1 menampilkan informasi terkait langkah-langkah pelaksanaan lapisan *preloading* timbunan, ketinggian tiap lapisan *preloading*, serta durasi pelaksanaan *preloading* timbunan dan waktu tunggu pada masing-masing lapisan. Total durasi pelaksanaan proses *preloading* timbunan selama 270 hari dengan total ketinggian timbunan setinggi 2.400 mm. Pelaksanaan *preloading* timbunan dilaksanakan dengan jadwal berdasarkan tabel 1, pelaksanaan pemancangan *spun pile* juga dilakukan pada area Pilar 1. Proses pemancangan dilakukan pada tahapan lapisan timbunan 3, kemudian dilanjutkan kembali proses *preloading* timbunan hingga mencapai lapisan timbunan 6. Selama pelaksanaan *preloading* timbunan, pada area Pilar 1 juga dilakukan penyimpanan atau *stockyard spun pile*. Pelaksanaan *stockyard spun pile* juga memerlukan waktu dalam pelaksanaan dan terdapat durasi tunggu antara pelaksanaan lapisan 1 ke lapisan 2 dan seterusnya.

Pelaksanaan *stockyard spun pile* dilaksanakan dengan jadwal berdasarkan tabel 2, pelaksanaan pemancangan *spun pile* juga pada area Pilar 1. Proses pemancangan dilakukan pada setelah *stockyard spun pile* lapisan 4. Gambar 7 menampilkan jadwal pelaksanaan *preloading* dan *stockyard spun pile*. Kegagalan *spun pile* terjadi pada *staging* atau tahapan penggalian. Beban tambahan dari *preloading* dan *stockyard* terjadi pada saat yang bersamaan. Kegagalan *spun pile* pada titik A4 dan A5 dilakukan evaluasi menggunakan pemodelan *Finite Element*.

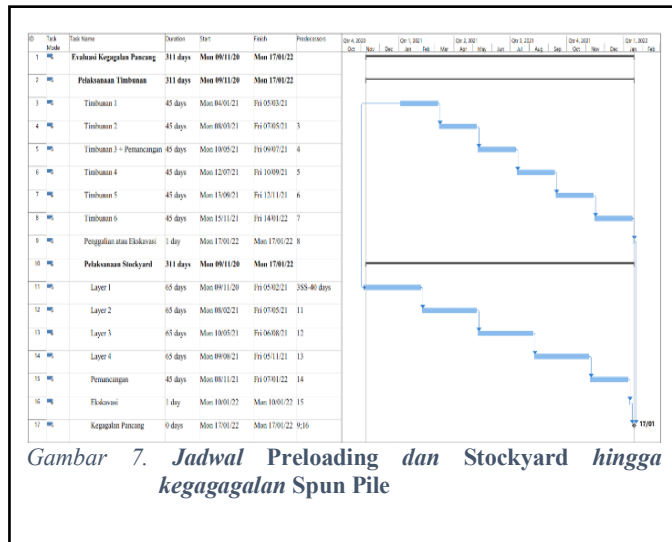
Tabel 1. Durasi Pelaksanaan Preloading Timbunan

No	STA	Lapisan ke -	Kenaikan STA 1+075		Durasi Pelaksanaan (hari)	Durasi Tunggu (hari)	Total Durasi (hari)
			per layer (cm)	elevasi			
1	1+075	Timbunan 1	40,00	+0,40	10	35	45
2	1+075	Timbunan 2	40,00	+0,80	10	35	45
3	1+075	Timbunan 3	40,00	+1,2	10	35	45
4	1+075	Timbunan 4	40,00	+1,6	10	35	45
5	1+075	Timbunan 5	40,00	+2,0	10	35	45
6	1+075	Timbunan 6	40,00	+2,4	10	35	45

