

*Perilaku Perkerasan Sistem Pelat Terpaku pada Tanah Lunak
Akibat Beban Aksial Eksentris dan Lateral*



Oleh:

Kusrin

10202100009

Disetujui Untuk Diajukan dalam:

Sidang Terbuka Disertasi Hari/Tanggal: Kamis, 28 Agustus 2025

Promotor

Prof. Ir. Pratikso, MST., Ph.D.

Ko – Promotor

Dr. Abdul Rochim, S.T., M.T.

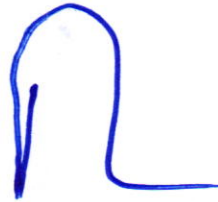
**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG, SEMARANG
2025**

LEMBAR PENGUJI

Sidang Terbuka

Hari : Kamis, 28 Agustus 2025

Promotor :



Prof. Ir. Pratikso, MST., Ph.D.

Ko-Promotor :



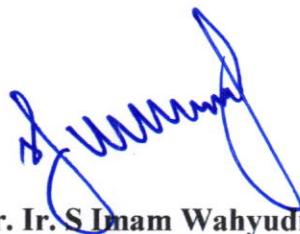
Dr. Abdul Rochim, S.T., M.T.

Penguji Eksternal :



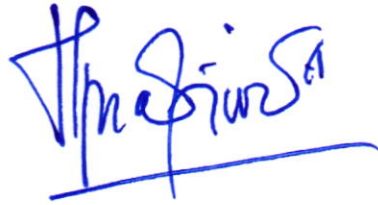
Prof. Yusep Muslih Purwana, S.T., M.T., Ph.D.

Penguji Internal :



Prof. Dr. Ir. S Inam Wahyudi, DEA.

Penguji Internal :

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Henny Pratiwi Adi', with a long horizontal line extending from the bottom.

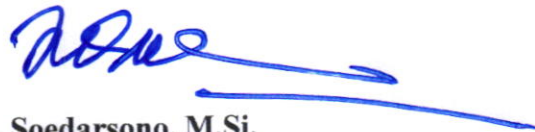
Prof. Dr. Ir. Henny Pratiwi Adi, S.T., M.T.

Penguji Internal:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Rifqi Brillyant Arief', with a horizontal line underneath.

Dr. Rifqi Brillyant Arief, S.T., M.T.

Penguji Internal :

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Soedarsono', with a long horizontal line extending from the bottom.

Dr. Ir. Soedarsono, M.Si.

Kusrin DTS

UJIAN TERBUKA_21 08 2025.pdf

 Universitas Semarang

Document Details

Submission ID**trn:oid:::3618:109157165****Submission Date****Aug 21, 2025, 1:07 PM GMT+7****Download Date****Aug 21, 2025, 1:15 PM GMT+7****File Name****UJIAN TERBUKA_21 08 2025.pdf****File Size****6.3 MB****164 Pages****37,459 Words****218,953 Characters**

20% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- Bibliography
- Quoted Text
- Cited Text
- Small Matches (less than 20 words)
- Abstract
- Methods and Materials

Exclusions

- 9 Excluded Matches
- 1 Excluded Website

Top Sources

- 10%  Internet sources
- 1%  Publications
- 12%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

1 Integrity Flag for Review



Replaced Characters

72 suspect characters on 16 pages

Letters are swapped with similar characters from another alphabet.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

- 10%  Internet sources
- 1%  Publications
- 12%  Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Submitted works	Sultan Agung Islamic University on 2017-07-16	12%
2	Internet	repository.uir.ac.id	3%
3	Internet	123dok.com	3%
4	Internet	www.scribd.com	<1%
5	Internet	text-id.123dok.com	<1%
6	Internet	repository.unri.ac.id	<1%
7	Internet	ugm.ac.id	<1%
8	Internet	pdfcoffee.com	<1%
9	Publication	Darmadi, Darmadi. "Perhitungan Kapasitas Jalan Dengan Model Lalu Lintas Mjcro...	<1%
10	Publication	Parwanti, Asnun. "Model bendung barrier plastik untuk penanganan darurat ban...	<1%
11	Internet	ejournal.umm.ac.id	<1%

12

Publication

Wen-Li Yang, Rafael I. Nepomechie, Yao-Zhong Zhang. "Q-operator and <mml:ma... <1%

13

Internet

www.respondeai.com.br <1%

PERILAKU PERKERASAN SISTEM PELAT TERPAKU PADA TANAH LUNAK AKIBAT BEBAN AKSIAL EKSENTRIS DAN LATERAL

DISERTASI

UJIAN TERBUKA

Diajukan Sebagai Salah Satu Persyaratan Untuk Mencapai Gelar Doktor



Promotor : Prof. Ir. H. Pratikso, MST., Ph.D.

Ko Promotor : Dr. Abdul Rochim, ST., MT.

Nama Mahasiswa : Kusrin

NIM : 10202100009

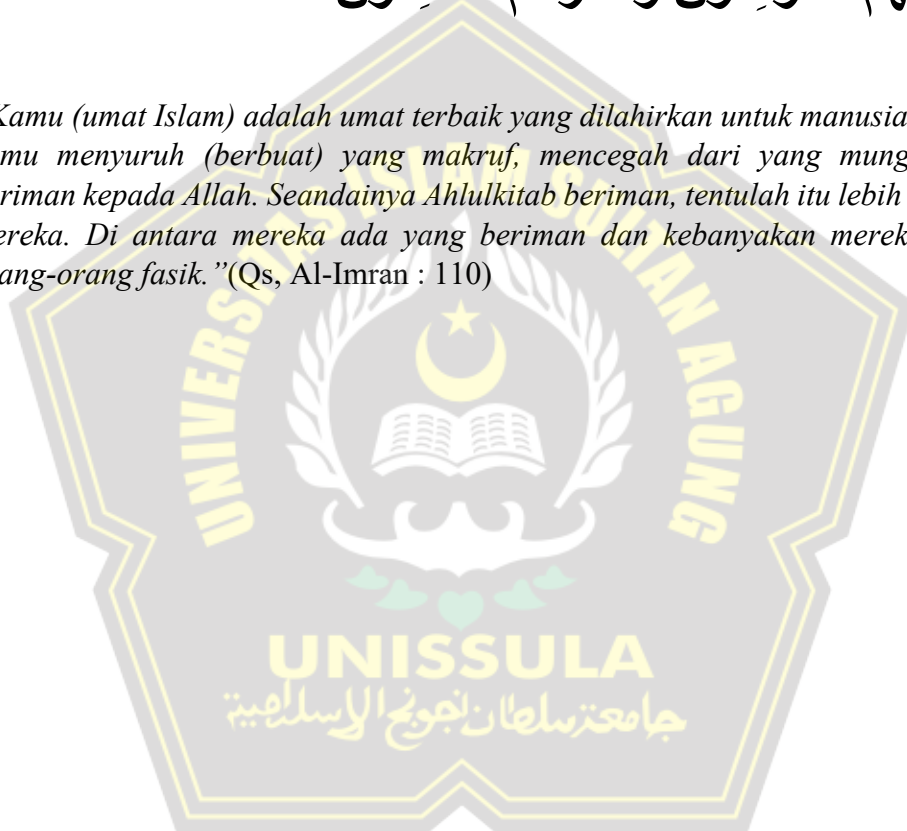
**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG
2025**

MOTTO

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

كُنْتُمْ خَيْرَ أُمَّةٍ أُخْرِجَتْ لِلنَّاسِ تَأْمُرُونَ بِالْمَعْرُوفِ وَتَنْهَوْنَ
عَنِ الْمُنْكَرِ وَتُؤْمِنُونَ بِاللَّهِ وَلَوْ آمَنَ أَهْلُ الْكِتَابِ لَكَانَ خَيْرًا
لَّهُمْ مِنْهُمْ الْمُؤْمِنُونَ وَأَكْثَرُهُمُ الْفَاسِقُونَ

“Kamu (umat Islam) adalah umat terbaik yang dilahirkan untuk manusia (selama) kamu menyuruh (berbuat) yang makruf, mencegah dari yang mungkar, dan beriman kepada Allah. Seandainya Ahlulkitab beriman, tentulah itu lebih baik bagi mereka. Di antara mereka ada yang beriman dan kebanyakan mereka adalah orang-orang fasik.”(Qs, Al-Imran : 110)



PERSEBAHAN

Alhamdulillah, Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan taufik, Rahmat dan hidayah Nya. Sholawat serta salam kepada Junjungan kita Nabi Muhammad SAW.

Disertasi ini saya persembahkan untuk:

- 1) Almarhum Bapak Kartoredjo, Almarhumah Ibu Batiyah atas segala cita-cita dan tindakan penulis telah mengiringi langkah penulis menuju keberhasilan studi ini,
- 2) Almarhum Mas Warno, almarhum Mas Muslikan yang selalu mendorong saya untuk berkarya yang baik.
- 3) Kakak saya Mbak In dan Mbak Amah sekeluarga yang selalu memberi bantuan dan dorongan untuk bisa berbuat yang terbaik dan dapat memberi manfaat.
- 4) Adik Peni sekeluarga dan Adik Min sekeluarga.
- 5) Istriku Muslichatin atas dukungan dan kesabaran, beserta anak-anak, Khansa Helmy Pradana dan Dinda Feyruz Chalisa selalu tercurah selama penulis menempuh studi ini.
- 6) Bapak Rektor, Bapak Dekan Fakultas Teknik USM, Dosen, dan seluruh staf di lingkungan Universitas Semarang,
- 7) Bapak/Ibu Dosen Magister Teknik Sipil UGM dan Bapak/Ibu Dosen Program Doktor Teknik Sipil Unissula Semarang.

ABSTRAK

1 Perkerasan kaku sering digunakan pada jalan di atas tanah lunak, tetapi tantangan utama yang dihadapi adalah defleksi yang tidak merata (differential settlement) baik secara melintang maupun memanjang trase jalan. Hal ini terjadi akibat distribusi beban yang tidak merata serta ketidakseragaman karakteristik tanah dasar. Kekuatan perkerasan kaku sangat bergantung pada interaksi antara pelat beton dan tanah dasar, termasuk potensi terbentuknya rongga yang dapat mengurangi stabilitasnya. Penelitian ini bertujuan mengetahui gambaran perilaku pelat perkerasan pada perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku di atas tanah lunak dan pola pergerakan tiang yang dapat mempengaruhi deformasi pelat.

Masalah tersebut dapat diatasi dengan berbagai metode, salah satunya adalah Sistem Pelat Terpaku (Nailed-Slab System). Metode ini menawarkan solusi efektif dengan meningkatkan daya dukung tanah dasar dan memperbaiki interaksi antara pelat dan tanah, sehingga mengurangi risiko Defleksi diferensial dan meningkatkan umur layanan jalan. Pembuatan model skala Laboratorium *prototipe* perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku dibuat dengan ukuran dimensi pelat 120 cm x 120 cm x 10 cm, sedangkan tiang sebagai pengaku berbentuk bulat dengan tinggi tiang 100 cm, diameter tiang 10 cm dan jarak antar tiang 100 cm. Pada tahapan pengujian ini motor penggerak akan di seting sesuai dengan beban lateral sebesar 1 kN, 2 kN dan 4 kN dengan beban vertikal/aksial eksentris 1 kN., 2 kN, dan 4 kN. Pembacaan perilaku plat dan tiang terhadap beban dipantau oleh *strain gauge* untun mendapat nilai *gap* antara tanah dan struktur beton.

Hasil uji model di laboratorium menunjukkan bahwa Defleksi terbesar pada *strain gauge* terjadi di dekat pusat beban aksial eksentris sebesar 0,33 mm. Defleksi ini semakin berkurang seiring dengan bertambahnya jarak dari pusat beban, dengan nilai 0,16 mm pada bagian tengah pelat dan 0,11 mm pada titik yang lebih jauh. Lendutan maksimum pelat perkerasan tercatat 0,33 mm saat menerima beban aksial eksentris sebesar 4 kN, dengan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN. Hasil ini mengindikasikan bahwa distribusi Defleksi pada pelat cenderung menurun seiring dengan meningkatnya jarak dari pusat beban.

Kata kunci: Perkerasan kaku, Sistem pelat terpaku, Tanah lunak, Stabilitas tanah.

ABSTRACT

Rigid pavements are often used on roads over soft soils, but the main challenge faced is differential settlement both across and along the roadway. This occurs due to uneven load distribution and non-uniformity of subgrade characteristics. The strength of a rigid pavement is highly dependent on the interaction between the concrete slab and the subgrade, including the potential for voids to form which can reduce its stability.

The problem has been addressed by various methods, one of which is the Nailed-Slab System. This method offers an effective solution by increasing the bearing capacity of the subgrade and improving the interaction between the slab and the soil, thereby reducing the risk of differential settlement and increasing the service life of the road. Laboratory scale modeling of rigid pavement prototypes with a nailed-slab system is made with plate dimensions of 120 cm x 120 cm x 10 cm, while the poles as stiffeners are round with a pole height of 100 cm, a pole diameter of 10 cm and a distance between poles of 100 cm. At this stage of the test, the drive motor will be set according to lateral loads of 1 kN, 2 kN and 4 kN with vertical/axial eccentric loads of 1 kN, 2 kN, and 4 kN. The reading of the behavior of the plate and pole against the load is monitored by a strain gauge to obtain the value of the gap between the soil and the concrete structure.

The results of the model tests in the laboratory showed that the largest drop in the strain gauge occurred near the center of the eccentric axial load 0,33 mm. This settlement decreased as the distance from the load center increased, with values of 0,16 mm at the center of the slab and 0,11 mm at more distant points. The maximum deflection of the pavement slab was recorded as 0,33 mm when receiving an eccentric axial load of 4 kN, with lateral load variations of 1 kN, 2 kN, and 4 kN. These results indicate that the settlement distribution of the slab tends to decrease as the distance from the load center increases.

Keywords: Rigid pavement, Nailed Slab System, Soft soil, Soil stability.

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Segala puji dan syukur penulis panjatkan Kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena hanya dengan Berkah dan Rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan Laporan Disertasi dengan judul “Perilaku Perkerasan Sistem Pelat Terpaku Pada Tanah Lunak Akibat Beban Aksial Eksentris dan Lateral”. Penelitian Disertasi ini disusun sebagai bahan ujian terbuka dan salah satu persyaratan untuk mencapai gelar Doktor Teknik Sipil pada Program Doktor Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya, terutama kepada yang terhormat Bapak/Ibu :

1. Prof. Dr. Gunarto, S.H., M.Hum., selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung Semarang,
2. Dr. Abdul Rochim, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung, sekaligus sebagai Ko-Promotor dan Penguji atas bimbingan, dukungan serta motivasi dan membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini,
3. Prof. Dr. Ir. H. S. Imam Wahyudi, DEA., selaku Ketua Program Doktor Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung, sekaligus sebagai Penguji atas saran dalam penyempurnaan penelitian ini,
4. Prof. Ir. H. Pratikso, MST., Ph. D., selaku Sekretaris Program Doktor Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung, sekaligus sebagai Promotor dan Penguji atas bimbingan, dukungan serta motivasi dan kesabarannya dalam membantu penulis menyelesaikan penelitian ini,
5. Prof. Yosep Muslih Purwana, S.T., M.T., Ph. D., selaku Penguji yang telah membaca, mengoreksi dan menilai disertasi ini,
6. Dosen Program Doktor Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung,
7. Kepala Laboratorium Mekanika Tanah dan seluruh staf di Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung,
8. Staf, pegawai serta semua pihak yang telah membantu terlaksananya ujian sidang terbuka ini.

Penulis telah berusaha menyusun Laporan Disertasi ini dengan kerja keras, namun menyadari bahwa penyusunan disertasi ini masih belum sempurna, oleh

karena itu penulis mohon saran dan kritik yang bersifat membangun dari semua pihak agar disertasi ini menjadi lebih sempurna.

Semoga hasil penelitian disertasi ini dapat menjadi karya penelitian yang dapat bermanfaat bagi penulis, masyarakat, bangsa dan Negara Indonesia. Aamiin.

Semarang, Agustus 2025
Penulis

(Kusrin)



DAFTAR ISI

DISERTASI.....	i
MOTTO	ii
PERSEBAHAN	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	7
1.3 Perumusan Masalah	8
1.4 Maksud dan Tujuan Penelitian.....	8
1.5 Manfaat Penelitian	9
1.6 Ruang Lingkup Penelitian.....	9
1.7 Sistematika Penulisan	10
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN KERANGKA BERPIKIR.....	12
2.1 Perilaku Tanah Lunak.....	12
2.1.1 Stabilitas dan Perkuatan Tanah Lunak Sebagai Tanah Dasar Timbunan Jalan	13
2.1.2 Defleksi Perkerasan di Atas Tanah Lunak	16
2.2 Perkerasan Kaku dengan Sistem Pelat Terpaku	17
2.2.1 Konstruksi Sarang Laba-laba (KSLL)	17
2.2.2 Fondasi Cakar Ayam	17
2.2.3 Sistem Pelat Terpaku	20
2.3 Beban Lateral.....	23
2.3.1 Tiang Mendukung Beban Lateral	24
2.3.2 Analisa Defleksi Tiang Tomlinson	26
2.4 Defleksi Pelat Perkerasan	32
2.5 Program Numerik	37
2.5.1 Masukan Program Numerik.....	37
2.5.2 Perhitungan Dinamik Pada Numerik	38
2.5.3 Keluaran Program Numerik.....	39

2.6	Penelitian Sejenis Terdahulu.....	39
2.7	Gap Penelitian.....	50
2.8	Kerangka Berpikir.....	51
BAB III METODE PENELITIAN.....		55
3.1	Metode Penelitian	55
3.2	Material Tanah dan Bahan Beton.....	56
3.2.1	Tanah.....	56
3.2.2	Beton dan baja tulangan.....	56
3.3	Metode Pelaksanaan	57
3.4	Peralatan Penelitian.....	58
3.5	Tahapan Penelitian.....	58
3.5.1	Tahap Persiapan dan Pembuatan Benda Uji	60
3.5.2	Pelaksanaan Pengujian di laboratorium	69
3.5.3	Tahap Pengumpulan Data.....	72
3.5.4	Tahap Analisis Data.....	72
3.5.5	Penyajian Hasil Penelitian dan Studi Komparasi	73
BAB IV ANALISA DATA DAN HASIL ANALISIS.....		74
4.1	Sifat-sifat Material	74
4.1.1	Tanah lunak	74
4.1.2	Pelat dan tiang uji	77
4.2	Uji Pembebanan Monotonik	79
4.3	Uji Beban di Tepi Pelat (Beban Aksial Eksentris) dan Beban Lateral.....	80
4.3.1	Hasil Uji Defleksi Pada Pelat Perkerasan	80
4.3.2	Hasil Uji Defleksi Pada Tiang	94
BAB V PEMBAHASAN HASIL PENELITIAN.....		103
5.1	ANALISIS PEMODELAN <i>FEM</i> 3D	103
5.1.1	Idealisasi Geometri.....	103
5.1.2	Hasil Analisis FEM	104
5.2	KOMPARASI HASIL UJI MODEL DAN <i>FEM</i>	130
5.3	Perbandingan Dengan Penelitian Sebelumnya	138
BAB VI KESIMPULAN, IMPLEMENTASI DAN REKOMENDASI		140
6.1	Kesimpulan.....	140
6.2	Implementasi dan Rekomendasi	141
DAFTAR PUSTAKA		143

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sebaran tanah lunak di Indonesia (Puri, 2015).....	12
Gambar 2.2 Stabilisasi Pada Tanah Lunak (Dept. PU. 2005)	14
Gambar 2.3 Analogi Perkerasan kaku yang tebal digantikan oleh Perkerasan Kaku yang lebih tipis dan diperkuat dengan tiang-tiang	16
Gambar 2. 4 Denah dan penampang Fondasi KSSL (Wahyudi, dkk., 2010)	17
Gambar 2. 5 Sistem cakar ayam pada Jalan Prof. Sedyatmo (Hardiyatmo, 2010)	18
Gambar 2. 6 Contoh detail desain fondasi CAM (Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, 2007).....	19
Gambar 2. 7 Ilustrasi Pengaruh Lateral Pada Tanah Disekitar Tiang (Christensen, 2006)	25
Gambar 2. 8 Ilustrasi Pengaruh Lateral Pada Tanah Disekitar Tiang (Jagodnik, 2014).....	25
Gambar 2. 9 Tiang Dalam Menahan Beban Lateral (Tomlinson, 1977)	26
Gambar 2. 10 Mekanisme Keruntuhan Metode Broms (Tomlinson, 1977)	29
Gambar 2. 11 Ilustrasi Perilaku Defleksi Tiang Akibat beban Lateral (Christensen, 2006)	31
Gambar 2. 12 Tekanan Di dalam Tanah Akibat Beban (Rao, 2010).....	31
Gambar 2. 13 Balok Diatas pondasi elastis dengan panjang terbatas akibat beban terpusat (Young dan Budynas, 2002)	34
Gambar 2. 14 Pengaruh penggunaan tiang dalam tanah di bawah pelat (Hardiyatmo, 2011).....	34
Gambar 2.15 Skematik pengujian pelat dengan tiang.....	41
Gambar 2. 16 Skematik pengujian tiang.....	41
Gambar 2. 17 Hubungan displacement dengan friksi dan Modulus friksi	42
Gambar 2. 18 Pengujian beban dengan koperan (Anas Puri, 2013).....	43
Gambar 2. 19 Skemati Pengujian (Anas Puri, 2014)	44
Gambar 2. 20 Pengujian Skala Penuh (Willis D., 2013).....	45
Gambar 2. 21 Skema pengujian yang dilakukan oleh Chandrasekaran (2008)	46
Gambar 2. 22 Skema pengujian yang dilakukan oleh Mahdy Khari (2014).....	46
Gambar 2. 23 Model pengujian Numeris Elhakim A.F. (2014)	47
Gambar 2.24 Kerangka Berpikir Penelitian	53
Gambar 3. 1 Skematik Prototipe Penelitian	58
Gambar 3. 2 Skematik alat uji dalam 3D	58
Gambar 3. 3 Bagan Alir Penelitian.....	60

Gambar 3. 4 Bak uji dalam 3D	62
Gambar 3. 5 Perletakan strain gauge pada tulangan dalam 3D	64
Gambar 3. 6 Prototipe pelat perkerasan dalam bak uji.....	65
Gambar 3. 7 Strain gauge tipe FLA-5-11	67
Gambar 3. 8 Data logger.....	67
Gambar 3. 9 Instrumen Motor penggerak	68
Gambar 3. 10 Inverter.....	68
Gambar 3. 11 Kamera.....	69
Gambar 3. 12 Alat Uji Gradasi	70
Gambar 3. 13 Alat Uji Atterberg Limit.....	70
Gambar 3. 14 Alat Uji Kuat Tekan Beton	71
Gambar 4. 1 Distribusi Ukuran Butiran Tanah	75
Gambar 4. 2 Batas-batas Atterberg Tanah Guntur.	75
Gambar 4. 3 Sub kelompok A-7 dari Batas-batas Atterberg.	76
Gambar 4. 4 Grafik Uji Geser Langsung (Direct Shesr Test).	76
Gambar 4. 5 Tulangan Pelat Perkerasan	77
Gambar 4. 6 Tulangan Tiang	78
Gambar 4. 7 Pemasangan Strain gauge Pelat Perkerasan.....	78
Gambar 4. 8 Proses Pengecoran Pelat dan Tiang.....	79
Gambar 4. 9 Skema Alat Uji di Laboratorium	80
Gambar 4. 10 Letak Beban Aksial Eksentris Pada Pelat Perkerasan.....	80
Gambar 4. 11 Posisi Strain gauge pada Pelat dan Tiang Model.....	81
Gambar 4. 12 Denah Pembebanan Aksial Eksentris dan Lateral	82
Gambar 4. 13 Posisi Strain gauge arah melintang pada Pelat Model	85
Gambar 4. 14 Lendutan Pelat Terpaku uji model pada arah memanjang pelat akibat beban 4 kN di tepi (eksentris) di tulangan atas	89
Gambar 4. 15 Lendutan Pelat Terpaku uji model pada arah memanjang pelat akibat beban 4 kN di tepi (eksentris) di tulangan bawah	90
Gambar 4. 16 Lendutan Pelat Terpaku uji model pada arah melintang pelat akibat beban 4 kN di tepi (eksentris) di tulangan atas	91
Gambar 4. 17 Lendutan Pelat Terpaku uji model pada arah melintang akibat beban 4 kN di tepi (eksentris) di tulangan bawah	92
Gambar 4. 18 Hasil Pengujian Laboratorium Pada Pelat	94
Gambar 4. 19 Skema penempatan strain gauge dan beban pada uji model	95
Gambar 4. 20 Kamera Pengamatan Pergeseran Pelat dan Tiang 1.....	98

Gambar 4. 21	Kamera Pengamatan Pergeseran Pelat dan Tiang 2.....	99
Gambar 4. 22	Gap yang terjadi antara Tanah dan Tiang akibat beban Lateral.....	100
Gambar 4. 23	Hasil Pengujian Laboratorium Pada Pile.....	102
Gambar 5. 1	Pemodelan Visualisasi Gambar.....	104
Gambar 5. 2	Pemodelan Pada Numerik 3D V22	104
Gambar 5. 3 (5.1)	Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D	107
Gambar 5. 4	Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D.....	110
Gambar 5. 5	Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 1 Arah u_x	111
Gambar 5. 6	Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 1 Arah u_x	112
Gambar 5. 7	Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 1 u_z	113
Gambar 5. 8	Hasil Validasi Grafik Excel pemodelan 1 arah u_z	113
Gambar 5. 9	Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 2 arah u_z	114
Gambar 5. 10	Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 2 Arah u_z	115
Gambar 5. 11	Hasil Validasi Grafik Numerik pemodelan 2 Arah u_x	116
Gambar 5. 12	Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 2 Arah u_x	116
Gambar 5. 13	Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 3 Arah u_z	117
Gambar 5. 14	Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 3 Arah u_z	118
Gambar 5. 15	Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 3 Arah u_x	119
Gambar 5. 16	Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 3 u_x	119
Gambar 5. 17	Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 1 arah u_x	121
Gambar 5. 18	Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 1 arah u_x	122
Gambar 5. 19	Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 1 arah u_z	123
Gambar 5. 20	Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 1 arah u_z	123
Gambar 5. 21	Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 2 arah u_x	124
Gambar 5. 22	Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 2 arah u_x	125
Gambar 5. 23	Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 2 arah u_z	126
Gambar 5. 24	Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 2 arah u_z	126
Gambar 5. 25	Hasil Defleksi Pile validasi Grafik Numerik Pemodelan 3 Arah u_x	127
Gambar 5. 26	Hasil Defleksi Pile validasi Grafik Excel Pemodelan 3 Arah u_x	128
Gambar 5. 27	Hasil Defleksi Pile validasi Grafik Numerik Pemodelan 3 arah u_z	129
Gambar 5. 28	Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 3 arah u_x	129
Gambar 5. 29	Defleksi pelat arah memanjang di tulangan atas vs FEM 3D	131
Gambar 5. 30	Defleksi pelat arah memanjang di tulangan bawah vs FEM 3D	132

Gambar 5. 31 Defleksi pelat arah melintang di tulangan atas vs FEM 3D.....	134
Gambar 5. 32 Defleksi pelat arah melintang di tulangan bawah vs FEM 3D.....	136



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Reduksi Defleksi dengan tiang dan tanpa tiang tidak monolit ($Q = 7,74 \text{ kN}$)..40	40
Tabel 2.2 Reduksi Defleksi dengan tiang dan tanpa tiang monolit ($Q = 7,74 \text{ kN}$).....40	40
Tabel 2.3 Penelitian terdahulu yang sejenis.....47	47
Tabel 3.1 Tipe Beban Aksial dan Lateral yang diterapkan pada uji.....57	57
Tabel 4.1 Sifat-sifat Tanah Lunak Demak74	74
Tabel 4.2 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 1 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Atas82	82
Tabel 4.3 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 2 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Atas82	82
Tabel 4.4 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 4 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Atas83	83
Tabel 4.5 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 1 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Bawah.....83	83
Tabel 4.6 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 2 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Bawah84	84
Tabel 4.7 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 4 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Bawah85	85
Tabel 4.8 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 1 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Atas.....86	86
Tabel 4.9 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 2 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Atas.....86	86
Tabel 4.10 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 4 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Atas.....87	87
Tabel 4.11 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 1 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Bawah87	87
Tabel 4.12 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 2 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Bawah88	88
Tabel 4.13 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 4 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Bawah88	88
Tabel 4.14 Rangkuman Hasil Pengujian Laboratorium Pada Pelat.....93	93
Tabel 4.15 Defleksi tiang akibat beban Aksial eksentris 1 kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN95	95

Tabel 4. 16 Defleksi tiang akibat beban Aksial eksentris 2 kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN.....	96
Tabel 4. 17 Defleksi tiang akibat beban Aksial eksentris 4 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN	97
Tabel 4. 18 Rangkuman Hasil Pengujian Laboratorium Pada Pile	101
Tabel 5. 1 Model dan parameter material pada analisis aksisimetri.....	103
Tabel 5. 2 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 1 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D	105
Tabel 5. 3 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 2 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D	105
Tabel 5. 4 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 4 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D	106
Tabel 5. 5 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 1 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D	108
Tabel 5. 6 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 2 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D	108
Tabel 5. 7 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 4 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D	109
Tabel 5. 8 Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 1 arah u_x	111
Tabel 5. 9 Hasil Validasi Numerik Pemodelan 1 arah u_z	112
Tabel 5. 10 Hasil Validasi Numerik Pemodelan 2 arah u_z	114
Tabel 5. 11 Hasil Validasi Numerik Pemodelan 2 Arah u_x	115
Tabel 5. 12 Hasil Validasi Numerik Pemodelan 3 Arah u_z	117
Tabel 5. 13 Hasil Validasi Numerik Pemodelan 3 Arah u_x	118
Tabel 5. 14 Kesimpulan Hasil Defleksi Pelat	120
Tabel 5. 15 Defleksi tiang akibat beban Aksial eksentris 1 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D.....	120
Tabel 5. 16 Hasil Defleksi Pile validasi Numerik Pemodelan 1 arah u_x	121
Tabel 5. 17 Hasil Defleksi Pile validasi Numerik Pemodelan 1 u_z	122
Tabel 5. 18 Hasil Defleksi Pile validasi Numerik Pemodelan 2 arah u_x	124
Tabel 5. 19 Hasil Defleksi Pile validasi Numerik Pemodelan 2 arah u_z	125
Tabel 5. 20 Hasil Defleksi Pile validasi Numerik Pemodelan 3 arah u_x	127
Tabel 5. 21 Hasil Defleksi Pile validasi Numerik Pemodelan 3 arah u_z	128
Tabel 5. 22 Kesimpulan Hasil Difleksi Pile.....	130

Tabel 5. 23 Defleksi tiang akibat beban Aksial eksentris 1 kN Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN	139
---	-----



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

3 Pada keadaan alami tanah dengan kepadatan rendah sampai sedang cenderung mengalami deformasi yang besar bila dilintasi beban berulang kendaraan. Untuk itu dibutuhkan suatu struktur perkerasan (*pavement*) yang dapat melindungi tanah tersebut dari beban yang berlebihan akibat kendaraan. Selain itu, perkerasan juga berfungsi untuk memberikan permukaan rata dan halus bagi pengendara, dan melindungi formasi tanah terhadap pengaruh buruk perubahan cuaca (Hardiyatmo, 2007). Perkerasan untuk jalan raya dapat berupa perkerasan lentur (*flexible pavement*), perkerasan kaku (*rigid pavement*), atau komposit (kombinasi antara tipe perkerasan lentur dan perkerasan kaku). Pemilihan tipe tersebut umumnya bergantung pada lapis fondasi dan tanah dasar, namun juga dipengaruhi oleh faktor beban lalu lintas dan lingkungan seperti suhu, dan hujan.

Perkerasan kaku merupakan salah satu tipe perkerasan jalan yang umum digunakan pada tanah dasar lunak. Perkerasan terletak pada timbunan di atas tanah lunak, Defleksi terjadi cenderung bersifat tidak seragam (*differential settlement*) pada arah melintang maupun memanjang trase jalan sebagai akibat distribusi beban yang tidak merata sepanjang lebar ataupun panjang perkerasan atau disertai dengan Defleksi tidak seragam akibat ketidak-homogenan tanah. Pelat yang terletak di atas tanah, kekuatannya akan bergantung pada kekuatan pelat, kapasitas dukung tanah dasar dan interaksi antara pelat dan tanah dasar dalam mendukung beban, yang umumnya dipengaruhi oleh adanya rongga-rongga yang terbentuk di antara keduanya. Rongga-rongga antara pelat ini dapat disebabkan oleh Defleksi tak seragam antara pelat dan tanah dasar, maupun oleh proses pemompaan butiran halus (*pumping*) ke permukaan pelat akibat beban siklik oleh kendaraan (Hardiyatmo, 2009). Perkerasan juga menerima beban akibat temperatur yang membuat perkerasan mengalami momen lentur bolak-balik. Hal-hal tersebut dapat mengakibatkan bergelombangnya jalan dan atau patahnya struktur perkerasan.

7 Beberapa metode untuk mengatasi permasalahan perkerasan kaku jalan pada tanah lunak yang sudah diaplikasikan di lapangan antara lain penggunaan perbaikan tanah, konstruksi sarang laba-laba, serta fondasi cakar ayam. Dua metode terakhir dapat pula dikategorikan sebagai perkuatan perkerasan kaku. Adapun metode baru yang diusulkan untuk mengatasi permasalahan perkerasan kaku jalan pada tanah lunak adalah Sistem Pelat Terpaku (*Nailed-slab System*). Sistem Pelat Terpaku adalah suatu perkerasan beton bertulang dengan tebal 12 – 20 cm yang didukung oleh tiang-tiang beton mini dengan panjang 150 cm – 200 cm dan diameter 15 – 20 cm. Tiang-tiang dan pelat beton dihubungkan secara monolit dengan bantuan tulangan-tulangan, interaksi antara pelat beton – tiang – tanah di sekitarnya menciptakan suatu perkerasan yang lebih kaku, yang lebih tahan terhadap deformasi tanah.

3 Penggunaan material pilihan pada lapis fondasi dan stabilisasi tanah dasar merupakan perbaikan tanah yang umum dilakukan. Cara ini masih belum efektif mengatasi masalah kerusakan perkerasan kaku yang dibangun di atas tanah lunak, seperti *punchout*, *pumping*, *blowups*, *faulting*, kekasaran, dan retak kelelahan akibat beban kendaraan serta momen lentur bolak-balik yang dialami perkerasan akibat beban kendaraan dan temperatur.

Pada konstruksi jalan raya, sistem konstruksi sarang laba-laba (KSSL) dapat digunakan sebagai perkerasan kaku, dengan pelat perkerasan diperkaku oleh rusuk-rusuk di bawahnya. Rusuk-rusuk tersebut terdiri atas rusuk-rusuk memanjang jalan dan rusuk-rusuk diagonal. Rusuk-rusuk mempunyai ketebalan 10 cm dan rusuk bagian luar mempunyai ketinggian mencapai 90 cm (Wahyudi, dkk, 2010). Berdasarkan geometrinya, sistem ini memerlukan teknik khusus dalam pengerjaan. Konstruksi ini sepertinya tidak cocok untuk lokasi yang mempunyai muka air tanah dangkal, bila konstruksi langsung ditempatkan pada tanah asli, karena harus memompa air dari lubang galian dan menjaga dinding galian dari longsor. Sekalipun muka air tanah dalam, penggalian lubang untuk penempatan balok memerlukan alat khusus mengingat lebar rusuknya yang kecil hanya 10 cm. Kepadatan urugan yang dimasukkan ke dalam bekas galian kurang baik dapat mengurangi kontribusi tahanan gesek balok rusuk. Bilamana rusuk-rusuk terlebih dahulu dibangun di atas lokasi pekerjaan kemudian dilakukan urugan tanah

timbunan, maka diperlukan pula metode pemadatan sedemikian rupa mengingat geometri denah rusuk-rusuk berbentuk segitiga.

Pengalaman penggunaan fondasi cakar ayam pada Jalan Tol Prof.Sudiyatmo menuju Bandara Internasional Soekarno-Hatta di Cengkareng Banten, umumnya dianggap sebagai suatu kesalahan metode konstruksi, yang berakibat terjadinya Defleksi badan jalan sangat berlebihan. Anggapan kesalahan metode konstruksi yang dimaksud adalah bahwa fondasi cakar ayam ditempatkan pada timbunan bukan pada tanah lunaknya, sehingga Defleksi berlebihan tetap terjadi akibat Defleksi konsolidasi tanah lunak di bawah timbunan. Ada hal positif yang terjadi yaitu Defleksi yang terjadi merupakan Defleksi seragam dan permukaan perkerasan jalan masih tetap rata, sehingga kendaraan masih dapat melewatinya dengan nyaman. Fondasi cakar ayam tersebut, selanjutnya mengalami berbagai pengembangan yang salah satunya adalah penggantian cakar yang semula berbahan beton dengan cangkang baja galvanis, sehingga berat sendiri konstruksi jauh berkurang (Suhendro, 2006).

