

Artikel

Pengaruh Pondasi Bored pile Terhadap Kapasitas Daya Dukung Dan Stabilitas Underpass (Studi Kasus: Underpass Bulak Kapal)

Khalisa Mumtasyfana¹ dan Fatin Adriati^{1,*}

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Bakrie, Jl. H. R. Rasuna Said, Kuningan, DKI Jakarta, 12940, Indonesia

* Korespondensi: fatin.adriati@bakrie.ac.id

Abstrak

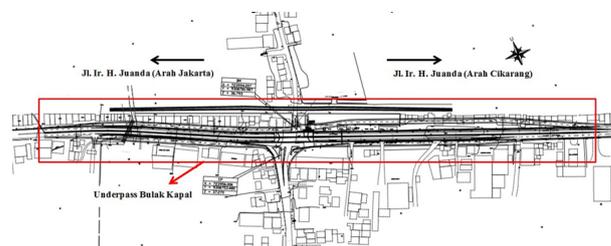
Underpass Bulak Kapal memiliki bentang terowongan sepanjang 16,4 meter dan pondasi bored pile diantara secant piles. Sebagai perbandingan Underpass NYIA memiliki desain yang hampir serupa namun tidak memiliki bored pile diantara dinding penahan tanahnya. Oleh karena itu, dilakukan penelitian dengan memodelkan underpass dengan ada, dan tanpa adanya bored pile untuk melihat pengaruh dari pondasi bored pile pada kapasitas daya dukung dan stabilitas underpass. Analisis dilakukan menggunakan metode statis, hasil uji PDA dan metode elemen hingga dengan software PLAXIS. Daya dukung bored pile yang diperoleh dengan metode Reese And Wright 7081,82 kN, N-SPT sebesar 10.612,58 kN/m, PDA yaitu 5109,26 dan PLAXIS sebesar 6949,20 kN. Hasil analisis pada stabilitas underpass sebelum adanya bored pile memiliki deformasi tanah sebesar 10,37 mm, dengan angka keamanan 2,724. Kemudian setelah adanya bored pile deformasi tanah menurun menjadi 8,32 mm dengan angka keamanan 3,580. Kemudian kapasitas gaya aksial pada secant piles berubah setelah penambahan adanya bored pile dari 738,91 kN/m, menjadi 226,03 kN/m. Adanya bored pile mengurangi defleksi secant piles dari 6,12 mm menjadi 5,95 mm, dan menurunkan momen lentur secant piles dari -401,52 kNm/m menjadi -395,09 kNm/m.

Kata Kunci: keyword 1, keyword 2, keyword 3, keyword 4

1 Pendahuluan

Peningkatan mobilitas manusia, jasa, dan barang di Kota Bekasi terjadi akibat adanya aktivitas industri yang tinggi di sekitarnya. Hal ini membuat jalan yang ada mengalami penurunan kinerja dan mengakibatkan sering terjadinya kemacetan, sehingga menghambat konektivitas dan mobilitas antar wilayah di Kota Bekasi. Salah satu kemacetan yang kerap terjadi ada di persimpangan lalu lintas empat arah sebidang rel kereta api yang ditunjukkan pada **Gambar 1**, yaitu Jalan Ir. H. Juanda (dari arah Jakarta), Jalan Pahlawan, Jalan Joyomartono, dan Jalan Ir. H. Juanda (dari arah Cikarang), atau biasa dikenal dengan Simpangan Bulak Kapal (Bina Marga, 2021). Dari data lintas harian rata - rata (LHR) tahun 2016 bahwa sebanyak 49.704 kendaraan kecil, 3.600 bus, dan 187 truk telah melintasi wilayah tersebut setiap harinya (P2JN, 2019). Hal ini disebabkan posisi Simpang Bulak Kapal yang berada di daerah dekat kawasan industri, sehingga mobilitas kendaraan yang melintas sangat tinggi. Untuk mengurangi dan mengurai kemacetan yang terjadi pada Simpangan Bulak Kapal tersebut, maka diperlukan pembangunan underpass sebagai salah satu solusi untuk mendukung mobilitas di wilayah tersebut.

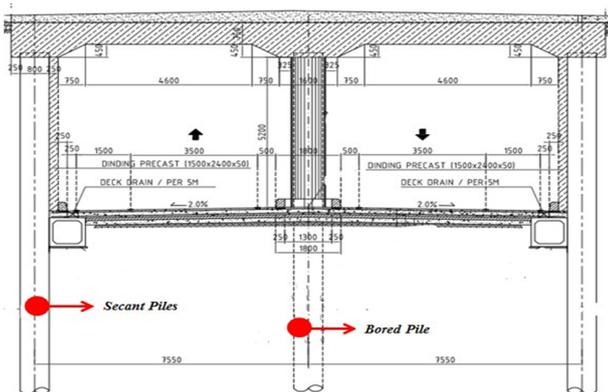
Underpass Bulak Kapal didesain dengan panjang 690 meter untuk terowongan utamanya dan memiliki tipe jalan 4/2 D dengan masing – masing lebar lajur 3,5 meter. Pada Underpass Bulak Kapal digunakan struktur pondasi bored pile dan struktur



Gambar 1. Lokasi Pembangunan Underpass Bulak Kapal

secant pile sebagai dinding penahan tanah. Pondasi bored pile direncanakan memiliki diameter 0,8 meter, dan kedalaman 20 meter dengan menggunakan mutu beton f_c' 30 MPa. Sedangkan struktur secant pile terdiri dari tiang primer dan sekunder dengan kedalaman bervariasi. Mutu beton yang digunakan pada tiang primer f_c' 30 MPa, dan tiang sekunder f_c' 15 Mpa dengan diameter 0,8 meter. **Gambar 2** adalah gambar rencana untuk proyek pembangunan Underpass Bulak Kapal.

Dengan panjang bentang jembatan 16,4 meter dan panjang box 61,87 meter, pondasi bored pile ditambahkan pada bagian tengah box diantara dinding secant piles. Pondasi bored pile direncanakan berjumlah 16 buah dengan jarak antar tiang sebesar 3,15 meter. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kapasitas daya dukung struktur bawah pada underpass, sehingga memiliki daya dukung yang sesuai untuk menahan beban struktur



Gambar 2. Gambar rencana struktur pondasi underpass Bulak Kapal

atas agar aman untuk dilewati kendaraan.