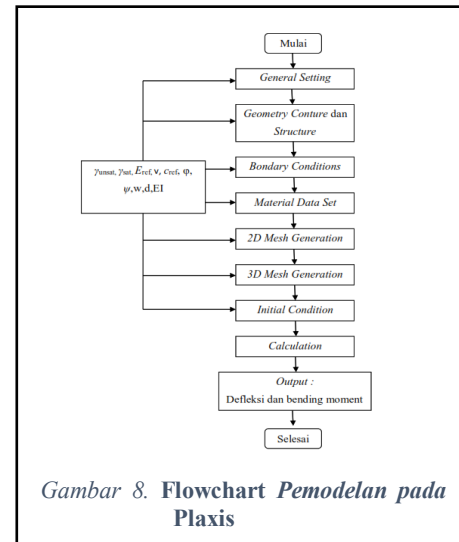
Tabel 2. Durasi Pelaksanaan Stockyard

No	STA	Lapisan ke -	Kenaikan STA 1+150		Durasi Pelaksanaan (hari)	Durasi Tunggu (hari)	Total Durasi (hari)
			per layer (cm)	elevasi			
1	1+150	Layer 1	100,00	+1	10	55	65
2	1+150	Layer 2	100,00	+2	10	55	65
3	1+150	Layer 3	100,00	+3	10	55	65
4	1+150	Layer 4	100,00	+4	10	55	65

Pemodelan *Finite Element* menggunakan *software Plaxis 2D*. Pemodelan ini akan digunakan untuk melihat pengaruh *preloading* timbunan dan *stockyard spun pile* terhadap pancang pasif. Penelitian melakukan 2 pemodelan yakni pemodelan *preloading* timbunan terhadap pancang pasif dan pemodelan *stockyard spun pile* terhadap pancang pasif. Kedua pemodelan akan menampilkan defleksi dan *Bending moment* yang disebabkan beban tambahan luar. Defleksi yang terjadi akan memberikan resultan arah defleksi dan dibandingkan dengan deformasi pada *spun pile* yang mengalami kegagalan. *Bending moment* yang terjadi akan dibandingkan dengan kapasitas momen *spun pile* berdasarkan katalog produk dan hasil uji *Bending moment spun pile*. Gambar 8 menampilkan *flowchart* langkah-langkah pemodelan yang dilakukan menggunakan *software Plaxis*. Tahapan-tahapan pelaksanaan di proyek akan dimasukkan kedalam *software* untuk dianalisa.



Gambar 7. Jadwal Preloading dan Stockyard hingga kegagalan Spun Pile



Gambar 8. Flowchart Pemodelan pada Plaxis

Kuat tekan *concrete spun pile* menggunakan mutu 52 Mpa dengan modulus elastisitas (E) sebesar 3389,2 Mpa (berdasarkan persamaan $E = 4700 \sqrt{f'_c}$). Diameter luar pancang 1000 mm dengan tebal 140 mm. Jarak antar tiang pancang sebesar 3000 mm. Kapasitas momen (M_{crack}) sebesar 1.200 kN m dan *moment* patah sebesar 2.400 kN m. Tabel 3 menampilkan parameter tanah eksisting yang digunakan untuk pemodelan pada *Plaxis 2D*. Lapisan tanah eksisting dibagi menjadi 11 lapisan yang memiliki parameter tanah yang berbeda-beda. Data parameter tanah eksisting ini akan digunakan pada 2 pemodelan yakni pemodelan *preloading* timbunan dan *stockyard spun pile*.

Pemodelan pada *Plaxis* akan memodelkan pancang pasif. Tabel 4 menampilkan parameter *spun pile*. Ditampilkan perhitungan daya dukung friksi (Q_s) dan daya dukung ujung (Q_p) pada *spun pile*. Pemodelan *preloading* timbunan menampilkan geometrik *preloading*, tahapan-tahapan pelaksanaan, *properties* material tanah eksisting, *properties* material tanah timbunan. Gambar 9 menampilkan geometrik dan model parameter tanah eksisting pada kondisi *preloading* timbunan. Geometrik pemodelan ini menyesuaikan data lapangan pada panjang *preloading* timbunan, jarak *preloading-spun pile*, dan ketinggian timbunan. Parameter tanah eksisting dimodelkan model *Mohr-Coulomb* dengan tipe drainase *undrained (B)*. Lapisan tanah eksisting dibuat menjadi 11 lapisan dengan parameter menyesuaikan data tabel 3. Pemodelan *spun pile* dimodelkan sebagai *embedded beam row* dengan panjang sedalam 31.000 mm dan parameter *spun pile* menggunakan data pada tabel 4.