Sistem pelat terpaku berawal dari ide untuk mengganti cakar ayam dengan tiang-tiang pendek, untuk lebih efisien dalam pelaksanaan konstruksi (Hardiyatmo, 2008). Sistem ini pada awalnya sebagai usulan aplikasi perkuatan beton perkerasan kaku pada tanah lunak. Tiang-tiang membuat pelat tetap kontak dengan tanah sehingga mencegah pelat terdeformasi dan mengalami kerusakan (pelat laksana dipaku pada tanah oleh tiang-tiang dengan mengerahkan kuat tekan dan tahanan ankur). Sistem ini direkomendasikan menggunakan *pile cap* tipis (tebal 12 cm hingga 25 cm), dan penggunaan *pile cap* tipis akan menguntungkan bagi tanah lunak (Suhendro, 2006). Bagian bawah pelat perkerasan terdapat tiang-tiang mikro pendek (*short micropiles*) berdiameter 12 cm – 20 cm dengan panjang 1,0 m – 1,5 m, dan jarak antar tiang berkisar antara 1 m – 2 m (Hardiyatmo, 2008). Jadi pelat tersebut berfungsi ganda yaitu sebagai struktur perkerasan sekaligus sebagai *pile cap*. Sistem ini dilakukan pada studi model laboratorium untuk lempung lunak dengan skala model 1 : 10 (Desrihardi, 2001; Tan, 2010), skala 1 : 2 (Suyuti, 2004), dan skala 1 : 1 namun terbatas pada tiang tunggal untuk lempung kaku (Dewi, 2009) dan studi analitis (Hardiyatmo, 2008, 2009, dan 2011).

3 Konsep serupa dengan Sistem Pelat Terpaku telah diusulkan oleh Pichumani, dkk. (1974), namun dengan menggunakan tiang panjang dan terbatas pada studi parametrik sistem perkerasan yang didukung oleh tiang-tiang (*pile-supported pavement*), untuk perkerasan lentur maupun perkerasan kaku. Pichumani, dkk. (1974) menyimpulkan bahwa lendutan permukaan perkerasan dan tegangan di dalam tanah dasar mengalami reduksi yang besarnya bergantung pada kekakuan tiang.

3 Cara analisis sistem pelat terpaku untuk perancangan tebal perkerasan kaku berdasarkan uji tiang tunggal, metode analisis lendutan pelat fleksibel menggunakan modulus reaksi tanah dasar ekuivalen, dan metode penentuan modulus reaksi tanah dasar ekuivalen yang didasarkan pada uji tiang tunggal telah diusulkan oleh Hardiyatmo (2008; dan 2009). Modulus reaksi tanah dasar ekuivalen adalah modulus reaksi akibat adanya tiang-tiang beserta pelat. Nilai modulus reaksi tanah dasar ekuivalen (k') ini diperoleh dengan menjumlahkan nilai modulus reaksi tanah dasar dari uji pelat beban (k) dan nilai tambahan modulus reaksi dari tiang tunggal (Δk). Hardiyatmo (2011) mengusulkan metode penentuan tambahan modulus Δk .

Beberapa penelitian yang telah dilakukan yang berhubungan dengan topik penelitian disertasi ini, seperti dijelaskan pada bagian di bawah ini :

1 Hardiyatmo (2008), melakukan penelitian terhadap perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku di atas tanah lunak. Pengujian dilakukan untuk mengetahui Defleksi pelat yang ditopang tiang secara monolit maupun yang ditopang tiang dengan tidak monolit akibat beban siklik secara vertikal. Dari hasil pengujian disimpulkan bahwa pelat yang ditopang tiang secara monolit mengalami reduksi Defleksi pelat yang signifikan yaitu sekitar 58 %, sedangkan tiang tidak monolit Defleksi pelat sekitar 55 %.

Hardiyatmo, (2009), meneliti tentang hubungan antara beban pelat (*plate load test*) dengan lendutan pada pelat terpaku dengan menggunakan modulus reaksi tanah dasar. Penghitungan lendutan yang dilakukan dengan menggunakan teori balok pada pondasi elastis (*Beam on Elastic Foundation, BoEF*), dimana dalam perhitungan tersebut memerlukan reaksi tanah dasar k yang diperoleh dari hubungan tekanan dengan lendutan, yang merupakan lendutan rerata di sepanjang

pelat. Dari hasil penelitian tentang lendutan tersebut didapat perbandingan hasil pengamatan dan hitungan dengan menggunakan teori balok pada pondasi elastis yang menunjukkan selisih lendutan yang berkisar antara 2,6 % sampai 25 %.

Hardiyatmo (2011), melakukan analisis hubungan antara friksi pada tiang dengan *displacement vertical* pelat. Pengujian dilakukan pada *single pile* dengan pembebanan vertikal. Dari penelitian tersebut diperoleh pada saat defleksi pelat mencapai 4 cm nilai friksi tiang mencapai 16 kPa, sehingga disimpulkan bahwa ada hubungan yang signifikan antara friksi tiang dengan perubahan defleksi pelat perkerasan.

Anas Puri (2013), mengkaji perhitungan semi manual pelat terpaku dan divalidasi dengan hasil uji pembebanan. Perhitungan besar lendutan dengan pelat menggunakan pendekatan teori balok di atas pondasi elastis dengan menggunakan modulus reaksi tanah dasar. Dari hasil penelitian tersebut, bahwa metode penentuan tambahan reaksi tanah dasar dapat digunakan untuk merencanakan pelat terpaku dengan hasil desain pada zona aman.

Puri, (2015), mengkaji perilaku pelat terpaku pada tanah lunak yang diakibatkan beban berulang dengan skala penuh di laboratorium. Pengujian dilakukan untuk mengetahui besar defleksi pada pelat akibat beban vertikal, yang dilakukan pada tiga titik yang berbeda yang di mulai dari pinggir pelat hingga pada bagian tengah pelat. Hasil pengujiannya menunjukkan bahwa tiang dapat mengurangi penurunan pelat akibat beban vertikal.

Diana, (2016), mengkaji perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku di atas tanah lunak ekspansif mengembang dan meninjau pengaruh parameter-parameter tanah terhadap perilaku deformasi pelat. Dari hasil penelitian disimpulkan bahwa pelat dengan perkuatan tiang pada tanah ekspansif mengembang menghasilkan *displacement* vertikal yang lebih kecil dibandingkan pelat tanpa tiang. Pengujian juga dilakukan pada variasi panjang dan spasi jarak antar tiang, dimana semakin panjang tiang *displacement* semakin kecil.

Mukherjee *et.all* (2016), melakukan analisa terhadap tiang terjepit akibat beban lateral dengan metode pendekatan *BoEF*. Penelitian dilakukan pada diameter

tiang yang berbeda. Dari hasil penelitiannya tersebut disimpulkan bahwa besar diameter tiang akan mempengaruhi besar defleksinya, semakin besar diameter tiang maka defleksi akan semakin kecil.

Utari Wessy Andriani (2013), melakukan penelitian tentang kapasitas momen maksimum pondasi tiang tunggal akibat beban lateral dengan metode *P-Y* Kurva. Dari hasil penelitian tersebut disimpulkan bahwa momen maksimum terdapat $\frac{1}{3}$ dari permukaan tanah.

Chandrasekaran, *et.all.*, (2008), meneliti perilaku *group pile* 2 x 2 dengan beban statis dan beban lateral yang dilakukan secara siklus. Pada penelitian ini tidak meneliti pengaruh siklus beban lateral terhadap Defleksi tiang secara kelompok yang dapat mempengaruhi *pile cap* atau pelat di atasnya. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa barisan tiang bagian depan dan bagian baris tiang belakang menerima pembebanan yang tidak sama, dimana bagian depan 15 % lebih besar dari bagian belakang. Kemudian, defleksi tiang meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah siklus pembebanan.

Mahdy Khari, (2014), melakukan penelitian terhadap tiang tunggal pada kondisi *fixed* yang dibebani beban lateral. Penelitian dilakukan untuk mengetahui pengaruh beban lateral pada setiap bagian tiang terhadap defleksi tiang, dari hasil tersebut didapat bahwa defleksi terbesar berada pada ujung atas tiang dengan beban lateral yang sama. Besarnya defleksi tersebut dapat berpengaruh besar terhadap *pile cap* di atasnya.

Elhakim, A.F., (2014), melakukan penelitian dengan analisa numeris tentang respon grup tiang yang tertanam pada tanah pasiran akibat beban lateral, dalam penelitian ini difokuskan mencari hubungan antara defleksi tiang dengan pembebanan secara lateral. Dari hasil penelitian disimpulkan bahwa pengaruh beban terhadap defleksi pada tiang tunggal berbeda dengan tiang secara grup, pada tiang tunggal hasilnya lebih besar jika dibandingkan dengan tiang secara grup. Defleksi tiang pada kondisi *fixed* secara grup berbeda dengan tiang pada bagian depan dibanding dengan tiang pada baris belakang, hal ini kemungkinan karena adanya pengaruh *gap* akibat beban lateral.

Situmorang & Pratikso (2019), melakukan penelitian dengan analisis numeris elemen hingga dengan *Numerik* dan eksperimen di laboratorium terhadap Defleksi pelat perkerasan dan defleksi tiang akibat beban lateral dan vertikal. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa akibat adanya beban lateral pada pelat perkerasan kaku, akan terjadi *gap* di sekitar tiang yang akan mempengaruhi Defleksi pelat perkerasan.

1 Dari beberapa penelitian di atas yang berhubungan dengan topik pada penelitian ini, terutama yang berhubungan dengan sistem perkerasan kaku dengan pelat terpaku, belum ada penelitian yang khusus mengenai pengaruh beban lateral dan aksial eksentris terhadap perilaku pelat perkerasan.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian di atas, maka permasalahan yang akan dicari suatu penyelesaiannya melalui penelitian ini antara lain

1. Secara umum kegagalan perkerasan jalan yang sering terjadi di atas tanah lunak adalah karena kondisi tanah dasar / *subgrade* di bawah perkerasan masih mengalami perubahan bentuk atau masih mengalami Defleksi yang dapat mengakibatkan retak pada lapisannya.
2. Indonesia termasuk negara dengan luasan tanah lunak sekitar 60 juta Ha atau sekitar 30 % dari total luasan daratan sekitar 198,6 juta Ha (Satibi, 2009). Hal ini tidak dapat dihindari jika pembangunan jalan akan dilaksanakan di area yang banyak mengandung tanah lunak.
3. Indonesia yang terjadi gempa, harus mempertimbangkan bahwa setiap konstruksi baik gedung atau perkerasan jalan harus di desain tahan terhadap beban gempa yang berupa beban lateral atau horizontal. Beban-beban lateral bisa diakibatkan beban angin, atau beban tanah untuk pondasi atau beban pengereman kendaraan untuk perkerasan jalan.
4. Perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku diharapkan sebagai salah satu solusi pada perkerasan yang di letakkan di atas tanah lunak, karena model perkerasan ini memiliki angkur yang dapat meneruskan beban hingga pada bagian bawah tanah. Tetapi jenis perkerasan ini perlu penelitian lebih dalam

terhadap ketahanan menahan beban lateral, sehingga friksi pada tiang dapat berjalan dengan baik.

1.3 Perumusan Masalah

Dari latar belakang dan identifikasi masalah di atas, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut :

1. Seberapa besar pengaruh beban aksial eksentris dan beban lateral yang ditimbulkan akibat pengereman kendaraan terhadap kestabilan pelat perkerasan ?
2. Akibat beban aksial eksentris dan beban lateral akan menyebabkan adanya *gap* antara tiang dengan tanah lunak di sekitarnya. Apakah *gap* yang terjadi akan mempengaruhi daya dukung tiang, mengingat friksi antara tiang dengan tanah akan berkurang jika terjadi celah atau *gap* antara tiang dengan tanah di sekitar tiang ?
3. Apakah *gap* akibat beban aksial eksentris dan beban lateral akan mempengaruhi defleksi pelat perkerasan, mengingat kestabilan dari pelat perkerasan hanya bertumpu pada tiang di bawah pelat perkerasan ?
4. Bagaimana hubungan antara defleksi tiang dengan defleksi pelat perkerasan akibat beban aksial eksentris dan beban lateral ?

1.4 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud penelitian ini ingin mengetahui gambaran perilaku pelat perkerasan pada perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku di atas tanah lunak dan pola pergerakan tiang yang dapat mempengaruhi deformasi pelat yang berfungsi sebagai perkerasan jalan, ketika menerima beban vertikal / aksial eksentris monotonik dan beban lateral yang besarnya bervariasi. Adapun tujuan penelitian perilaku perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku di atas tanah lunak adalah sebagai berikut :

1. Membuktikan adanya *gap* yang terjadi pada tiang dengan tanah di sekitarnya akibat beban aksial eksentris dan beban lateral akan mempengaruhi pola Defleksi pelat perkerasan.
2. Menganalisis perilaku *Nailed Slab System* akibat pengaruh beban vertikal / aksial eksentris yang berbeda dan beban lateral yang berbeda..

3. Membuat simulasi hubungan antara Defleksi pelat perkerasan kaku dengan *defleksi* tiang sebagai angkur dengan analisis numeris elemen hingga dengan bantuan *software* Numerik 3D dan juga pada eksperimen di laboratorium.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian disertasi ini adalah sebagai berikut :

1. Hasil dari penelitian ini diharapkan semakin dapat meyakinkan bahwa penggunaan perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku dapat digunakan di daerah-daerah yang banyak terdapat tanah lunak.
2. Memudahkan para praktisi untuk dapat merencanakan perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku di atas tanah lunak yang tahan terhadap beban vertikal / aksial eksentris dan beban lateral.

1.6 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian disertasi ini akan dibatasi hanya pada perilaku perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku yang diletakkan di atas tanah lunak akibat beban vertikal / aksial eksentris dan beban lateral. Batasan-batasan yang digunakan dalam penelitian ini selengkapnya adalah sebagai berikut :

1. Uji model skala kecil di laboratorium
2. Hasil uji prototipe di laboratorium akan divalidasi dengan hasil analisis numeris dengan bantuan program *Software Numerik 3D*.
3. Tanah pendukung yang digunakan dalam uji model dalam program *Software* maupun dalam uji laboratorium adalah tanah dengan kategori tanah lunak dalam sistem klasifikasi *unified*, Braja M Das, mekanika Tanah 1 (1995), dengan kriteria sebagai berikut :
 - a. Plastisitas Index (PI) > 30 %
 - b. Derajat kejenuhan > 90 %
 - c. 50 % lebih lolos saringan No. 200 ($F_{200} > 50$).
4. Beban lateral dalam model uji laboratorium dihasilkan dari motor penggerak dengan kecepatan yang bisa diatur sesuai kebutuhan, yang disesuaikan dengan besaran beban sesuai dengan kebutuhan.

5. Beban uji di laboratorium terdiri dari 2 tipe beban yang akan bekerja secara bertahap :
Beban 1 : Beban vertikal / aksial eksentris dengan beban bervariasi
Beban 2 : Beban lateral dengan penambahan beban bervariasi.
6. Material beton yang digunakan sebagai model dalam pengujian di laboratorium adalah beton dengan kuat tekan $f_c' = 16,6$ MPa atau setara dengan beton K-200.
7. Material besi tulangan untuk beton pelat dan tiang adalah besi ϕ 8 dengan $f_y = 240$ Mpa.

Variabel yang akan diteliti adalah :

1. Besar Defleksi pelat perkerasan akibat beban lateral yang berbeda-beda dan beban vertikal / aksial eksentris yang berbeda.
2. Defleksi tiang yang dapat mempengaruhi Defleksi pelat perkerasan atau defleksi pelat akibat beban lateral yang berbeda-beda dan beban vertikal/aksial eksentris yang berbeda.
3. Mengetahui interaksi antara tanah lunak dengan tiang pada pelat perkerasan ketika menerima beban lateral, yang dapat mempengaruhi Defleksi pelat perkerasan.
4. Besaran *gap* antara tiang dan tanah di sekitar tiang dan mencari hubungan besar *gap* dengan besar Defleksi pelat perkerasan.

1.7 Sistematika Penulisan

Secara garis besar penulisan disertasi ini dibagi atas 3 (tiga) bagian diantaranya adalah sebagai berikut : Bagian pendahuluan yang di dalamnya terdiri dari halaman sampul, halaman judul, halaman pengesahan, lembar ucapan terima kasih, lembar kata pengantar, abstrak, daftar isi, daftar tabel, daftar gambar, daftar istilah, singkatan dan notasi, serta daftar lampiran. Bagian isi yang didalamnya terdiri dari beberapa bab dan sub-bab, seperti penjelasan di bawah ini :

Bab I Pendahuluan

Diuraikan tentang latar belakang, identifikasi permasalahan, maksud penelitian dan tujuan penelitian, batasan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan penelitian disertai.

Bab II Kajian Pustaka Dan Kerangka berpikir

Diuraikan tentang tinjauan pustaka yang berkaitan perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku, studi pustaka tentang penelitian-penelitian terdahulu tentang perilaku tiang akibat beban lateral, pengujian akan dilakukan dengan model di laboratorium. Dalam bab ini juga akan dipaparkan tentang analisis terhadap pengujian yang dilakukan serta kerangka berpikir dan hipotesa penelitian.

Bab III Metode Penelitian

Diuraikan mengenai tahapan-tahapan dalam pelaksanaan penelitian yang disampaikan dalam diagram alur penelitian, serta model dan peralatan untuk eksperimen di laboratorium, metode dalam menganalisis hasil data.

Bab IV Kompilasi Dan Analisis Data

Dalam bab ini akan dikemukakan tentang kompilasi dan analisis data yang terdiri dari : kompilasi dan analisis data model Program *Software* sebagai analisis data numeris dan kompilasi dan analisis data dari hasil pengujian yang dilaksanakan di laboratorium.

Bab V Pembahasan Dan Hasil Penelitian

Dalam bab ini akan diuraikan tentang pembahasan dan hasil penelitian yang terdiri dari : pembahasan percobaan dengan menggunakan *software Numerik* yang akan dibandingkan dengan hasil percobaan di laboratorium yang disajikan dalam bentuk grafik-grafik dan tabel-tabel.

Bab VI Kesimpulan, Saran Atau Rekomendasi

Dalam bab ini akan diuraikan tentang kesimpulan dari hasil penelitian baik dari hasil numeris maupun dari percobaan laboratorium, serta saran atau rekomendasi yang dapat digunakan untuk penelitian lebih lanjut.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN KERANGKA BERPIKIR

2.1 Perilaku Tanah Lunak

Tanah lunak (*soft soils*) adalah semua jenis tanah berbutir halus yang mempunyai parameter : kadar air tinggi, derajat kejenuhan tinggi, angka pori dan porositas tinggi, tekanan air pori awal tinggi, sehingga tanah lunak mempunyai sifat : kuat geser rendah, dan daya mampat (potensi Defleksi) besar bila terjadi peningkatan tegangan efektif (Bina Marga, 1998).

Pada Gambar 2.1, dapat dilihat sebaran tanah lunak di Indonesia, lokasi tanah lunak disimbolkan dengan warna gelap, paling luas terdapat di Pulau Papua (Panduan Geoteknik Indonesia, 2001). Indonesia merupakan negara dengan luas tanah lunak sekitar 60 juta Ha atau sekitar 30% dari total luas daratan sekitar 198, 6 juta Ha (Satibi, 2009). Tanah lunak tersebut terdiri dari tanah gambut, tanah lempung, dan tanah lunak lainnya yang tersebar di seluruh provinsi di Indonesia.



Gambar 2.1 Sebaran tanah lunak di Indonesia (Puri, 2015)

German Geotechnical Society memberikan kriteria yang harus dipenuhi dalam penentuan tanah sebagai tanah lunak dalam kaitannya dengan kegunaan secara konstruksi (Kempfert dan Gebreselassie, 2006). Tidak seluruh kriteria mesti terpenuhi. Kriteria tersebut antara lain:

- Sangat lunak hingga lunak,
- Jenuh sempurna atau mendekati jenuh sempurna,
- Kuat geser *undrained* $c_u \leq 40 \text{ kN/m}^2$

- d. Cenderung untuk mengalir,
- e. Sifat plastis rendah hingga sedang,
- f. Sangat sensitif untuk vibrasi (sensitif ditentukan sebagai rasio antara kuat geser *undrained* saat runtuh dengan kuat residual dari uji geser baling-baling),
- g. Sifat tiksotropi, dan lain-lain.

2.1.1 Stabilitas dan Perkuatan Tanah Lunak Sebagai Tanah Dasar

Timbunan Jalan

Stabilitas dan perkuatan tanah lunak sebagai tanah dasar timbunan dimaksudkan untuk menambah atau meningkatkan kestabilan tanah lunak ketika dibebani timbunan maupun beban kendaraan di atasnya, peningkatan kestabilan tanah lunak sebagai tanah dasar timbunan dapat dilakukan dengan beberapa cara, diantaranya dengan stabilisasi tanah, perkuatan dengan geodrid, dan lain-lain. Stabilitas dan perkuatan tanah lunak sebagai tanah dasar (*subgrade*) untuk timbunan sudah banyak dilakukan di Indonesia, diantaranya adalah sebagai berikut:

A. Stabilisasi Tanah Lunak

Stabilisasi tanah merupakan salah satu cara untuk memperbaiki sifat-sifat tanah dasar sehingga dapat meningkatkan daya dukung tanah dasar agar stabil ketika pembebanan diterapkan di atasnya. Metode stabilisasi yang banyak digunakan adalah stabilisasi mekanis dan stabilisasi kimiawi. Stabilisasi mekanis yaitu menambah kekuatan dan kuat dukung tanah dengan cara perbaikan struktur dan perbaikan sifat-sifat mekanis tanah, sedangkan stabilisasi kimiawi yaitu menambah kekuatan dan kuat dukung tanah dengan cara mengurangi atau menghilangkan sifat-sifat teknis tanah yang kurang menguntungkan dengan cara mencampur tanah dengan bahan kimia seperti semen, kapur, aspal emulsi, garam, dan lain-lain. Untuk lebih jelas tentang metode perbaikan tanah lunak, berikut akan dibagi menjadi 3 cara metode stabilisasi yang sering digunakan untuk jenis tanah lempung, diantaranya adalah :

1. *Removal dan Replacement*

Metode ini dilakukan dengan cara mencampur tanah ekspansif dengan non ekspansif, diharapkan dengan mencampur kedua jenis tanah ini dapat memperbaiki sifat-sifat negatif tanah ekspansif.

2. *Remolding dan Compaction*

Swelling potential dari tanah ekspansif dapat diperbaiki dengan cara merubah nilai *density* tanah tersebut (Holtz, 1959). Metode ini menunjukkan bahwa pemadatan tanah pada nilai *density* yang rendah dan pada kadar air di bawah kadar air optimum yang terlihat pada tes *Standard Proctor* dapat mengakibatkan lebih sedikit *swelling potensial* dari pada pemadatan pada nilai *density* yang tinggi dan kadar air yang lebih rendah.

3. *Chemical admixtures*

Stabilisasi dengan metode ini dilakukan dengan cara mencampurkan tanah lunak dengan beberapa bahan kimiawi, seperti : semen, kapur maupun garam.

Dari beberapa penelitian stabilisasi tanah lunak dengan kapur, diperoleh hasil yang optimum pada kadar kapur berkisar antara 3 % sampai 7 % berat kering tanah, sama halnya dengan bahan stabilisasi lainnya bahwa dengan kadar tertentu akan meningkatkan daya dukung tanah dasar. Gambar 2.2 menunjukkan bentuk stabilisasi pada lapisan tanah lunak.



Gambar 2.2 Stabilisasi Pada Tanah Lunak (Dept. PU. 2005)

B. Perkuatan Tanah lunak Dengan Cerucuk

Perkuatan dengan cerucuk dari beberapa penelitian dapat meningkatkan daya dukung tanah lunak, menurut (Masyhur, 2018), dengan menggunakan cerucuk

bambu laju defleksi tanah menjadi kecil, dan defleksi relatif seragam. Berikut jenis cerucuk yang banyak digunakan diantaranya adalah :

1. Tiang kayu cerucuk, biasanya tiang yang digunakan berukuran panjang 4-6 m dengan diameter 10 cm.
2. Tiang beton, untuk tanah lunak yang lebih dalam, dan kapasitas daya dukung beban yang lebih besar diperlukan, penggunaan dari tiang beton pracetak lebih cocok. Tiang pracetak berbentuk persegi atau segitiga dengan sisi berukuran 10-40 cm, akan memberikan kapasitas daya dukung yang cukup besar.

C. Perkuatan Tanah Lunak dengan Geosintetik

Geosintetik merupakan sebuah produk yang berbentuk lembaran yang terbuat dari bahan polimer lentur, seperti *polipropilena (PP)*, *polyester (PET)* atau *polietilena (PE)*. Material polimer tersebut sangat tahan terhadap degradasi biologis dan kimiawi. Penelitian Gajendra, V. Kumar, D.N (2013), penggunaan geogrid dapat meningkatkan nilai *CBR* tanah dasar, sehingga Defleksi tanah menjadi kecil.

D. Perkuatan Tanah Lunak Dengan Vertikal Drain

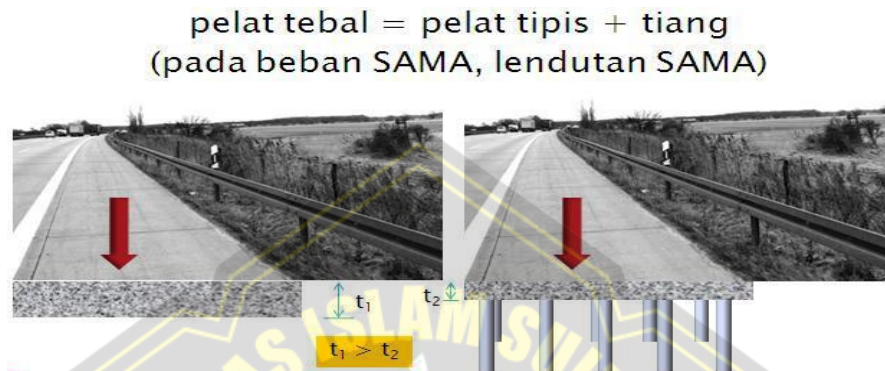
Salah satu metode perbaikan yang banyak digunakan adalah dengan *prefabricated vertical drain (PVD)*. Prinsip metode perbaikan tanah ini adalah mempercepat proses konsolidasi dengan menyediakan jalur drainase yang lebih pendek. Kuat geser tanah akan bertambah karena adanya disipasi air pori, sehingga diharapkan Defleksi akan segera terjadi.

E. Metode Perbaikan Tanah Lunak dengan cara *VACUUM*

Metode *vacuum consolidation* merupakan suatu sistem untuk mempercepat konsolidasi tanah lunak dengan menggunakan tekanan vacuum yang dapat bekerja secara efektif dan efisien, metode ini dianggap efektif karena tidak membutuhkan bahan timbunan sebagai *preloading*, dengan kekuatan beban tekanan *vacuum* sekitar $7 \text{ ton} / \text{m}^2$ dianggap dapat mempercepat konsolidasi sehingga pelaksanaan konstruksi dapat dilaksanakan dengan cepat. Dan masih banyak lagi metode-metode yang lain yang dapat digunakan dalam perbaikan tanah lunak sebagai tanah dasar pada bangunan jalan.

2.1.2 Defleksi Perkerasan di Atas Tanah Lunak

Gambar 2.3 menggambarkan analogi perkerasan kaku yang tebal digantikan oleh perkerasan kaku yang lebih tipis, namun diperkuat dengan tiang-tiang dan menerima beban yang sama dengan lendutan yang sama pula. Penggunaan *pile cap* tipis pada tanah lunak menguntungkan, karena beban yang dipikul tanah menjadi lebih ringan, sehingga Defleksi dapat direduksi (Hardiyatmo dan Suhendro, 2008).



Gambar 2.3 Analogi Perkerasan kaku yang tebal digantikan oleh Perkerasan Kaku yang lebih tipis dan diperkuat dengan tiang-tiang

Perkerasan kaku konvensional pada tanah lunak yang mempunyai kekakuan pelat yang cukup, masih dapat mengalami vibrasi besar yang mengakibatkan kontak pelat dan tanah menjadi lemah, sehingga terbentuk rongga antara pelat perkerasan dan tanah dasar. Kekuatan perkerasan pun akan turun seiring dengan waktu, hingga perkerasan dapat mengalami kerusakan. Hal yang berbeda pada Sistem Pelat Terpaku, vibrasi akan rendah, karena adanya tahanan angkur yang diberikan tiang. Tahanan angkur tiang dalam menahan beban merupakan kontribusi tahanan gesek dan tahanan cabut tiang-tiang, atau disertai dengan momen torsi. Ketika beban kendaraan bekerja, maka tiang-tiang memberikan perlawanan ke atas.

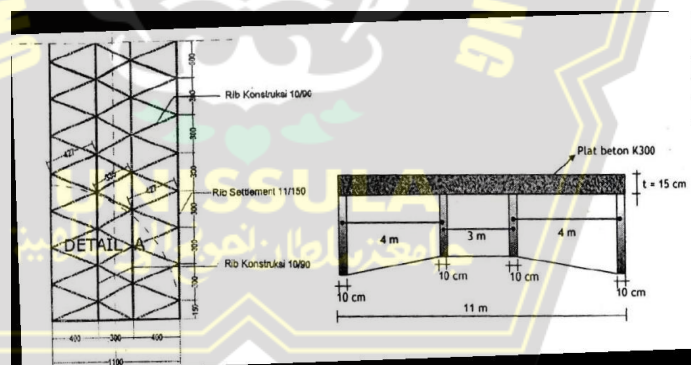
Perlawanan lainnya yang diberikan tanah adalah tekanan kontak antara tanah dengan sisi bawah pelat. Tekanan kontak ini akan tetap termobilisasi mengingat sistem pelat terpaku ini diharapkan menciptakan kondisi agar tidak terbentuk rongga antara pelat dan tanah. Tahanan angkur tiang meningkatkan kekakuan pelat perkerasan. Peningkatan kekakuan tersebut juga diperoleh, karena adanya peningkatan tahanan lateral tanah di sekitar tiang, sehingga tiang memberikan perlawanan momen torsi.

2.2 Perkerasan Kaku dengan Sistem Pelat Terpaku

Sistem Pelat Terpaku (Nailed-slab System) merupakan metode perkerasan kaku yang dirancang untuk meningkatkan stabilitas pada tanah lunak. Sistem ini mengombinasikan pelat beton bertulang dengan elemen tiang sebagai penahan untuk mengurangi deformasi dan meningkatkan daya dukung perkerasan.

2.2.1 Konstruksi Sarang Laba-laba (KSL) (KSL)

KSL ini merupakan salah satu tipe fondasi dangkal berupa fondasi rakit dengan kombinasi antar pelat penuh di permukaannya dan terdapat balok-balok atau rib-rib pengaku di bawahnya. Sistem ini dapat diaplikasikan sebagai fondasi bangunan gedung ataupun sebagai suatu lapisan permukaan untuk *apron*, *taxiway*, lapangan kontainer, dan perkerasan jalan raya (Wahyudi, dkk., 2010). Pada konstruksi jalan raya, sistem ini sebagai perkerasan kaku dengan pelat diperkaku oleh rusuk-rusuk di bawahnya. Rusuk-rusuk tersebut terdiri atas rusuk-rusuk memanjang jalan dan rusuk-rusuk diagonal. Rusuk-rusuk mempunyai ketebalan 10 cm dan rusuk bagian luar mempunyai ketinggian mencapai 90 cm. (Wahyudi, dkk., 2010). Tipikal fondasi KSL seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Denah dan penampang Fondasi KSL (Wahyudi, dkk., 2010)

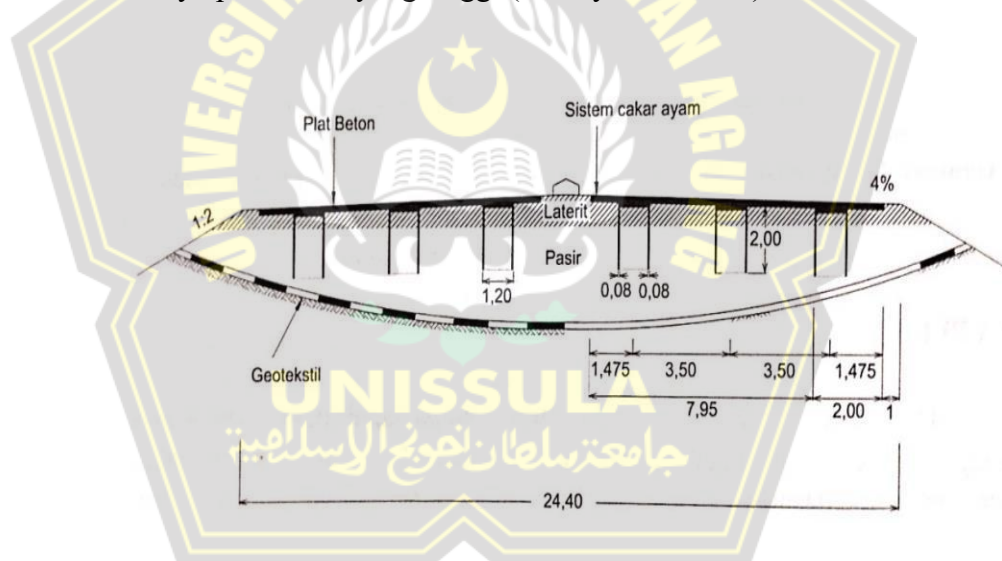
2.2.2 Fondasi Cakar Ayam

Tipikal fondasi cakar ayam pada timbunan badan Jalan Tol Prof. Sedyatmo menuju Bandara Internasional Soekarno-Hatta di Cengkareng, Banten, seperti pada Gambar 2.5. Dasar timbunan diperkuat dengan geosintetik dan fondasi cakar ayam konvensional (terbuat dari pipa beton bertulang) ditempatkan di dalam timbunan setebal 2,50 m – 3,50 m, dan selanjutnya pelat beton bertulang berada di atas cakar-

cakar tersebut dengan hubungannya dibuat monolit. Fondasi cakar ayam terdiri dari pelat beton bertulang tebal 10 cm – 17 cm dan pipa-pipa beton (disebut cakar) berdiameter 120 cm dengan tebal 8 cm dan panjang pipa 150 cm – 200 cm, dengan jarak cakar 200 cm – 250 cm (Hardiyatmo, 2010).

Sistem cakar ayam yang diaplikasikan pada Jalan Tol Prof. Sedyatmo mengalami Defleksi berlebihan akibat konsolidasi tanah dasar lunak (kuat geser undrained, $S_u = 5-10$ kPa), namun permukaan perkerasan tetap rata dan kendaraan masih dapat melewati dengan aman dan nyaman.

Cakar berfungsi sebagai angkur (paku) pelat pada tanah dasar yang dapat menjamin kontak antara tanah dengan pelat, sehingga perkerasan lebih awet dan sedikit perawatan. Adapun pada sistem konvensional (tanpa cakar), maka akan mudah terbentuk rongga antara tanah dengan pelat yang mengakibatkan kekuatan turun tajam berjalan dengan waktu. Perkerasan kurang awet (mudah pecah) dan memerlukan biaya perawatan yang tinggi (Hardiyatmo, 2010).



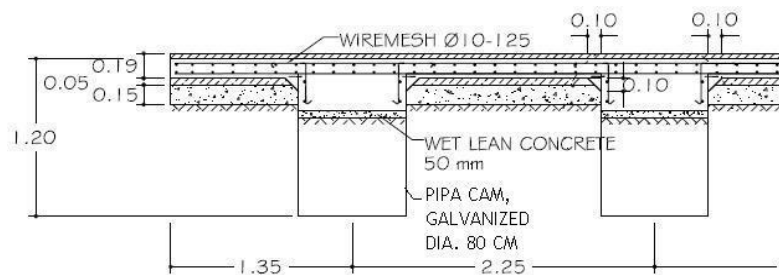
Gambar 2. 5 Sistem cakar ayam pada Jalan Prof. Sedyatmo (Hardiyatmo, 2010)

Sistem Cakar Ayam sebagai perkuatan perkerasan kaku pada tanah lunak, dikembangkan dengan mengganti pipa beton bertulang dengan pipa baja tahan karat. Penggunaan pelat baja tahan karat adalah atas ide bapak Ir. Maryadi Darmokumoro pada awal tahun 2005 (Suhendro, 2006), selanjutnya dikenal dengan system cakar ayam modifikasi (CAM). Di akhir tahun 2005, CAM ini telah dilakukan uji skala penuh pada tanah lunak di Waru, Jawa Timur. Hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa repetisi beban tidak mempengaruhi respon lendutan

secara signifikan, sedangkan pipa-pipa baja yang tipis (tebal 1,4 mm) setelah tertancap dalam tanah menunjukkan kinerja yang cukup kaku untuk berfungsi sebagai pengaku pelat. Hal ini terlihat pada besar lendutan yang terjadi sangat kecil, yakni 0,63 mm pada beban 40 kN.

Gambar 2.6. memperlihatkan contoh konstruksi CAM pada *trial road* Pamanukan di Indramayu, Jawa Barat. Cakar terbuat dari pelat baja bergalvanis dengan tebal 1,4 mm, diameter 80 cm dan tinggi 120 cm yang dipasang di bawah pelat beton berketebalan 15 cm dengan jarak antar cakar 250 cm. Sistem CAM ini telah diaplikasikan di Jl. Tol de Tour Jl. Prof. Sedyatmo Cengkareng, *trial road* Pamanukan-Sumedang KM. 25+800 Jawa Barat dan Jl. Tol Seksi 4 Makassar, serta jalan truk pengangkut semen di Samarinda (Hardiyatmo, 2010) Selain itu, penggunaan cakar ayam modifikasi untuk masalah jalan pada tanah ekspansif juga sedang dikembangkan. Sistem cakar ayam cocok untuk menahan gerakan naik-turun perkerasan akibat kembang-susut tanah.