Sebagai perbandingan, pada Underpass New Yogyakarta International Airport (NYIA) yang dibangun untuk menghubungkan Yogyakarta akibat pembangunan Bandara Kulon Progo hanya memiliki median jalan dan tidak menggunakan bored pile pada bagian tengah box. Underpass ini juga memiliki tipe jalan 4/2D dengan desain sepanjang 1,3 km dan panjang terowongan 1,095 kilometer dan bentang terowongan 18,4 meter (Bina Marga, 2019). Meski memiliki desain yang tidak jauh berbeda dari Underpass Bulak Kapal, tapi terdapat perbedaan yaitu pada bagian tengah box terowongan Underpass NYIA tidak memiliki bored pile.

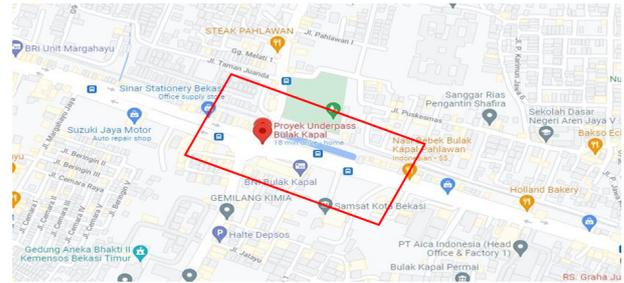
Berdasarkan latar belakang tersebut, maka penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kapasitas daya dukung dan stabilitas struktur bawah Underpass Bulak Kapal dengan ada dan tanpa adanya pondasi bored pile pada bagian tengah box. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak geoteknik PLAXIS.

2 Metode

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada Proyek Pembangunan Underpass Bulak Kapal yang lokasinya dapat dilihat dari Google Earth pada **Gambar 3**. Underpass Bulak Kapal berlokasi di Jalan Ir. H. Juanda, Kecamatan Bekasi Timur, Kota Bekasi, Jawa Barat, Indonesia. Proyek dimulai pada tanggal kontrak 24 September 2020 dengan masa pelaksanaan pembangunan proyek 540 hari kalender. Direncanakan Proyek Underpass Bulak Kapal akan selesai, dan dapat digunakan pada tanggal 17 Maret 2022 (Bina Marga, 2021).

Penelitian akan dilakukan pada area box underpass yang struktur rencana pondasinya dapat dilihat pada **Gambar 2**. Pada area box underpass terdapat dinding penahan tanah secant piles dan bored pile pada bagian tengah. Sesuai dengan latar belakang yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, penelitian hanya akan fokus pada struktur bawah area box Underpass Bulak Kapal.



Gambar 3. Lokasi Penelitian Tugas Akhir

2.2 Data Tanah

Data tanah yang digunakan pada penelitian ini didapatkan dari Standard Penetration Test (SPT) yang hasilnya berupa boring log (borlog). Uji SPT dilakukan di beberapa titik, yaitu BH-01 (STA 0+180), BH-02 (STA 0+375), BH-03 (STA 0+425), dan BH-04 (STA 0+625). Tanah yang berada di lokasi penelitian umumnya merupakan tanah lempung pada lapisan atas, dan tanah pasir pada lapisan terbawah. Kedalaman muka air yang dimiliki relatif tinggi, yaitu 1,2 meter dan yang paling rendah 8,92 meter dari permukaan tanah.

Pada penelitian ini area yang dibahas hanya sekitaran box pada underpass, maka data tanah yang akan digunakan adalah boring log pada titik BH-02 dan BH-03 yang pengujiannya paling dekat dengan area yang akan ditinjau. Nilai N-SPT dari boring log akan dikorelasikan untuk mendapatkan parameter-parameter tanah yang dapat dilihat pada **Tabel 1**.

2.3 Data Bored pile

Pada Proyek Underpass Bulak Kapal diketahui bored pile yang digunakan pada area box memiliki diameter 0,8 meter, diameter pembesian 0,65 meter dan panjang 20 m. Bored pile memiliki jumlah 16 buah dengan masing – masing tiang pondasi berjarak 3,15 meter. Mutu beton yang digunakan adalah 30 MPa, dengan volume beton yang dibutuhkan untuk pengecoran satu tiang bored pile sebesar ± 13 m³. Mutu baja tulangan yang digunakan adalah tulangan BJTS-400A.

Pada penelitian ini parameter bored pile yang dibutuhkan dapat dilihat pada **Tabel 2**.

2.4 Data Secant piles

Dinding penahan tanah (DPT) yang digunakan pada Proyek Underpass Bulak Kapal adalah secant piles yang dipasang sepanjang 296 meter. Secant piles terdiri dari primary pile, dan secondary pile dengan kedalaman yang bervariasi. Namun pada area box underpass, secant pile yang digunakan memiliki tinggi 20 meter dengan diameter tiang 0,8 meter. Mutu beton yang digunakan pada primary pile adalah 15 MPa, dan mutu beton secondary pile adalah 30 MPa. Mutu baja tulangan yang digunakan pada tiang bor sekunder adalah tulangan BJTS-400A. Pada penelitian ini parameter secant piles yang dibutuhkan dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 1: Parameter Tanah

Depth	h	Soil Desc.	N	Konsistensi	sat	uns at	cu	c'	ϕ'	Es	
m	m				kN/ m ³	kN /m ³	kN/ m ²	kN/ m ²		kN/m ²	
0-4	4	Silty Clay	8	Medium Stiff	18	17	25	10	26	0,25	15000
4-8	4	Silty Clay	13	Stiff	20	18	32,5	13	29	0,3	30000
8-16	8	Silty Clay	21	Very Stiff	21	19	40	16	33	0,35	40000
16-19	3	Cemented Sand	49	Dense	20	19	55	22	42	0,25	45000
19-27	8	Gravelly Sand	60	Very Dense	22	21	75	30	45	0,3	50000
30,45	3,45	Silty Sand	60	Very Dense	22	21	75	30	45	0,3	50000

Tabel 2: Parameter Bored Pile

Parameter Bored pile		
Mutu Beton (fc')	30	Mpa
Modulus Elastisitas Beton (E)	25742960,2	kN/m ²
Modulus Elastisitas Tanah (E)	45000	kN/m ²
Modulus Elastisitas (Eeq)	6528597,52	kN/m ²
Mutu Baja (fy)	400	MPa
Diameter Bored pile	0,8	m
Jarak Antar Bored pile	3,15	m
Panjang Bored pile	20	m
Jarak Dari Secant piles	6,75	m
Jumlah Bored pile	16	buah
Luas Bored pile (Aeq)	3,16	m ²
Momen Inersia (Ieq)	4,108,658,333	m ⁴
Kekakuan Aksial (EAeq)	20630368,16	kN/m
Kekakuan Lentur (EIQ)	26823776,6	kN/m ³
Ketebalan Ekuivalen (D)	3,95	m
Berat Bored pile (W)	26,86	kN/m ²