Pemodelan *stockyard spun pile* menampilkan geometrik *stockyard*, tahapan-tahapan pelaksanaan, *properties* material tanah eksisting, *properties* material tanah timbunan. Gambar 10 menampilkan geometrik dan model parameter tanah eksisting pada kondisi *stockyard spun pile*. Geometrik pemodelan ini menyesuaikan data lapangan pada panjang *stockyard*, jarak *stockyard-spun pile*, dan besarnya beban *stockyard* tiap lapisannya. Tiap lapisan tumpukan *spun pile* memberikan beban 10 kN/m. 4 lapisan tumpukan *stockyard* sebesar 40 kN/m. Parameter tanah eksisting sama dengan parameter akibat *preloading* timbunan yakni menggunakan model *Mohr-Coulomb* dengan tipe drainase *undrained (B)*. Lapisan tanah eksisting dibuat menjadi 11 lapisan dengan parameter menyesuaikan data tabel 3. Pemodelan *spun pile* dimodelkan sebagai *embedded beam row* dengan panjang sedalam 31.000 mm dan parameter *spun pile* menggunakan data pada tabel 4. Beban akibat *stockyard spun pile* dimodelkan menggunakan *Line Load* dengan panjang 15.000 mm sesuai panjang

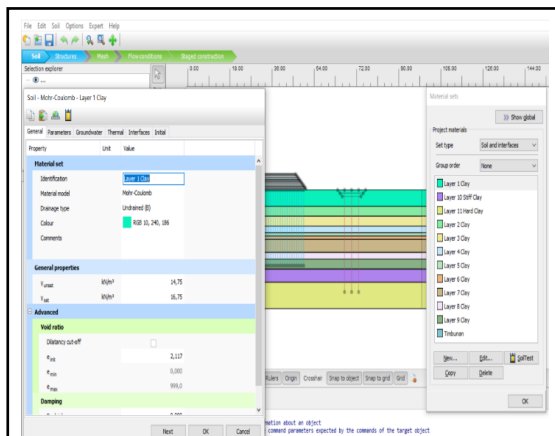
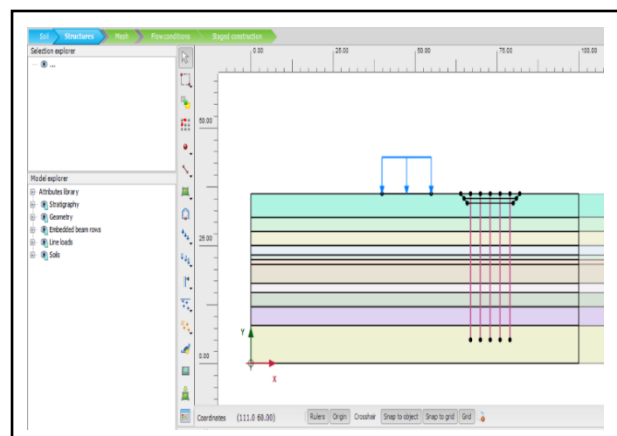
Tabel 3. Parameter Tanah Eksisting