Penggunaan pelat baja yang dibentuk menjadi silinder/pipa lebih praktis dalam mobilisasinya, karena pelat-pelat baja diangkut ke lokasi pekerjaan dalam bentuk lembaran, selanjutnya dilakukan penggulangan membentuk pipa sesuai diameter rencana di lokasi pekerjaan. Adapun sambungan pelat tersebut dapat dengan cara dilas maupun paku keling. Selain itu, tanah dasar tidak mengalami gangguan berarti saat instalasinya pipa oleh karena tipisnya cangkang (*shell*). Sistem CAM ini juga tidak memerlukan alat-alat berat saat pelaksanaan, demikian halnya tidak memerlukan perkerasan sementara untuk landas kerja alat berat. Dari sisi berat sendiri konstruksi, CAM memberikan reduksi berat sendiri yang sangat signifikan, bila cakar ayam konvensional (berbahan beton) mempunyai berat 1,1 ton, untuk CAM hanya 35 kg (Hardiyatmo, 2010).



Gambar 2. 6 Contoh detail desain fondasi CAM (Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, 2007)

2.2.3 Sistem Pelat Terpaku

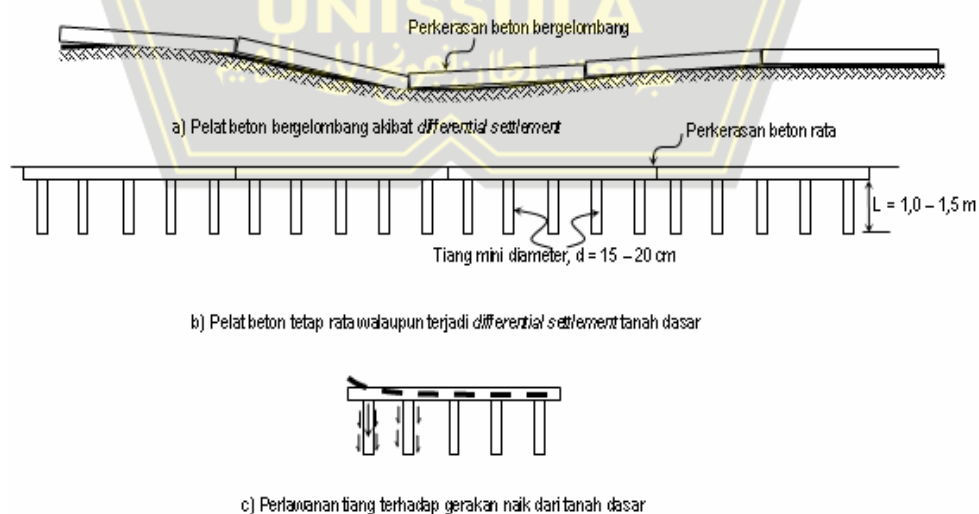
2.2.3.1 Struktur perkerasan jalan yang menyerupai Sistem Pelat Terpaku

Pichumani, dkk. (1974) melakukan studi parametrik sistem perkerasan yang didukung oleh tiang-tiang (*pile supporting pavement*), untuk perkerasan lentur maupun perkerasan kaku. Lendutan permukaan perkerasan dan tegangan di dalam tanah dasar mengalami reduksi yang besarnya bergantung pada kekakuan tiang. Reduksi tersebut diikuti dengan peningkatan tegangan di bawah dasar tiang. Peningkatan kekakuan tiang menghasilkan reduksi yang signifikan pada tegangan tarik di dalam pelat beton perkerasan.

2.2.3.2 Pengembangan Sistem pelat Terpaku

Hardiyatmo, dkk. (2002), meneliti perilaku pelat yang didukung oleh kelompok tiang pada tanah lunak dengan melakukan uji model di laboratorium. Model fondasi tiang menggunakan pipa baja berdiameter 1,5 cm yang diisi spesi. Modulus reaksi tanah dasar vertikal meningkat dan lendutan *pile cap* menurun oleh adanya perlawanan tanah di sekitar tiang.

Hardiyatmo (2008) melakukan studi analitis penggunaan tiang-tiang pendek pada perkerasan kaku, Gambar 2.7 merupakan ilustrasi perbandingan perkerasan kaku konvensional dengan perkerasan sistem pelat terpaku dan perlawanan tiang terhadap beban.



Gambar 2. 7 Ilustrasi pengaruh pemasangan tiang sebagai ‘paku’ pada Perkerasan beton (Hardiyatmo, 2008)

2 Tiang-tiang diharapkan dapat mereduksi perbedaan Defleksi (Gambar 2.7a) sehingga perkerasan tetap rata pada arah memanjang jalan (Gambar 2.7b). Demikian juga pada arah melintang jalan, perbedaan Defleksi juga dapat direduksi, dimana tiang dapat berfungsi sebagai angkur sehingga pelat tidak mengalami jungkitan (Gambar 2.7c). Tiang-tiang tersebut berfungsi laksana paku bagi pelat beton. Tiang-tiang juga menambah kuat dukung sistem perkerasan kaku dan mengurangi faktor kehilangan dukungan (*loss of support factor, LS*), sehingga meningkatkan modulus reaksi tanah dasar vertikal efektif, dan terjadi efisiensi pada pelat beton. Dalam studi itu, Hardiyatmo menggunakan data uji beban siklik pada model fondasi tiang tunggal dengan hubungan antar tiang dengan *pile cap* dibuat monolit dan tidak monolit, analisis didasarkan pada AASHTO 1986. (Hardiyatmo, 2009) merekomendasikan metode analisis lendutan pelat fleksibel menggunakan modulus reaksi tanah dasar ekuivalen, dan kemudian mengusulkan pula cara penentuan nilai tambahan modulus reaksi tanah dasar akibat dipasangnya tiang (Hardiyatmo, 2011).

2 Analogi dengan sistem cakar ayam, sistem pelat terpaku ini juga diharapkan berfungsi sebagai angkur pada beban rendah dan sekaligus berfungsi sebagai perlawanan lendutan pada beban berat. Kinerjanya pun diharapkan serupa dengan kinerja sistem cakar ayam, namun konstruksinya lebih kecil, sehingga diperoleh keuntungan berupa pelaksanaan yang lebih praktis dan biaya konstruksi lebih rendah dibanding cakar ayam. Sistem ini masih terbatas pada studi analitis model.

4 Pelat yang diperkuat tiang untuk berbagai tebal dimana hubungan pelat dan tiang adalah monolit, lendutan maksimum terjadi tepat di bawah beban, dan semakin kecil bila semakin jauh dari beban. Selain itu, jungkitan di ujung pelat (lendutan negatif) berkurang dengan semakin tebalnya pelat (t), serta distribusi lendutan semakin menyebar. Tebal pelat cenderung mereduksi lendutan. Hal ini disebabkan kekakuan pelat yang meningkat sejalan dengan peningkatan tebalnya (Hardiyatmo dan Suhendro, 2003). Lendutan cenderung berkurang pada hubungan pelat dan tiang yang dibuat monolit dibandingkan dengan hubungan bebas. Kontribusi monolitnya hubungan pelat dan tiang semakin besar pada pelat yang semakin tipis, hal ini disebabkan semakin besarnya kontribusi tiang dalam melawan lendutan dan rotasi (Hardiyatmo dan Suhendro, 2003).

Bila diperhatikan pada bentuk struktur Sistem Pelat Terpaku, maka sistem ini dapat dikategorikan sebagai fondasi rakit-tiang, namun dengan *pile cap* yang tipis dan panjang tiang yang lebih pendek serta penggunaan tiang mikro. Berdasarkan hasil analisis oleh Prakoso dan Kulhawy (2001) bahwa *displacement* maksimum, Defleksi tak seragam, dan momen lentur rakit cenderung menurun seiring dengan peningkatan kekakuan rakitnya. Hal serupa juga telah disampaikan oleh Poulus (2001a dan 2001b) Zhang dan Small (2000), serta Lee, dkk., (2010). Menurut Mandolini, dkk., (2005) bahwa ketebalan rakit hanya memberikan sedikit pengaruh terhadap pembagian beban antar rakit dan tiang serta Defleksi merata. Selain itu, tiang makro mengandalkan tahanan gesek untuk menahan beban eksternal dan perbedaan kapasitas tekan dan tariknya tidak berbeda signifikan, sekitar 7% sampai 12,5 % lebih kecil pada kapasitas Tarik (Farouk, 2009).

Mengacu pada pengujian yang dilakukan oleh Watanabe, dkk., (2001) dan Lee, dkk., (2010), dapat diketahui bahwa beban vertikal yang mampu dipikul tiang semakin besar dengan semakin panjangnya tiang. Selain itu, rakit memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kuat dukung sistem fondasi, karena adanya transfer beban melalui dasar rakit ke tanah. Kurva perilaku beban-Defleksi relatif tidak bergantung tipe beban, baik akibat beban merata maupun beban terpusat, dan pengaruhnya tidak signifikan (Lee, dkk., 2010), sehingga dapat diabaikan (Poulus, 2001a).

Tiang yang lebih rapat, $s/d = 2$ (s : jarak antar tiang) menghasilkan lendutan yang lebih kecil dibanding dengan tiang yang renggang, $s/d = 4$ (Hardiyatmo dan Suhendro, 2003), Pengamatan serupa oleh Pujiastuti (2001) menghasilkan kesimpulan yang sama, dalam hal ini rentang s/d antara 2,5 hingga 5. Defleksi tak seragam berkurang signifikan dan akan mencapai nilai rasio perbedaan Defleksi yang minimum pada $Lp/s = 1 \sim 1,5$ (Seo, dkk., 2003). Jarak yang tepat dari tiang akan dapat mereduksi zona tegangan berimpit pada tanah di sekitar tiang, dan sejumlah tiang mempunyai kontribusi terhadap zona tersebut (Bowles, 1997). Semakin besar zona tegangan yang berimpit, semakin kecil pula tahanan gesek kelompok tiang (Wai, dkk., 2006). Bila jarak antar tiang besar (mencapai $4,5d$), maka *pile cap* akan dipaksa berlaku sebagai fondasi rakit dan bersama tiang akan menghasilkan konfigurasi yang berperilaku sebagai sistem rakit-tiang (Rahardjo

dan Handoko, 2003), namun semakin besar jarak tiang maka semakin besar pula proporsi beban yang dipikul rakit (Mandolini, dkk., 2005).

4 Bila ditinjau terhadap koefisien reaksi tanah dasar, maka keberadaan tiang-tiang yang memperkuat pelat dapat meningkatkan koefisien reaksi tanah dasar ekuivalen arah vertikal (k') (Pujiastuti, 2001; Hardiyatmo dan Suhendro, 2003; Hardiyatmo, 2008, 2010; Dewi, 2009; Nasibu, 2009). Peningkatan k' dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kekakuan tanah, kekakuan tiang dan pelat, dimensi tiang maupun pelat, serta konfigurasi tiang. Penggunaan teori balok pada fondasi elastis (*BoEF*) dengan mempertimbangkan pengaruh tiang-tiang memberikan hasil yang relatif memuaskan terhadap hasil pengujian (Hardiyatmo, dkk., 2002). Penggunaan modulus reaksi tanah dasar ekuivalen dalam analisis lendutan pelat fleksibel berdasarkan *BoEF*- untuk fondasi tiang beton pada tanah lempung-memberikan hasil yang memuaskan bila dibandingkan dengan hasil pengukuran (Hardiyatmo, 2009).

Pada penelitian yang dilakukan (Situmorang & Pratikso, 2019), menganalisis lendutan perkerasan pelat yang diperkuat tiang-tiang dalam menerima beban aksial sentris dan lateral. Oleh karena itu, guna melengkapi penelitian diatas, maka Sistem Pelat Terpaku juga dimungkinkan untuk diteliti dalam menerima beban aksial eksentris dan lateral.

1 2.3 Beban Lateral

1 Beban lateral merupakan beban horizontal yang bekerja pada struktur bangunan, pada perkerasan jalan atau jembatan, beban lateral bisa disebabkan akibat pengereman kendaraan, akibat angin, akibat perubahan suhu, akibat gempa, maupun akibat tanah yang dapat memberikan dorongan secara horizontal pada struktur di atas. Setiap bangunan baik di dalam tanah maupun di atas tanah harus diperhitungkan kekuatannya terhadap pengaruh beban lateral, hal ini dilakukan untuk mengetahui kapasitas dan kemampuan suatu struktur dalam menahan beban-beban lateral.

Untuk tiang pada pondasi dalam, pengaruh pembebanan lateral dapat menyebabkan defleksi yang berlebihan yang dapat mengakibatkan kerusakan pada pondasi atau tiang baik tiang pendek maupun tiang panjang. Penelitian yang dilakukan oleh (Deka, 2016) tentang pengaruh beban lateral terhadap tiang,

menyimpulkan bahwa akibat pembebanan secara lateral dapat menyebabkan perubahan perilaku tiang yang signifikan selain pembebanan secara vertikal, sehingga kajian struktur akibat beban lateral sangat penting untuk dilakukan. Menurut *Omid Taheri et.al* (2015), dengan meningkatnya beban lateral akan menurunkan reaksi tanah dasar sehingga akan mengurangi kekuatan tanah dasar yang dapat menyebabkan Defleksi pelat perkerasan kaku di atasnya.

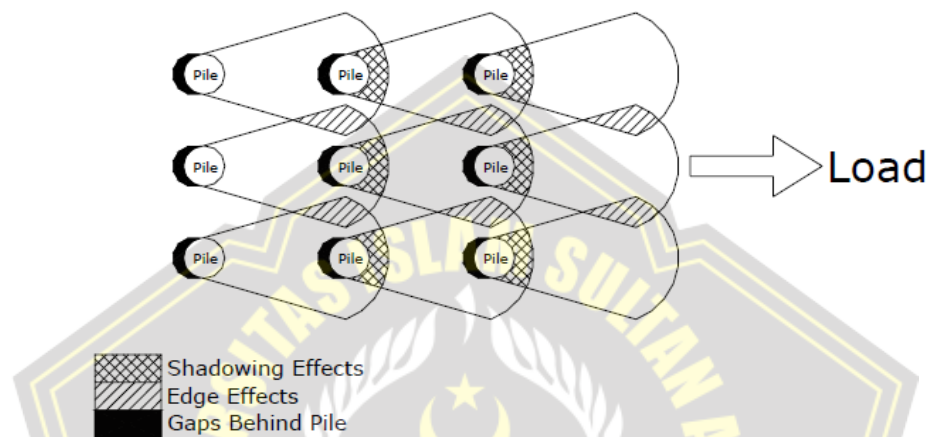
Dari beberapa penelitian tentang perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku belum ada yang melakukan penelitian tentang pengaruh beban lateral pada pelat perkerasan atau pengaruh tiang pada pelat perkerasan ketika pelat tersebut menerima beban lateral yang dapat mempengaruhi kestabilan pelat perkerasan kaku akibat pergerakan tiang. Hardiyatmo (2008), dalam pembahasan menuliskan jika Defleksi yang tidak seragam (*differential settlement*), maka gerakan tanah dasar di sekitar tiang akan mendapat perlawanan gesek tiang yang berarti bahwa Defleksi pelat yang diakibatkan Defleksi tiang tidak akan terjadi karena adanya ikatan tiang dengan tanah di sekitarnya. Tetapi jika dilihat dari penelitian (*Christensen, 2006*), bahwa jika tiang menerima beban lateral akan menimbulkan celah yang disebut sebagai *gaps behind pile* yang terjadi diantara tiang dengan tanah di sekitar tiang.

Dengan adanya *gap* antara tiang dan tanah di sekitar tiang, maka kemungkinan akan mengurangi friksi di sekitar tiang yang dapat mempengaruhi atau menambah besar Defleksi pelat perkerasan kaku, karena friksi yang terjadi tidak lagi menyeluruh sepanjang tiang akibat adanya *gap* tersebut.

2.3.1 Tiang Mendukung Beban Lateral

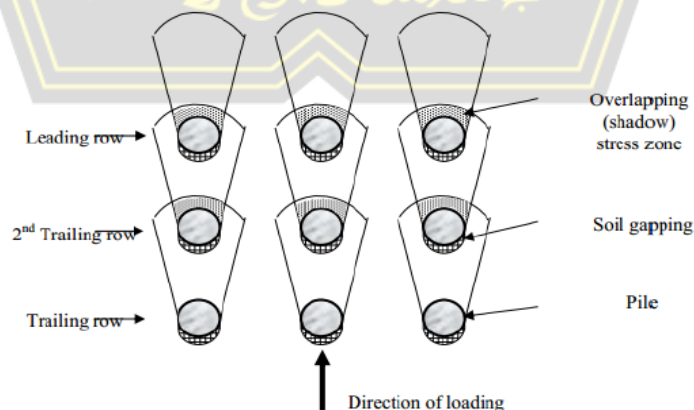
Tiang harus didesain untuk tahan dalam mendukung tidak hanya beban vertikal tetapi juga beban lateral atau beban horizontal, karena beban lateral salah satu beban yang dapat mempengaruhi perilaku tiang selain beban vertikal. Beban lateral dapat mempengaruhi interaksi tanah dengan tiang, dimana akibat beban lateral yang berulang ulang dapat menimbulkan *gap* antara tanah dengan tiang yang dapat mengurangi friksi atau ikatan tanah terhadap tiang (*Christensen, 2006*), *gap* ini akan semakin besar ketika beban lateral ditingkatkan dan dilakukan secara berulang-ulang, dan ketika *gap* antara tanah dengan tiang semakin besar maka Defleksi pelat atau *pile cap* di atasnya akan semakin besar, *defleksi* yang berlebihan pada tiang juga akan mempengaruhi *defleksi* pada pelat di atasnya.

Untuk perkerasan dengan sistem pelat terpaku, kekokohan tiang sangat mempengaruhi kestabilan pelatnya, karena tumpuan pelat berada pada tiang yang lebih banyak mengandalkan friksi tanah dengan tiang karena kedalaman tanah lunak masih lebih dalam jika dibandingkan dengan kedalaman tiang yang hanya mencapai kedalaman 1-2 meter. Gambar di bawah ini merupakan ilustrasi perubahan tanah yang mengakibatkan terjadinya *gap* antara tiang dan tanah di sekitarnya oleh (Christensen, 2006).



Gambar 2. 7 Ilustrasi Pengaruh Lateral Pada Tanah Disekitar Tiang (Christensen, 2006)

Hal yang sama telah diteliti oleh (Jagodnik, 2014), bahwa ada pengaruh dalam penerapan beban lateral pada tiang, baik tiang tunggal maupun tiang secara grup, dimana beban lateral akan menimbulkan adanya *gap* pada tiang dengan tanah, yang dapat mempengaruhi kestabilan tiang, seperti pada Gambar di bawah ini.



Gambar 2. 8 Ilustrasi Pengaruh Lateral Pada Tanah Disekitar Tiang (Jagodnik, 2014)

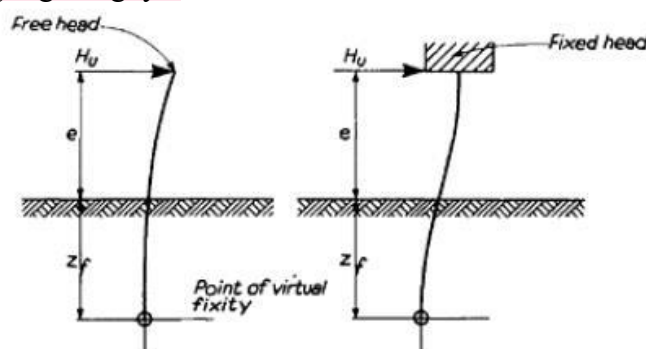
Pondasi tiang panjang maupun tiang pendek dalam perancangan akibat beban-beban lateral, harus memenuhi beberapa kriteria, sebagai berikut :

1. Tiang harus mampu menahan beban lentur
2. Tanah harus mampu mendukung beban
3. Faktor aman terhadap keruntuhan ultimit
4. Defleksi yang terjadi akibat beban harus masih dalam batas toleransi.

Candrasekaran (2008), dalam penelitiannya tentang analisa tiang akibat beban lateral, menyampaikan bahwa *gap* yang terjadi antara tiang dan tanah di sekitarnya sangat berpengaruh terhadap pembebanan yang terjadi, semakin besar beban lateral pada tiang, maka akan semakin besar *gap* yang terjadi antara tiang dan tanah. Hasil penelitian *Candrasekaran* (2008) menyebutkan bahwa *gap* yang terjadi sekitar 10 mm (0,4 kali diameter tiang) dengan kedalaman *gap* hingga mencapai 130 cm (5 kali diameter tiang).

2.3.2 Analisa Defleksi Tiang Tomlinson

(*Tomlinson, 1977*) dalam bukunya *Pile Design and Construction Practise*, salah satunya membuat analisa perhitungan defleksi pada tiang, dalam buku tersebut menyebutkan ada dua kondisi tiang dalam perhitungan defleksi yang terjadi pada tiang akibat beban lateral, yaitu : kondisi *free*, dimana ujung tiang bagian atas tidak monolit dengan pelat di atasnya dan *fixed*, yaitu dimana ujung tiang bagian atas monolit dengan *pile cap* atau bagian pelatnya. Bentuk pergerakan tiang menurut (*Tomlinson, 1977*) digambarkan seperti pada Gambar 2.10 di bawah, dan perhitungan analisa defleksi tiang akibat beban lateral dirumuskan sesuai dengan kondisi ujung tiangnya.



Gambar 2. 9 Tiang Dalam Menahan Beban Lateral (*Tomlinson, 1977*)

Perhitungan defleksi pada ujung tiang sebagai berikut :

a. Untuk *free head pile*

$$y = \frac{H(e + Zf)^3}{3EI} \dots\dots\dots (2.1)$$

b. Untuk *fixed head pile*

$$y = \frac{H(e + Zf)^3}{12EI} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

E = Elastic Modulus dari material tiang (Mpa)

I = Momen Inersia dari tiang (m^4)

H = Lateral Load (kN)

Zf = Kedalaman tiang dari elevasi tanah

e = Jarak ujung tiang terhadap tanah dasar.

Sedangkan defleksi yang terjadi pada dasar tiang, (Tomlinson, 1977) menggambarkan sebagai berikut :

• Untuk *Free head pile*

$$y_o = \frac{4H \left(1 + \frac{1,5e}{L}\right)^3}{kBL} \dots\dots\dots (2.3)$$

• Untuk *Fixed head pile*

$$y_o = \frac{H}{kBL} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

K = Koefisien reaksi tanah dasar

B = Dimensi tiang

H = Lateral Load (kN)

L = Kedalaman tiang dari elevasi tanah

e = Jarak ujung tiang terhadap tanah dasar.

Beberapa metode yang digunakan dalam menganalisa defleksi yang terjadi pada tiang akibat beban-beban lateral, diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Metode *Broms*

Metode *Broms* yaitu suatu metode yang digunakan dalam menganalisa perubahan pergerakan tiang dengan cara menggunakan grafik. Metode ini tidak memperhitungkan *soil structure / pile* interaksi sehingga kurang akurat dalam menganalisa defleksi, disamping itu metode ini hanya berlaku untuk satu jenis tanah tertentu yang terdapat pada area tiang. Analisa dengan cara *Broms* dibedakan atas beberapa bagian :

- a. Analisa dibedakan atas kedalaman tiang yaitu : tiang pendek (*short pile*) dan tiang panjang (*long pile*). Tiang dianggap pendek kaku jika $L/T \leq 2$ atau $L/R \leq 2$, sedangkan tiang panjang jika $L/T \geq 4$ atau $L/R \geq 3,5$.

$$T = \left(\frac{EI}{nh} \right)^{1/5} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$R = (EI/kh)^{1/4} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

E = modulus elastisitas bahan tiang (kg/cm^2)

I = momen inersia tiang (cm^4)

L = panjang tiang pancang (cm)

kh = koefisien reaksi modulus tanah horizontal

nh = koefisien variasi modulus tanah.

- b. Kepala tiang dibedakan atas :

1. Kepala tiang tidak tertahan (*unrestrained / free*)
2. Kepala tiang tertahan (*restrained / fix*).

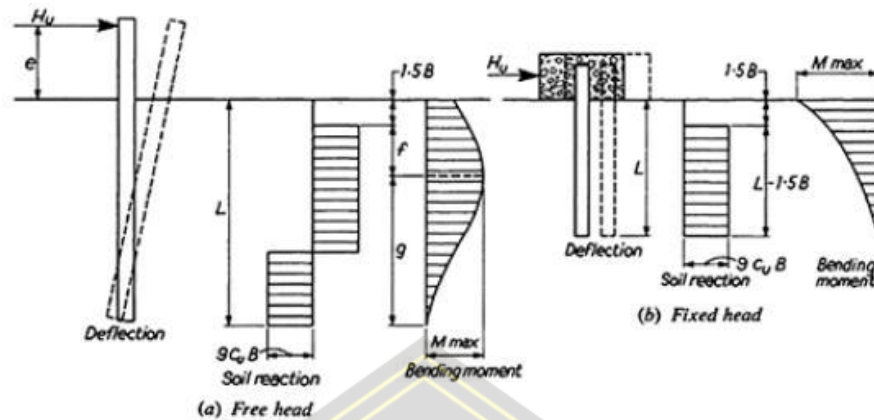
Tiang pendek dengan ujung bebas diharapkan berotasi disekitar pusat rotasi, sedangkan tiang dengan ujung jepit dapat bergerak secara lateral dalam bentuk translasi.

- c. Penyelesaian dengan metode *Broms* dapat dilakukan pada tanah yang terdiri dari dua : tanah kohesif dan tanah non-kohesif. Karena perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku dilakukan hanya pada tanah lunak atau kohesif, maka penyelesaian tahanan lateral tiang dapat digambarkan sebagai berikut :

$$Hu = 9 C_u (L - 3 d/2) \dots\dots\dots (2.7)$$

$$M_{maks} = Hu (L/2 + 3 d/2) \dots\dots\dots (2.8)$$

Mekanisme keruntuhan pada tiang akibat beban lateral, dapat dilihat seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. 10 Mekanisme Keruntuhan Metode Broms (Tomlinson, 1977)

Untuk menentukan momen dan lendutan tiang vertikal yang dipancang pada tanah granular dan dibebani beban lateral dan momen di permukaan tanah digunakan cara *Matlock dan Reese* (1960).

Persamaan diferensial :

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} + E_s y = 0 \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana :

EI = Kekakuan tiang

E_s = Modulus tanah

y = Defleksi tiang.

2. Metode *P-Y Curve*

Metode *P-Y Curve* adalah salah satu metode yang digunakan untuk mengetahui momen yang diterima pondasi tiang, disamping itu metode ini juga mendefinisikan hubungan antara beban lateral dan defleksi pada tiang yang digambarkan dalam sebuah kurva. Keuntungan metode ini adalah sebagai berikut :

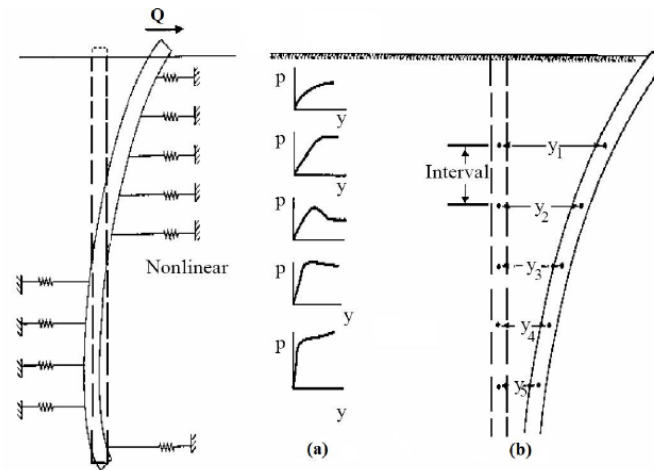
- Diselesaikan berdasarkan persamaan *beam-couulum* dengan menggunakan *finite difference*.
- Lebih akurat karena memperhitungkan *soil structure / pile* interaksi antara tanah dengan tiangnya.

c) Dapat digunakan dengan lapisan tanah yang berbeda.

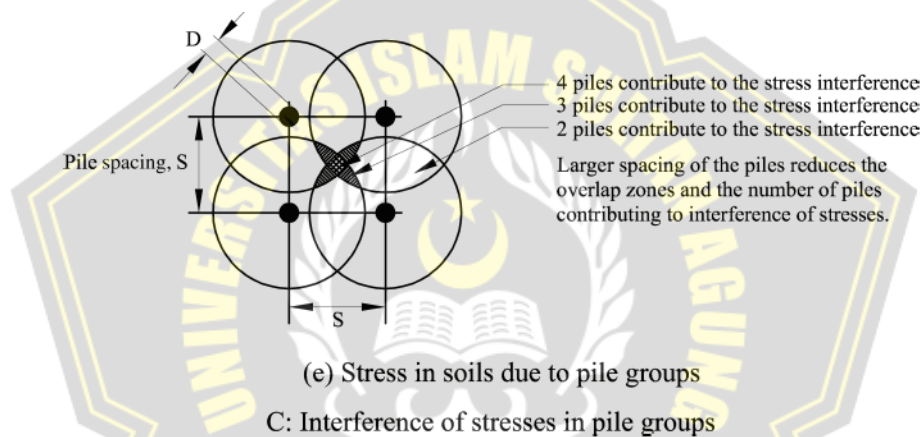
Konsep yang digunakan adalah dengan mengasumsikan persamaan pada balok *Beam on Elastic Foundation (BoEF)*, dimana balok diputar dengan kemiringan 90° atau tegak lurus terhadap bidang datar. Akibat beban yang terjadi yaitu beban lateral maka akan memberikan tegangan tekan dan geser dalam tanah. Untuk memberikan keseimbangan pada tiang maka sepanjang tiang akan memberikan perlawanan agar gaya lateral yang disebabkan oleh beban dapat tetap seimbang. Untuk memenuhi keseimbangan, tanah harus memberikan perlawanan sepanjang tiang untuk menyeimbangkan gaya horizontal eksternal. Pada metode ini p-y digambarkan dalam sebuah grafik, dimana (p) digambarkan sebagai resistensi tanah sepanjang tiang, dan (y) menggambarkan defleksi tiang akibat beban. Hubungan linier anatar p dan y adalah $p = ky$, dimana k adalah reaksi modulus tanah dasar.

Ketika beban lateral diterapkan pada kepala tiang, maka kelompok tiang seolah olah akan memberi perlawanan terhadap beban dimana beban lateral tersebut diterapkan. Pada proses ini akan timbul tekanan tekan dan geser dalam tanah yang dapat mempengaruhi perilaku tiang.

Gambar 2.12. di bawah memperlihatkan bagaimana bentuk defleksi pada tiang yang diakibatkan beban lateral yang membentuk dan menggambarkan perilaku defleksi tiang. Sedangkan Gambar 2.13. memperlihatkan bagaimana tekanan di dalam tanah akibat beban lateral yang dapat mempengaruhi perilaku tanah di sekitar tiang. Jarak antar tiang dapat mempengaruhi wilayah pengaruh tanah di sekitar tiang, semakin kecil jarak antar tiang, akan memperbesar *overlap zones* diantara tiang-tiang, dan semakin besar jarak antar tiang akan mengurangi *overlap zones* diantara tiang-tiang.



Gambar 2. 11 Ilustrasi Perilaku Defleksi Tiang Akibat beban Lateral (Christensen, 2006)



Gambar 2. 12 Tekanan Di dalam Tanah Akibat Beban (Rao, 2010)

Defleksi tiang merupakan perubahan bentuk tiang akibat pembebanan pada tiang secara lateral maupun secara axial. Secara umum tiang dengan beban lateral dikelompokkan menjadi dua bagian :

- Tiang pendek atau tiang kaku
- Tiang panjang atau tiang elastis.

Analisa defleksi tiang dilakukan dengan pendekatan teori *Beam on Elastic foundation – BoEF*, dimana beam dirotasi hingga mencapai 90° (Mukherjee, 2016), sehingga berfungsi sebagai bentuk tiang yang dapat dianalisa defleksinya akibat beban lateral.

Ketika tanah dimodelkan non linier maka respon akibat beban lateral dapat digambarkan dalam 4 orde dengan persamaan diferensial (Brown dan Reese, 1985),

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + Pz \frac{d^2 y}{dz^2} + P - w = 0 \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana :

P_z = Beban *axial pile*

y = Defleksi tiang pada kedalaman z

P = Reaksi tanah dasar pada setiap panjang

EI = Kekakuan tiang

w = Distribusi beban sepanjang tiang.

$$P = \frac{d^4 M(z)}{dz^2} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$y = \frac{1}{EI} \iint M(z) dz \dots\dots\dots (2.12)$$

M = Momen bending

$P = -E_s y$

E_s = Modulus reaksi tanah dasar.

2.4 Defleksi Pelat Perkerasan

Analisa perhitungan besar defleksi pelat atau defleksi pelat perkerasan untuk penelitian disertasi ini dan momen serta gaya geser akibat beban terpusat pada pelat dapat menggunakan analisa balok diatas pondasi elastis (*beam on elastic foundation – BoEF*), seperti yang telah dijelaskan di atas. Teori ini akan mendefinisikan hubungan antara tekanan tanah dengan Defleksi pelat perkerasan menggunakan modulus reaksi tanah dasar atau koefisien tanah dasar (k), sesuai dengan formula yang digunakan oleh (Hetényi, 1964).

Perhitungan besar koefisien tanah dasar (k) sesuai dengan (Hetényi, 1964), dapat menggunakan persamaan 2.13. di bawah.

$$k_s = \frac{q}{\delta} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dengan :

Q = tekanan pada tanah

δ = deformasi (Defleksi balok) atau defleksi balok.

Pada analisa defleksi dengan menggunakan formula Roark (Young dan Budynas, 2002) yang dijelaskan dalam Gambar 2.14. yang juga digunakan (Puri, 2015), bahwa perhitungan defleksi akibat beban terpusat adalah sebagai berikut :

$$\delta = y_A F_1 + \frac{\theta_A}{2\beta} F_2 + \frac{MA}{2EI\beta^2} F_3 + \frac{RA}{4EI\beta^2} F_4 - \frac{W}{4EI\beta^2} F_{a4} \dots\dots\dots(2.14)$$

Untuk kedua ujung bebas dimana gaya dan momen tidak ada, maka nilai dari $RA = 0$ dan $MA = 0$, sedangkan θ_A dan y_A dirumuskan seperti pada persamaan di bawah ini.

$$\theta_A = \frac{W}{2EI\beta^2} \frac{C2Ca2 - 2C3Ca1}{C11} \dots\dots\dots(2.15)$$

$$y_A = \frac{W}{2EI\beta^3} \frac{C4Ca1 - C3Ca2}{C11} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana:

$$F1 = \cosh \beta x \cosh \beta x$$

$$F2 = \cosh \beta x \sinh \beta x + \sinh \beta x \cosh \beta x$$

$$F3 = \sinh \beta x \cosh \beta x$$

$$Fa4 = \cosh \beta (x - a) \sinh \beta (x - a) + \sinh \beta (x - a) \cosh \beta (x - a)$$

$$C2 = \cosh \beta I \sinh \beta I + \sinh \beta I \cosh \beta I$$

$$C3 = \sinh \beta I \cosh \beta I$$

$$C4 = \cosh \beta I \sinh \beta I + \sinh \beta I \cosh \beta I$$

$$Ca1 = \cosh \beta (I - a) \cosh \beta (I - a)$$

$$Ca2 = \cosh \beta (I - a) \sinh \beta (I - a) + \sinh \beta (I - a) \cosh \beta (I - a)$$

$$C11 = \sinh^2 \beta I - \sinh^2 \beta I$$

Dimana:

$$W = \text{beban terpusat (kN)}$$

$$\beta = \text{fleksibilitas balok}$$

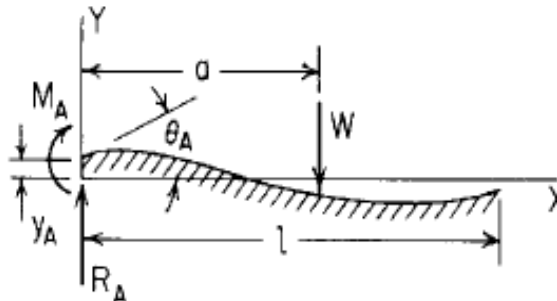
$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Bk}{4EI}} \dots\dots\dots(2.17)$$

$$k = \text{modulus reaksi tanah dasar (kN/m}^2\text{/m)}$$

$$B = \text{lebar balok (m)}$$

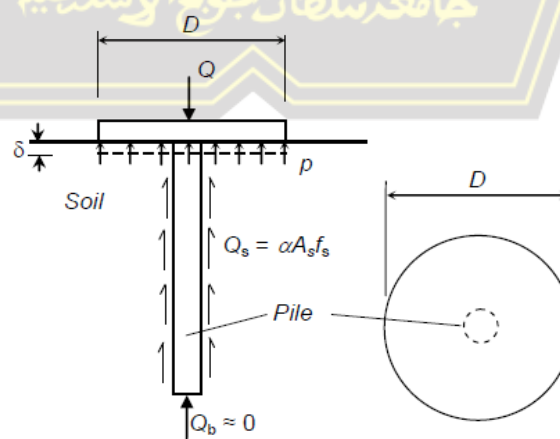
$$E = \text{modulus elastisitas balok (kN/m}^2\text{)}$$

- 1
- a = jarak beban terhadap tepi kiri balok (m)
- x = jarak titik yang ditinjau terhadap tepi balok
- l = panjang balok (m).