Tabel 3: Parameter Secant Piles

Parameter Secant piles		
Mutu Beton Primary Pile (fc')	15	MPa
Mutu Beton Secondary Pile (fc')	30	MPa
Modulus Elastisitas Beton (E)	25742960,2	kN/m ²
Mutu Baja Secondary Pile (fy)	400	MPa
Diameter Primary Pile	0,8	m
Diameter Secondary Pile	0,8	m
Spacing Primary Pile	0,6	m
Panjang Secant piles	20	m
Luas Secant piles	0,5024	m ²
Momen Inersia (I)	0,020096	m ⁴
Jarak Antar Secant piles	14,3	m
Kekakuan Normal (EA)	12933263,21	kN/m
Kekakuan Lentur (EI)	517330,53	kN/m ³
Ketebalan Ekuivalen (D)	0,69282	m
Berat Secant piles (W)	4,711,178	kN/m ²

Tabel 4: Pembebanan Underpass

No	Jenis Beban	Faktor Ultimit	Beban (kN/m)	Beban \times Faktor Ultimit kN/m
1	Berat Sendiri	Qms	371,625	483,11
2	Beban Mati Tambahan	QMA	2,69	5,38
3	Beban Truk T	QTT	100,042	256,32
	Jumlah			744,81

2.5 Data Pembebanan

Pembebanan yang akan digunakan dalam penelitian untuk menganalisis daya dukung dan stabilitas pada box underpass dapat dilihat pada **Tabel 4**. Pembebanan terdiri dari berat sendiri, beban tambahan, dan beban lajur "D" dengan total beban sebesar 744,81 kN/m. Penentuan pembebanan berdasarkan SNI 1725:2016 yaitu pembebanan untuk jembatan.

Untuk stabilitas underpass sesuai dengan Pedoman Konstruksi dan Bangunan oleh Departemen Pekerjaan Umum, beban lalu lintas seperti pada Tabel 3.6 yang akan digunakan pada sekitar secant piles underpass adalah 15 kN/m².

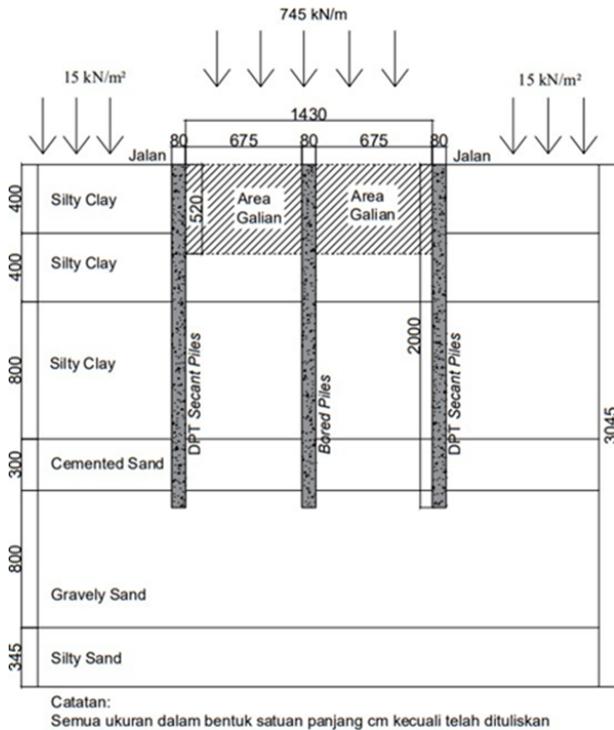
Analisis dilanjutkan pada underpass dengan meninjau dinding penahan tanah secant piles dan pondasi bored pile pada bagian tengah box menggunakan program PLAXIS. Pemodelan pada PLAXIS akan dilakukan dengan 2 jenis pemodelan, yaitu saat adanya pondasi bored pile dan tanpa adanya pondasi bored pile pada bagian tengah box underpass. Pada **Gambar 4** dapat dilihat ilustrasi untuk lapisan tanah dan pemodelan underpass ketika adanya pondasi bored pile di bagian tengah box, sedangkan **Gambar 5** merupakan ilustrasi lapisan tanah dan pemodelan underpass tanpa adanya pondasi bored pile pada bagian tengah box.

3 Hasil dan Pembahasan

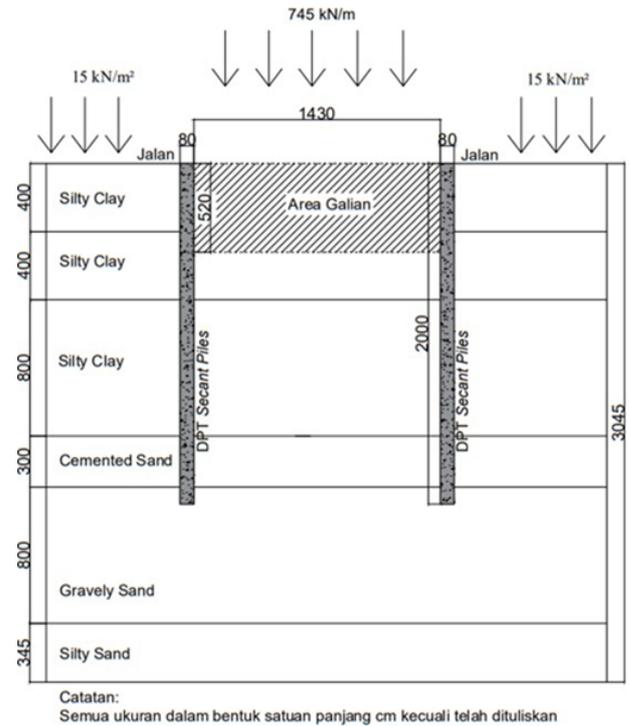
3.1 Kapasitas Daya Dukung Bored pile

Analisis kapasitas daya dukung bored pile dilakukan dengan perhitungan manual menggunakan beberapa metode berdasarkan data yang diperoleh, yaitu dengan metode statis, dan berdasarkan N-SPT. Kemudian hasil perhitungan tersebut akan dibandingkan dengan daya dukung bored pile dari hasil pengujian PDA, dan hasil dari analisis pemodelan pada PLAXIS akan digunakan sebagai beban untuk perbandingan sebagai daya dukung pondasi yang diijinkan. Kapasitas daya dukung ultimate bored pile adalah penjumlahan dari daya dukung pada ujung tiang dan selimut tiang.