No	Kedalaman (Rentang)	Nama layer	Nilai rata-rata R1	Nilai rata- rata Cu (R1/20)	E (400*Cu)	Y_{unsat}	Y_{sat}	Poisson Ratio ν' (nu)	Void Ratio	Soil Behavior Type
	(m)		(Kpa)	(Kpa)	KN/m ²	KN/m ³	KN/m ³			
1	0-5	layer 1	160,00	8,00	3200,00	14,75	16,75	0,35	2,12	Clays - Silty Clay to Clay
2	5-8	layer 2	287,50	14,38	5750,00	14,75	16,75	0,35	2,12	Organic Soils - Peats
3	8-11	layer 3	466,67	23,33	9333,33	14,75	16,75	0,35	2,12	Clays - Silty Clay to Clay
4	11-13	layer 4	616,67	30,83	12333,33	14,75	16,75	0,35	2,12	Clays - Silty Clay to Clay
5	13-14	layer 5	314,29	15,71	6285,71	14,75	16,75	0,35	2,12	Clays - Silty Clay to Clay
6	14-15	layer 6	233,33	11,67	4666,67	14,75	16,75	0,35	2,12	Organic Soils - Peats
7	15-19	layer 7	395,24	19,76	7904,76	14,75	16,75	0,35	2,12	Organic Soils - Peats
8	19-21	layer 8	950,00	47,50	12000,00	14,75	16,75	0,35	2,12	Organic Soils - Peats
9	21-24	layer 9	1233,33	61,67	14000,00	14,75	16,75	0,35	2,12	Clays - Silty Clay to Clay
10	24-28	layer 10		77,50	16000,00	14,75	16,75	0,25	0,50	Clays - Silty Clay to Clay
11	28-36	layer 11		300,00	40000,00	16,75	18,75	0,15	0,50	Clays - Silty Clay to Clay

spun pile yang ditumpuk pada area tersebut. Beban tiap lapisan tumpukan *stockyard* diarahkan kebawah dan dinaikkan 10 kN/m. Beban ini dinaikkan bertahap sesuai dengan kenaikan tiap lapis tumpukan dan durasi pelaksanaan. Lapis 1 memberikan beban 10 kN/m, lapis 2 memberikan beban 20 kN/m, lapis 3 memberikan beban 30 kN/m, dan lapis 4 memberikan beban 40 kN/m.

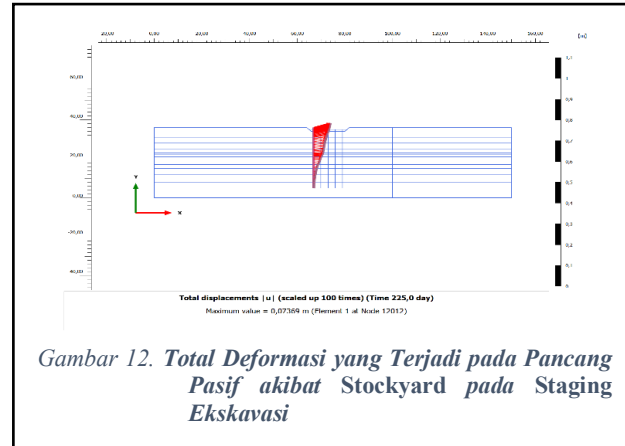
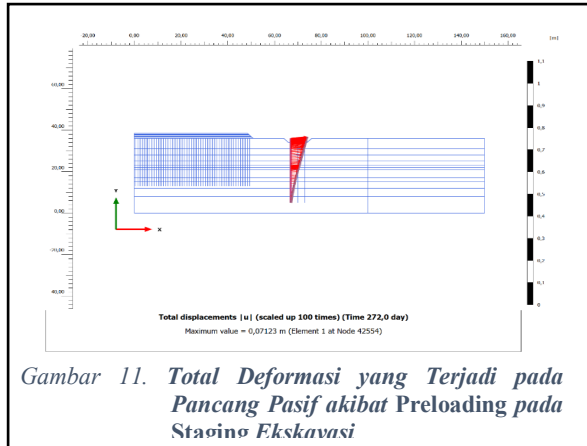
Tabel 4. Data Daya Dukung Friksi (Qs) dan Daya Dukung Ujung (Qp) pada *Spun Pile*