Gambar 2. 13 Balok Diatas pondasi elastis dengan panjang terbatas akibat beban terpusat (Young dan Budynas, 2002)

Dalam perhitungan defleksi pelat perkerasan yang menggunakan tambahan tiang atau sistem pelat terpaku (*Nailed Slab System*) dapat berpedoman pada nilai modulus reaksi tanah dasar, Hardiyatmo (2011) membuat analisa perhitungan nilai kekakuan pelat perkerasan dengan menggunakan satu tiang sebagai percobaan yang dihubungkan dengan pelat berbentuk lingkaran seperti yang dijelaskan pada Gambar 2.15. Dalam analisa tersebut menunjukkan bahwa kekakuan modulus tanah dasar dipengaruhi juga oleh friksi tiang terhadap tanah di sekeliling tiang, sehingga kapasitas ultimit tiang sangat dipengaruhi oleh besaran friksi di sekitar tiang. Dalam analisa tiang dalam pelat perkerasan dengan sistem pelat terpaku, *end bearing* atau kapasitas ujung tiang sangat kecil, bahkan dianggap tidak ada, karena ujung tiang tidak diletakkan di atas tanah keras tetapi masih diantara tanah lunak yang kedalamannya melebihi panjang tiang.



Gambar 2. 14 Pengaruh penggunaan tiang dalam tanah di bawah pelat (Hardiyatmo, 2011)

Untuk mendapatkan besaran nilai daya dukung ultimit dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Q_u = Q_b + Q_c \dots\dots\dots (2.18)$$

Dimana :

Q_u = kapasitas ultimit

Q_b = kapasitas ujung tiang (asumsi $Q_b = 0$)

Q_c = kapasitas friksi

Sedangkan daya dukung friksi tiang digambarkan dalam persamaan sebagai berikut:

$$Q_c = A_s \times f_s \dots\dots\dots (2.19)$$

Dimana :

f_s = friksi sepanjang tiang (kPa)

A_s = luas keliling tiang (m²)

Ultimit friksi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$f_i = a_d c + p_o K_d \tan \varphi_d \dots\dots\dots (2.20)$$

Dimana :

a_d = faktor adhesi

c = kohesi tanah (kPa)

p_o = tekanan *overburden* (kN/m²)

K_d = koefisien dari tekanan lateral tanah di sekeliling tiang

φ_d = derajat friksi tanah.

Dan untuk tahanan friksi ultimit tiang pada lempung jenuh dinyatakan dengan (Puri et al., 2012) :

$$f_s = a_d c \dots\dots\dots (2.21)$$

Dalam *Fleming, et al, 2009* telah menentukan nilai faktor adhesi untuk lempung lunak atau lempung terkonsolidasi normal yaitu sebesar 1,0, Hardiyatmo (2011) telah menentukan rumus besaran friksi sepanjang tiang adalah :

$$R_s = \delta_o / \delta (a_d c_u + p_o K_d \tan \varphi_d) \dots\dots\dots (2.22)$$

Sehingga modulus friksi akibat tiang didefinisikan sebagai berikut :

$$k_c = R_s / \delta \dots\dots\dots (2.23)$$

Dimana :

k_c = modulus friksi tiang (kN/m³)

k_c = gesekan sepanjang tiang (kN/m²)

δ = defleksi pelat perkerasan (m).

Dari persamaam di atas menunjukkan bahwa nilai friksi tiang sangat mempengaruhi nilai kekakuan tanah sehingga berakibat pada nilai modulus reaksi tanah dasar jika ada penambahan tiang pada pelat perkerasan tersebut. Dengan mempertimbangkan tiang tunggal yang terhubung pada pelat lingkaran seperti pada gambar di atas. (Hardiyatmo, 2011), telah mengusulkan persamaan untuk menentukan penambahan nilai modulus reaksi tanah akibat penambahan tiang pada pelat, seperti pada persamaan 2.23.

$$\Delta k = \frac{\delta_o A_c}{\delta 2 S^2} (A_d C_u + p_o K_d \tan \varphi_d) \dots\dots\dots (2.24)$$

Dimana :

Δk = modulus reaksi tanah dasar akibat adanya tiang

δ_o = perpindahan relatif antara tanah dan tiang^o

δ = defleksi pelat

A_s = luas keliling tiang

S = jarak antara tiang

a_d = faktor adhesi (non-dimensional)

c_u = kohesi *Undrained* (kN/m²)

p_o = tekanan *overburden* efektif rerata sepanjang tiang (kN/m²)

K_d = koefisien tekanan tanah lateral di sepanjang tiang

φ_d = sudut gesek antara tanah dan tiang (°).

Sehingga pendekatan penentuan modulus reaksi *subgrade* ekivalen ditentukan sebagai berikut (Hardiyatmo, 2011) :

$$k' = k + \Delta k \dots\dots\dots (2.25)$$

Dimana :

k' = modulus reaksi tanah dasar ekivalen

k' = modulus reaksi tanah dasar dari pembebanan uji

Δk = tambahan modulus reaksi *subgrsde* karena adanya tiang.

2.5 Program Numerik

Numerik adalah sebuah program yang dikembangkan berdasarkan metode elemen hingga (*finite element method*) yang telah dikembangkan secara khusus untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas dalam bidang-bidang rekayasa geoteknik, program ini dapat menganalisis kondisi *Plane – Strain* dan *Axisymmetric*. Penyelesaian dengan menggunakan Numerik sebagai bagian dari analisis numeris untuk mengetahui perilaku pelat perkerasan akibat beban lateral pada tiang. Sumber beban lateral yang digunakan dalam analisis untuk Numerik sebagai bagian dari perhitungan perilaku pelat yang disesuaikan dengan besar beban pada uji pembebanan lateral di laboratorium. Prosedur perhitungan dengan menggunakan Numerik berjalan secara otomatis dan didasarkan pada prosedur numerik (*Brinkgreve, 2005*). Berikut prosedur analisis dalam penggunaan Numerik dinamik maupun lateral.

2.5.1 Masukan Program Numerik

Pada analisis dinamik inerasi lapisan tanah dan variasi beban dinamik terhadap waktu dimasukkan ke dalam model dinamik. Di dalam input beban dinamik disimulasikan dengan menggunakan model regangan-bidang (*plane strain*), dimana pada model ini tidak memperhitungkan redaman geometris. Oleh karena itu redaman material perlu digunakan untuk memperoleh hasil yang realistis.

Parameter-parameter tanah dan perkerasan akan di masukkan ke dalam *Material Properties* dengan menggunakan model material *Mohr-Coulomb* atau model material linier elastis, dimana pada kedua model ini dapat memasukkan nilai cepat rambat gelombang tekan v_p , dan gelombang geser v_ϕ , atau dengan memasukkan nilai modulus elastis, E , dan ratio poisson, ν , dengan memasukkan nilai-nilai tersebut di atas, maka secara otomatis program akan langsung

menghitung cepat rambat gelombang tekan dan geser, sebagaimana digambarkan dalam persamaan di bawah ini :

$$v_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}} \dots\dots\dots (2.25)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \dots\dots\dots (2.26)$$

Dimana :

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \dots\dots\dots (2.27)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots\dots\dots (2.28)$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \dots\dots\dots (2.29)$$

G adalah modulus geser, ρ adalah kepadatan material, E_{oed} adalah *modulus eodometer*, E modulus *Young*, ν adalah rasio *Poisson* dan γ adalah berat volume tanah dan g adalah percepatan gravitasi.

2.5.2 Perhitungan Dinamik Pada Numerik

Pada tahap perhitungan, pemilihan opsi *Dynamic Analysis* secara otomatis akan memberikan opsi perhitungan *Automatic Time Stepping*. Dengan program Numerik dapat dilakukan analisis dinamik setelah rangkaian perhitungan plastis. Meskipun demikian, terdapat beberapa batasan sebagai berikut :

- a. Analisis dinamik tidak dapat dilakukan tambahan pada perhitungan *update mesh*.
- b. Pada analisis dinamik, tidak dapat dipilih tipe pembebanan *Staged Construction*.

Parameter analisis dinamik yang dapat diatur dalam program adalah :

a) Langkah Waktu (*Time Stepping*)

Langkah waktu yang digunakan dalam perhitungan dinamik adalah konstan dan didefinisikan sebagai $\delta_t = \frac{\Delta t}{n \times m}$ dimana Δt durasi beban dinamik (*interval waktu*), n adalah jumlah langkah tambahan dan m adalah jumlah *sub-langkah dinamis*.

b) Interval Waktu (*Time Interval*)

Untuk setiap tahap perhitungan, harus ditentukan interval waktu pada lembar tab parameter. Perkiraan waktu akhir akan dihitung secara otomatis dengan menambahkan interval waktu pada seluruh tahap secara berurutan. Apabila seluruh perhitungan selesai, maka dapat diperoleh waktu akhir perhitungan.

c) Langkah Tambahan (*Additional Steps*)

Numerik menyimpan hasil perhitungan pada beberapa langkah. Secara pra-pilih, nilai langkah tambahan adalah 100, tetapi dapat pula dimasukkan nilai antar 1 hingga 250.

d) Menghapus langkah sebelumnya (*Delete Intermediate Steps*)

Pada program Numerik, dapat ditampilkan animasi hasil perhitungan dari analisis dinamik. Apabila yang ingin ditampilkan tidak hanya kondisi awal dan akhir perhitungan, maka seluruh *steps* harus tetap disimpan.

2.5.3 Keluaran Program Numerik

Numerik dinamik menyediakan berbagai pilihan untuk menampilkan hasil-hasil dari suatu perhitungan dinamik yang telah diproses, diantaranya :

- a. Dengan pilihan menu buat animasi dalam menu Tampilan, dapat ditampilkan hasil gerakan aktual dari geometrik terhadap waktu. Jumlah langkah dalam animasi dapat dipengaruhi oleh jumlah langkah tambahan yang ditentukan dalam tahap perhitungan.
- b. Untuk langkah dinamik tersedia beberapa pilihan kecepatan dan percepatan dalam menu Deformasi, sehingga dapat dilakukan pemilihan terhadap kecepatan total, percepatan total, komponen horizontal dan komponen vertikal.
- c. Dari output perhitungan akan ditampilkan dalam beberapa grafik yang mencari hubungan antara defleksi tiang, pembebanan dan Defleksi pelat perkerasan.

2.6 Penelitian Sejenis Terdahulu

Beberapa penelitian telah dilakukan yang berhubungan dengan topik yang akan diteliti oleh penulis, diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Hardiyatmo (2008), melakukan penelitian terhadap pelat terpaku yang monolit dengan pelat maupun tidak monolit. Pengujian ini untuk mengetahui besar Defleksi pada pelat akibat beban siklik secara vertikal. Pada pelat yang monolit Defleksi dapat tereduksi hingga sampai 58 %, sedangkan untuk yang tidak

monolit dapat mereduksi hingga 55 %. Perubahan besar Defleksi salah satunya diakibatkan adanya perlawanan gesek tiang sehingga beda Defleksi akan menjadi semakin kecil. Selengkapnya hasil Defleksi seperti pada tabel di bawah ini :

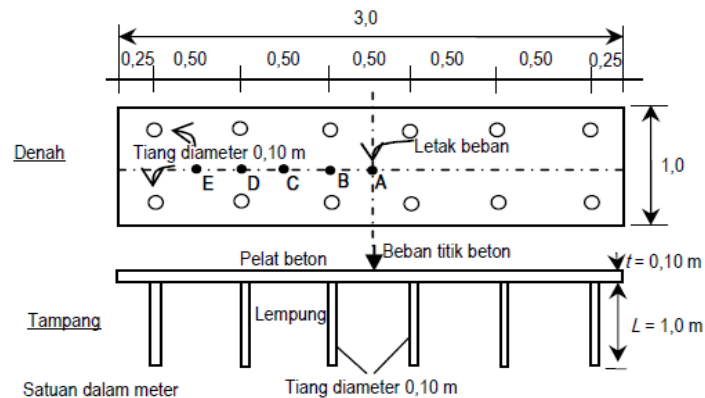
Tabel 2.1 Reduksi Defleksi dengan tiang dan tanpa tiang tidak monolit ($Q = 7,74 \text{ kN}$)

Dimensi pelat (cm)	Defleksi rata-rata pelat (mm)	Defleksi rata-rata pelat (mm)	Defleksi rata-rata pelat (mm)	Reduksi Defleksi terhadap pelat tanpa tiang (%)	Reduksi Defleksi terhadap pelat tanpa tiang (%)
	Dengan Tiang L = 50cm	Dengan Tilang L = 75 cm	Tanpa Tiang	L = 50 cm	L = 75 cm
50 x 50	1,99	1,51	3,39	41,3	55,46
70 x 70	1,71	1,37	2,54	32,68	46,06

Tabel 2.2 Reduksi Defleksi dengan tiang dan tanpa tiang monolit ($Q = 7,74 \text{ kN}$)

Dimensi pelat (cm)	Defleksi rata-rata pelat (mm)	Defleksi rata-rata pelat (mm)	Defleksi rata-rata pelat (mm)	Reduksi Defleksi terhadap pelat tanpa tiang (%)	Reduksi Defleksi terhadap pelat tanpa tiang (%)
	Dengan Tiang L = 50cm	Dengan Tilang L = 75 cm	Tanpa Tiang	L = 50 cm	L = 75 cm
50 x 50	1,68	1,40	3,39	50,44	58,70
70 x 70	1,57	1,22	2,54	38,19	31,97

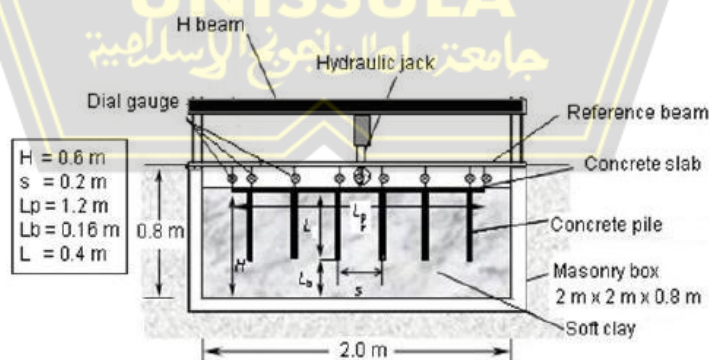
- Hardiyatmo (2009), melakukan penelitian tentang metode hitungan lendutan pelat dengan menggunakan modulus reaksi tanah dasar ekivalen. Ada dua model penelitian yang digunakan, yaitu : pelat ukuran 1m x 1m x 0,1m tanpa tiang dengan uji beban sentris dan 3m x 1m x 0,1m dengan pembebanan pada beberapa titik.



Gambar 2.15 Skematik pengujian pelat dengan tiang

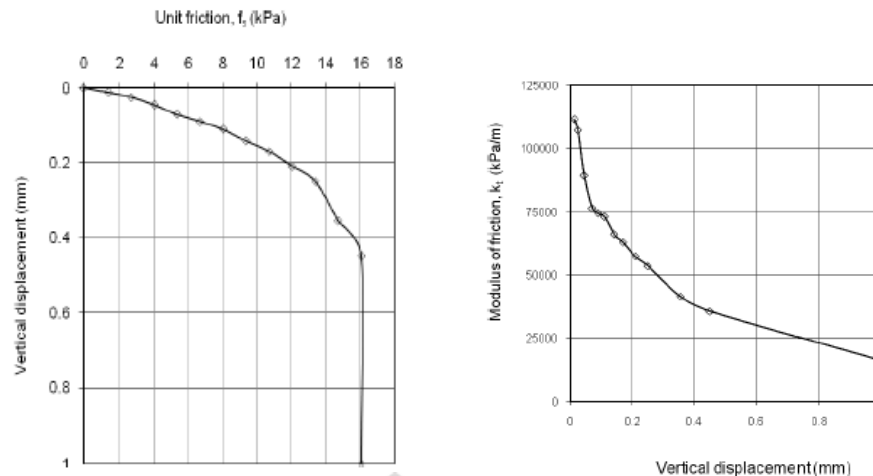
Dari hasil penelitian didapatkan bahwa modulus reaksi tanah dasar untuk pelat yang lebar nilai k akan lebih kecil jika dibandingkan dengan pelat uji yang lebih kecil. Namun dalam pengujian yang dilakukan nilai modulus tanah dasar (k) pada pelat uji 1 m x 1 m lebih kecil jika dibandingkan dengan pelat uji yang ukuran 3 m x 1 m, hal ini terjadi karena pelat uji yang lebar tersebut didukung oleh beberapa tiang, dimana yang berperan meneruskan pembebanan hingga pada bagian dalam lapisan tanah sehingga menyebabkan nilai modulus tanah dasarnya semakin besar.

- Hardiyatmo (2011), melakukan penelitian bagaimana pengaruh displacement pelat perkerasan dengan friksi tanah dasar pada tiang akibat beban vertikal. Pengujian dilakukan pada beberapa tiang seperti pada gambar di bawah :



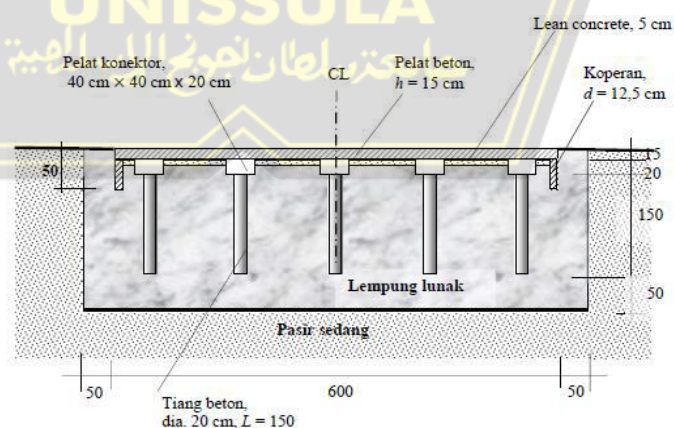
Gambar 2. 16 Skematik pengujian tiang

Dari hasil penelitian didapatkan bahwa hubungan antara friksi tiang dengan perpindahan (defleksi) pelat pada beban 16 kPa sebesar 0,4 mm. Defleksi pelat semakin besar ketika friksinya juga besar.



Gambar 2. 17 Hubungan displacement dengan friksi dan Modulus friksi

4. Anas Puri (2013), melakukan penelitian perkerasan dengan pelat terpaku pada skala penuh dengan uji pembebanan vertikal. Pada penelitian ini pelat dimodifikasi dengan menambah koperan pada sisi samping pelat yang digunakan untuk mengurangi defleksi pelat yang berlebihan pada bagian luar pelat. Disamping itu, modifikasi juga dilakukan dengan menambah pelat konektor di atas tiang yang monolit dengan pelat. Tinjauan dilakukan pada satu baris tiang dan tiga baris tiang. Dari hasil penelitian tersebut disimpulkan bahwa dengan penambahan koperan dapat mereduksi lendutan secara signifikan untuk beban yang diletakkan pada ujung pelat. Tetapi tidak terlalu signifikan pada beban yang diletakkan pada bagian tengah (sentris).



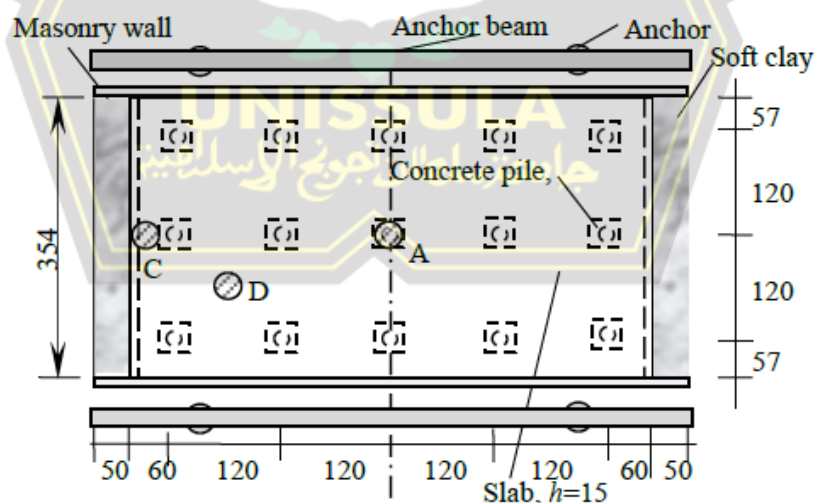
a. Kondisi dengan penambahan koperan



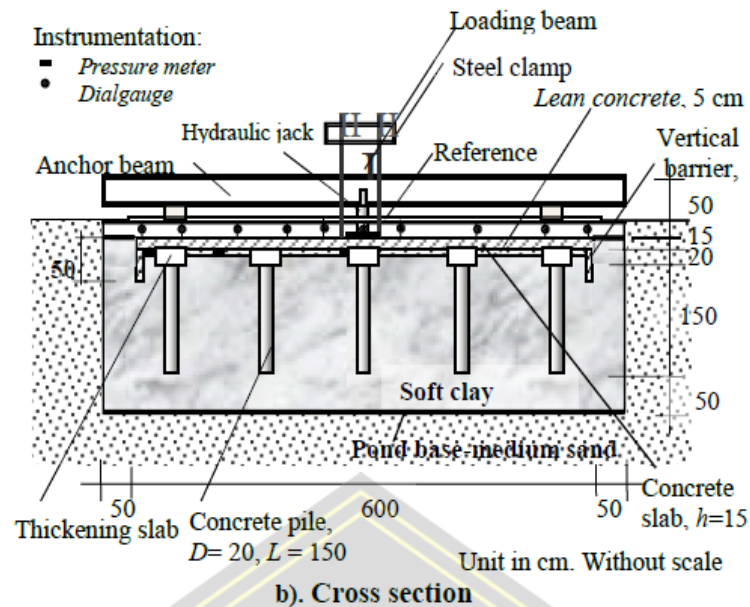
b. Proses pengujian di lapangan

Gambar 2. 18 Pengujian beban dengan koperan (*Anas Puri, 2013*)

5. Anas Puri (2014), mengkaji perilaku pelat terpaku pada tanah lunak yang diakibatkan beban berulang dengan skala penuh di laboratorium. Pengujian dilakukan untuk mengetahui besar defleksi pada pelat akibat beban vertikal yang dilakukan secara berulang dengan besaran yang berbeda, yaitu : 10 kN, 20 kN, 40 kN, 80 kN, 160 kN, yang ditempatkan pada tiga titik yang berbeda, dimulai dari pinggir pelat hingga pada bagian tengah pelat. Hasil pengujiannya menunjukkan bahwa adanya perbedaan besar defleksi pelat yang ditempatkan pada titik yang berbeda, defleksi terbesar diperoleh ketika pembebanan diletakkan pada bagian tengah pelat.

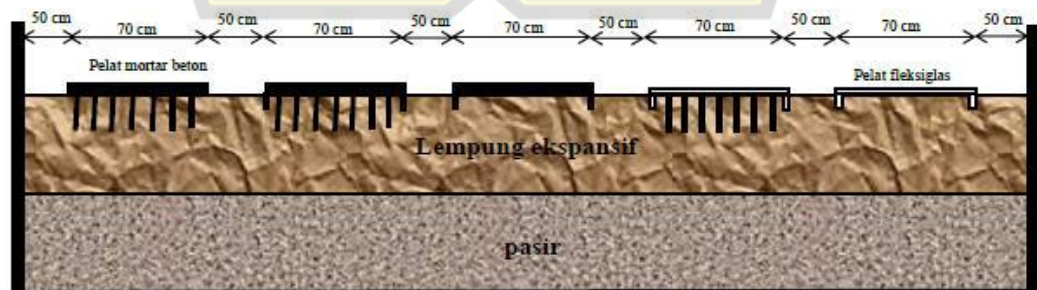


a). Plan of view



Gambar 2. 19 Skemati Pengujian (Anas Puri, 2014)

6. Willis Diana (2016), melakukan penelitian pelat terpaku dalam tanah lempung ekspansif, dimana pelat dengan perkuatan tiang pada tanah lunak ekspansif yang mengembang menghasilkan *displacement* vertikal yang lebih kecil dibandingkan pelat tanpa tiang. Disisi lain pengujian dilakukan pada panjang tiang yang berbeda, dari hasil itu didapatkan bahwa semakin panjang tiang *displacement* (perpindahan) tiang ke atas (*heave* tiang) akibat tanah mengembang akan semakin kecil. Hasil uji pembebanan pada kondisi awal (kadar air tanah rerata sebesar 11 %) menghasilkan modulus reaksi subgrade yang lebih besar dibandingkan kondisi setelah dibasahi (kadar air tanah berkisar 47 %).



(a). Sketsa model dalam kolam pengujian



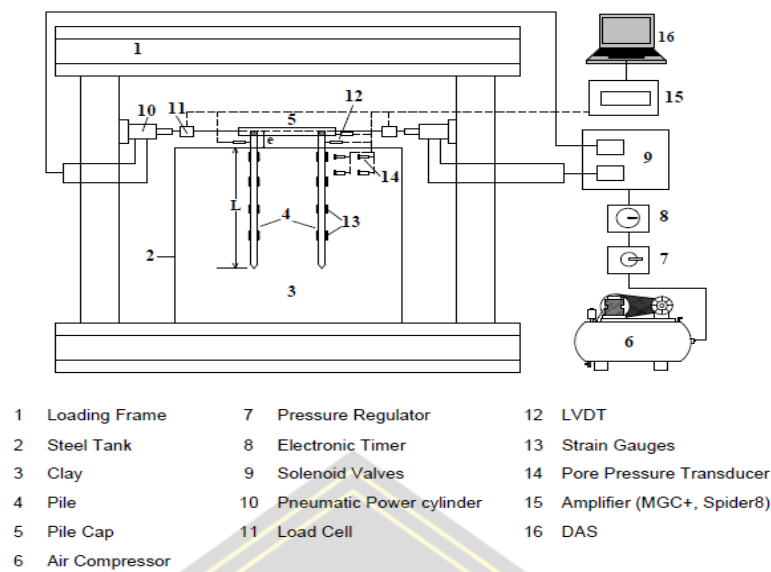
(b). Model pelat di kolam uji selama pembasahan

Gambar 2. 20 Pengujian Skala Penuh (Willis D., 2013)

7. Chandrasekaran, A. Boominathan and G.R. Dodagoudar (2008), meneliti perilaku group pile 2 x 2 dengan beban statis dan beban lateral yang dilakukan secara siklus. Pada penelitian ini tidak meneliti pengaruh siklus beban lateral terhadap Defleksi tiang secara kelompok yang dapat mempengaruhi *pile cap* atau pelat di atasnya. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa barisan tiang bagian depan dan bagian baris tiang belakang menerima pembebanan yang tidak sama, dimana bagian depan menerima beban 15 % lebih besar dari bagian belakang. Kemudian defleksi tiang meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah siklus pembebanan. Model uji seperti pada gambar di bawah ini.



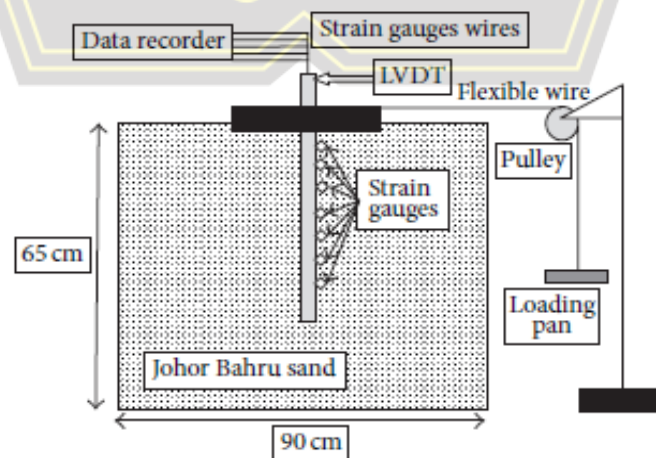
a. Model uji



b. Skematik pengujian

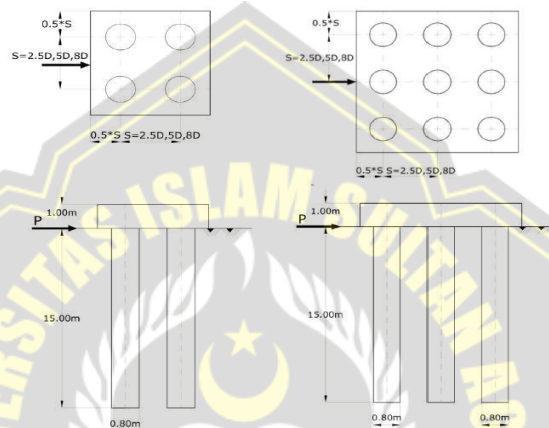
Gambar 2. 21 Skema pengujian yang dilakukan oleh Chandrasekaran (2008)

8. Mahdy Khari (2014), melakukan penelitian skala laboratorium terhadap tiang tunggal pada kondisi *fixed* yang dibebani beban lateral. Penelitian dilakukan untuk mengetahui pengaruh beban lateral pada setiap bagian tiang terhadap defleksi tiang, dari hasil tersebut didapat bahwa defleksi terbesar berada pada ujung atas tiang dengan beban lateral yang sama.



Gambar 2. 22 Skema pengujian yang dilakukan oleh Mahdy Khari (2014)

9. Elhakim, A.F., (2014), melakukan penelitian dengan analisis numeris tentang respon grup tiang yang tertanam pada tanah pasiran akibat beban lateral. Dari hasil penelitian disimpulkan bahwa pengaruh beban terhadap defleksi pada tiang tunggal berbeda dengan tiang secara grup, pada tiang tunggal hasilnya lebih besar jika dibandingkan dengan tiang secara grup. Defleksi tiang pada kondisi *fixed* secara grup berbeda dengan tiang pada bagian depan disbanding dengan tiang pada baris belakang, hal ini kemungkinan karena adanya pengaruh *gap* akibat beban lateral.



Gambar 2. 23 Model pengujian Numeris Elhakim A.F. (2014)

10. Adolf S., Pratikso, Abdul Rochim, (2019), melakukan penelitian dengan analisis numeris elemen hingga dengan *Numerik* dan eksperimen di laboratorium terhadap Defleksi pelat perkerasan dan defleksi tiang akibat beban lateral dan vertikal. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa akibat adanya beban lateral pada pelat perkerasa kaku, akan terjadi *gap* di sekitar tiang yang akan mempengaruhi Defleksi pelat perkerasan.

Tabel 2. 3 Penelitian terdahulu yang sejenis

No	Judul	Peneliti & Tahun	Tujuan	Hasil
1	Sistem pelat terpakai (<i>Nailed Slab</i>) untuk perkuatan pelat beton pada perkerasan kaku (<i>rigid pavement</i>)	Hardiyatmo (2008)	Untuk mengetahui pengaruh pemasangan tiang pada pelat	• Pemasangan tiang monolit dapat meningkatkan nilai reaksi tanah dasar k sebesar 50 %. • Bila tanah dasar mengalami Defleksi tidak seragam (<i>differential settlement</i>), maka gerakan tanah dasar di sekitar tiang

No	Judul	Peneliti & Tahun	Tujuan	Hasil
				akan mendapat perlawanan gesek tiang, sehingga beda Defleksi akan menjadi kecil. Perkerasan pelat terpaku cocok juga digunakan untuk perkerasan yang tanah dasarnya dipengaruhi oleh Defleksi yang tidak seragam, karena tiang mengurangi beda Defleksi sehingga pelat tetap rata.
2	Metode hitungan Lendutan Pelat Dengan Menggunakan Modulus Reaksi Tanah Dasar Ekuivalen Untuk Struktur pelat Fleksibel	Hardiyatmo (2009)	Menghitung besar lendutan pelat perkerasan dengan teori <i>BoEF</i> yang menggunakan modulus reaksi tanah dasar, pada dua model, yaitu tanpa tiang dan menggunakan tiang.	- Nilai hasil lendutan dari pengamatan dengan perhitungan memiliki selisih nilai 2,6 s/d 25 %. - Perhitungan lendutan dengan menggunakan <i>BoEF</i> dapat digunakan dalam menganalisa besaran lendutan. - Pada pelat yang lebar yang didukung tiang memberi nilai k yang besar, tetapi nilai k pada pelat yang kecil yang tidak didukung tiang, nilai k yang lebih kecil.
3	<i>Method to Analyze the Deflection of the Nailed Slab System</i>	Hardiyatmo (2011)	Analisa untuk meningkatkan modulus reaksi tanah dasar.	- Penggunaan tiang pada pelat perkerasan dapat meningkatkan modulus reaksi tanah dasar. - Peningkatan defleksi (Defleksi) pelat, seiring dengan Defleksi reaksi tanah dasar yang terjadi akibat beban vertikal.
4	Penerapan Metode Analisis Lendutan Pelat Terpaku Pada Model Skala Penuh Dan Komparasi Dengan Uji Pembebanan.	Anas Puri (2013)	Mengetahui reaksi tanah dasar dengan menambah koperan pada sisi luar Pelat terpaku	- Dengan penambahan koperan pada sisi luar pelat dapat meningkatkan reaksi tanah dasar dengan koefisien faktor pengali sebesar 1,5. - Akibat koperan pada sisi luar maka perlu dilakukan perhitungan momen, dari hasil momen tersebut dapat dijadikan sebagai analisa besaran volume tulangan yang digunakan pada pelat perkerasannya.
5	<i>Behavior of Nailed Slab System on Soil Clay Due tp Repetitive</i>	Anas Puri (2014)	Mengetahui besar defleksi pelat pada	Defleksi terbesar terdapat pada tengah pelat dengan pembebanan 160 kN, sedangkan pada dua titik

No	Judul	Peneliti & Tahun	Tujuan	Hasil
	<i>Loading by Conducting Full Scale Test.</i>		tiga titik yang berbeda, dengan pembebanan yang berbeda, yang dimulai dari 10 kN, 20 kN, 40 kN, 80 kN, 160 kN.	pada bagian ujung pelat besar defleksinya lebih kecil. • Pengurangan besar beban hingga mencapai 0 kN, menjadikan pelat kembali seperti semula tanpa menerima beban (0 kN).
6	Uji Model Skala Kecil Dan Analisis Elemen Hingga Perkerasan Sistem Pelat Terpaku Pada Tanah Dasar Ekspansif	Willis Diana (2016)	Untuk mengetahui perilaku deformasi tiang akibat pengembangan tanah jenuh dan tidak jenuh pada lempung ekspansif.	• Semakin panjang tiang dan semakin rapat jarak tiang akan menghasilkan displacement yang kecil. • Pada tanah mengembang atau tanah lempung ekspansif, pengembangan tanah dapat mempengaruhi displacement pelat yang dapat mempengaruhi Defleksi pelat perkerasan.
7	<i>Behavior of 2 x 2 Pile Group under Static and Syclic Lateral Loading</i>	Chandrasekaran (2008)	Mengetahui perilaku tiang grup yang dipengaruhi oleh jarak tiang, pada pembebanan secara lateral.	• Pembebanan secara siklus akan menyebabkan <i>gap</i> antara tiang dengan tanah sekitarnya. <i>Gap</i> yang terjadi sekitar 1 cm hingga kedalaman 1, 3 meter. • Tiang pada barisan depan akan menerima beban paling besar sehingga defleksi lebih besar jika dibandingkan dengan tiang pada bagian barisan belakang. • Defleksi tiang meningkat seiring dengan pertambahan siklus pembebanan, sehingga akan mempengaruhi <i>gap</i> yang terjadi pada tiang dengan tanah di sekitarnya.
8	<i>Development of p-y Curve of Laterally Loaded Piles in Cohesionless Soil.</i>	Mahdy Khari (2014)	Mengetahui besar defleksi pada setiap bagian tiang yang dibebani secara lateral.	Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa defleksi terbesar pada tiang berada pada bagian atas tiang, dan defleksi terkecil berada pada bagian bawah dari tiang.
9	<i>Three dimensional modeling of laterally</i>	Elhakim A.F (2014)	Mengetahui pengaruh beban lateral	• Defleksi yang terjadi pada tiang tunggal dan tiang secara grup

No	Judul	Peneliti & Tahun	Tujuan	Hasil
	<i>loaded pile groups resting in sand.</i>		terhadap defleksi tiang dengan menggunakan analisis numeris.	akibat beban lateral sangat berbeda. • <i>The Shadowing effect</i> atau lapisan tanah yang mengalami tekanan lebih tinggi pada tanah yang padat jika dibandingkan dengan tanah tidak padat.
10	Kapasitas Friksi Tiang Pada Perkerasan Kaku Akibat Beban Lateral	Adolf S., Pratikso, Abdul Rochim (2019)	Mengetahui pengaruh beban lateral terhadap defleksi tiang	Akibat beban lateral tiang akan mengalami defleksi dan terjadi <i>gap</i> pada tanah disekitar tiang yang berpengaruh mengurangi friksi.
11	Perilaku Lendutan Perkerasan Pelat Terpaku pada Tanah Lunak akibat Beban Aksial Sentris.	Adolf S., Pratikso, Abdul Rochim (2019)	Mengetahui lendutan yang terjadi pada pelat akibat beban vertikal dimana tiang berfungsi sebagai angkur yang menopang pelat perkerasan kaku.	Terjadinya lendutan pada pelat perkerasan kaku selain karena daya dukung tiang juga karena terjadi <i>gap</i> disekitar tiang.