Metode analisis daya dukung pondasi bored pile yang digunakan pertama adalah metode statis dengan menggunakan data hasil korelasi yang didapat dari nilai N-SPT. Kemudian hasil



Gambar 4. Ilustrasi Underpass dengan Bored Pile di Bagian Tengah



Gambar 5. Ilustrasi Underpass Tanpa Bored pile Di Bagian Tengah

yang didapatkan adalah daya dukung dari ujung, dan selimut tiang. Metode Reese And Wright untuk tanah non kohesif digunakan untuk menghitung daya dukung ujung tiang, karena lapisan tanah pada ujung tiang dengan kedalaman 20 meter merupakan tanah pasir dengan deskripsi tanah yaitu gravelly sand. Maka didapatkan daya dukung tahanan ujung sebesar 5805,5 kN.

Analisis dilanjutkan dengan mencari distribusi tegangan yang terjadi pada tanah. Menurut Kustiarini (2021), distribusi tegangan tanah adalah kondisi dimana tanah akan menyebarkan beban yang diterima dan membentuk area luasan daya dukung. Beban mengakibatkan terjadinya distribusi tegangan tanah pada kedalaman tanah yang ditinjau. Distribusi tegangan tanah didapat dari perkalian berat jenis tanah per lapisan dengan kedalaman lapisan tanah. Pada Gambar 4.1 merupakan distribusi tegangan tanah dan hasil tersebut akan digunakan untuk perhitungan daya dukung selimut tiang.

Kemudian pada daya dukung selimut tiang (Q_s) menggunakan metode lamda untuk lapisan tanah lempung, dan metode Coyle And Castello untuk tanah pasir. Hasil perhitungan tiap lapisannya dapat dilihat pada Tabel 4.1. Koefisien yang digunakan dalam perhitungan metode lambda adalah 0,2. Kemudian hasil perhitungan yang didapatkan untuk daya dukung selimut tiang adalah sebesar 1276,316 kN. Maka daya dukung ultimate pondasi bored pile dengan metode statis yaitu sebesar 7081,82 kN.

Analisis dilanjutkan dengan menggunakan nilai N-SPT yang didapatkan dari pengujian SPT. Pada perhitungan daya dukung ujung tiang dan selimut tiang, metode yang digunakan untuk adalah Metode Reese And Wright untuk tanah non kohesif, dan tanah kohesif. Hasil dari perhitungan daya dukung ujung

tiang (Q_p) adalah sebesar 1970,74 kN, dengan nilai SPT yang digunakan sebesar 60 sesuai dengan lapisan tanah pada ujung tiang. Kemudian perhitungan dilanjut dengan daya dukung selimut tiang, dan nilai SPT yang digunakan adalah sesuai dengan lapisan tanah tersebut. Dengan koefisien alfa yang digunakan untuk perhitungan pada lapisan tanah lempung menurut Reese And Wright (1997) yaitu 0,55. Didapatkan total daya dukung selimut tiang yaitu sebesar 8614,844 kN. Hasil daya dukung dari setiap lapisannya dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Nilai SPT dari pengujian SPT akan berbeda sesuai dengan karakteristik tanah tiap lapisan. Nilai SPT menggambarkan kondisi pada lapisan tanah yaitu kepadatan relatif tanah butiran besar, dan konsistensi pada tanah berbutir halus. Dimana kepadatan dan konsistensi mempengaruhi ketahanan gesek yang dihasilkan dari tanah. Tebal lapisan tanah juga berperan dalam menentukan ketahanan gesek tanah. Pada proses perhitungan daya dukung selimut tiang, nilai SPT yang digunakan adalah nilai SPT per lapisan tanah. Sehingga analisis daya dukung selimut tiang, merupakan total dari daya dukung selimut tiang pada per lapisan tanah. Akibatnya daya dukung pada selimut tiang memiliki nilai yang jauh lebih besar dari daya dukung ujung tiang. Maka daya dukung ultimate bored pile yang dihasilkan dari metode N-SPT adalah 10.612,58 kN. Perhitungan metode N-SPT dapat dilihat pada Lampiran 4.

Pada daya dukung tahanan ujung tiang, metode dengan hasil yang paling besar adalah metode statis, yaitu sebesar 5805,5 kN, dan yang paling kecil adalah hasil dari perhitungan berdasarkan nilai N-SPT yaitu 1970,74 kN. Sedangkan untuk tahanan selimut tiang, metode N-SPT memiliki hasil yang lebih besar dari metode statis. Hasil pengujian dari PDA dengan daya dukung ujung tiang sebesar 2333,98 kN, dan selimut tiang

yaitu 2775,28 kN, sehingga hasil dari uji PDA tidak memiliki perbedaan yang besar.

Kemudian pada pemodelan menggunakan PLAXIS, didapatkan gaya aksial bored pile yaitu sebesar 173,73 kN/m (lihat Gambar 4.2). Gaya aksial tersebut akan dijadikan sebagai beban untuk digunakan sebagai pembanding kapasitas daya dukung ijin bored pile. Hasil perbandingan dari daya dukung ijin bored pile dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Selanjutnya daya dukung ultimate tiang dibagi oleh nilai safety factor untuk mendapatkan daya dukung yang diizinkan. Menurut Tomlinson (1997), bahwa kapasitas daya dukung ultimate dari bored pile dibagi dengan nilai safety factor sebesar 2 untuk mendapatkan daya dukung ijin pondasi. Maka nilai dari daya dukung ijin harus lebih besar dari beban yang dihasilkan oleh pemodelan PLAXIS agar dapat dikatakan aman.

Pada Tabel 4.4 terlihat daya dukung ijin bored pile yang telah dibagi oleh safety factor. Metode statis menghasilkan nilai daya dukung ijin sebesar 3540,91 kN, metode N-SPT yaitu sebesar 5306,29 kN, dan uji PDA yaitu 2595,13 kN. Terlihat bahwa daya dukung ijin yang memenuhi batas aman dan nilainya lebih besar dari beban adalah metode statis, dan N-SPT. Sehingga daya dukung dari metode statis dan N-SPT tersebut dapat dikatakan aman karena bernilai lebih besar dari beban sebesar 3474,60 kN. Sedangkan daya dukung ijin yang dihasilkan dari uji PDA tidak memenuhi kriteria aman dan tidak mampu menahan beban, karena nilai daya dukung yang dihasilkan lebih kecil dari beban.