No	Kedalaman (Rentang)	nama layer	Nilai rata-rata R1	Nilai rata-rata Cu (R1/20)	$\frac{C_u}{P\alpha}$	α	p	$f = \alpha c_u$	$Q_s = \Sigma (f_p \times L)$
	(m)	(m)	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)		m		kN
1	0-5	layer 1	5	160.00	8.00	0.08	1.00	3.14	8.00
2	5-8	layer 2	3	287.50	14.38	0.14	1.00	3.14	14.38
3	8-11	layer 3	3	466.67	23.33	0.23	0.92	3.14	21.47
4	11-13	layer 4	2	616.67	30.83	0.31	0.82	3.14	25.28
5	13-14	layer 5	1	314.29	15.71	0.16	0.92	3.14	14.46
6	14-15	layer 6	1	233.33	11.67	0.12	1.00	3.14	11.67
7	15-19	layer 7	4	395.24	19.76	0.20	0.92	3.14	18.18
8	19-21	layer 8	2	950.00	47.50	0.48	0.74	3.14	35.15
9	21-24	layer 9	3	1233.33	61.67	0.62	0.62	3.14	38.23
10	24-28	layer 10	4		77.50	0.78	0.54	3.14	41.85
11	28-36	layer 11	8		300.00	3.00	0.34	3.14	102.00
Total									1382.86
$Q_s = \frac{(T_{skin \text{ start max}} + T_{skin \text{ end max}})}{2} \times L$ $T_{skin \text{ end max}} = \frac{Q_s \times 2}{L}$ $T_{skin \text{ end max}} = \frac{1382,86 \times 2}{31}$ $T_{skin \text{ end max}} = 89.2$ $Q_p = 9 C_u A_p$ $Q_p = 9 C_u \left(\frac{1}{4} \pi d^2\right)$ $Q_p = 2121$									

**Gambar 9.** Geometrik dan Model Parameter Tanah Eksisting pada Kondisi Preloading Timbunan**Gambar 10.** Geometrik dan Model Parameter Tanah Eksisting pada Kondisi Stockyard Spun Pile

Dalam dua pemodelan pada Plaxis memberikan hasil yang berbeda-beda pada masing-masing staging atau tahapan pelaksanaan. Deformasi pada pancang pasif bertambah seiring penambahan beban. Deformasi ini memberikan nilai yang berbeda pada kondisi akibat *preloading* timbunan dan kondisi *stockyard spun pile*. *Bending moment* yang juga terjadi pada pancang pasif memberikan nilai yang bertambah seiring penambahan beban. *Bending moment* yang terjadi pada pancang pasif juga berbeda pada kondisi *preloading* timbunan dan *stockyard spun pile*.

Pemodelan *preloading* timbunan memberikan deformasi pada pancang pasif sebesar 71,23 mm dengan arah menjauhi dari *preloading*. Gambar 11 menampilkan besarnya deformasi yang terjadi pada pancang pasif dan arahnya yang menjauhi *preloading* emodelan *stockyard spun pile* memberikan deformasi pada pancang pasif sebesar 73,69mm dengan arah menjauhi dari *stockyard*. Gambar 12 menampilkan besarnya deformasi yang terjadi pada pancang pasif dan arahnya yang menjauhi *stockyard*. Deformasi ini berbeda-beda pada tiap tahapan atau *staging*.



Tabel 5 dan 6 menampilkan resume deformasi dan *Bending moment* yang terjadi pada tiap-tiap tahapan (*staging*) akibat *preloading* timbunan dan akibat *stockyard spun pile*.

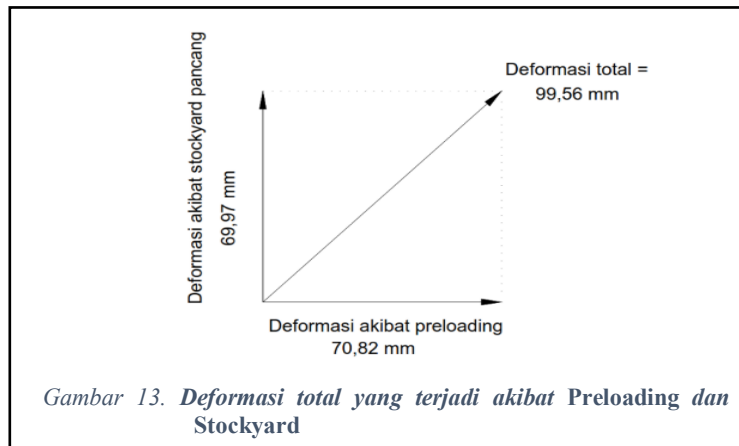
Tabel 5. Resume Deformasi dan Bending Moment yang Terjadi akibat Preloading pada Pancang Pasif