2.7 Gap Penelitian

Dari roadmap penelitian di atas, maka gap penelitian yang didapat dan belum dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya yang berhubungan dengan perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku adalah sebagai berikut :

- Bagaimana tinjauan atau perilaku pelat akibat beban lateral dan beban vertikal / aksial eksentris yang bekerja pada perkerasan pelat terpaku.
- Bagaimana hubungan Defleksi pelat perkerasan akibat beban lateral, karena beban lateral yang berulang akan menyebabkan terjadinya *gap* antara tanah dengan tiang yang dapat mengurangi friksi pada tiang sehingga dapat meningkatkan Defleksi pelat perkerasan.
- Bagaimana hubungan antara defleksi tiang dengan defleksi pelat akibat beban vertikal / aksial eksentris monotonik dan beban lateral yang bervariasi.

2.8 Kerangka Berpikir

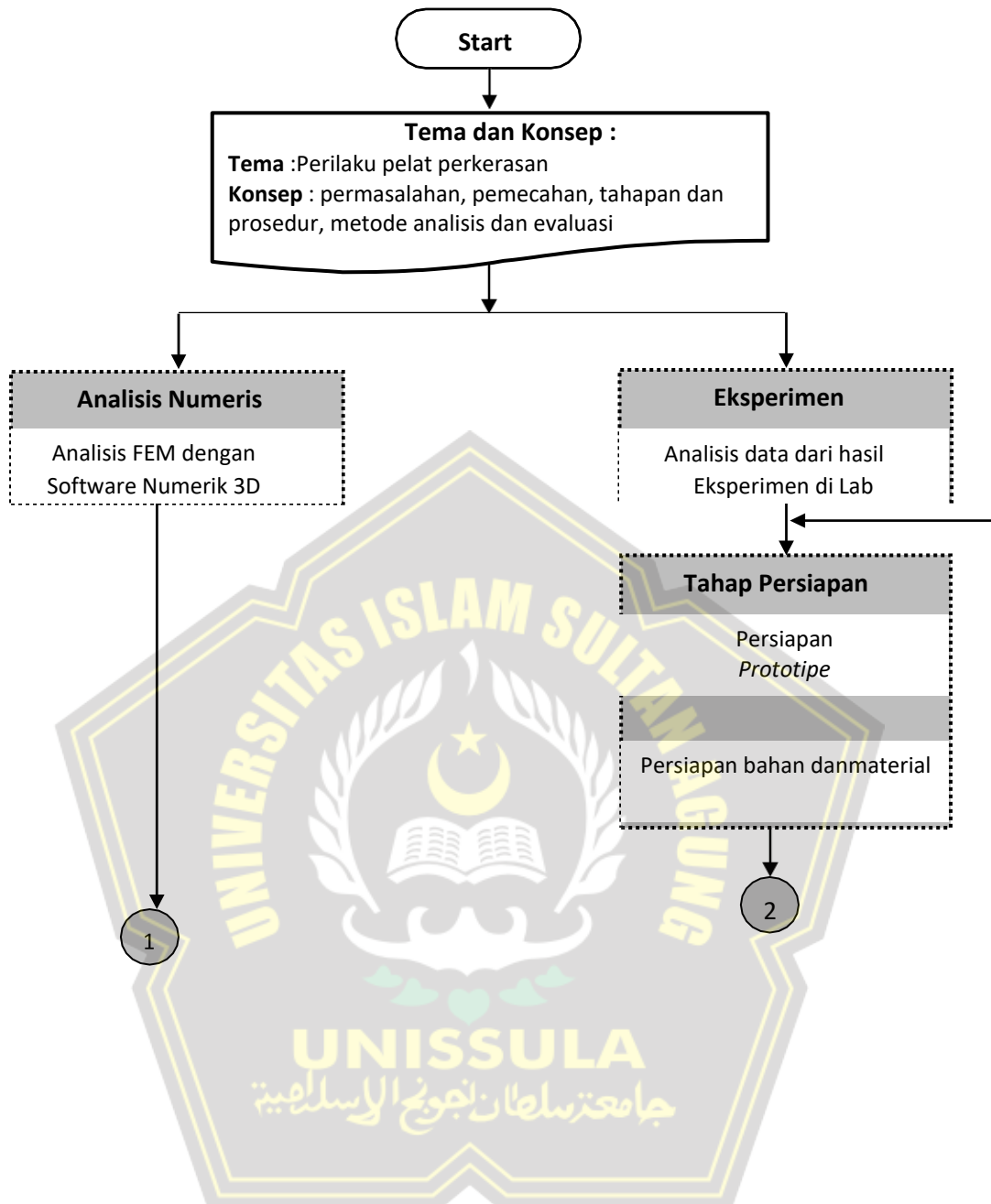
1 Dari penjelasan pada latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, kajian teori dan empiris, maka dibuatlah kerangka berpikir yang merupakan bentuk alur berpikir dari seorang peneliti tentang dasar penelitiannya untuk mendapatkan hasil penelitian sesuai dengan keinginannya agar dapat menjawab atas pertanyaan dalam topik yang akan diteliti. Permasalahan yang paling utama yang menjadi topik dalam penelitian ini adalah seberapa besar pengaruh beban lateral terhadap kestabilan pelat perkerasan, meskipun beban lateral bukan beban terbesar dalam pembebanan pelat perkerasan jalan, tetapi ada pengaruh yang dapat mengubah perilaku pelat ketika beban lateral bekerja pada pelat perkerasan dengan sistem pelat terpaku, hal ini terjadi karena timbulnya *gap* pada tiang sebagai angkur sehingga mempengaruhi friksi tanah pada tiang.

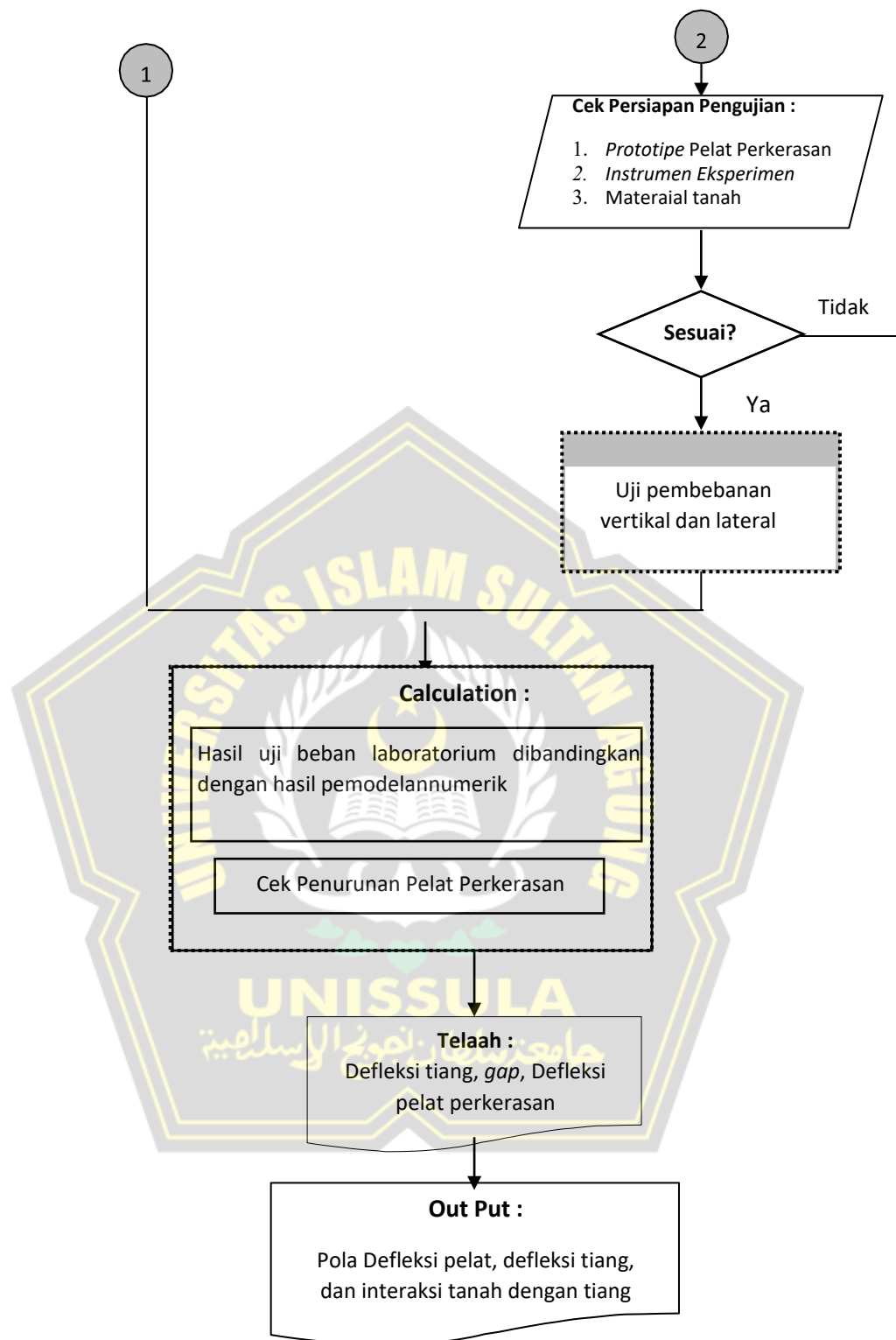
Pelat perkerasan dengan sistem pelat terpaku memiliki tiang atau angkur sebagai penopang utama dari pelat perkerasannya. Kestabilan tiang tersebut sangat dipengaruhi oleh friksi tanah yang ada di sekitar tiang, dan *gap* yang terjadi antara tanah dengan tiang akan mengurangi friksi di sekitar tiang, disamping itu struktur yang paling berdampak akibat pembebanan lateral adalah tiang sehingga rentan dengan deformasi yang akan mempengaruhi struktur pelat karena pelat ditopang oleh tiang.

Langkah-langkah yang akan dilakukan untuk menjawab permasalahan di atas adalah sebagai berikut :

1. Melakukan uji skala kecil di laboratorium dengan *prototipe* yang sama dengan penelitian-penelitian sebelumnya.
2. Melakukan pengujian pembebanan lateral yang dimodelkan dari alat motor penggerak yang sudah dimodifikasi.
3. Melakukan analisis baik dengan metode numerik dengan bantuan *Numerik* maupun analisis dari hasil pengamatan di laboratorium.

1 Dari uraian latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, kajian teori, maka akan dijelaskan dalam bentuk *flowchart* kerangka berpikir seperti dalam Gambar 2.25. di bawah.





Gambar 2.24 Kerangka Berpikir Penelitian

Konsep dari *flowchart* kerangka berpikir di atas menggambarkan urutan pelaksanaan penelitian yang akan dilakukan tentang perilaku pelat perkerasan akibat beban lateral dan beban vertical/aksial eksentris. Penelitian diawali dengan pembahasan latar belakang dan permasalahan yang sering dihadapi di lapangan terutama yang berkaitan dengan perkerasan jalan yang selama ini banyak mengalami kerusakan akibat tanah lunak di bawahnya yang masih mengalami Defleksi. Setelah itu akan dibuat pemecahan masalah bagaimana bentuk perkerasan lain yang dapat digunakan di area tanah lunak. Tahapan penelitian atau prosedur pelaksanaan penelitian akan diawali dengan tahapan persiapan yang didalamnya persiapan material pembentukan *prototipe* seperti : tanah lunak, beton dan tulangan baja, sesuai dengan kebutuhan penelitian. Pada bagian lain, persiapan akan dilakukan pada alat tes yang dapat difungsikan sebagai pembebanan lateral dan perangkat instrumen lainnya.

Pada tahapan eksperimen dilakukan sesuai dengan kebutuhan pembebanan aksial eksentris dan lateral yang sudah dicantumkan pada sebelumnya. Pembebanan aksial eksentris dan lateral yang berbeda-beda akan mendapatkan hasil defleksi yang bervariasi sehingga data-data yang didapatkan menjadi lebih baik. Analisis numeris juga dilakukan sebagai perbandingan dengan data-data dari pengujian di laboratorium, hasil analisis numeris ini nanti akan dilakukan studi komparasi dengan hasil pengujian *prototipe* di laboratorium.

Pada tahapan akhir yaitu kalkulasi data-data yang didapatkan dari hasil tes *prototipe* di laboratorium maupun dari analisis numeris, akan fokus pada perilaku pelat yang diakibatkan perubahan defleksi baik pada tiang maupun pada pelat yang diakibatkan pembebanan aksial eksentris dan lateral, dan besaran defleksi ini akan dikaji pengaruhnya terhadap kerusakan perkerasan kaku di atas tiang-tiang sebagai angkur pelat.

Untuk hasil output akhir dari percobaan ini akan dijabarkan dalam bentuk persamaan dan grafik-grafik pola Defleksi pelat akibat pembebanan aksial eksentris dan lateral, maupun pola perubahan *gap* antara tiang dengan tanah di sekitar tiang yang dapat mempengaruhi perubahan Defleksi pelat, seberapa besar perubahan tersebut, ini akan dikaji pada bagian akhir dari laporan penelitian disertasi ini.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif, dimana sistem pengambilan data dilakukan dari hasil percobaan atau metode eksperimental skala model di laboratorium dengan membuat *prototipe* perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku yang diletakkan di dalam sebuah bak atau kontainer dimana pada bagian depannya transparan yang terbuat dari kaca yang di dalamnya terisi tanah lunak yang sudah dipadatkan sesuai dengan kepadatan di lapangan. Pada tiang dan pelat perkerasan kaku akan dipasang *strain gauge* pada titik-titik tertentu yang akan tersambung dengan komputer agar bisa terekam setiap perubahan defleksi yang terjadi pada tiang maupun defleksi pada pelat perkerasan ketika menerima beban vertical/aksial maupun beban lateral.

Pengujian dilakukan dengan mengaplikasikan pembebanan lateral yang berasal dari motor penggerak dengan percepatan tertentu yang diatur melalui *dial gauge* dan tersambung dengan inverter untuk kemudian terhubung dengan power listrik. Besar pembebanan pada *dial gauge* akan disesuaikan dengan kebutuhan pada penelitian (Gambar 3.1). Disamping itu kamera juga akan dipasang di depan bak uji untuk mengetahui secara detail evolusi pergerakan tiang dan besaran *gap* antara tiang dengan tanah di sekitar tiang yang ditimbulkan akibat pembebanan aksial eksentris dan lateral yang besarnya sesuai dengan kebutuhan.

Di samping pengujian eksperimen skala model di laboratorium, analisis numeris juga dilakukan dengan bantuan software *Finite Element Method* atau metode elemen hingga dengan menggunakan bantuan program *Numerik* untuk mendapatkan nilai pendekatan induktif sebagai acuan didalam melaksanakan pengujian laboratorium, dan data-data hasil penelitian dari kedua metode percobaan baik skala model maupun dari hasil analisis dengan menggunakan *Numerik* tersebut akan dikomparasikan satu sama lain, sehingga akan didapatkan hasil yang lebih akurat tentang Defleksi perkerasan pelat yang diakibatkan oleh beban vertikal/aksial eksentris dan beban lateral.

3.2 Material Tanah dan Bahan Beton

Material merupakan komponen yang sangat penting dalam penelitian, karna hasil yang akan didapat berdasarkan nilai dari parameter material yang di siapkan. Maka dari itu material tanah dan beton sangat penting untuk disiapkan dengan baik.

3.2.1 Tanah

Tanah yang dipakai adalah tanah dengan gradasi sesuai dengan kategori tanah lunak yang diambil dari Daerah Kecamatan Guntur, Demak, Jawa Tengah. Adapun variabel yang menjadi kreteria dalam kategori tanah lunak yang diperoleh setelah pengujian laboratorium diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Uji gradasi butiran
2. Plastisitas
3. Kadar air
4. Tingkat kepadatan.

Pengambilan sampel tanah dilakukan di lapangan dengan cara permukaan tanah digali/dikupas sedalam kurang lebih 50 cm, tanah yang telah digali setebal 50 cm dibuang untuk diambil tanahnya yang akan dpakai untuk penelitian. Dalam klasifikasi *unified* tanah lunak atau tanah berbutir halus diklasifikasikan sebagai tanah dimana lebih dari 50 % butirannya lolos saringan No. 200.

3.2.2 Beton dan baja tulangan

Bahan beton yang digunakan untuk model penelitian tiang dan pelat sesuai dengan mutu bahan yang digunakan sebagai bahan dalam perkerasan beton bertulang yaitu beton dengan mutu K-200 atau $f_c' 16,6$ Mpa sesuai dengan mutu beton pada penelitian. Bahan-bahan material pembentukan beton harus dilakukan pengecekan terlebih dahulu, seperti semen, pasir, split atau batu pecah dan air, yang disesuaikan dengan spesifikasi sebagaimana bahan pembentukan beton untuk K-200. Bahan pasir, split atau batu pecah harus dibersihkan dari debu dan tanah yang menempel. Mutu baja untuk tulangan baik pada pelat maupun pada tiang menggunakan tulangan polos dengan spesifikasi BJTP 24 (240 Mpa) dengan regangan ijin baja polos $\epsilon_{\text{baja polos ijin}} = 0,0012$.

3.3 Metode Pelaksanaan

Metode pelaksanaan dibagi dalam beberapa tahapan, diantaranya adalah sebagai berikut :

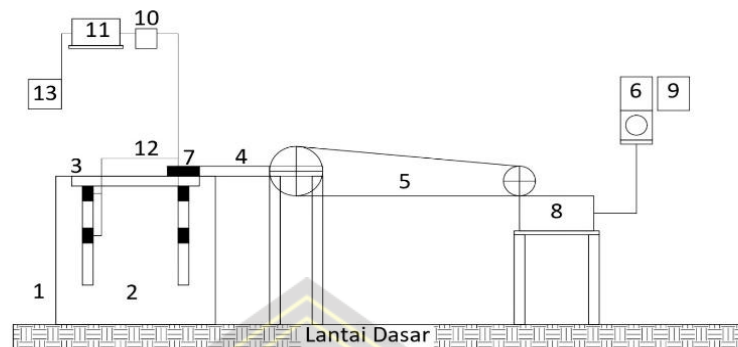
- Pembuatan bak uji berukuran 200 x 200 x 150 cm dengan dinding terbuat dari plat baja tipis pada bagian belakang dan samping, sedangkan bagian alas bak uji juga terbuat dari plat baja tipis, dan pada bagian depan terbuat dari kaca untuk memudahkan monitoring besaran *gap* yang terjadi antara tiang dengan tanah di sekitarnya ketika beban lateral diaplikasikan.
- Pengecoran beton bertulang pada *prototipe* dilakukan, dengan terlebih dahulu memasang *strain gauge* yang dipasang dan diikat pada tulangan *prototipe* baik pada tulangan tiang maupun tulangan pelat perkerasannya.
- Strain gauge* diletakkan pada empat belas titik masing-masing pembesian, tulangan tiang diletakkan pada tulangan bagian atas dan pada bagian tengah tiang angkur, masing-masing di sisi depan dan sisi belakang. Pada bagian pelat diletakkan pada dua bagian tepi pelat di tulangan sisi atas dan sisi bawah, dan bagian tengah pelat perkerasan masing-masing di sisi atas dan sisi bawah tulangan.
- Tanah lunak yang sudah di tes, dimasukkan ke dalam bak uji sampai pada batasan tertentu dan kemudian *prototipe* pelat perkerasan dimasukkan ke dalam bak uji, untuk kemudian dilakukan pengujian.
- Motor penggerak yang sudah terpasang siap diinstall pada pelat untuk selanjutnya dilakukan proses pembebanan sesuai dengan kebutuhan. Beban yang diterapkan seperti pada Tabel 3.1 berikut :

Tabel 3.1 Tipe Beban Aksial dan Lateral yang diterapkan pada uji

Tipe Pembebanan	Besar Beban Aksial (kN)	Besar Beban Lateral (kN)
Aksial	1	1
		2
		4
Aksial	2	1
		2
		4
Aksial	4	1
		2
		4

3.4 Peralatan Penelitian

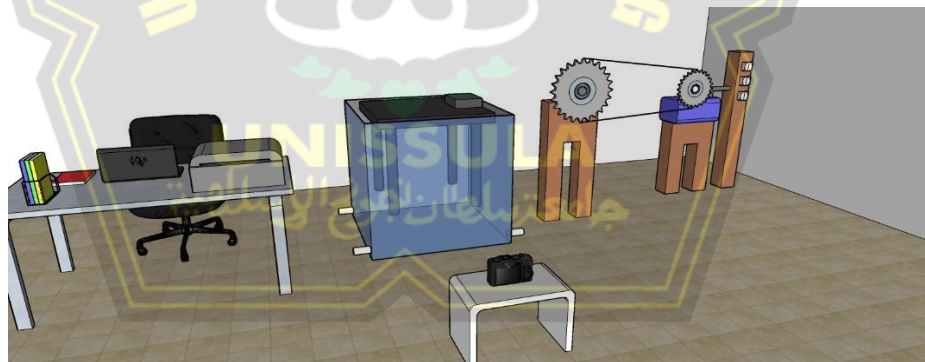
Skematik *prototipe* atau purwarupa pada penelitian disertasi ini dapat dilihat seperti pada Gambar 3.1. dan Gambar 3.2.



Gambar 3. 1 Skematik Prototipe Penelitian

Keterangan :

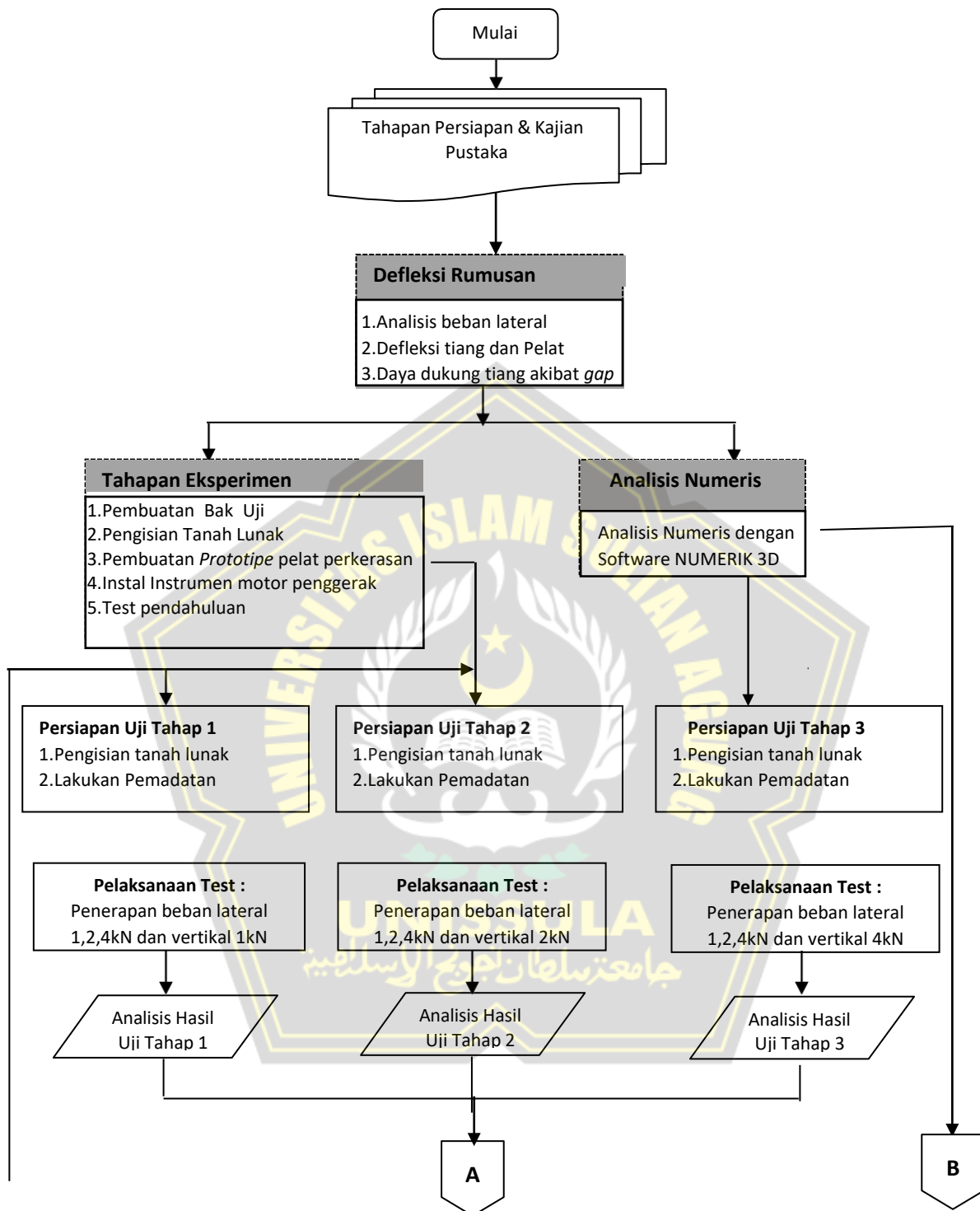
- | | |
|---|----------------------------------|
| 1. Tanah lunak dalam bak uji | 7. Motor Penggerak beban Lateral |
| 2. Perkerasan dengan sistem pelat terpaku | 8. Power Listrik |
| 3. Batang penghubung | 9. Data Logger |
| 4. Puli | 10. Komputer |
| 5. Inverter | 11. Strain Gauge |
| 6. Beban Vertikal | 12. Kamera. |

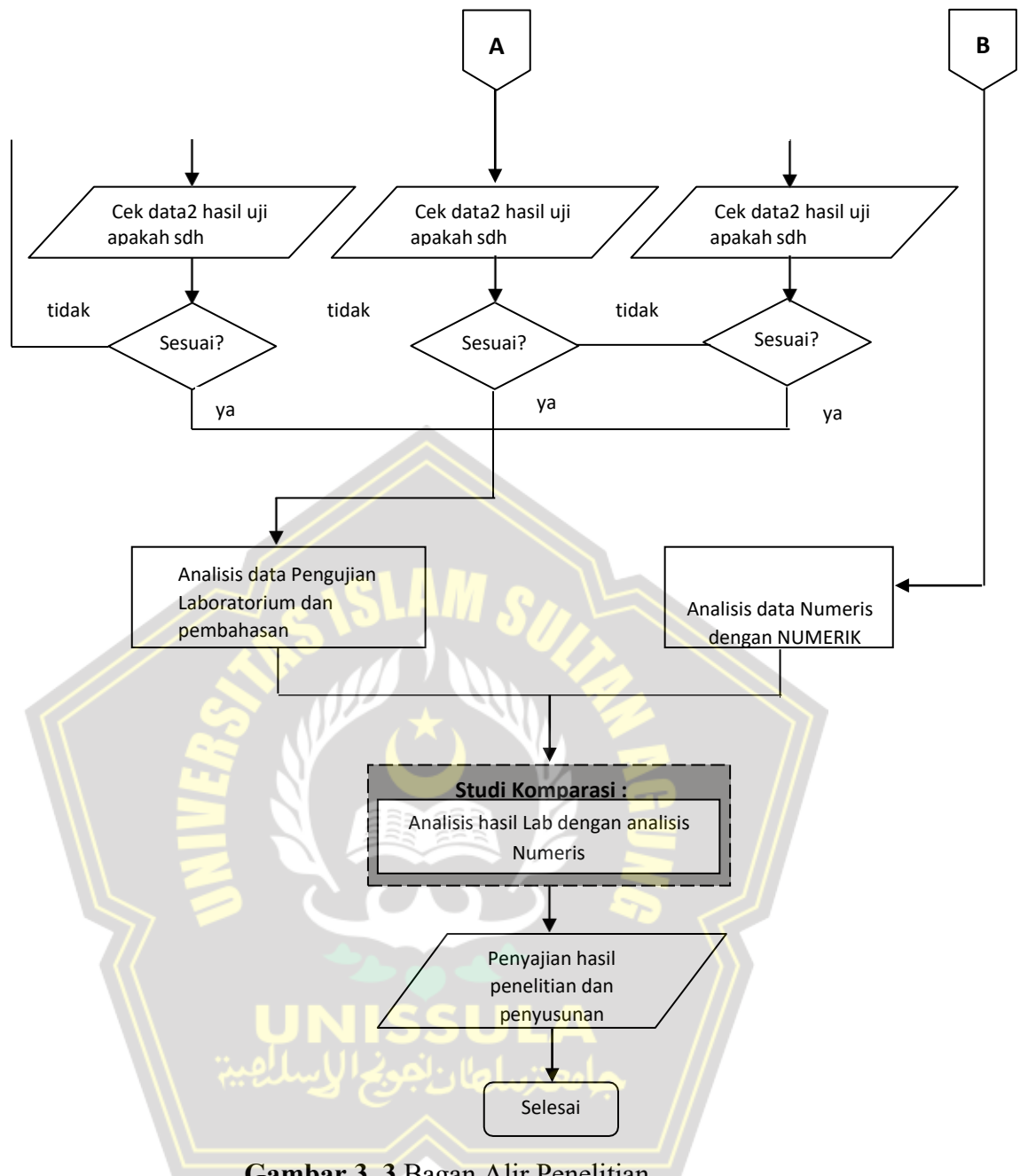


Gambar 3. 2 Skematik alat uji dalam 3D

3.5 Tahapan Penelitian

Adapun tahapan penelitian mulai dari persiapan hingga pada tahapan analisis hasil-hasil penelitian dapat dilihat seperti pada Gambar 3.3. Bagan alir penelitian.





Gambar 3.3 Bagan Alir Penelitian

3.5.1 Tahap Persiapan dan Pembuatan Benda Uji

Pada tahapan persiapan akan lebih banyak pada pengumpulan jurnal-jurnal penelitian yang berhubungan dengan topik penelitian disertasi untuk kemudian mencari *novelty* atau kebaruan dari penelitian disertasi yang akan dilakukan, sehingga penelitian disertasi ini dapat dimanfaatkan oleh masyarakat. Disamping itu, pada tahapan ini juga akan dilakukan persiapan material, baik tanah lunak maupun material pada campuran beton yang akan digunakan dalam membuat

model *prototipe* perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku, dan juga persiapan terhadap alat uji dan instrumen-instrumen lainnya yang akan digunakan dalam tes sehingga tujuan dari penelitian ini akan mengetahui perilaku perkerasan dengan sistem pelat terpaku, dapat diperoleh dengan maksimal.

1 Pada tahapan persiapan material tanah lunak, akan lebih dahulu dilakukan pengetesan di laboratorium untuk menentukan bahwa tanah yang digunakan sesuai dengan sifat-sifat tanah lunak sebagaimana persyaratan yang sudah disampaikan dalam kajian pustaka pada Bab 2. Karakteristik beton sebagai bahan *prototipe* akan disesuaikan dengan mutu beton kelas C atau K-200 dimana kuat tekan beton $f_c' = 16,6 \text{ Mpa}$.

Pembuatan model *prototipe* perkerasan kaku dengan sistem pelat terpaku dibuat dengan ukuran dimensi pelat 120 cm x 120 cm x 10 cm, sedangkan tiang sebagai pengaku berbentuk bulat dengan tinggi tiang 100 cm, diameter tiang 10 cm dan jarak antar tiang 100 cm. Setelah semua bahan-bahan material dan alat instrumen sudah dipersiapkan, maka akan dilakukan penyetelan antara alat instrumen yang terdiri dari motor penggerak dan instrumen lainnya dengan *prototipe* pelat perkerasan kaku. Berikut adalah bagian-bagian alat uji *prototipe*, bak uji dan instrumen-instrumen alat penggerak lainnya yang akan digunakan dalam penelitian.

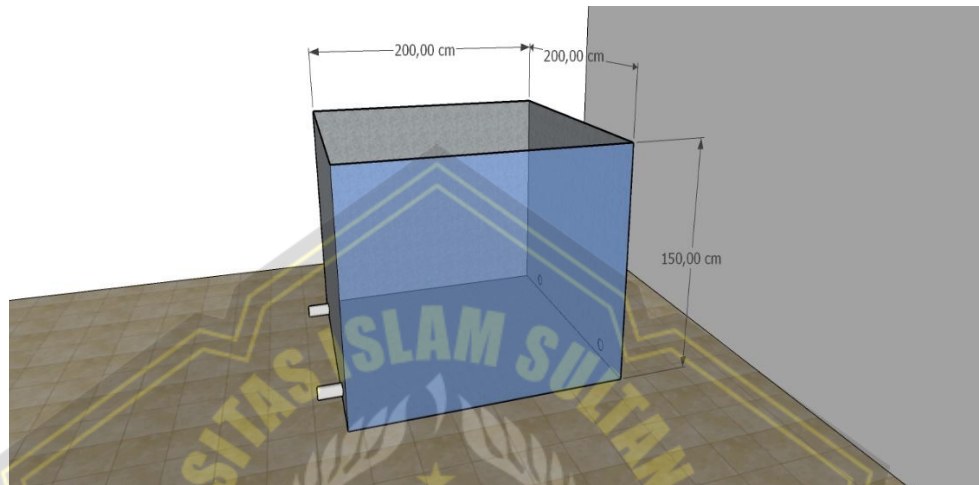
Langkah-langkah pembuatan dan persiapan perakitan *prototipe* pelat perkerasan dan persiapan bahan lainnya yang digunakan dalam pengujian dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Persiapan Bak Uji

Material yang digunakan dalam pembuatan bak uji sebagai wadah tanah lunak dan tempat *prototipe* adalah sebagai berikut :

- Bak uji akan dirangkai dari bahan plat baja tipis, profil baja dan kaca, dengan dimensi bak uji adalah 200 cm x 200 cm x 150 cm.
- Rangka utama bak uji dari profil baja L 40 x 40 mm.
- Dinding bagian bawah terbuat dari plat baja tipis $t = 3 \text{ mm}$.
- Dinding bagian samping dan bagian belakang terbuat dari plat baja tipis.
- Dinding bagian depan terbuat dari kaca $t = 1 \text{ cm}$.

- f. Rangkaian baja dan dinding tersebut akan dihubungkan dengan menggunakan las.
- g. Pada bagian bawah dinding plat baja tipis akan dibuatkan pipa air yang digunakan sebagai saluran air keluar ketika akan dilakukan pemadatan untuk mendapatkan kepadatan sesuai dengan kepadatan tanah lunak di lapangan.



Gambar 3. 4 Bak uji dalam 3D

2. Persiapan Tanah

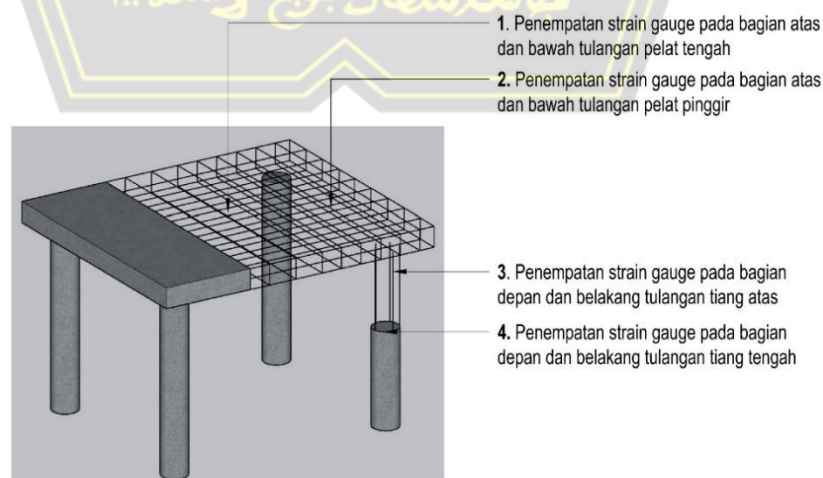
- a) Pengambilan dan persiapan tanah lunak yang dibutuhkan dalam pengujian, yang sesuai dengan kriteria sebagaimana sifat dan karakteristik tanah lunak. Tanah lunak yang digunakan adalah tanah lunak terganggu dengan karakteristik yang masuk dalam kategori sebagaimana klasifikasi tanah lunak. Penggunaan tanah lunak terganggu ini dimaksudkan untuk memastikan bahwa tanah yang digunakan dalam setiap pengujian dengan pembebanan vertikal/aksial eksentris dan lateral yang berbeda-beda adalah mempunyai sifat-sifat yang sama, seperti komposisi gradasi butiran, kadar air tanah, dan kepadatan yang sama dalam setiap pengujian.
- b) Tanah *sample* yang akan digunakan diambil dari lokasi di Daerah Guntur, Demak, Jawa Tengah, Tanah di gali/kupas kedalaman 50 cm dengan menggunakan alat cangkul dan alat gali lainnya dengan terlebih dahulu membersihkan sampah dan kadar organik yang tercampur dengan tanah tersebut. Lalu tanah tersebut di masukkan ke dalam karung-karung untuk selanjutnya dibawa ke laboratorium untuk dilakukan tes gradasi guna

mengetahui komposisi ukuran butiran apakah sudah sesuai dengan klasifikasi tanah lunak.