Daya dukung ijin dari uji PDA yang tidak memenuhi kriteria aman dapat dipengaruhi oleh beberapa hal, yaitu pada saat proses pemancangan tiang bor kedalaman pondasi bisa berbeda dari desain yang direncanakan, dan perbedaan dalam hasil korelasi data tanah ke pemodelan PLAXIS akibat kecenderungan melebihi perkiraan, sehingga nilai beban yang dihasilkan dari pemodelan pada PLAXIS dapat berbeda dari yang seharusnya.

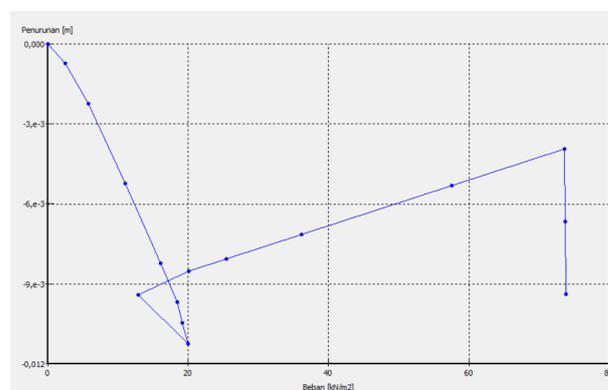
Kemudian hasil uji PDA yang diambil untuk perbandingan merupakan hasil pengujian pada pondasi bored pile titik BP-02 yang berada di sekitar STA 0+370. Pada titik tersebut pengujian SPT dilakukan dan menghasilkan boring log BH-02. Muka air tanah pada boring log BH-02 berada di kedalaman 1,2 meter. Sedangkan data tanah yang digunakan pada perhitungan metode statis, N-SPT, dan pemodelan pada PLAXIS merupakan hasil dari stratifikasi boring log BH-02 dan BH-03, dengan kedalaman muka air tanah yang diambil yaitu 4 meter. Hal ini juga dapat mempengaruhi kapasitas daya dukung ultimate bored pile dari pengujian PDA. Akibatnya daya dukung yang dihasilkan dari uji PDA memiliki nilai yang lebih kecil dari beban.

Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan analisis daya dukung tiang bor dengan menggunakan beberapa metode perhitungan, dan perangkat lunak selain PLAXIS. Sehingga hasil analisis yang didapat bisa dibandingkan untuk mencari nilai yang paling mendekati aslinya.

3.2 Penurunan Bored Pile

Pada hasil analisis dari pemodelan PLAXIS menghasilkan grafik penurunan seperti pada Gambar 4.3. Penurunan pertama

terjadi pada saat proses konstruksi dimana secant piles dan pondasi bored pile dipancang yaitu sebesar -11 mm. Kemudian karena sifat tanah yang merupakan plastis, seiring waktu saat adanya jeda pada proses konstruksi secant piles dan bored pile terjadi kenaikan tanah sebesar +1,5 mm. Kenaikan ini terjadi pada tahap konstruksi top slab. Setelah itu terdapat kenaikan tanah yang cukup signifikan. Hal ini disebabkan volume tanah yang berkurang akibat adanya galian tanah sampai kedalaman 5,4 m dan dewatering sampai kedalaman 6,4 m pada underpass. Kenaikan tanah yang terjadi pada proses ini mencapai +5,6 mm. Selanjutnya pada tahap pembebanan, kembali terjadi penurunan yang disebabkan oleh pembebanan lalu lintas pada top slab. Hal inilah menyebabkan terjadi penurunan -5,5 mm. Maka penurunan pondasi dari hasil analisis pemodelan menggunakan PLAXIS adalah 9,4 mm.



Gambar 6. Grafik Penurunan Bored pile

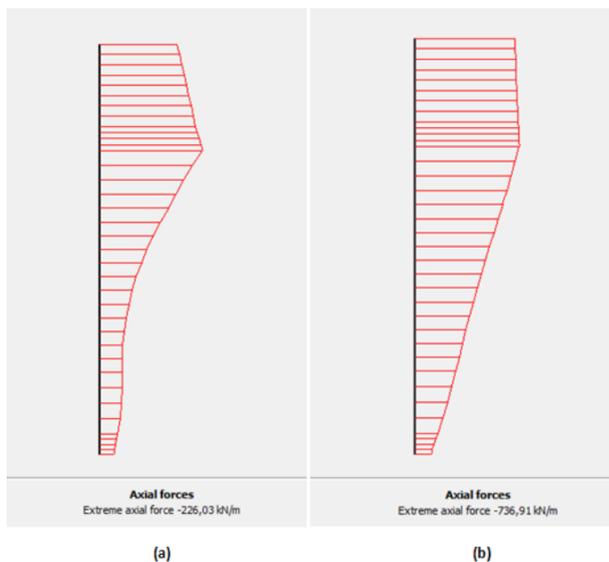
Pada hasil analisis menggunakan metode Poulos And Davis menghasilkan penurunan sebesar 7,10 mm. Perbedaan hasil metode statis dipengaruhi pada proses korelasi grafik faktor penurunan tanah yang mempengaruhi ketahanan dari tanah. Sedangkan pada pemodelan PLAXIS penurunan yang terjadi sebesar 9,37. Hasil penurunan bored pile dari pemodelan PLAXIS lebih besar dari metode statis. Tahapan yang diinput (lihat Gambar 4.3) pada pemodelan PLAXIS mempengaruhi pergerakan tanah dan penurunan pada bored pile. Hal ini menyebabkan distribusi tanah di sekitar bored pile lebih banyak bergerak akibat tahapan tersebut. Sedangkan metode statis hanya menggambarkan penurunan bored pile pada area yang tidak luas. Berdasarkan SNI 8460-2017 tentang Geoteknik, bahwa penurunan izin memiliki nilai kurang dari $15 \text{ cm} + b/600$ (b dalam cm) yaitu sebesar 15,13 cm. Sehingga penurunan terbesar dari analisis pada bored pile yaitu sebesar 0,937 cm < 15,13 cm telah memenuhi penurunan yang diizinkan, dan dapat dikatakan aman.