Staging	Deformasi Pancang			Bending Moment Pancang	Shear Pancang	SF Timbunan
	Ux (mm)	Uy (mm)	Utot (mm)	KNm	KN	
Initial Phase	0	0	0	0	0	
Reset to Displacement Zero	0	0	0	0	0	
Timbunan 1	0	0	0	0	0	2,513
Timbunan 2	0	0	0	0	0	1,704
Timbunan 3+pancang	22,97	5,72	23,67	2,76	0,648	1,398
Timbunan 4	32,7	6,03	33,25	7,29	1,902	1,248
Timbunan 5	44,1	6,33	44,55	13,21	3,392	1,136
Timbunan 6	57,54	6,62	57,92	21,09	5,129	1,104
Ekskavasi	70,82	7,56	71,23	34,76	6,521	1,073

Tabel 6. Resume Deformasi dan Bending Moment yang Terjadi akibat Stockyard pada Pancang Pasif

Staging	Deformasi Pancang			Bending Moment Pancang	Shear Pancang	SF Timbunan
	Ux (mm)	Uy (mm)	Utot (mm)	KNm	KN	
Initial Phase	0	0	0	0	0	
Reset to Displacement Zero	0	0	0	0	0	
Pembebanan Layer 1	0	0	0	0	0	3,949
Pembebanan Layer 2	0	0	0	0	0	2,036
Pembebanan Layer 3	0	0	0	0	0	1,371
Pembebanan Layer 4	0	0	0	0	0	1,031
Layer 4 + Pemancangan	59,93	3,57	63,89	1,912	0,661	1,115

Berdasarkan besarnya deformasi yang terjadi pada pancang pasif pada tabel 5 dan tabel 6, arah deformasi yang menjauhi *preloading* dan *stockyard* dilakukan penggambaran *resultante* gaya dan besaran. Gambar 13 menampilkan besarnya deformasi yang terjadi sebesar 99,56 mm. Deformasi yang terjadi dari permodelan *Plaxis* memberikan hasil deformasi sebesar 99,56 mm. *Bending moment* yang terjadi pada tiang pancang akibat *preloading* sebesar 34,76 KNm atau setara dengan 3,476 Ton



Gambar 13. Deformasi total yang terjadi akibat Preloading dan Stockyard

m (Tabel 6). *Bending moment* yang terjadi pada tiang pancang akibat *stockyard spun pile* sebesar 20,92 KNm atau setara dengan 2,92 Ton m (Tabel 7). Deformasi eksisting yang terjadi pada titik A4 dan A5 (yang mengalami patah) sebesar 1000-1500 mm. Kapasitas momen pancang yang digunakan pada proyek ini sebesar 120 Ton m (berdasarkan katalog produk). Hasil pemodelan yang dilakukan pada *Plaxis* belum menunjukkan deformasi yang mendekati deformasi eksisting (deformasi eksisting 1000 mm > deformasi pemodelan 99,56 mm) dan belum menunjukkan momen yang dapat menyebabkan pancang patah (kapasitas momen 120 Ton m > *Bending moment* *Plaxis* 3,476 Ton m).

D. Penutup

Berdasarkan hasil dan pembahasan diatas terkait evaluasi pengaruh *preloading* timbunan dan *stockyard spun pile* terhadap kegagalan pancang disimpulkan beban luar tambahan memberikan dorongan pada pancang pasif tetapi tidak menyebabkan kegagalan pada pancang pasif. Beban luar tambahan mengakibatkan deformasi dan *bending moment* yang tidak direncanakan dalam beban rencana.