- c) Setelah tanah lunak terganggu tersebut yang sudah sesuai dengan klasifikasi tanah lunak, maka tanah lunak tersebut akan dimasukkan ke dalam bak uji dan diisi sampai penuh, kemudian dilakukan proses pemadatan untuk mendapatkan kepadatan yang sama dengan kepadatan sebagaimana kepadatan tanah lunak di lapangan. Pada saat proses pemadatan, air yang keluar dari pori-pori tanah akan dialirkan dengan keran diameter 1 *inch* yang diletakkan pada bagian bawah dinding bak uji (Gambar 3.4). Keran dalam keadaan terbuka meskipun proses pemadatan tanah sudah sesuai kepadatan lapangan.
 - d) Untuk memastikan kepadatan tanah dalam bak uji sesuai dengan kepadatan di lapangan, maka akan dilakukan tes dengan alat *hand penetrometer* untuk mengetahui tingkat kepadatan tanah hingga pada lapisan bawah tanah dalam bak uji, dengan menghasilkan nilai perlawanan cone dalam satuan kg/cm^2 .
 - e) Untuk mengetahui kadar air tanah dalam bak uji yang sudah terdrainase, maka akan dilakukan tes kadar air di laboratorium sesuai dengan aturan dalam SNI 1965 – 2008.
 - f) Tanah dalam bak uji yang sudah padat sesuai kepadatan di lapangan akan di *cutting*, agar elevasinya sama dengan top bak uji, sebelum *prototipe* pelat perkerasan diletakkan di atasnya.
3. Persiapan *Prototipe* Pelat Perkerasan
- a. Skematik *prototipe* benda uji yang terdiri dari beton bertulang dengan dimensi pelat 120 cm x 120 cm x 10 cm, dan tiang sebagai angkur dengan kedalaman 100 cm dan diameter 10 cm, gambar detail seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.
 - b. Sebelum pengecoran *prototipe* dilakukan, terlebih dahulu dibuatkan *moulding* atau bekesting dari multiplek $t = 2$ cm yang dibentuk sesuai dengan *prototipe*, untuk bekesting tiang akan dibuat melingkar dengan diameter 10 cm.
 - c. Persiapan tulangan baja diameter 8 mm dengan terlebih dahulu menempelkan *strain gauge* dalam tulangan sesuai dengan metode

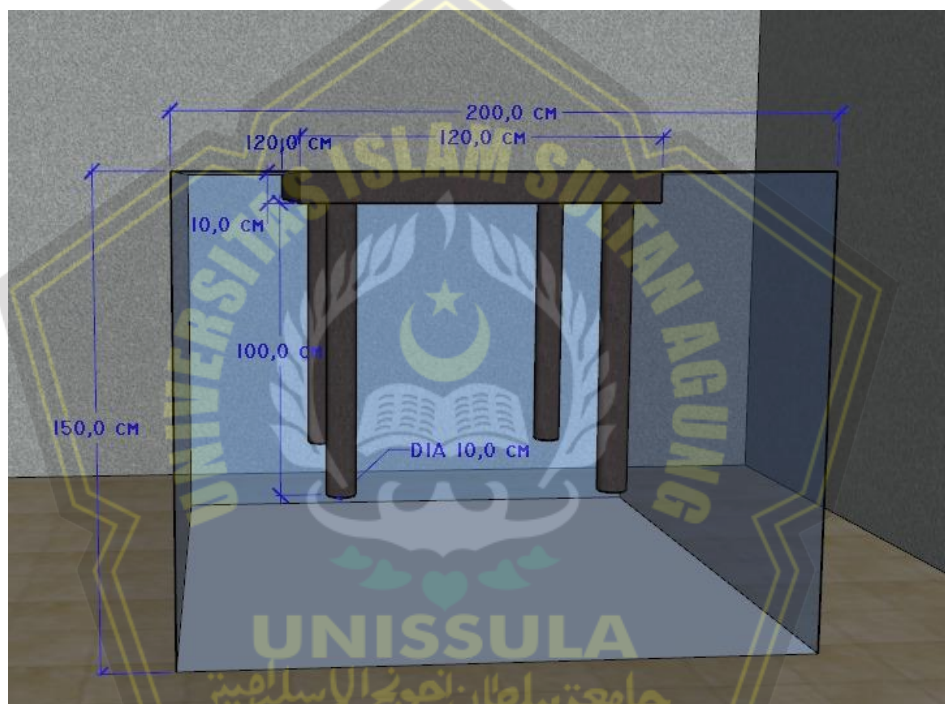
pemasangan *strain gauge* pada sub di bawah. Rangkaian pembesian pelat perkerasan pelat terpaku dan jarak-jaraknya disesuaikan dengan Gambar 3.5.

- d. *Strain gauge* merupakan alat yang digunakan untuk memonitor besar defleksi pelat maupun defleksi tiang, sehingga *strain gauge* akan diletakkan pada tulangan bagian bawah maupun tulangan bagian atas dari pelat perkerasan. Untuk tiang akan diletakkan pada tulangan bagian depan dan tulangan bagian belakang tiang, tujuan penempatan *strain gauge* pada bagian depan dan belakang untuk dapat mengetahui secara detail besar defleksi pada bagian tekan maupun pada bagian tarik tiang dan pelat perkerasan. Penempatan *strain gauge* pada tulangan ditunjukkan seperti pada Gambar 3.5.
- e. Setelah semua *strain gauge* pada pembesian telah terpasang dengan sempurna, kemudian dilakukan pengecoran manual dengan menggunakan alat seperti cethok, cangkul, dan lain-lain. Hasil cor tersebut dipadatkan dengan cara menekan beton secara manual dan berulang-ulang, baik pada pelat maupun tiang, hal ini dilakukan untuk menghindari adanya rongga dalam beton, sehingga dipastikan bahwa beton sudah padat.
- f. Setelah beton selesai di cor maka akan dibiarkan selama 28 hari untuk mendapatkan kuat tekan beton 100 % sebelum dilakukan pembebanan, sesuai dengan persyaratan dalam Peraturan Beton Bertulang Indonesia (PBI) 1971, Departemen PU dan Tenaga Listrik.



Gambar 3. 5 Perletakan strain gauge pada tulangan dalam 3D

4. Instal *prototipe* ke dalam bak uji
 - a. Sebelum *prototipe* dimasukkan ke dalam bak uji, terlebih dahulu melakukan pemboran pada tanah di dalam bak uji dengan menggunakan *bore* modifikasi diameter 9 cm (atau diameternya harus lebih kecil dari diameter tiang supaya tidak terjadi *gap*).
 - b. Perlu dipastikan bahwa kabel-kabel *strain gauge* yang tertanam dalam beton pelat maupun beton tiang harus sudah tersambung pada data *logger*, dan perlu dibuatkan pipa pengaman pada kabel *strain gauge* agar tidak mengalami kerusakan pada saat pengecoran dilakukan.



Gambar 3. 6 Prototipe pelat perkerasan dalam bak uji

5. Alat-alat Instrumen

a. *Strain gauge*

Strain gauge digunakan untuk mengetahui pergerakan pelat maupun tiang yang dipantau dari pergerakan tulangan yang tertanam dalam beton perkerasan maupun beton tiang, yang dihubungkan dengan kawat / kabel jenis 3WP011 dengan data *logger*. Pemasangan instrument *strain gauge* ini harus dilakukan dengan sangat hati-hati, karena bentuknya yang sangat mini, dimana ukurannya adalah FLA-5-11 : 10 mm x 3 mm. Instrumen ini akan ditempatkan pada tulangan pelat pada bagian bawah dan bagian atas,

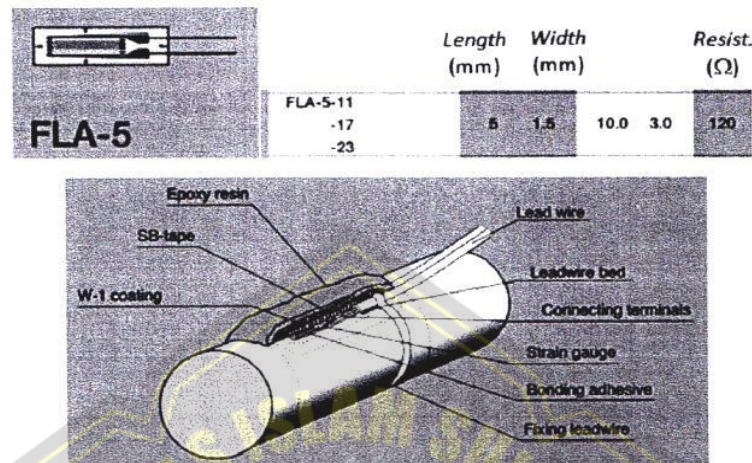
dan tulangan tiang yang diletakkan pada bagian belakang dan bagian depan. Pemasangan *strain gauge* pada tulangan dilakukan dengan lebih dulu membuat permukaan tulangan menjadi rata dengan alat gerinda agar *strain gauge* tidak dapat bergerak.

Metode pemasangan *strain gauge* yang ditempelkan terhadap tulangan menurut Helmy Darjanto, 2015 (dalam Adolf 2019) adalah sebagai berikut :

- Pemasangan dilakukan pada beberapa titik
 - a. Tulangan Pelat Tengah pada bagian Atas (TPT – A) dan bagian Bawah (TPT – B)
 - b. Tulangan Pelat Pinggir pada bagian Atas (TPP – A) dan bagian Bawah (TPP – B)
 - c. Tulangan Angkur Tengah pada bagian Depan (TAT – D) dan bagian Belakang (TAT – B)
 - d. Tulangan Angkur Atas pada bagian Depan (TAA – D) dan bagian Belakang (TAA – B).
- Antara *strain gauge* FLA–5-11 dengan terminal penghubung dan kabel 3WP011 akan disolder terlebih dahulu, kemudian kabel tersebut dihubungkan ke data *logger*, panjang kabel akan disesuaikan dengan penempatan data *logger* di laboratorium.
- Permukaan tulangan yang akan dipasang *strain gauge* dibersihkan dan diratakan terlebih dahulu dengan alat gerinda sesuai dengan lebar dan panjang *strain gauge*.
- Permukaan tulangan yang sudah rata akan diberi cairan *adhesive* jenis CN kemudian *strain gauge* akan diletakkan di atas permukaan cairan tersebut.
- Pada permukaan *strain gauge* yang terpasang diberi material coating jenis W1, setelah itu dilakukan pembebatan dengan isolasi untuk listrik tegangan tinggi.
- Setelah semua sudah terpasang, lalu dibungkus dengan perban hingga tebal 5-7 mm dan dituangkan cairan *acrylic* (resin dicampur dengan

hardener), serta didiamkan sekitar 1 jam kemudian dibebat kembali dengan isolasi listrik yang umum digunakan sehari-hari.

- Kabel yang terdapat dalam beton sebaiknya dilindungi dengan selang untuk mencegah kerusakan kabel pada saat dilakukan pengecoran.



Gambar 3. 7 Strain gauge tipe FLA-5-11

b. Data Logger (Perekam Data)

Data logger adalah sebuah alat elektronik yang berfungsi mencatat data-data dari waktu ke waktu secara *continue* dari suatu percobaan. Data logger yang sudah dihubungkan dengan *strain gauge* akan langsung terhubung dengan perangkat komputer sehingga data-data pergerakan tiang maupun pelat akan terekam secara terus menerus ke dalam komputer.



Gambar 3. 8 Data logger

c. Motor penggerak

Motor penggerak sebagai sebuah instrumen yang digunakan untuk menggerakkan *prototipe* pelat perkerasan sebagai bentuk pembebanan lateral, yang sudah terhubung dengan power listrik. Mesin motor penggerak

akan dihubungkan dengan puli yang dapat menimbulkan gerakan dengan pembebanan tertentu. Dalam pembebanan akan ditambahkan *pressure gauge* yang difungsikan untuk mengetahui besar pembebanan yang diaplikasikan terhadap *prototype* pelat perkerasan.

Motor penggerak ini akan dimodifikasi dan dihubungkan dengan beberapa alat bantu seperti puli dan pelat penyambung gerakan dengan *prototype* pelat perkerasan.



Gambar 3. 9 Instrumen Motor penggerak

5 d. Inverter

Inverter merupakan suatu rangkaian yang digunakan untuk mengubah sumber tegangan DC (searah) tetap menjadi sumber tegangan AC (bolak balik) , dengan frekuensi tertentu, dimana amplitudo dan frekuensi dapat diatur. Inverter ini akan digunakan sebagai sumber arus untuk menggerakkan motor penggerak yang dapat menghasilkan gerakan lateral pada *prototype*.



Gambar 3. 10 Inverter

e. Kamera

Kamera digunakan untuk merekam setiap perubahan *gap* yang terjadi antara tanah dengan tiang akibat beban lateral. Perubahan pergerakan tanah ini akan terekam secara *continue* pada setiap perubahan pembebanan lateral.

Kamera pemantau ini akan diletakkan pada bagian depan bak uji yang tertutup dengan kaca.



Gambar 3. 11 Kamera

f. Komputer

Komputer digunakan sebagai tempat perekaman data-data yang didapatkan dari hasil pengujian *prototipe*, melalui data *logger* yang sudah terekam terlebih dahulu. Pengolahan data akan dilakukan setelah semua data defleksi sudah terekam dalam komputer.

3.5.2 Pelaksanaan Pengujian di laboratorium

Pengujian dalam penelitian disertasi ini akan dilakukan dalam beberapa bagian tahapan pengujian, yaitu :

1) Tahapan Pengujian Material

a. Pengetesan tanah lunak, yang digunakan untuk mendapatkan sifat dan karakteristik tanah sesuai dengan karakteristik sebagaimana tanah lunak, tanah lunak yang digunakan diambil dari sekitar kota Semarang. Pengetesan tanah lunak meliputi :

- Pengujian laboratorium untuk *disturbed Sampling* dengan standar ASTM D-1587.
- Pengujian analisa saringan sesuai dengan standar SNI 3423-2008.



Gambar 3. 12 Alat Uji Gradasi

- Pengujian *atterberg limit* sesuai dengan SNI 1967-2008, untuk mengetahui tingkat plastisitas tanah lunak setelah dilakukan pencampuran.



Gambar 3. 13 Alat Uji Atterberg Limit

- Pemeriksaan kadar air tanah lunak dilakukan sesuai dengan standar SNI 1965-2008
 - Pemeriksaan berat jenis tanah dilakukan dengan standar SNI 1964-2008. Pemeriksaan ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kepadatan tanah yang digunakan.
- b. Beton kelas C atau K-200 dengan komposisi yang terdiri agregat kasar, agregat halus, semen dan air. Untuk mendapatkan komposisi yang sesuai dengan mutu beton K-200 maka lebih dulu akan dilakukan *trial sample* dalam bentuk silinder dan dilakukan uji tekan. Jika dari hasil uji tekan sudah sesuai dengan mutu beton K-200 atau setara dengan $f_c' = 16,6 \text{ Mpa}$, maka

komposisi tersebut akan dijadikan acuan dalam pembuatan beton *prototipe* pelat terpaku.



Gambar 3. 14 Alat Uji Kuat Tekan Beton

2. Tahapan pengujian model *prototipe*

a. Pengujian dengan beban vertikal/aksial eksentris 1 *kN*

Prototipe sudah terinstal dalam bak uji yang sudah diisi dengan tanah lunak sesuai kebutuhan. Pada tahapan pengujian ini motor penggerak akan di seting sesuai dengan beban lateral sebesar 1 *kN*, 2 *kN* dan 4 *kN* dengan beban vertikal/aksial eksentris 1 *kN*. Dari hasil pengujian pada pembebanan pertama tersebut data-data akan terekam langsung kedalam data *logger* yang terhubung dengan komputer. Besar *gap* yang terjadi akan direkam dan diukur di dalam kamera yang terdapat pada bagian depan bak uji dan langsung tersambung kedalam komputer. Setelah pengujian tahap pertama selesai dilakukan, kemudian dipersiapkan pada pengujian pembebanan tahap kedua dengan beban vertikal/aksial eksentris sebesar 2 *kN*.

b. Pengujian dengan beban vertikal/aksial eksentris 2 *kN*

Pada tahapan pengujian ini dengan motor penggerak yang sudah disesuaikan dengan pembebanan lateral sebesar 1 *kN*, 2 *kN* dan 4 *kN* dengan beban vertikal/aksial eksentris 2 *kN*, sama dengan pengujian pembebanan pertama, data-data defleksi akan langsung terekam dalam komputer melalui data *logger*.

c. Pengujian dengan beban vertikal/aksial eksentris 4 *kN*

Tahap pengujian pada pembebanan yang ketiga sama dengan pada tahap pembebanan sebelumnya, dimana *prototipe* akan tersambung dengan motor

penggerak yang sudah di *setting* sesuai dengan beban lateral sebesar 1 kN, 2 kN dan 4 kN dengan beban vertikal/aksial eksentris 4 kN. Pengujian pada pembebanan ketiga ini adalah pembebanan terakhir dari semua tahapan pengujian pada penelitian disertasi ini.

3.5.3 Tahap Pengumpulan Data

Dari hasil pengujian *prototipe* pelat perkerasan skala model di laboratorium, akan dikumpulkan data-data seperti besaran defleksi tiang dan defleksi pelat pada besaran beban vertikal/aksial eksentris dan lateral yang berbeda-beda yang sudah tersimpan dalam komputer. Kemudian akan diukur besaran keruntuhan tanah atau *gap* yang terjadi pada tanah di sekitar tiang akibat pembebanan lateral, dengan beban lateral yang berbeda-beda, pengukuran *gap* ini akan dilakukan dengan cara manual. Disamping itu, perekaman dengan kamera akan dilakukan pada bagian depan bak uji untuk mendapatkan data *gap* yang lebih akurat.

Pengumpulan data dari hasil perhitungan numeris dengan *Finite Element Method* dengan bantuan program *Numerik* dilakukan untuk mengetahui besaran defleksi pada pembebanan vertikal/aksial eksentris dan lateral yang berbeda-beda, yang akan dikomparasikan dengan data-data dari hasil pengujian pada model dalam laboratorium.

3.5.4 Tahap Analisis Data

Setelah data primer dari hasil pengujian di laboratorium diperoleh, dan data dari analisis numeris elemen hingga dengan menggunakan program *Numerik 3D*, maka akan disajikan dalam bentuk grafik maupun tabel berdasarkan pembebanan lateral dan pengaruhnya terhadap lendutan pelat perkerasan. Data-data yang akan dianalisis adalah sebagai berikut :

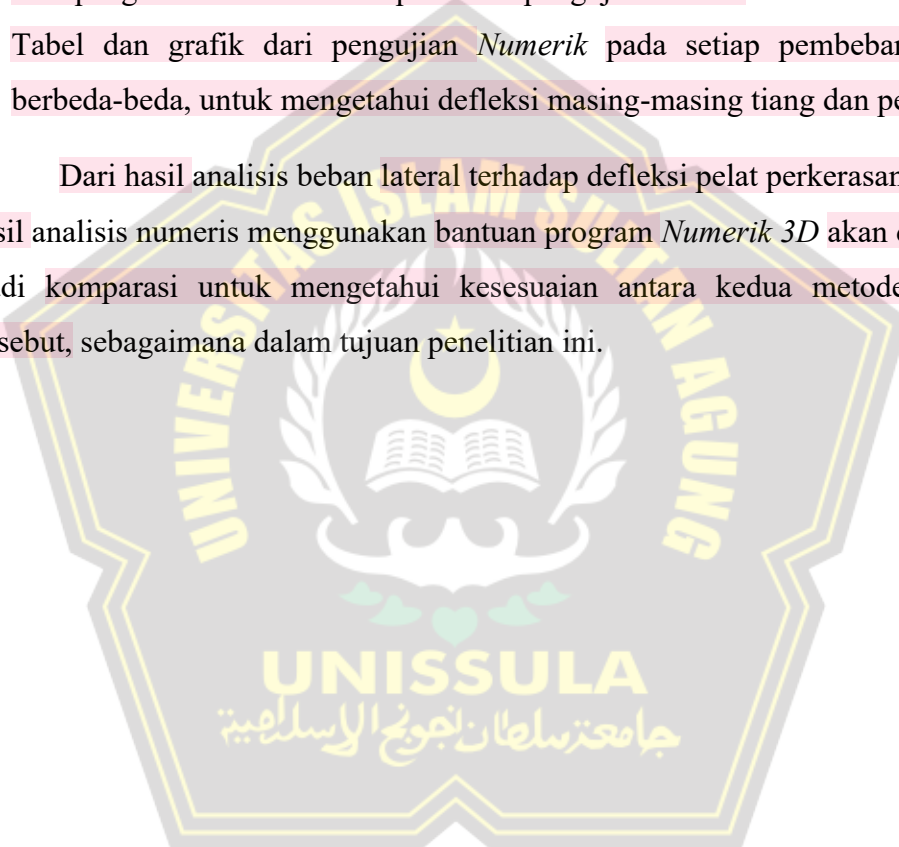
1. Membandingkan setiap besar pembebanan terhadap defleksi pelat perkerasan yang ditimbulkan baik pada tiang maupun pada pelat.
2. Membandingkan pengaruh defleksi pada tiang terhadap defleksi pelat akibat beban.
3. Hubungan antara *gap* yang terjadi pada tanah di sekitar tiang dengan defleksi pada tiang maupun pelat.
4. Akan melakukan studi komparasi dari hasil pengujian *Numerik* dengan pengujian *prototipe* di laboratorium dan seberapa besar kesesuaiannya.

3.5.5 Penyajian Hasil Penelitian dan Studi Komparasi

Pada tahapan ini akan disajikan hasil-hasil penelitian dari laboratorium maupun dari *Numerik*, semua hasil penelitian akan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik, diantaranya :

1. Tabel dan grafik hubungan antara besar pembebanan dengan besar defleksi tiang maupun pelat, pada beban aksial eksentris yang berbeda dari pengujian model di laboratorium.
2. Tabel dan grafik hubungan *gap* antara tanah di sekitar tiang yang dapat mempengaruhi besar defleksi pelat dari pengujian model di laboratorium.
3. Tabel dan grafik dari pengujian *Numerik* pada setiap pembebanan yang berbeda-beda, untuk mengetahui defleksi masing-masing tiang dan pelat.

Dari hasil analisis beban lateral terhadap defleksi pelat perkerasan dan juga hasil analisis numeris menggunakan bantuan program *Numerik 3D* akan dilakukan studi komparasi untuk mengetahui kesesuaian antara kedua metode analisis tersebut, sebagaimana dalam tujuan penelitian ini.



BAB IV ANALISIS DATA DAN HASIL ANALISIS

4.1 Sifat-sifat Material

Material memiliki berbagai macam sifat yang variatif berdasarkan jenis tanah tersebut. Berikut sifat sifat material tanah berdasarkan jenis tanahnya:

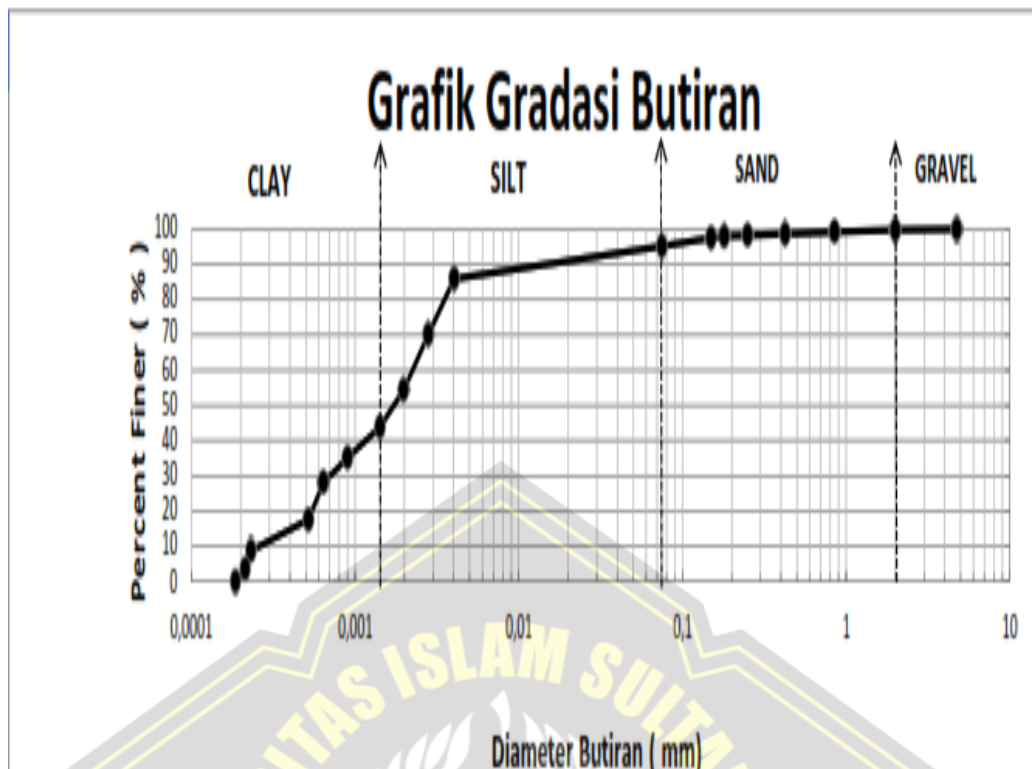
4.1.1 Tanah lunak

Dalam penelitian ini menggunakan tanah lunak yang diambil dari Daerah Kecamatan Guntur, Demak, Jawa Tengah dengan sifat-sifat seperti diberikan pada Tabel 4.1. Tanah ini kategori lunak dimana kuat geser sebesar 21,43 kPa, serta kadar air tanah sebesar 33,088 %.

Tabel 4. 1 Sifat-sifat Tanah Lunak Demak

No	Sifat-sifat	Satuan	Besaran
1	Berat Spesifik, Gs	-	2,489
2	Batas-batas konsistensi		
	- Batas cair, LL	%	54,55
	- Batas plastis, PL	%	21,24
	- Batas susut, SL	%	13,62
	- Indeks plastisitas, PI	%	33,31
3	Kadar air, w	%	33,088
4	Kadar butir halus	%	93,16
5	Kandungan pasir	%	6,84
6	Berat volume basah	kN/m ³	17,70
7	Berat volume kering	kN/m ³	13,30
8	Klasifikasi tanah		
	- AASHTO	-	A-7-5
	- USCS	-	CH

Distribusi ukuran butiran tanah disajikan dalam Gambar 4.1. Terlihat bahwa gradasi didominasi oleh butir halus yang mencapai 93,16% dan sisanya berupa pasir halus. Tanah yang dipakai dalam pengujian model ini adalah baik tanah yang lolos saringan nomor 200 maupun yang tidak lolos saringan nomor 200.



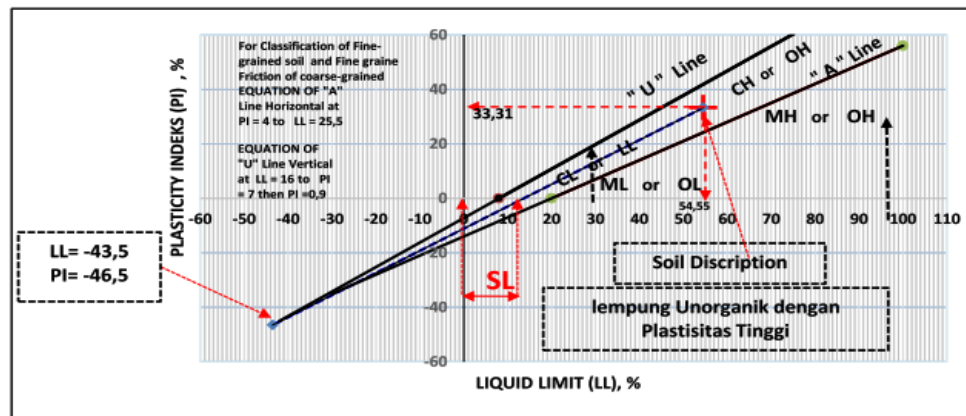
Gambar 4. 1 Distribusi Ukuran Butiran Tanah

Menurut klasifikasi USCS, tanah lunak ini termasuk klasifikasi CH (lempung plastisitas tinggi), atau setara dengan klasifikasi A-7-5 menurut AASHTO, dimana PI sebesar 33,31% (Gambar 4.2).



Gambar 4. 2 Batas-batas Atterberg Tanah Guntur.

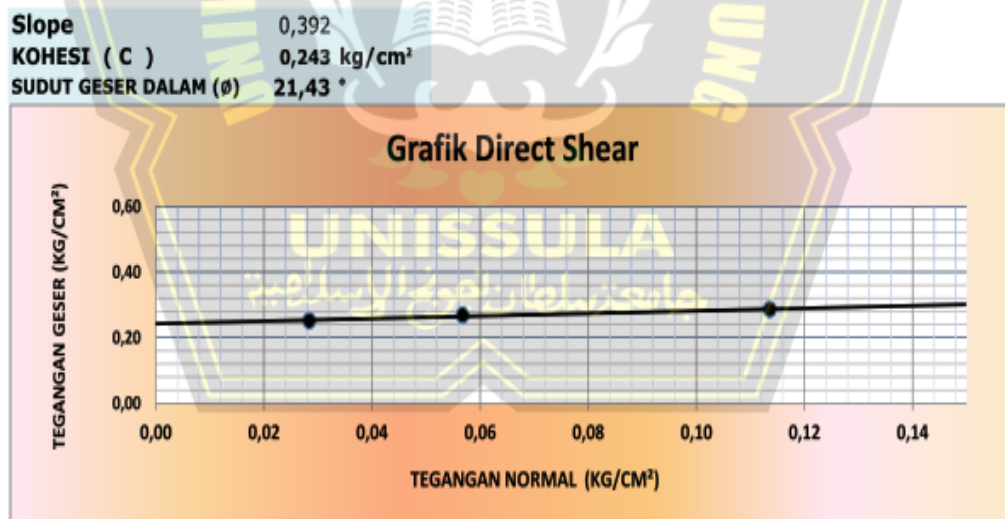
Bila ditinjau terhadap nilai batas susut $SL = 13,62\%$ ($> 10\%$), maka mengacu pada Almeyer, 1955 (Dalam Puri, 2015), tanah ini tidak berada pada potensi ekspansi (*potential of expansion*) yang kritis.



CH			
LL	PL	PI	SL
54,55	21,24	33,31	13,62

Gambar 4.3 Sub kelompok A-7 dari Batas-batas Atterberg.

Dapat disimpulkan bahwa tanah lunak Guntur ini termasuk tanah dengan tingkat potensi pengembangan yang tinggi namun potensi ekspansi tidak kritis. Hasil uji tanah di laboratorium dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.4 Grafik Uji Geser Langsung (Direct Shesr Test).

Dari hasil uji geser langsung (*Direct shear test*) di laboratorium, tanah lunak dari Daerah Guntur Demak mempunyai nilai kohesi (*cohesion*) sebesar 24,3 kN/m² dan nilai sudut gesek dalam tanah (ϕ) 21,43° (lihat Gambar 4.4). Nilai kohesi itu

diharapkan dapat memberikan lekatan antara tanah dan sepanjang keliling tiang dalam menahan beban aksial eksentris dan beban lateral.

Untuk mencegah pengaruh kembang susut tanah, maka kadar airnya dipertahankan pada kondisi konstan selama pengujian. Hal ini sudah dilaksanakan selama dalam pengujian di laboratorium, agar kondisi tanah sesuai dengan keadaan di lapangan.

4.1.2 Pelat dan tiang uji

Pelat dan tiang uji adalah pasta semen bertulang dengan menggunakan material pasir dan split yang berasal dari Muntilan serta semen jenis Portland Cement (PC). Pelat menggunakan tulangan baja polos dengan diameter 8 mm dan lebar jejaring 120 cm x 120 cm dengan tebal 10 cm (Gambar 4.5). Rangkaian jejaring dikaitkan dengan menggunakan kawat bendrat supaya tidak lepas dan kencang saat pengecoran pelat perkerasan berlangsung.



Gambar 4.5 Tulangan Pelat Perkerasan

Adapun tulangan pada tiang model menggunakan tulangan baja polos dengan diameter 8 mm sebanyak 3 batang (lihat Gambar 4.6). Pada penulangan tiang model juga dipasang tulangan sengkang dengan jarak 15 cm, agar tulangan sengkang tidak bergeser diikat dengan kawat bendrat.



Gambar 4. 6 Tulangan Tiang

Pada Gambar 4.7 diperlihatkan pemasangan *strain gauge* pada pelat perkerasan. Total ada 14 titik *strain gauge* yang dipasang, 6 *strain gauge* pada pelat perkerasan dan 8 titik *strain gauge* ada di kedua tiang, dimana masing-masing tiang ada 4 titik *strain gauge*. Sedangkan untuk proses pengecoran perkerasan dan tiang dapat dilihat pada Gambar 4.8. Dalam pelaksanaan pengecoran perlu kehati-hatian, dimulai dari penuangan adonan mortar di tiang, ada empat tiang dalam model ini.



Gambar 4. 7 Pemasangan Strain gauge Pelat Perkerasan

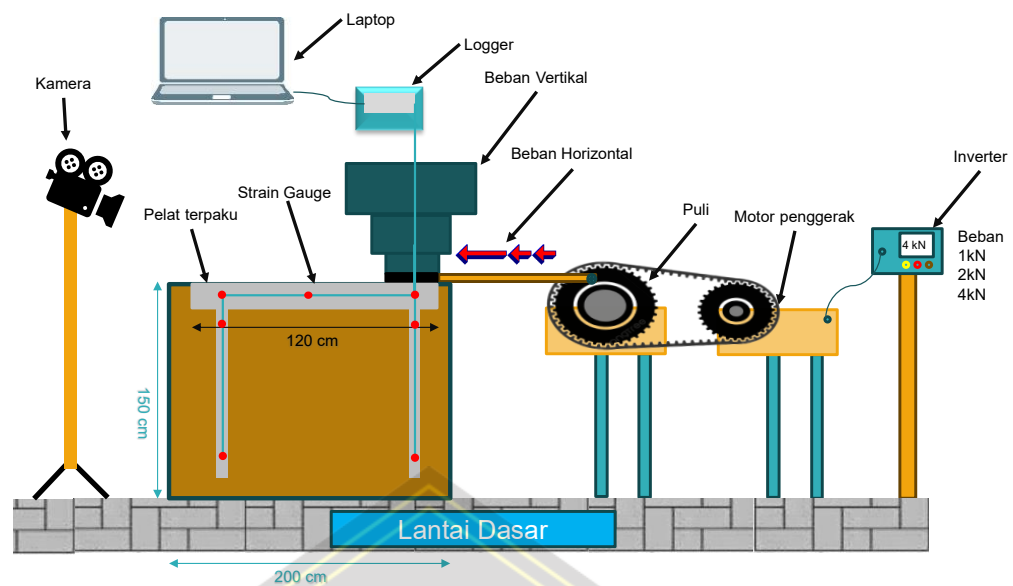
Dua tiang terpasang *strain gauge*, dari kedua tiang yang terpasang *strain gauge*, tiap tiang model ada 4 titik *strain gauge* yang terhubung dengan kabel. Kabel-kabel ini akan menyatu dengan adonan mortar sehingga diperlukan cara yang baik agar kabel tetap terjaga selama pelaksanaan pengecoran. Begitu juga saat penuangan adonan mortar pada pelat, ada 6 titik *strain gauge* yang terpasang, yang semua *strain gauge* terhubung kabel, sehingga pengecoran harus hati-hati.



Gambar 4. 8 Proses Pengecoran Pelat dan Tiang

4.2 Uji Pembebanan Monotonik

Lokasi titik pembebanan pada penelitian ini berada di tepi pelat. Hasil-hasil uji pembebanan tersebut diuraikan pada bagian berikut. Tipe pembebanan adalah beban monotonik. Beban kerja pada permukaan pelat perkerasan berupa beban merata melalui balok beban yang berukuran 20 cm x 20 cm, yakni setara dengan luasan bidang kontak roda ganda kendaraan. Beban diberikan bertahap dengan peningkatan beban dua kali dari beban sebelumnya. Untuk titik beban, intensitas beban dinaikkan secara bertahap mulai dari $P = 0$, berturut-turut menjadi $P = 1$ kN, 2 kN dan 4 kN (10 % dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya sebesar 40 kN). Secara umum pembebanan tidak mencapai kondisi runtuh, bahkan belum mencapai awal zona plastis. Semua lendutan di semua titik yang diamati akan terbaca data *strain gauge*.