3.3 Kapasitas Daya Dukung Secant piles

3.3.1 Gaya Aksial

Underpass dimodelkan dengan adanya bored pile dan tanpa bored pile sehingga gaya aksial maksimum pada secant piles yang dihasilkan akan memiliki perbedaan pada kedua kondisi tersebut (lihat Gambar 4.4). Pada kondisi dengan adanya bored pile, gaya aksial maksimum yang dimiliki oleh secant piles

adalah sebesar 266,03 kN/m. Sedangkan gaya aksial maksimum pada secant piles dengan kondisi tanpa bored pile yaitu sebesar 736,91 kN/m. Nilai tersebut menunjukkan bahwa gaya aksial maksimum pada secant piles tanpa adanya bored pile memiliki nilai yang lebih besar dibanding pada kondisi dengan adanya bored pile. Perbedaan ini disebabkan karena sebelumnya beban hanya ditahan oleh secant piles. Kemudian setelah penambahan pondasi bored pile pada underpass, beban yang sebelumnya hanya ditahan oleh secant piles pada kondisi tanpa adanya bored pile menjadi terbagi ke pondasi bored pile. Sehingga nilai gaya aksial yang dihasilkan pada kondisi adanya bored pile dan tanpa bored pile akan berbeda.



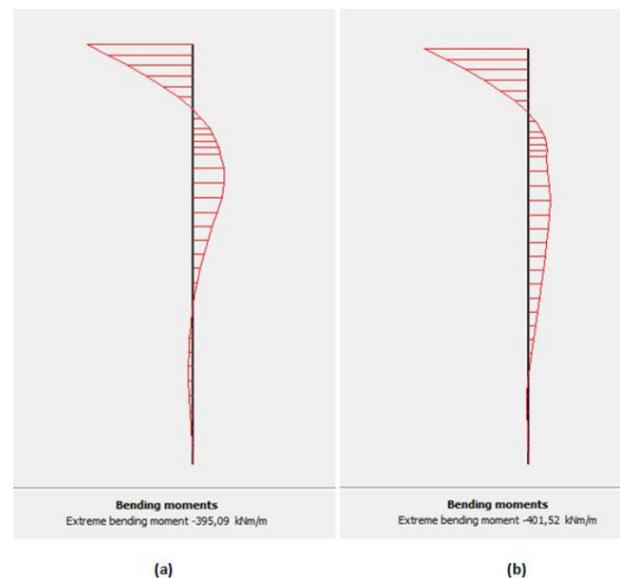
Gambar 7. Gaya Aksial Secant piles Kondisi (a) Dengan Bored pile dan (b) Tanpa Bored pile

Menurut Pramitasari (2021), gaya aksial maksimum secant piles dapat dikatakan aman ketika memiliki nilai yang lebih kecil dari batas gaya aksial maksimum. Dimana gaya aksial maksimum merupakan mutu beton yang digunakan pada secant piles. Mutu beton yang digunakan pada secant piles dari studi kasus Underpass Bulak Kapal adalah sebesar 30 Mpa, sehingga batas gaya aksial maksimum yang diijinkan harus kurang dari 30.000 kN/m². Menurut batas tersebut, gaya aksial maksimum yang dihasilkan pada kondisi adanya pondasi bored pile sebesar 4.502,6 kN/m² dan tanpa pondasi bored pile sebesar 14.738,2 kN/m² memiliki nilai gaya aksial maksimum yang lebih kecil. Sehingga secant piles pada kedua kondisi tersebut dapat dikatakan aman, dan mampu untuk menahan beban yang diterima.

3.3.2 Momen Lentur

Diketahui nilai momen lentur maksimum secant piles dari hasil analisis pemodelan menggunakan PLAXIS dengan adanya pondasi bored pile sebesar -395,09 kNm/m, sedangkan pemodelan tanpa adanya pondasi bored pile memiliki momen lentur maksimum sebesar -402,52 kNm/m. Terlihat pada Gambar 4.5 momen lentur maksimum yang dihasilkan dua pemodelan tersebut memiliki bentuk yang hampir serupa. Dimana pada

bagian atas momen lentur maksimum mengarah ke lendutan negatif akibat adanya beban yang berasal dari top slab dan lalu lintas. Kemudian arah lendutan kembali mengarah ke lendutan positif akibat adanya tekanan dari tanah, namun pada sisi sebaliknya tidak terjadi tahanan karena terdapat area galian dengan kedalaman 5,4 m.



Gambar 8. Momen Lentur Secant piles Kondisi (a) Dengan Bored pile, dan (b) Tanpa Bored pile

Perbedaan lendutan pada momen lentur maksimum secant piles pada pemodelan dengan pondasi bored pile dan tanpa pondasi bored pile terlihat pada ujung tiang secant piles. Hal ini disebabkan karena adanya tahanan yang berasal dari penambahan pondasi bored pile, dimana tanah mengalami peningkatan tegangan dan membentuk tahanan untuk secant piles. Sehingga arah lendutan pada pemodelan dengan pondasi bored pile berubah arah lebih cepat pada kedalaman 14 meter hingga 20 meter. Sedangkan lendutan momen lentur maksimum pada pemodelan tanpa adanya pondasi bored pile baru berubah arah pada kedalaman 17 meter.

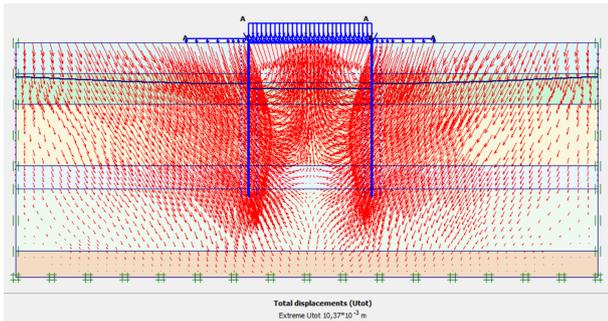
3.4 Analisis Stabilitas Secant piles

3.4.1 Deformasi Tanah dan Distribusi Tegangan

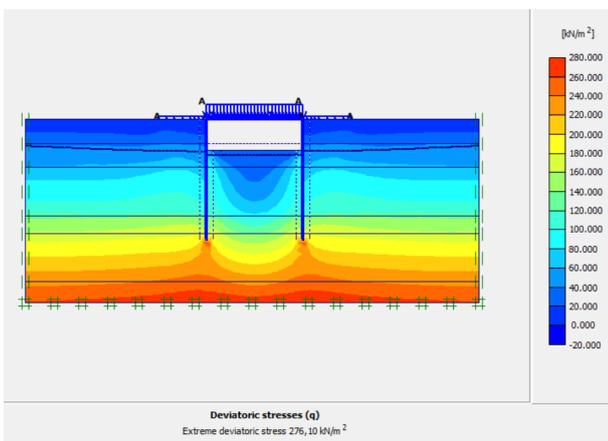
Hasil pemodelan pada PLAXIS dengan kondisi underpass dengan adanya bored pile dan tanpa bored pile telah didapatkan total deformasi tanah dan distribusi tegangan. Pada Gambar 4.6 terlihat deformasi tanah saat kondisi tanpa adanya bored pile sebesar 10,37 mm.