Ucapan Terima Kasih

Dengan terselesaikannya artikel ilmiah ini, penulis menyampaikan terimakasih kepada pihak yang sudah membantu, pembimbing lahan dan lapangan, konsultan perencana, konsultan *engineering*, kontraktor pelaksana selaku penyedia, *reviewer* dan pengelola jurnal serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan secara individu.

Daftar Pustaka

- Aslam, Z., & Gofar, N. (2022). Pengaruh Perbaikan Tanah Fondasi dan Perkuatan terhadap Stabilitas Lereng Timbunan Jalan diatas Tanah Lunak. *Jurnal Teknik Sipil*, 18(2), 356–367. <https://doi.org/10.28932/jts.v18i2.4613>
- Damarhadi, P. N., Muslih, Y. P., & Harya Dananjaya, R. (2015). Analisis Kegagalan Pondasi Tiang Kelompok pada Konstruksi Pilar Jembatan. *E-JurnalMatkris Teknik Sipil*, 1121–1128.
- Guo, W. D., & Qin, H. Y. (2010). Thrust and *Bending moment* of rigid piles subjected to moving soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(2), 180–196. <https://doi.org/10.1139/T09-092>
- Hidayat, D., & Hidayat, G. (2015). Analisa Kerusakan Abutmen Jembatan Koto Gasib Kabupaten Siak Provinsi Riau. *Info Teknik*, 16(1), 85–100.
- Hidayat, G. (2011). Studi Kasus Analisis Kerusakan Abutment Jembatan Sungai Bahalang Kalimantan Tengah. *Jurnal Teknologi Berkelanjutan*, 1(1), 1–10.
- Jeong, S., Seo, D., & Kim, Y. (2009). Numerical analysis of passive pile groups in offshore soft deposits. *Computers and Geotechnics*, 36(7), 1164–1175. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.05.003>

- Jeong, S., Seo, D., Lee, J., & Park, J. (2004). Time-dependent behavior of pile groups by staged construction of an adjacent embankment on soft clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(4), 644–656. <https://doi.org/10.1139/T04-024>
- Lay, M. O., Sumarli, I., & Iskandar, D. 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), 1091–1104.
- Li, S., Deng, Z., Wei, L., Chen, Q., Zhang, Y., & He, F. (2025). Lateral behavior of high-speed railway bridge pile foundation in soft soils under adjacent surcharge loads considering time-dependent characteristics. *Alexandria Engineering Journal*, 110, 451–467. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.10.044>
- Loganathan, N., Balasubramaniam, A. S., & Bergado, D. T. (1993). Deformation analysis of embankments. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(8), 1185–1206. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1993\)119:8\(1185\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:8(1185))
- M, B., V, P., & M. R., M. (2020). Lateral Displacements of Soft Ground under Embankment Loading. *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*, 268–275.
- Mulyawati, I. B., Riza, M., & Dermawan, H. (2022). Lateral Deformation Analysis on Embankments by Vacuum Preloading System. *Proceedings, 26th Annual National Conference on GEotechnical Engineering*.
- Nie, R., Leng, W., Wei, L., & Chen, Y. F. (2014). Prediction of Lateral Behavior of Existing Bridge Pile Foundations due to Surcharge Load. 458–469. <https://doi.org/10.1061/9780784413449.045>
- Shen, B., Mao, D., Ding, Y., Wang, L., & Li, Z. (2023). A numerical analysis of inclination and rectification of ramp-bridge piers adjacent to surcharge load in soft clay area. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36737-6>
- Sumantri, E. W., & Gofar, N. (2023). Lapisan Geotekstil dan Turap Terhadap Deformasi Timbunan Jalan diatas Tanah Lunak. *Teknika : Jurnal Teknik*, 10(1), 45–55.
- Yang, M., Shangguan, S., Li, W., & Zhu, B. (2017). Numerical Study of Consolidation Effect on the Response of Passive Piles Adjacent to Surcharge Load. *International Journal of Geomechanics*, 17(11). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000991](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000991)