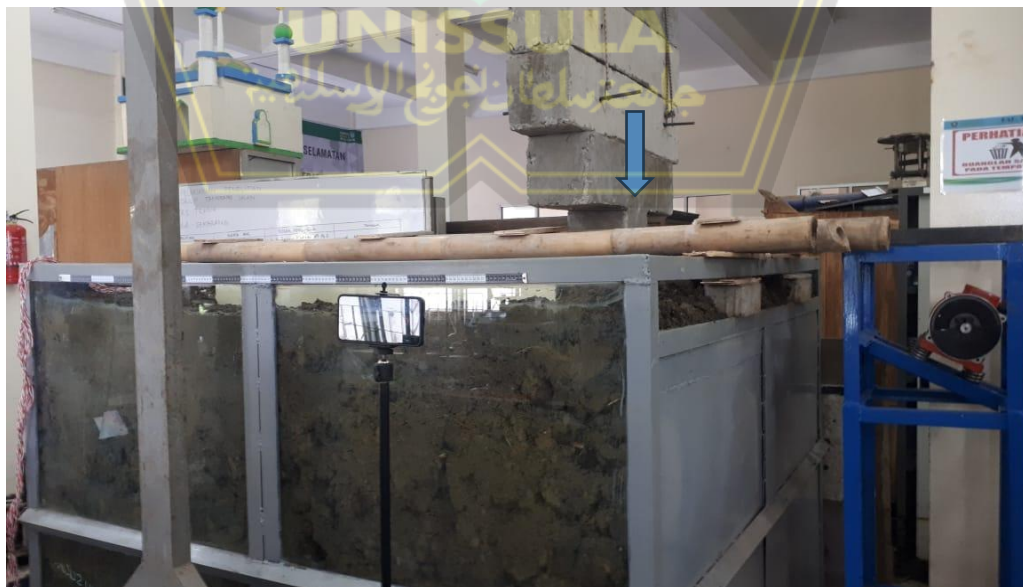
Gambar 4. 9 Skema Alat Uji di Laboratorium

4.3 Uji Beban di Tepi Pelat (Beban Aksial Eksentris) dan Beban Lateral

Uji beban dilakukan secara bertahap dengan berbagai pembebanan dari 1 kN hingga 4 kN. Berikut hasil pembebanan:

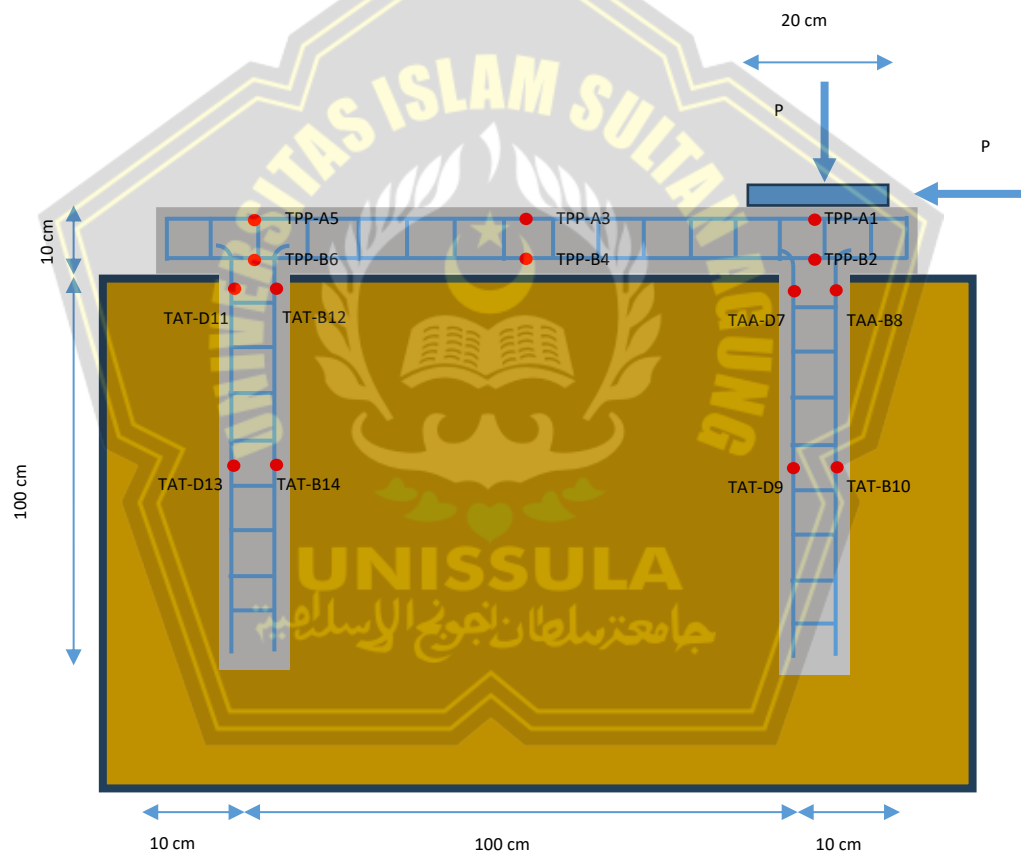
4.3.1 Hasil Uji Defleksi Pada Pelat Perkerasan

Posisi beban di tepi pelat adalah eksentris pelat seperti ditunjukkan Gambar 4.10 (Arah Panah). Titik-titik pengamatan juga sudah terpasang *strain gauge* pada pelat perkerasan ini.

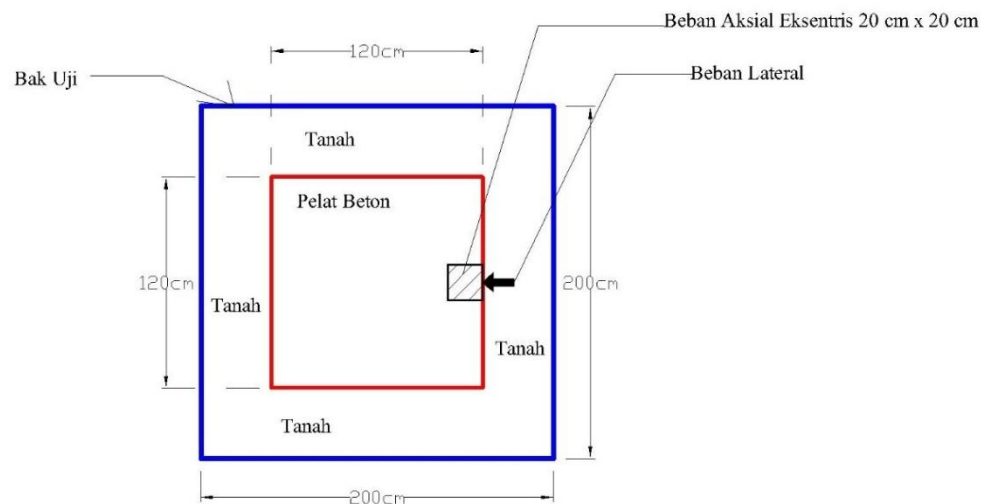


Gambar 4. 10 Letak Beban Aksial Eksentris Pada Pelat Perkerasan

Hubungan beban dan lendutan akibat beban di pelat perkerasan akan terbaca *strain gauge* pada titik-titik yang terpasang, pada pelat perkerasan ada 6 titik *strain gauge*, yaitu *strain gauge* nomor TPP-A1, TPP-B2, TPT-A3, TPT-B4, TPP-A5, dan TPP-B6. Sedangkan 3 titik ada di atas pelat, yaitu *strain gauge* nomor TPP-A1, TPT-A3, dan TPP-A5, sedangkan 3 titik ada di bawah pelat, yaitu *strain gauge* nomor TPP-B2, TPT-B4, dan TPP-B6. Letak *strain gauge* di tengah pelat yaitu *starin gauge* nomor TPT-A3 dan TPT-B4 dan 2 titik di tepi pelat perkerasan, yaitu *strain gauge* nomor TPP-A1, TPP-B2, TPP-A5, dan TPP-B6. Posisi *strain gauge* dapat dilihat pada Gambar 4.11, di gambar tersebut *strain gauge* dikodekan dengan titik-titik merah, baik di tulangan atas pelat dan tulangan bawah pelat perkerasan.



Gambar 4. 11 Posisi Strain gauge pada Pelat dan Tiang Model



Gambar 4. 12 Denah Pembebanan Aksial Eksentris dan Lateral

Tabel 4. 2 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 1 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Atas

Nomor <i>Strain gauge</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-A1 (Tepi pelat, dekat dari Beban)	0,26
TPT-A3 (Tengah pelat)	0,07
TPP-A5 (Tepi pelat, jauh dari Beban)	0,04

Dari Tabel 4.2 bisa dilihat besar Defleksi akibat beban aksial eksentris 1 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan atas pelat perkerasan, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah memanjang (searah dari pusat beban lateral). Defleksi terbesar 0,26 mm berada di *strain gauge* nomor TPP-A1 (tepi pelat perkerasan dekat pusat beban aksial eksentris), kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *strain gauge* nomor TPT-A3 (tengah pelat perkerasan) sebesar 0,07 mm dan di *strain gauge* nomor TPP-A5 (tepi pelat perkerasan jauh dari pusat beban) besar Defleksi 0.04 mm. Nilai Defleksi tidak terlalu besar karena beban aksial eksentris dan beban lateral yang ada masih dapat didukung oleh besarnya lekatan antara tanah dengan tiang.

Tabel 4. 3 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 2 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Atas

Nomor <i>Strain gauge</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-A1 (Tepi pelat, dekat dari Beban)	0,29
TPT-A3 (Tengah pelat)	0,15
TPP-A5 (Tepi pelat, jauh dari Beban)	0,10

Pada Tabel 4.3 bisa dilihat besar Defleksi akibat beban aksial eksentris 2 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan atas pelat perkerasan, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah memanjang (searah dari pusat beban lateral). Defleksi *strain gauge* nomor TPP-A1 sebesar 0,29 mm berada di tepi pelat perkerasan dekat pusat beban aksial eksentris, kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *strain gauge* nomor TPT-A3 (tengah pelat perkerasan) sebesar 0,15 mm dan di *strain gauge* nomor TPP-A5 besarnya Defleksi 0,10 mm. Nilai Defleksi tidak terlalu besar karena beban aksial eksentris dan beban lateral yang ada masih dapat didukung oleh besarnya lekatan antara tanah dengan tiang.

Tabel 4. 4 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 4 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Atas

Nomor <i>Strain gauge</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-A1 (Tepi pelat, dekat dari Beban)	0,33
TPT-A3 (Tengah pelat)	0,16
TPP-A5 (Tepi pelat, jauh dari Beban)	0,11

Pada Tabel 4.4 bisa dilihat besar Defleksi akibat beban aksial eksentris 4 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan atas pelat perkerasan, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah memanjang (searah dari pusat beban lateral). Defleksi di *strain gauge* nomor TPP-A1 sebesar 0,33 mm berada di dekat pusat beban aksial eksentris, kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *strain gauge* nomor TPT-A3 sebesar 0,16 mm dan di *strain gauge* nomor TPP-A5 besar Defleksi 0,11 mm. Nilai Defleksi pelat perkerasan cukup signifikan karena sudah terjadi *gap* di sekitar tiang akibat adanya beban lateral, yang mengakibatkan berkurangnya daya dukung tiang. Dalam pengujian model di laboratorium ini, beban aksial eksentris 4 kN (10% dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya) dengan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN adalah Defleksi pelat perkerasan yang paling besar, yaitu 0,33 mm

Tabel 4. 5 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 1 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Bawah

Nomor <i>Starin gauge</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-B2 (Tepi pelat, dekat dari Beban)	0,25
TPT-B4 (Tengah pelat)	0,03

TPP-B6 (Tepi pelat, jauh dari Beban)	0,00
--------------------------------------	------

Pada Tabel 4.5 bisa dilihat besar Defleksi akibat beban aksial eksentris 1 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan bawah pelat perkerasan, baik di kedua tepi pelat perkerasan, yaitu *strain gauge* nomor TPP-B2 dan TPP-B6 maupun di tengah pelat perkerasan, yaitu *strain gauge* nomor TPT-B4 arah memanjang (searah dari pusat beban lateral). Defleksi di *strain gauge* nomor TPP-B2 sebesar 0,25 mm berada di dekat pusat beban aksial eksentris, kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *strain gauge* nomor TPT-B4 (tengah pelat perkerasan) sebesar 0,03 mm dan di *strain gauge* nomor TPP-B6 (tepi pelat perkerasan jauh dari pusat beban) besarnya defleksi 0,00 mm (pelat masih belum menunjukkan reaksi karena beban masih kecil). Nilai defleksi tidak terlalu besar karena beban aksial eksentris dan beban lateral yang ada masih dapat didukung oleh besarnya nilai lekatan antara tanah dengan tiang.

Tabel 4. 6 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 2 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Bawah

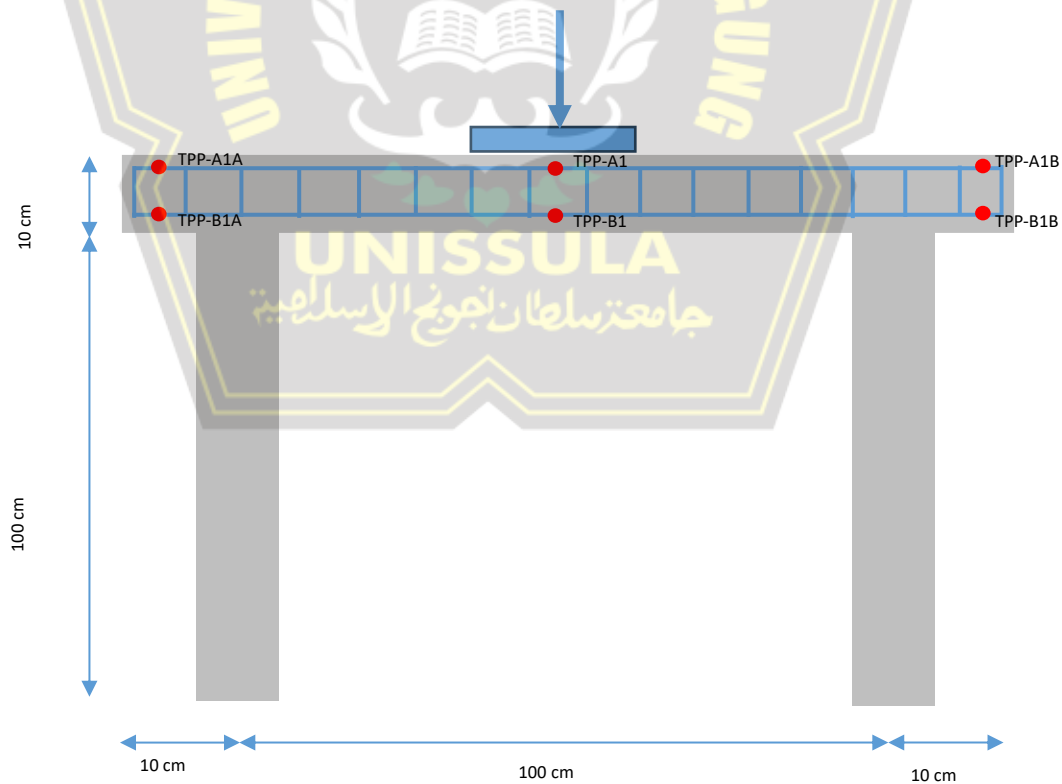
Nomor <i>Strain gauge</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-B2 (Tepi pelat, dekat dari Beban)	0,27
TPT-B4 (Tengah pelat)	0,12
TPP-B6 (Tepi pelat, jauh dari Beban)	0,09

Pada Tabel 4.6 bisa dilihat besar Defleksi akibat beban aksial eksentris 2 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan bawah pelat perkerasan, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah memanjang (searah dari pusat beban lateral). Defleksi *strain gauge* nomor TPP-B2 sebesar 0,27 mm (berada di tepi pelat perkerasan dekat pusat beban aksial eksentris), kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *strain gauge* nomor TPT-B4 (tengah pelat perkerasan) sebesar 0,12 mm dan di *strain gauge* nomor TPP-B6 (tepi pelat perkerasan jauh dari pusat beban) besar defleksi 0,09 mm. Nilai defleksi tidak terlalu besar karena beban aksial eksentris dan beban lateral yang ada masih dapat ditopang oleh besarnya nilai lekatan antara tanah dengan tiang, artinya tiang berfungsi dengan baik dalam mendukung beban.

Tabel 4. 7 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 4 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Bawah

Nomor <i>Strain gauge</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-B2 (Tepi pelat, dekat dari Beban)	0,30
TPT-B4 (Tengah pelat)	0,17
TPP-B6 (Tepi pelat, jauh dari Beban)	0,10

Pada Tabel 4.7 bisa dilihat besar defleksi akibat beban aksial eksentris 4 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan bawah pelat perkerasan, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah memanjang (searah dari pusat beban lateral). Defleksi di *strain gauge* nomor TPP-B2 sebesar 0,30 mm (berada di tepi pelat perkerasan dekat pusat beban aksial eksentris), kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *strain gauge* nomor TPT-B4 (tengah pelat perkerasan) sebesar 0,17 mm dan di *strain gauge* nomor TPP-B6 (tepi pelat perkerasan jauh dari pusat beban) besar defleksi 0,10 mm. Nilai defleksi tidak terlalu besar karena beban yang ada masih dapat didukung oleh lekatan antara tanah dengan tiang di bawah pelat perkerasan.



Gambar 4. 13 Posisi Strain gauge arah melintang pada Pelat Model

Tabel 4. 8 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 1 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Atas

Nomor <i>Strain gauge</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-A1A (Tepi pelat)	0,00
TPT-A1 (Tengah pelat, dekat dari Beban)	0,26
TPP-A1B (Tepi pelat)	0,00

Untuk arah melintang (arah lebar jalan) Tabel 4.8 bisa dilihat besar Defleksi akibat beban aksial eksentris 1 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan atas pelat perkerasan, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah melintang (arah melebar dari pusat beban lateral). Defleksi di *strain gauge* nomor TPT-A1 sebesar 0,26 mm berada di dekat pusat beban aksial eksentris, kemudian defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *strain gauge* nomor TPP-A1A (tepi pelat perkerasan) sebesar 0,00 mm dan di *strain gauge* nomor TPP-A1B (tepi pelat perkerasan) sebesar 0,00 mm. Nilai defleksi tidak signifikan karena pusat beban aksial eksentris dan beban lateral berada diantara kedua tiang, sehingga beban yang ada di atas pelat perkerasan dapat didukung kedua tiang pelat perkerasan.

Tabel 4. 9 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 2 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Atas

Nomor <i>Strain gauge</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-A1A (Tepi pelat)	0,00
TPT-A1 (Tengah pelat, dekat dari Beban)	0,29
TPP-A1B (Tepi pelat)	0,00

Untuk arah melintang (arah lebar jalan) Tabel 4.9 bisa dilihat besar Defleksi akibat beban aksial eksentris 2 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan atas pelat perkerasan, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah melintang (arah melebar dari pusat beban lateral). Defleksi di *strain gauge* nomor TPT-A1 sebesar 0,29 mm berada di dekat pusat beban aksial eksentris, kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari defleksi di *strain gauge* nomor TPP-A1A (tepi pelat perkerasan) sebesar 0,00 mm dan di *strain gauge* nomor TPP-A1B (tepi

pelat perkerasan) sebesar 0,00 mm. Nilai Defleksi tidak signifikan karena pusat beban aksial eksentris dan beban lateral dekat dengan kedua tiang, sehingga beban yang ada termobilisasi di kedua tiang tersebut.

Tabel 4. 10 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 4 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Atas

Nomor <i>Strain gauge</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-A1A (Tepi pelat)	0,00
TPT-A1 (Tengah pelat, dekat dari Beban)	0,33
TPP-A1B (Tepi pelat)	0,00

Untuk arah melintang (arah lebar jalan) Tabel 4.10 bisa dilihat besar Defleksi akibat beban aksial eksentris 4 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan atas pelat perkerasan, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah melintang (arah melebar dari pusat beban lateral). Defleksi di *strain gauge* nomor TPT-A1 sebesar 0,33 mm berada di dekat pusat beban aksial eksentris dan beban lateral, kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *strain gauge* nomor TPP-A1A (tepi pelat perkerasan) sebesar 0,00 mm dan di *strain gauge* nomor TPP-A1B (tepi pelat) sebesar 0,00 mm. Nilai Defleksi pelat perkerasan cukup signifikan karena sudah terjadi *gap* di sekitar tiang akibat adanya beban lateral, yang mengakibatkan berkurangnya daya dukung tiang. Dalam pengujian model di laboratorium ini, beban aksial eksentris 4 kN (10% dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya) dengan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN adalah Defleksi pelat perkerasan yang paling besar, yaitu 0,33 mm.

Tabel 4. 11 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 1 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Bawah

Nomor <i>Strain gauge</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-B2A (Tepi pelat)	0,00
TPT-B2 (Tengah pelat, dekat dari Beban)	0,25
TPP-B2B (Tepi pelat)	0,00

Pada arah melintang (arah lebar jalan) dari Tabel 4.11 bisa dilihat besarnya Defleksi akibat beban aksial eksentris 1 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan bawah pelat perkerasan, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah melintang (arah

melebar dari pusat beban lateral). Defleksi di *strain gauge* nomor TPT-B2 sebesar 0,25 mm berada di dekat pusat beban aksial eksentris dan lateral, kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *strain gauge* nomor TPP-B2A (tepi pelat perkerasan) sebesar 0,00 mm dan di *strain gauge* nomor TPP-B2B (tepi pelat perkerasan) lainnya Defleksi yang terjadi sebesar 0,00 mm. Nilai Defleksi tidak signifikan karena pusat beban berada di antara kedua tiang di bawah pelat perkerasan, sehingga beban yang ada termobilisasi terlebih dahulu di kedua tiang tersebut.

Tabel 4. 12 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 2 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Bawah

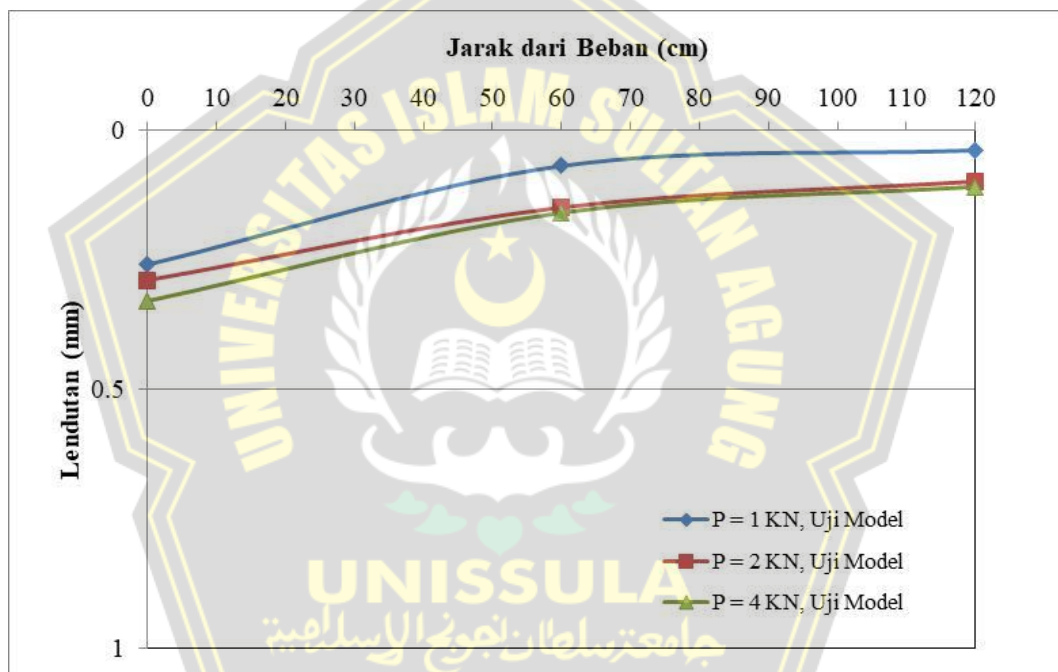
Nomor <i>Strain gauge</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-B2A (Tepi pelat)	0,00
TPT-B2 (Tengah pelat, dekat dari Beban)	0,27
TPP-B2B (Tepi pelat)	0,00

Dari arah melintang (arah lebar jalan) dari Tabel 4.12 bisa dilihat besar Defleksi akibat beban aksial eksentris 2 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan bawah pelat perkerasan, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah melintang (arah melebar dari pusat beban lateral). Defleksi di *strain gauge* nomor TPT-B2 sebesar 0,27 mm berada di dekat pusat beban aksial eksentris, kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, di *strain gauge* nomor TPP-B2A dan TPP-B2B (dari tepi pelat perkerasan) Defleksi masing-masing sebesar 0,00 mm. Nilai Defleksi tidak signifikan karena pusat beban berada diantara kedua tiang di bawah pelat perkerasan, sehingga beban yang ada termobilisasi terlebih dahulu di kedua tiang tersebut.

Tabel 4. 13 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 4 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di Tulangan Bawah

Nomor <i>Strain gauge</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-B2A (Tepi pelat)	0,00
TPT-B2 (Tengah pelat, dekat dari Beban)	0,30
TPP-B2B (Tepi pelat)	0,00

Untuk arah melintang (arah lebar jalan) Tabel 4.13 bisa dilihat besar Defleksi akibat beban aksial eksentris 4 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan bawah pelat perkerasan, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah melintang (arah melebar dari pusat beban lateral). Defleksi di *strain gauge* nomor TPT-B2 sebesar 0,30 mm (berada di dekat pusat beban aksial eksentris), kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris di *strain gauge* nomor TPP-B2A dan TPP-B2B (tepi pelat perkerasan) masing-masing Defleksi sebesar 0,00 mm. Nilai Defleksi tidak signifikan karena pusat beban dekat dengan kedua tiang, sehingga beban dapat dimobilisasi tiang di bawah pelat perkerasan.

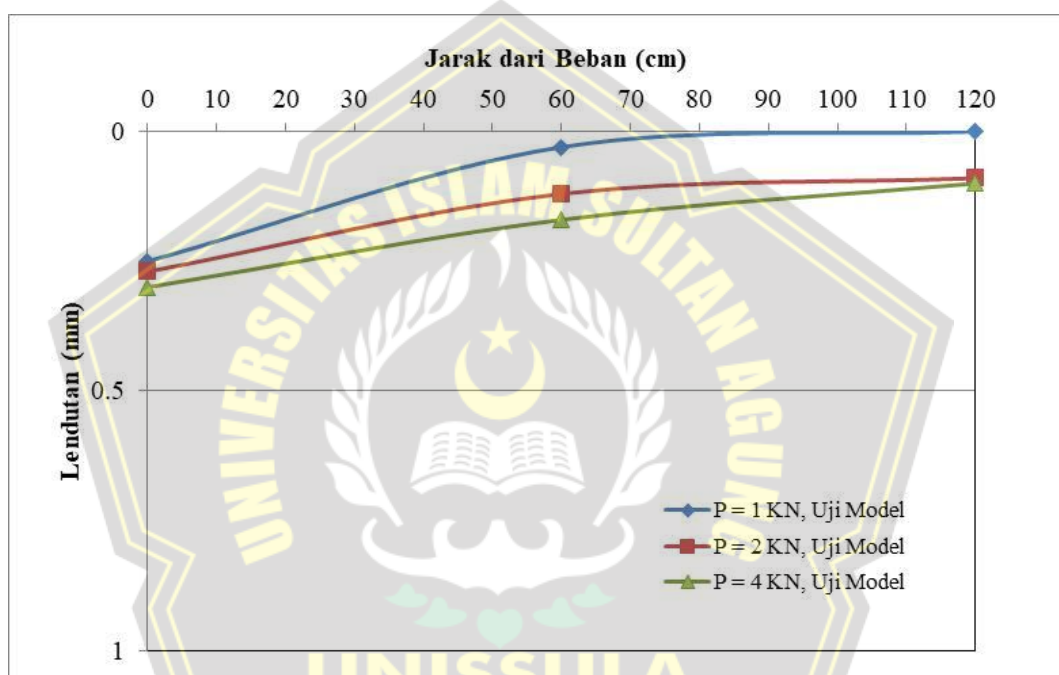


Gambar 4. 14 Lendutan Pelat Terpaku uji model pada arah memanjang pelat akibat beban 4 kN di tepi (eksentris) di tulangan atas

Pola lendutan maksimum pada arah memanjang Pelat Terpaku di tulangan Atas, *strain gauge* nomor TPP-A1, TPT-A3, dan TPP-A5 (arah memanjang jalan untuk kondisi lapangan) ditunjukkan oleh Gambar 4.13. dapat dilihat bahwa lendutan pelat perkerasan atas menunjukkan bahwa semakin jauh dari pusat beban aksial eksentris, lendutan cenderung semakin kecil, Namun demikian Defleksi yang terjadi pada pelat perkerasan cukup signifikan, untuk beban di atas *strain gauge* nomor TPP-A1 (dekat dari pusat beban) besarnya defleksi 0,33 mm, sedangkan di *strain gauge* nomor TPT-A3 (tengah pelat perkerasan) besar Defleksi 0,16 mm dan

Defleksi di *strain gauge* nomor TPP-A5 (jauh dari pusat beban aksial eksentris dan lateral) sebesar 0,11 mm

Nilai Defleksi pelat perkerasan cukup signifikan karena sudah mulai terjadi *gap* di sekitar tiang akibat adanya beban lateral, yang mengakibatkan berkurangnya daya dukung tiang. Dalam pengujian model di laboratorium ini, beban aksial eksentris 4 kN (10% dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya) dengan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN adalah Defleksi pelat perkerasan yang paling besar, yaitu 0,33 mm.

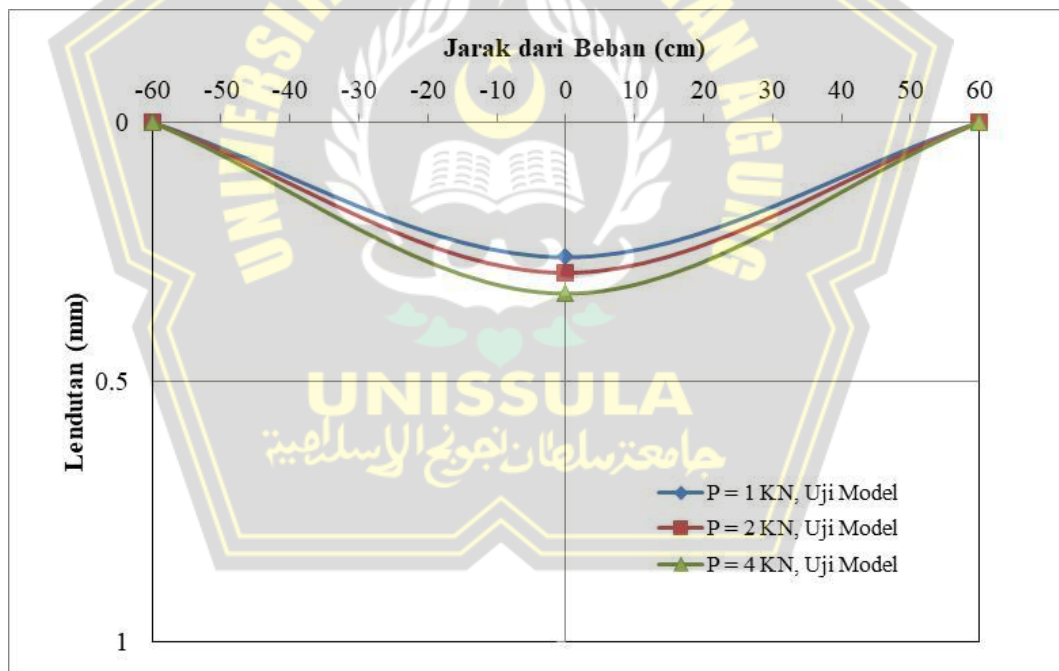


Gambar 4. 15 Lendutan Pelat Terpaku uji model pada arah memanjang pelat akibat beban 4 kN di tepi (eksentris) di tulangan bawah

Dilihat pola lendutan pada arah memanjang Pelat Terpaku di tulangan bawah, *strain gauge* nomor TPP-B2, TPT-B4, dan TPP-B6 (arah memanjang jalan untuk kondisi lapangan) ditunjukkan oleh Gambar 4.14. dapat dilihat bahwa defleksi/lendutan pelat perkerasan di tulangan bawah menunjukkan bahwa semakin jauh dari pusat beban aksial eksentris dan lateral, Defleksi/lendutan cenderung semakin kecil, Dimana untuk beban di atas pelat perkerasan (dekat dari pusat beban) di *strain gauge* nomor TPP-B2 besarnya Defleksi/lendutan 0,30 mm, sedangkan di atas pelat perkerasan *strain gauge* nomor TPT-B4 (tengah pelat perkerasan) Defleksi sebesar 0,17 mm dan Defleksi/lendutan di pelat perkerasan

strain gauge nomor TPP-B6 (tepi pelat perkerasan jauh dari pusat beban) sebesar 0,10 mm

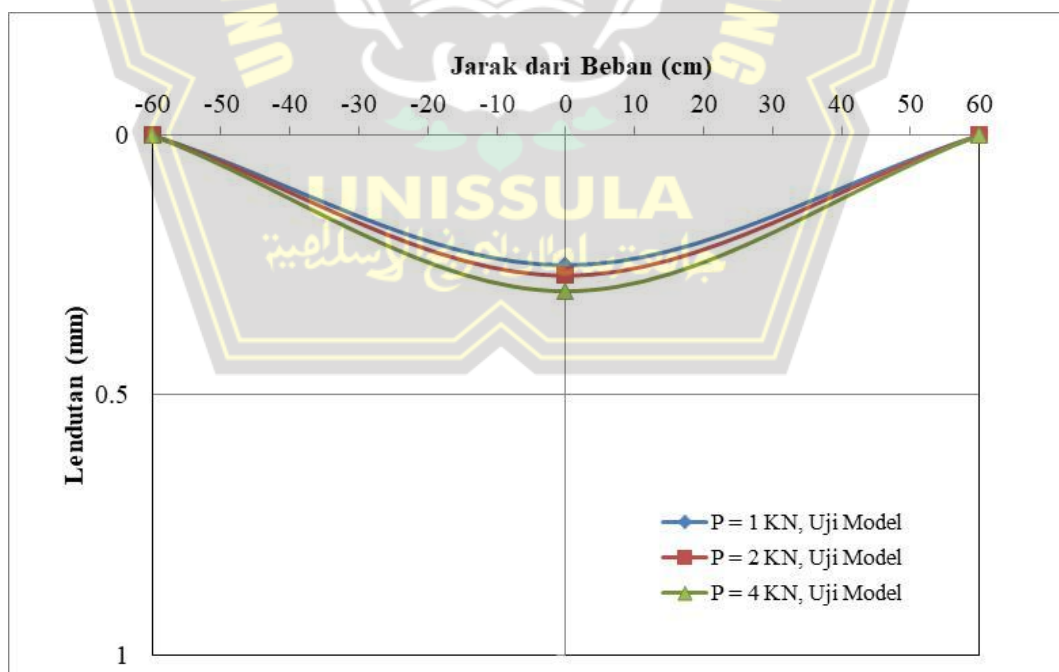
Baik Defleksi/lendutan pelat perkerasan di tulangan atas dan pelat perkerasan di tulangan bawah menunjukkan bahwa semakin jauh dari pusat beban aksial eksentris dan lateral, besarnya defleksi/lendutan cenderung semakin kecil, meskipun Defleksi/lendutan kecil, hal ini akan mengakibatkan pelat perkerasan mengalami Defleksi/lendutan yang cukup signifikan. Karena selain pelat perkerasan menerima beban aksial eksentris, pelat perkerasan juga menerima beban lateral, akibat adanya beban lateral, tiang akan mengalami defleksi yang mengakibatkan terjadi *gap* di sekitar tiang, sehingga akibat adanya *gap* akan mengurangi lekatan antara tanah dengan tiang yang berpengaruh pada berkurangnya daya dukung tiang, akibatnya diikuti terjadinya defleksi pelat perkerasan.



Gambar 4. 16 Lendutan Pelat Terpaku uji model pada arah melintang pelat akibat beban 4 kN di tepi (eksentris) di tulangan atas

Sedangkan Defleksi/lendutan pada arah melintang pelat perkerasan diberikan pada Gambar 4.15 pada tulangan atas (tulangan yang letaknya sebelah atas dari pelat perkerasan), *strain gauge* nomor TPP-A1A, TPT-A1, dan TPP-A1B. Dapat diamati melalui model gambar tersebut bahwa pola defleksi/lendutan

berbentuk parabola. Pelat perkerasan pada arah melintang, pinggir pelat perkerasan tidak mengalami Defleksi/lendutan yang signifikan. Hal ini dapat dipahami bahwa bagian melintang pelat perkerasan adalah sisi terpendek pelat perkerasan serta adanya tiang yang menopang pelat perkerasan. Untuk beban di atas *strain gauge* nomor TPT-A1 (dekat dengan beban aksial eksentris dan lateral) besarnya Defleksi/lendutan 0,33 mm, sedangkan di *strain gauge* nomor TPP-A1A dan TPP-A1B sebesar 0,00 mm. Nilai Defleksi/lendutan pelat perkerasan di bawah pusat beban aksial eksentris dan lateral cukup signifikan karena sudah mulai terjadi *gap* di sekitar tiang akibat adanya beban lateral, yang mengakibatkan berkurangnya daya dukung tiang. Dalam pengujian model di laboratorium ini, beban aksial eksentris yang diterapkan maksimal 4 kN (10% dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya) dengan variasi beban lateral yang diterapkan sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN. Adanya besaran beban aksial eksentris dan beban lateral tersebut di atas, maka terjadi Defleksi/lendutan pada pelat perkerasan maksimum sebesar 0,33 mm, akibat terjadi *gap* di sekitar tiang, yang akan mengurangi besarnya lekatan antara tanah dengan tiang dan berpengaruh pada berkurangnya daya dukung tiang, akibatnya diikuti terjadinya Defleksi pelat perkerasan.