Arah deformasi tanah yang terjadi berada di sepanjang kedalaman secant piles, diakibatkan karena adanya beban dari lalu lintas yang ditanggung secant piles. Sedangkan pada bagian tengah terowongan, arah deformasi tanah dominan ke arah atas akibat tekanan yang diterima tanah dari secant piles, sehingga tanah mengembang dan mengalami kenaikan muka tanah. Pada kondisi ini angka keamanan yang dihasilkan adalah sebesar 2,724.

Hasil analisis dari distribusi tegangan saat kondisi underpass tanpa bored pile yang didapatkan adalah sebesar 276,10



Gambar 9. Deformasi Tanah Kondisi Tanpa Bored pile



Gambar 10. Momen Lentur Secant piles Kondisi (a) Dengan Bored pile, dan (b) Tanpa Bored pile

kN/m². Distribusi tegangan yang terlihat pada Gambar 4.7 menunjukkan bahwa terjadi penyebaran tegangan di sekitar secant piles yang disebabkan adanya tekanan tanah, dan beban di atasnya. Pada bagian galian, distribusi tegangan yang terlihat tidak begitu besar, akibat tekanan yang diterima hanya dari satu sisi. Kemudian semakin ke bawah, tegangan semakin besar akibat dipengaruhi oleh kedalaman, dan berat jenis dari lapisan tanah tersebut

Saat kondisi underpass dengan adanya bored pile menghasilkan total deformasi tanah yang terjadi sebesar 8,32 mm, dan angka keamanan yang dihasilkan yaitu sebesar 3,580. Arah deformasi tanah akan terjadi pada sepanjang tiang bored pile dan secant piles terlihat pada Gambar 4.8.

Arah deformasi di sekitar bored pile bergerak ke bawah akibat beban dari atas. Kemudian deformasi yang terjadi di sekitar secant piles mengarah ke bawah dan kesamping menuju ke tengah underpass, karena disebabkan adanya beban dari atas, dan tekanan tanah dari sisi samping secant piles. penambahan bored pile juga mempengaruhi deformasi disepanjang secant piles, karena adanya tekanan yang diterima akibat penambahan bored pile.

Kemudian terlihat pada Gambar 4.8 tekanan yang dihasilkan dari secant piles dan bored pile membuat tanah di sekitar bored pile mengalami keruntuhan, yaitu keruntuhan geser umum. Tanah yang ditekan oleh bored pile bergerak dan menyebar ke arah sekitarnya namun tertahan oleh secant piles, akibatnya

Tabel 5: Hasil Perbandingan Tebal Perkerasan.

Kondisi	Deformasi Tanah (mm)	Distribusi Tegangan (kN/m ²)	Angka Keamanan
Dengan Bored pile	8,61	278,80	3,580
Tanpa Bored pile	10,37	276,10	2,724

tanah bergerak dan menekan lapisan tanah dengan kepadatan yang lebih rendah. Hal ini ditunjukkan dengan adanya kenaikan pada muka tanah diantara secant piles dan pondasi bored pile.

Distribusi tegangan yang didapat dari analisis saat kondisi underpass dengan adanya bored pile yaitu sebesar 278,80 kN/m². Pada Gambar 4.9 distribusi tegangan terlihat sama seperti distribusi tegangan pada kondisi tanpa bored pile, dimana tegangan berada di sekitar secant piles dan pondasi bored pile. Kondisi ini dipengaruhi oleh kedalaman, dan berat jenis dari lapisan tanah tersebut, akibatnya distribusi tegangan semakin ke bawah akan semakin besar. Perbedaan besaran nilai distribusi tegangan yang terjadi pada kondisi adanya bored pile dan tanpa bored pile dipengaruhi oleh penambahan pondasi bored pile, sehingga tegangan yang dihasilkan meningkat.

Selanjutnya beberapa penelitian dilakukan dalam menganalisis beberapa kondisi pada dinding penahan tanah secant piles untuk mengetahui total deformasi tanah yang terjadi. Pada penelitian pramitasari (2021), hasil analisis yang didapatkan dari penelitian perkuatan galian dengan secant piles bahwa total deformasi tanah yang terjadi saat kondisi galian sebelum adanya perkuatan adalah 11,97 mm dengan angka keamanan 1,104. Kemudian deformasi tanah turun menjadi 10,08 dan angka keamanan 2,826 setelah adanya perkuatan secant piles. Hal itu membuktikan bahwa adanya perkuatan dapat menurunkan nilai deformasi tanah sehingga meningkatkan angka keamanan pada galian

Pada penelitian Sianipar (2017), dilakukan penelitian pada dinding penahan tanah secant piles dengan menganalisis perkuatan secant piles dengan menggunakan tie back anchor maupun tidak. Dihasilkan nilai deformasi tanah pada secant piles kondisi tanpa tie back anchor yaitu sebesar 2,124 mm dengan angka keamanan 1,591. Kemudian pada kondisi dengan tie back anchor, deformasi yang dihasilkan menurun menjadi 0,674 mm dengan kenaikan angka keamanan yaitu 1,919. Sehingga perkuatan pada secant piles menghasilkan nilai angka keamanan yang lebih besar, dengan total deformasi yang lebih kecil.

Selanjutnya pada penelitian yang dilakukan Nurhaziqoh (2020), melakukan pemodelan secant piles dengan dan tanpa angkur. Dimana saat kondisi secant piles tanpa angkur, total deformasi yang dihasilkan sebesar 1340 mm dengan angka keamanan 1 yang dapat dikatakan kritis atau tidak aman. Kemudian saat kondisi secant piles dengan adanya angkur, total deformasi mengalami penurunan menjadi 77,54 mm dan kenaikan angka keamanan menjadi 2,225. Sehingga dapat disimpulkan jika dilakukan perkuatan pada dinding penahan tanah secant piles, maka total deformasi tanah yang dihasilkan akan berkurang dan meningkatkan angka keamanan pada secant piles.

Menurut ketentuan dari SNI 8460-2017 tentang Geoteknik, angka keamanan yang harus dipenuhi dan diizinkan adalah

sebesar $SF \geq 1,5$. Seperti yang terlihat pada Tabel 4.9, bahwa kondisi underpass dengan adanya bored pile dan tanpa bored pile termasuk dalam kondisi aman dan telah sesuai dengan ketentuan menurut SNI 8460-2017 karena memiliki angka keamanan $\geq 1,5$.

3.5 Defleksi Secant piles

Hasil analisis defleksi secant piles dapat dilihat pada Gambar 4.10 yang merupakan kondisi defleksi secant piles ketika adanya bored pile dan tanpa adanya bored pile. Pada variasi adanya pondasi bored pile, defleksi yang dihasilkan secant piles yaitu sebesar 5,95 mm. Kemudian hasil analisis pada kondisi tanpa adanya pondasi bored pile yaitu sebesar 6,12 mm.

Defleksi yang terjadi pada kedua kondisi tersebut memiliki lendutan besar pada kedalaman tanah yang hampir serupa. Hal ini terjadi akibat adanya tekanan dari tanah dan beban lalu lintas pada sisi samping secant piles, namun karena adanya area galian pada underpass mengakibatkan tidak adanya tahanan.

Kemudian adanya perbedaan pada ujung defleksi dari kedua kondisi tersebut. Pada defleksi secant piles dengan adanya pondasi bored pile mengalami pengurangan defleksi pada ujung tiangnya, hal ini akibat adanya tahanan dari tanah yang tertahan oleh pondasi bored pile. Tanah tersebut mengalami peningkatan tegangan dan tekanan dari bored pile. Sebaliknya pada kondisi ujung defleksi secant piles tanpa adanya bored pile memiliki perbedaan besaran dengan kondisi adanya bored pile. Defleksi pada ujung secant piles tersebut tidak mengalami besaran tahanan tanah yang serupa dengan tahanan tanah pada kondisi adanya pondasi bored pile, sehingga defleksi yang terjadi lebih besar.

Meskipun adanya perbedaan defleksi dimana kondisi tanpa adanya pondasi bored pile lebih besar dari kondisi underpass dengan adanya bored pile, namun defleksi secant piles yang terjadi tetap bisa dikatakan aman. Karena kedua kondisi memiliki lendutan ke arah lendutan positif. Perbandingan defleksi dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Menurut SNI 8460-2017 tentang Geoteknik, defleksi maksimum yang diizinkan adalah kurang dari 0,5% H, yaitu sebesar 0,1 m. Sehingga defleksi yang terjadi pada kondisi adanya bored pile dan tanpa bored pile termasuk dalam kondisi yang aman, karena defleksi yang dihasilkan masing – masing sebesar 5,95 mm dan 6,12 mm, sehingga nilai defleksi secant piles yang dihasilkan lebih kecil dari batas defleksi maksimum.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dari penelitian tugas akhir yang telah dilakukan sebelumnya, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan adanya bored pile pada underpass dihasilkan gaya aksial pada secant piles sebesar 226,03 kN/m, momen lentur sebesar -395,09 kNm/m, dan defleksi yaitu 5,95 mm. Kemudian menghasilkan total deformasi tanah 8,32 mm dengan angka keamanan 3,580, dan distribusi tegangan yaitu -636,33 kN/m².
2. Tanpa adanya bored pile pada underpass yaitu gaya aksial secant piles sebesar 736,91 kN/m, momen lentur sebesar -401,52 kNm/m, dan defleksi yaitu 6,12 mm. Kemudian menghasilkan total deformasi tanah 10,37 mm dengan angka keamanan 2,724, dan distribusi tegangan yaitu -632,38 kN/m².
3. Hasil analisis menunjukkan bahwa terjadi peningkatan tegangan diantara secant piles dan bored pile akibat penambahan bored pile. Akibatnya terjadi penambahan ketahanan pada tanah yang ditunjukkan dengan adanya peningkatan stabilitas underpass yaitu defleksi secant piles berkurang dari 6,12 mm menjadi 5,95 mm, deformasi tanah dari 10,37 mm menjadi 8,32 mm dan angka keamanan bertambah dari 2,725 menjadi sebesar 3,580. Kemudian penambahan bored pile juga menurunkan gaya aksial pada secant piles yang awalnya 738,91 kN/m menjadi 226,03 kN/m, dan menurunkan nilai momen lentur dari -401,52 kNm/m hingga menjadi -395,09 kNm/m.

Daftar Pustaka

- [1] Alisjahbana, S.W., 2011. *Dinamika Struktur Pelat II*. Jakarta: UB Press.
- [2] Alisjahbana, S.W. Alisjahbana, I., 2021. Pengaruh beban ledakan (Blast Load) terhadap perilaku dinamik pelat lantai dan pelat atap bangunan. Jakarta: UB Press.
- [3] Alisjahbana, S.W. et al., 2019. Dynamic behaviour of stiffened orthotropic plates subjected to Friedlander blast load. In: 7th International Conference on Euro Asia Civil Engineering Forum, 7, pp.1-9.
- [4] Chandra, S., 2014. *Modelling of Soil Behaviour*. Indian Institute of Technology Kanpur.
- [5] Gibigaye, M., Crespín, P. Ezechiel, I., 2015. Dynamic response of a rigid pavement plate based on an inertial soil. Hindawi Publishing Corporation, 2016, article 4975345.
- [6] Haji, T.K., 2017. Evaluating the effects of tunnel construction on buildings. PhD thesis, University of Nottingham.
- [7] Katili, I., 2003. *Aplikasi Metode Elemen Hingga untuk Pelat Lentur*. Jakarta: UI Press.
- [8] Pevzner, P., Weller, T. Berkovits, A., 2000. Further modification of Bolotin method in vibration analysis of rectangular plates. *AIAA Journal*, 38(9), pp.1725-1729.
- [9] Rudolf, S., 1989. *Teori dan Analisis Pelat Metode Klasik dan Numerik*. Jakarta: Erlangga.
- [10] Timoshenko, S.P. Goodier, J.N., 1974. *Theory of Elasticity*. Singapore: McGraw-Hill Book Company.