Gambar 4. 17 Lendutan Pelat Terpaku uji model pada arah melintang akibat beban 4 kN di tepi (eksentris) di tulangan bawah

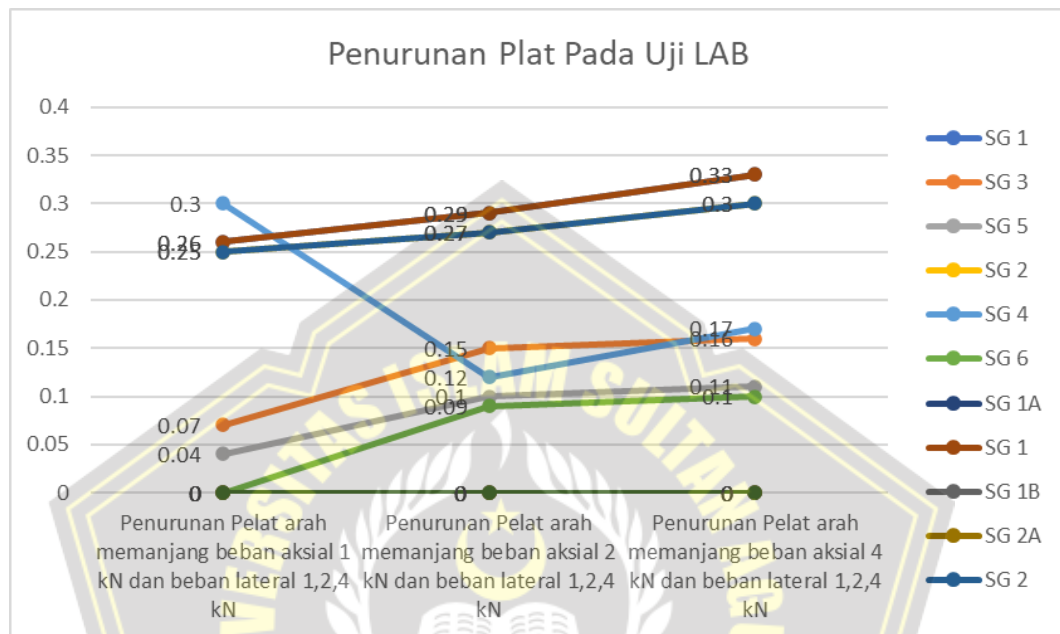
Pola Defleksi/lendutan yang sama pada arah melintangnya diberikan pada Gambar 4.16. untuk tulangan bawah pelat perkerasan (tulangan yang letaknya sebelah sisi bawah pada pelat perkerasan), di *strain gauge* nomor TPP-B2A, TPT-B2, dan TPP-B2B. Dapat diamati melalui model gambar tersebut bahwa pola lendutan berbentuk parabola. Adapun pada arah melintang, pinggir pelat perkerasan terjadi Defleksi/lendutan yang tidak signifikan. Hal ini dapat dipahami bahwa bagian melintang pelat perkerasan adalah sisi terpendek pelat perkerasan serta adanya tiang yang menopang pelat perkerasan, sehingga Defleksi pelat perkerasan akibat beban aksial eksentris dan lateral akan bisa ditahan oleh kedua tiang di bawah pelat perkerasan. Penempatan beban di atas *strain gauge* nomor TPT-B2 (dekat dengan pusat beban aksial eksentris dan lateral) besarnya Defleksi/lendutan 0,30 mm, sedangkan di *strain gauge* nomor TPP-B2A dan TPP-B2B sebesar 0,00 mm.

Tabel 4. 14 Rangkuman Hasil Pengujian Laboratorium Pada Pelat

Akar Pembebanan	Penurunan (mm)											
	SG 1	SG 3	SG 5	SG 2	SG 4	SG 6	SG 1A	SG 1	SG 1B	SG 2A	SG 2	SG 2B
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 1,2,4 kN	0,26	0,07	0,04	0,25	0,3	0	0,00	0,26	0,00	0,00	0,25	0,00
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 1,2,4 kN	0,29	0,15	0,10	0,27	0,12	0,09	0,00	0,29	0,00	0,00	0,27	0,00
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 1,2,4 kN	0,33	0,16	0,11	0,30	0,17	0,10	0,00	0,33	0,00	0,00	0,30	0,00

Pada Tabel 4.14 (Penomoran *strain gauge* pada uji model di laboratorium mengacu pada Gambar 4.11) bisa dilihat *strain gauge* nomor TPP-A1 besarnya defleksi pelat perkerasan akibat beban aksial eksentris 4 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan atas pelat perkerasan, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah memanjang (searah dari pusat beban lateral). Defleksi di *strain gauge* nomor TPP-A1 sebesar 0,33 mm berada di dekat pusat beban aksial eksentris, kemudian defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari defleksi di *strain gauge* nomor TPT-A3 sebesar 0,16 mm dan di *strain gauge* nomor TPP-A5 besar defleksi 0,11 mm. Nilai defleksi pelat perkerasan cukup signifikan karena sudah terjadi *gap*

di sekitar tiang akibat adanya beban lateral, yang mengakibatkan berkurangnya lekatan antara tanah dengan tiang sehingga berkurang pula daya dukung tiang. Dalam pengujian model di laboratorium ini, beban aksial eksentris 4 kN (10% dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya) dengan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN adalah defleksi pelat perkerasan yang paling besar, yaitu 0,33 mm



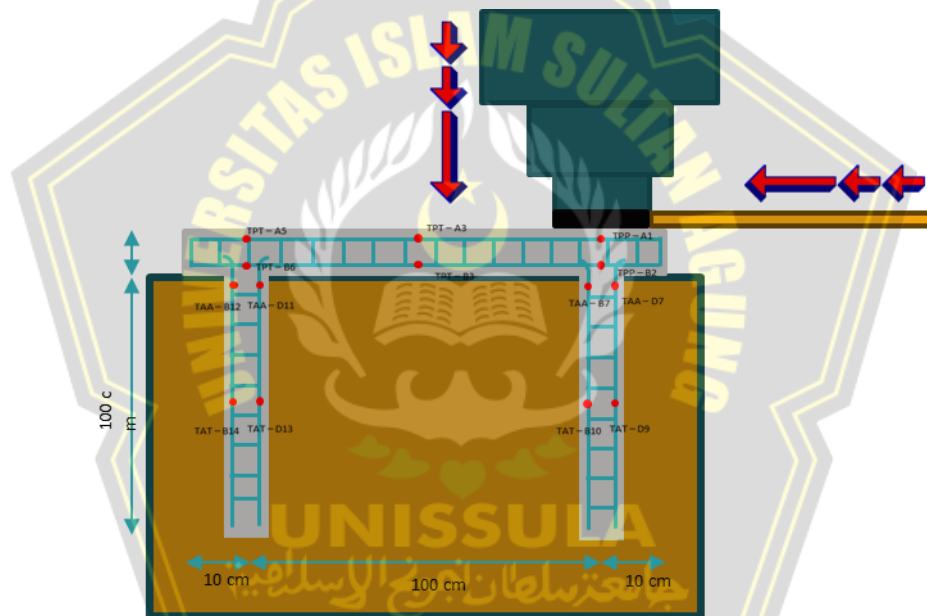
Gambar 4. 18 Hasil Pengujian Laboratorium Pada Pelat

Pada Gambar 4.17 diperlihatkan hubungan antara besar defleksi dengan beban pada pelat perkerasan disemua *strain gauge* yang terpasang, baik akibat beban aksial eksentris maupun beban lateral. Besar defleksi pelat perkerasan dilihat dari arah potongan memanjang pelat (searah panjang jalan) dan potongan melintang pelat (arah melebar jalan).

4.3.2 Hasil Uji Defleksi Pada Tiang

Peletakan beban aksial adalah eksentris pelat perkerasan, sedangkan beban lateral diterapkan di sisi permukaan pelat perkerasan seperti ditunjukkan Gambar 4.18 (Arah Panah). Pengujian dilaksanakan untuk beban aksial eksentris 1 kN diberi beban lateral 1 kN selama 20 detik, beban lateral ditambah menjadi 2 kN selama 20 detik, selanjutnya beban lateral ditambah menjadi 4 kN selama 20 detik. Pengujian yang sama untuk beban aksial eksentris 2 kN dan 4 kN, beban lateral yang diterapkan 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dengan interval waktu 20 detik. Titik-titik pengamatan juga sudah terpasang *strain gauge* pada tiang pelat perkerasan ini.

Hubungan beban dan defleksi akibat beban aksial eksentris dan lateral di tiang pelat perkerasan akan terbaca *strain gauge* pada titik-titik yang terpasang, pada tiang pelat perkerasan ada 8 titik *strain gauge*, yaitu *strain gauge* nomor TAA-D7, TAA-B8, TAT-D9, TAT-B10, TAA-D11, TAA-B12, TAT-D13, dan TAT-B14. Ada 4 titik *strain gauge* di bagian atas tiang pelat perkerasan, yaitu *strain gauge* nomor TAA-D7, TAA-B8, TAA-D11 dan TAA-B12, sedangkan 4 titik ada di bagian tengah tiang pelat perkerasan, yaitu *strain gauge* nomor TAT-D9, TAT-B10, TAT-D13 dan TAT-B14. Posisi pemasangan dan penomoran *strain gauge* dapat dilihat pada Gambar 4.11 (halaman sebelumnya), di gambar tersebut *strain gauge* dikodekan dengan titik-titik merah, baik di tulangan bagian atas tiang pelat perkerasan dan tulangan bagian tengah tiang pelat perkerasan.



Gambar 4. 19 Skema penempatan strain gauge dan beban pada uji model

Tabel 4. 15 Defleksi tiang akibat beban Aksial eksentris 1 kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN

Nomor <i>Strain gauge</i> pada Tiang	Defleksi (mm)
TAA-D7	0,23
TAA-B8	0,14
TAT-D9	0,11
TAT-B10	0,10
TAA-D11	0,24
TAA-B12	0,17
TAT-D13	0,10
TAT-B14	0,08

Pengamatan pergeseran tiang akibat adanya beban aksial eksentris dan lateral terbaca dari *strain gauge* yang terpasang di tiang nomor 4 (jauh dari beban) dan tiang nomor 1 (dekat dari beban). Tiap tiang pelat perkerasan terdapat 4 titik *strain gauge*. Letak *strain gauge* ada di sebelah atas tulangan tiang, yaitu *strain gauge* nomor TAA-D7, TAA-B8, TAA-D11, dan TAA-B12, sedangkan di bagian tengah tulangan tiang, yaitu *strain gauge* nomor TAT-D9, TAT-B10, TAT-D13, dan TAT-B14. Besarnya pergeseran tiang akibat beban aksial eksentris 1 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dapat dilihat dari Tabel 4.15, Dari tabel bisa dilihat bahwa *strain gauge* di tulangan bagian atas tiang mengalami defleksi yang lebih besar bila dibandingkan defleksi di tulangan bagian tengah tiang. Tiang nomor 4 (jauh dari pusat beban aksial eksentris dan lateral) pada tulangan bagian atas tiang mengalami defleksi sebesar 0,24 mm, ini lebih besar dibanding di tulangan bagian tengah tiang yang mengalami defleksi 0,10 mm. Hal ini terjadi karena dengan beban aksial eksentris 1 kN dengan beban lateral 1 kN, 2 kN dan 4 kN yang terpusat pada atas pelat perkerasan, akan mengakibatkan pergeseran arah lateral pada pelat perkerasan yang akan diikuti *defleksi* pada tiang pelat perkerasan bagian atas terlebih dahulu, menyusul *defleksi* ke tiang pelat perkerasan bagian tengah. Defleksi tiang sebesar 0,24 mm ini adalah yang paling besar dalam uji model di laboratorium, yang berakibat sudah terjadi *gap* antara tanah dengan tiang sehingga berpengaruh terhadap turunnya pelat perkerasan secara signifikan.

Tabel 4. 16 Defleksi tiang akibat beban Aksial eksentris 2 kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN

Nomor <i>Strain gauge</i> pada Tiang	Defleksi (mm)
TAA-D7	0,24
TAA-B8	0,18
TAT-D9	0,09
TAT-B10	0,08
TAA-D11	0,22
TAA-B12	0,21
TAT-D13	0,11
TAT-B14	0,10

Besarnya pergeseran tiang akibat beban aksial eksentris 2 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dapat dilihat dari Tabel 4.16, Dari tabel bisa dilihat

bahwa *strain gauge* di tulangan bagian atas tiang mengalami defleksi yang lebih besar bila dibandingkan defleksi di tulangan bagian tengah tiang. Tiang nomor 1 (dekat dari pusat beban aksial eksentris dan lateral) pada tulangan bagian atas tiang mengalami defleksi sebesar 0,24 mm, ini lebih besar dibanding di tulangan bagian tengah tiang yang mengalami defleksi 0,09 mm. Hal ini terjadi karena dengan beban aksial eksentris 2 kN dengan beban lateral 1 kN, 2 kN dan 4 kN yang terpusat pada permukaan atas pelat perkerasan, akan mengakibatkan pergeseran arah lateral pada pelat perkerasan yang akan diikuti defleksi tiang bagian atas terlebih dahulu, baru menyusul defleksi pada tiang bagian tengah tiang pelat perkerasan. Defleksi 0,24 mm ini adalah yang paling besar dalam uji model di laboratorium, yang berakibat sudah terjadi *gap* (karena besar defleksi yang terjadi sama dengan besar *gap* yang terjadi) antara tiang dengan tanah sehingga terjadi pula turunnya pelat perkerasan secara signifikan.

Tabel 4. 17 Defleksi tiang akibat beban Aksial eksentris 4 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN

Nomor <i>Strain gauge</i> pada Tiang	Defleksi (mm)
TAA-D7	0,17
TAA-B8	0,12
TAT-D9	0,05
TAT-B10	0,01
TAA-D11	0,20
TAA-B12	0,19
TAT-D13	0,06
TAT-B14	0,05

Nilai pergeseran tiang akibat beban aksial eksentris 4 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dapat dilihat dari Tabel 4.17, Dari tabel bisa dilihat bahwa *strain gauge* di tulangan bagian atas tiang mengalami defleksi yang lebih besar bila dibandingkan defleksi di tulangan bagian tengah tiang. Tiang nomor 4 (jauh dari pusat beban aksial eksentris dan beban lateral) pada tulangan bagian atas tiang mengalami defleksi sebesar 0,20 mm, ini lebih besar dibanding di tulangan bagian tengah tiang yang mengalami defleksi 0,06 mm. Hal ini terjadi karena dengan beban aksial eksentris 4 kN dengan beban lateral 1 kN, 2 kN dan 4 kN yang terpusat pada permukaan atas pelat perkerasan, akan mengakibatkan pergeseran arah lateral pada pelat perkerasan yang akan diikuti oleh tiang bagian atas terlebih

dahulu, selanjutnya *defleksi* terjadi pada tiang bagian tengah dan bagian bawah tiang pelat perkerasan.



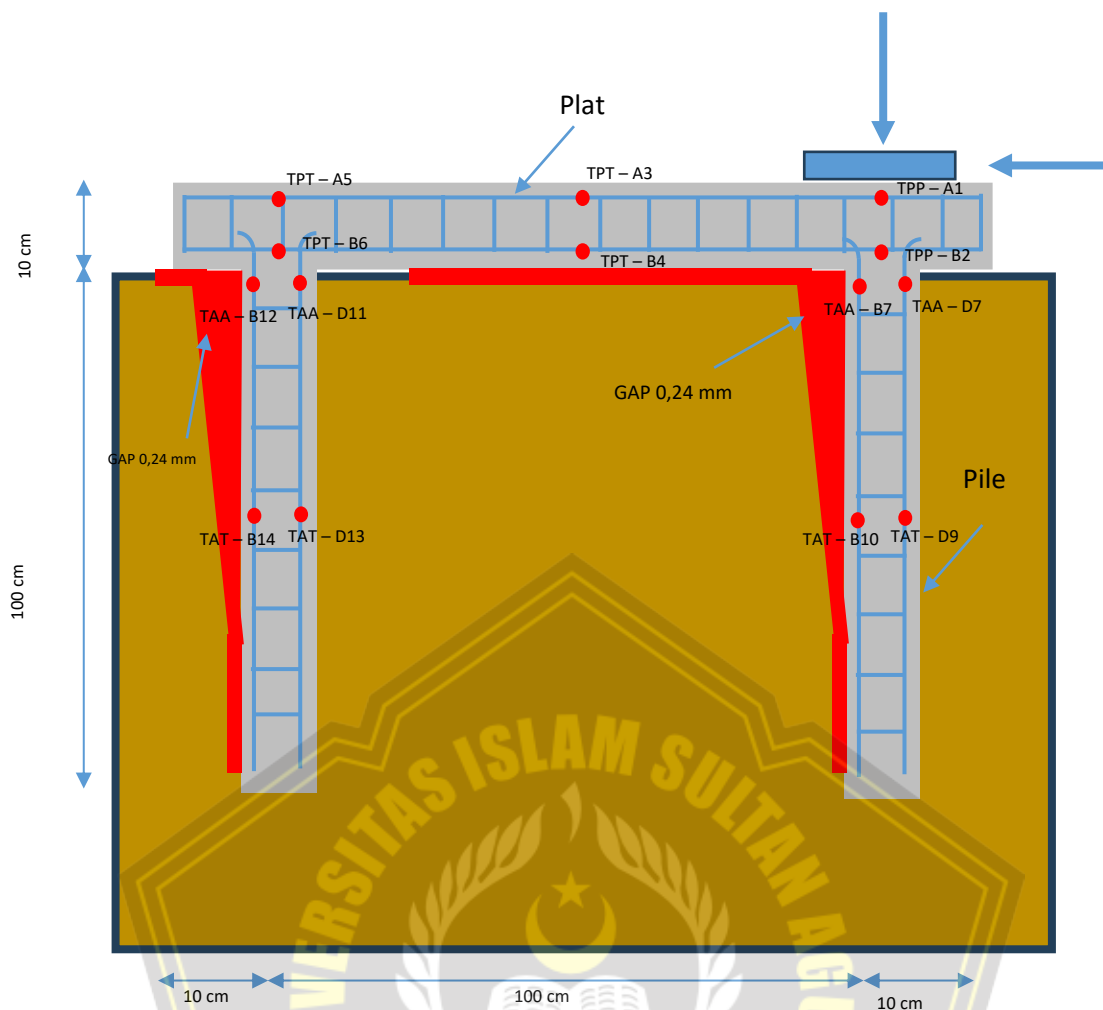
Gambar 4. 20 Kamera Pengamatan Pergeseran Pelat dan Tiang 1

Pergeseran tiang juga bisa dibaca dengan rekaman kamera, ada 2 kamera yang di letakkan di depan bak uji yang terbuat dari kaca tembus pandang. Akibat adanya beban aksial eksentris dan beban lateral. Pada Gambar 4.19 (Arah panah) diperlihatkan posisi kamera saat pengujian di laboratorium berlangsung, pergeseran dapat terlihat dari gerakan horizontal dari pelat dan tiang yang terukur pada pita berskala.



Gambar 4. 21 Kamera Pengamatan Pergeseran Pelat dan Tiang 2

Sama halnya untuk kamera satunya yang posisinya bersebelahan dari kamera 1 yang di letakkan di depan bak uji yang terbuat dari kaca tembus pandang. Akibat adanya beban aksial eksentris dan beban lateral. Pada Gambar 4.20 (Arah panah) diperlihatkan posisi kamera saat pengujian di laboratorium berlangsung, pergeseran dapat terlihat dari gerakan horizontal dari pelat dan tiang yang terukur pada pita berskala.



Gambar 4. 22 Gap yang terjadi antara Tanah dan Tiang akibat beban Lateral

Pada uji model di laboratorium ini, baik untuk beban aksial eksentris 1 kN dan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN maupun beban aksial eksentris 2 kN dan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dan juga beban beban aksial eksentris 4 kN dan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, diperoleh nilai defleksi tiang maksimum 0,24 mm. Defleksi tiang sebesar 0,24 mm ini adalah defleksi yang paling besar dalam uji model di laboratorium, yang berakibat sudah terjadi *gap* (karena besar defleksi sama dengan besar *gap* yang terjadi) antara tiang dengan tanah sehingga terjadi pula turunnya pelat perkerasan secara signifikan (Gambar 4.21).

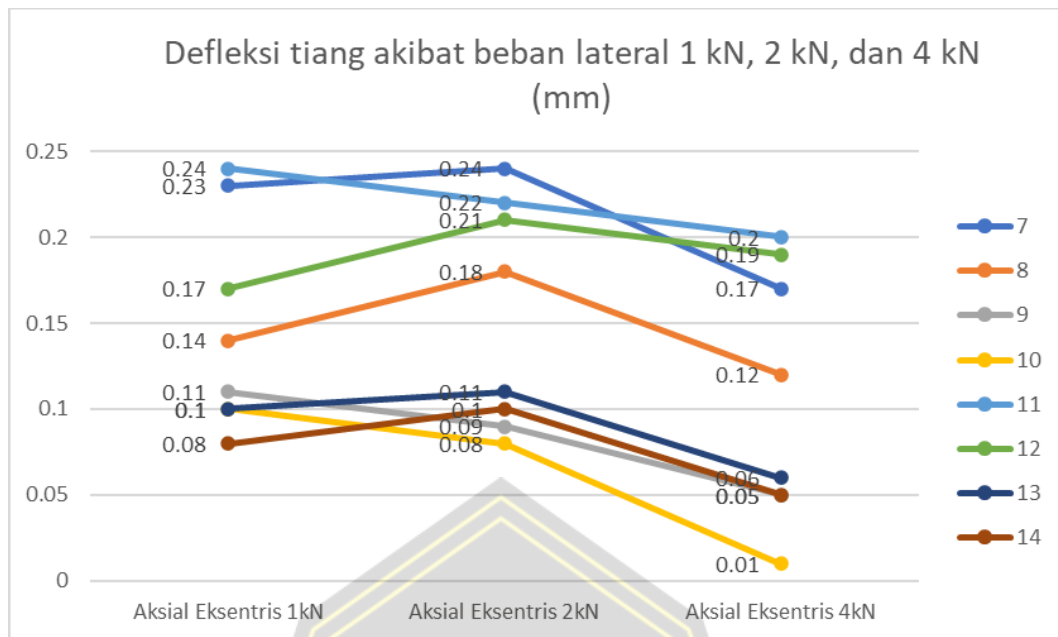
Dari hasil pengujian bahwa meskipun intensitas beban sudah mencapai 4 kN (10% dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya), lendutan maksimum yang terjadi pada pelat perkerasan di bawah beban masih cukup kecil, hanya sebesar 0,33 mm. Apabila ditinjau pada beban roda standar 40 kN (tekanan beban 566

kN/m²), maka Defleksi kedua tepi pelat pada arah memanjang tidak signifikan, yaitu sekitar 0,11 mm. Untuk pinggir pelat pada arah melintang *Prototipe* Pelat Terpaku, juga tidak terjadi Defleksi/lendutan yang berarti. Mengingat di lapangan, jalan dibangun dengan segmen yang jauh lebih panjang dibanding lebar jalan.

Tabel 4. 18 Rangkuman Hasil Pengujian Laboratorium Pada *Pile*

Nomor <i>Strain gauge</i> pada Tiang	Defleksi tiang akibat beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)		
	Aksial Eksentris 1kN	Aksial Eksentris 2kN	Aksial Eksentris 4kN
7	0,23	0,24	0,17
8	0,14	0,18	0,12
9	0,11	0,09	0,05
10	0,10	0,08	1
11	0,24	0,22	0,20
12	0,17	0,21	0,19
13	0,10	0,11	0,06
14	0,08	0,10	0,05

Seperti dalam Tabel 4.18 pada uji model perkerasan sistem pelat terpaku di laboratorium ini, baik untuk beban aksial eksentris 1 kN dan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN maupun beban aksial eksentris 2 kN dan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dan juga beban aksial eksentris 4 kN dan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, penomoran *strain gauge* di angkur/tiang mengacu pada Gambar 4.11. Di tulangan tiang atas *strain gauge* nomor TAA-D11 saat beban aksial eksentris 1 kN diperoleh nilai defleksi tiang maksimum 0,24 mm. Pada beban aksial eksentris 2 kN di *strain gauge* nomor TAA-D7 didapatkan defleksi tiang tulangan atas depan sebesar 0,24 mm. Defleksi tiang sebesar 0,24 mm ini adalah defleksi yang paling besar dalam uji model di laboratorium, yang berakibat sudah terjadi *gap* (karena besar defleksi sama dengan besar *gap* yang terjadi) antara tiang dengan tanah sehingga mengurangi daya dukung tiang dan terjadi pula turunnya pelat perkerasan secara signifikan.



Gambar 4. 23 Hasil Pengujian Laboratorium Pada Pile

Pada Gambar 4.22 diperlihatkan hubungan antara besar defleksi tiang dengan beban (Beban aksial eksentris dan lateral) di *strain gauge* yang terpasang pada tiang. Besar defleksi dapat dilihat di tulangan bagian atas (TAA) tiang maupun di tulangan bagian tengah (TAT) tiang.

BAB V PEMBAHASAN HASIL PENELITIAN

5.1 ANALISIS PEMODELAN *FEM* 3D

Pemodelan pada Laboratorium yang dilakukan perlu divalidasi dengan metode FEM guna memaksimalkan hasil penelitian ini, hasil FEM di maksudkan untuk mengurangi eror yang terjadi pada penelitian.

5.1.1 Idealisasi Geometri

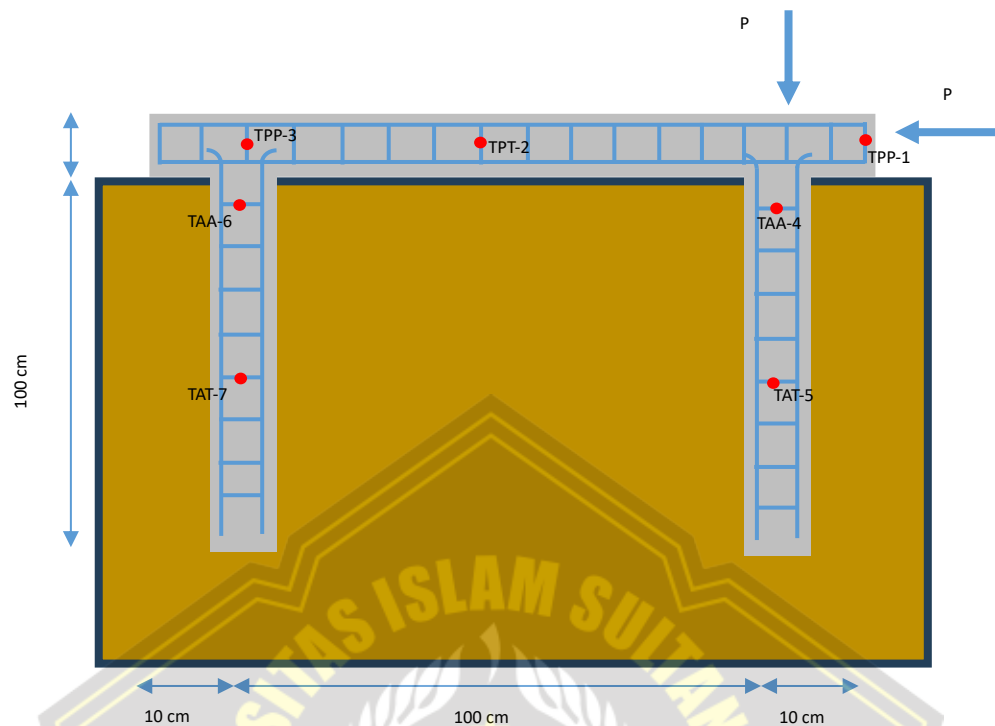
Di bawah ini data-data yang dipakai untuk menganalisis hasil dari uji model di laboratorium secara numerik dengan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*). Data itu berupa data tanah, data material pelat perkerasan dan data material tiang. Tabel 5.1 memuat data-data yang diperlukan untuk analisis uji model dan pembebanan, yaitu beban aksial eksentris dan beban lateral.

Tabel 5. 1 Model dan parameter material pada analisis aksisimetri

Parameter	Nama/Notasi	Tanah	Tiang	Pelat	Satuan
Model material	Model	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Elastic</i>	<i>Elastic</i>	-
Perilaku material	Tipe	<i>Undrained</i>	<i>Non porous</i>	<i>Non porous</i>	-
Berat volume terendam	γ_{sat}	17,7	24	24	kN/m ³
Berat volume kering	γ_d	13,3	-	-	kN/m ³
Modulus Young's	E	18.000	-	-	kPa
Rasio Poisson's	ν	0,30	-	-	-
Kohesi <i>undrained</i>	C_u	18,00	-	-	kPa
Sudut gesek internal	ϕ	21,43	-	-	°
Sudut dilatansi	ψ	0,00	-	-	°
Kadar pori awal	e_0	0,872	-	-	-
Interface strength ratio	R	0,90	0,90	0,90	-

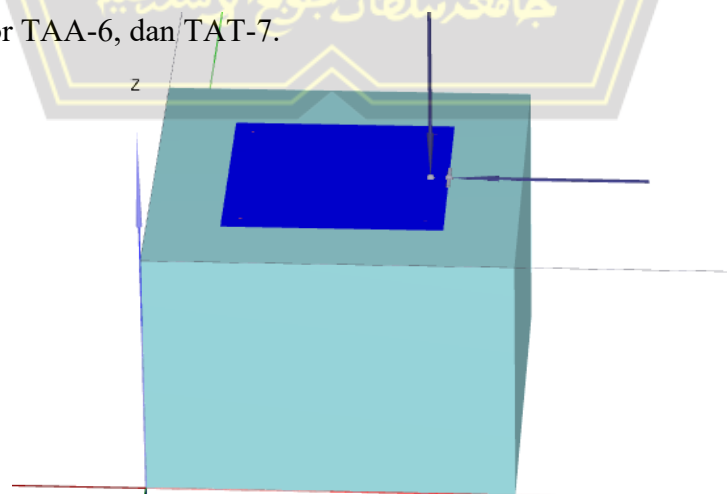
Setelah data tanah, material pelat perkerasan dan tiang sudah ditentukan, selanjutnya menentukan titik *sensor* sebagai pengganti *strain gauge*.

5.1.2 Hasil Analisis FEM



Gambar 5. 1 Pemodelan Visualisasi Gambar

Dari Gambar 5.1 dapat dilihat pemodelan perkerasan sistem pelat terpaku untuk analisis *FEM*, baik penempatan beban (beban aksial eksentris dan beban lateral) dan posisi sensor sebagai pengganti *strain gauge* dari uji model di laboratorium. Sensor diletakkan di pelat perkerasan dan tiang, untuk sensor di pelat perkerasan yaitu : sensor nomor TPP-1, TPT-2, dan TPP-3 sedangkan sensor pada tiang yaitu : pada tiang nomor 1 sensor nomor TAA-4, TAT-5, pada tiang nomor 4 sensor nomor TAA-6, dan TAT-7.



Gambar 5. 2 Pemodelan Pada Numerik 3D V22

Selanjutnya masuk ke menu struktur, pilih menu *create load*, pilih *option create*, *option load*, kemudian beban ditempatkan pada posisi tengah-tengah antara tiang 1 dan 2. Agar posisi beban bisa *center* bisa menggunakan *selection explore*. Untuk beban lateral pada pemodelan diberikan bertahap tiap 20 detik untuk beban 1 kN, 2 kN dan 4 kN, sedang untuk beban vertikal/aksial pada model 1 beban 1 kN, model 2 beban 2 kN, model 3 beban 4 kN (Gambar 5.2).

Tabel 5. 2 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 1 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D

Nomor <i>Sensor</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-1 (Tepi pelat, dekat dari Beban)	0,07
TPT-2 (Tengah pelat)	0,02
TPP-3 (Jepi pelat, jauh dari Beban)	0,01

Dari Tabel 5.2 bisa dilihat besar Defleksi akibat beban aksial eksentris 1 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan pelat perkerasan, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah memanjang (searah dari pusat beban lateral). Defleksi terbesar 0,7 mm berada di *sensor* nomor TPP-1 (tepi pelat perkerasan dekat pusat beban aksial eksentris), kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *sensor* nomor TPT-2 (tengah pelat perkerasan) sebesar 0,2 mm dan di *sensor* nomor TPP-3 (tepi pelat perkerasan jauh dari pusat beban) besar Defleksi 0,1 mm Nilai Defleksi tidak terlalu besar karena beban aksial eksentris dan beban lateral yang diterapkan dalam analisis *FEM* ini masih dapat didukung oleh besarnya lekatan antara tanah dengan tiang perkerasan. Tabel 5.3 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 2 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari *FEM* 3D

Tabel 5. 3 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 2 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D

Nomor <i>Sensor</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-1 (Tepi pelat, dekat dari Beban)	0,22
TPT-2 (Tengah pelat)	0,06
TPP-3 (Tepi pelat, jauh dari Beban)	0,03

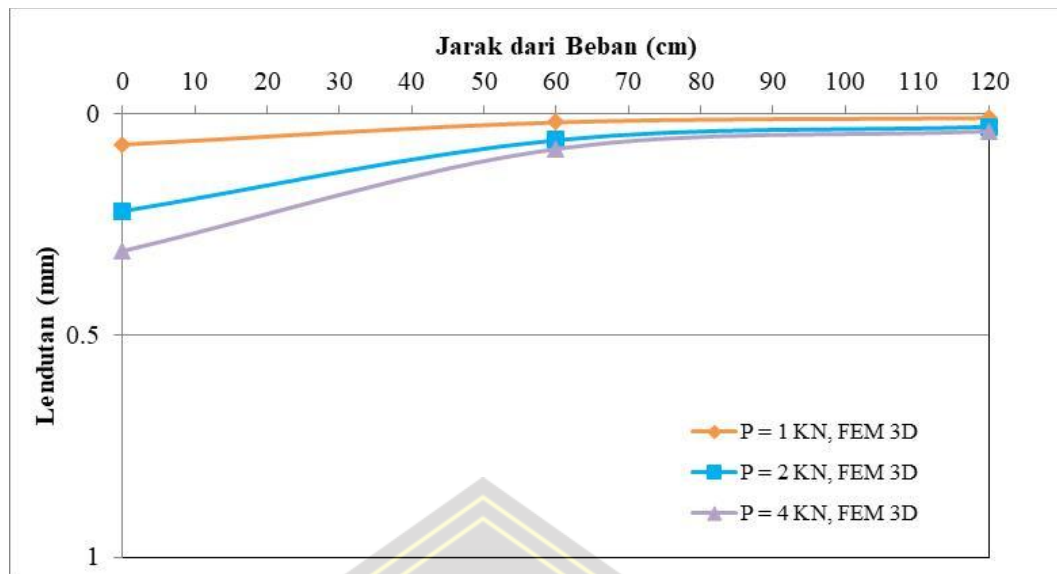
Pada Tabel 5.3 bisa dilihat besar Defleksi akibat beban aksial eksentris 2 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di

tulangan pelat perkerasan, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah memanjang (searah dari pusat beban lateral). Defleksi *sensor* nomor TPP-1 sebesar 0,22 mm berada di tepi pelat perkerasan dekat pusat beban aksial eksentris, kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *sensor* nomor TPT-2 (tengah pelat perkerasan) sebesar 0,6 mm dan di *sensor* nomor TPP-3 besarnya Defleksi 0,3 mm. Nilai Defleksi tidak terlalu besar karena beban aksial eksentris dan beban lateral yang diterapkan dalam analisis *FEM* ini masih dapat topang oleh nilai lekatan antara tanah dengan tiang pelat perkerasan.

Tabel 5. 4 Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial 4 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D

Nomor <i>Sensor</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-1 (Tepi pelat, dekat dari Beban)	0,31
TPT-2 (Tengah pelat)	0,08
TPP-3 (Tepi pelat, jauh dari Beban)	0,04

Pada Tabel 5.4 bisa dilihat besar Defleksi akibat beban aksial eksentris 4 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan pelat perkerasan, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah memanjang (searah dari pusat beban lateral). Defleksi di *sensor* nomor TPP-1 sebesar 0,31 mm berada di dekat pusat beban aksial eksentris, kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *sensor* nomor TPT-2 sebesar 0,8 mm dan di *sensor* nomor TPP-3 besar Defleksi 0,4 mm. Nilai Defleksi pelat perkerasan cukup signifikan karena sudah terjadi *gap* di sekitar tiang akibat adanya beban lateral, yang mengakibatkan berkurangnya daya dukung tiang. Dalam analisis *FEM* ini, beban aksial eksentris 4 kN (10% dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya) dengan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN adalah Defleksi pelat perkerasan yang paling besar, yaitu 0,31 mm.



Gambar 5.3 (5.1) Defleksi Pelat arah memanjang akibat beban aksial dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D

Pola lendutan maksimum pada arah memanjang Pelat Terpaku di tulangan dari analisis *FEM*, *sensor* nomor TPP-1, TPT-2, dan TPP-3 (arah memanjang jalan untuk kondisi lapangan) ditunjukkan oleh Gambar 5.3. Pada grafik Gambar 5.3 di atas dapat dilihat bahwa untuk beban aksial eksentris sebesar 1 kN, model garis Defleksi yang terjadi sangat kecil dan jauh jaraknya bila dibandingkan saat beban 2 kN dan beban 4 kN. Hal ini terjadi karena pada pembebanan aksial eksentris sebesar 1 kN belum terjadi *gap* pada tiang (tiang masih mampu bekerja menahan beban yang ada), baik Defleksi di *sensor* nomor TPP-1, TPT,2, dan TPP-3. Dari pola tersebut dapat dilihat bahwa lendutan pelat perkerasan menunjukkan bahwa semakin jauh dari pusat beban aksial eksentris, lendutan cenderung semakin kecil, Namun demikian Defleksi yang terjadi pada pelat perkerasan antara titik sensor satu dengan titik sensor yang lain cukup signifikan, untuk beban di atas *sensor* nomor TPP-1 (dekat dari pusat beban) besarnya Defleksi 0,31 mm , sedangkan di *sensor* nomor TPT-2 (tengah pelat perkerasan) besar Defleksi 0,8 mm dan Defleksi di *sensor* nomor TPP-3 (jauh dari pusat beban aksial eksentris dan lateral) sebesar 0,4 mm.

Nilai Defleksi pelat perkerasan cukup signifikan karena sudah mulai terjadi *gap* di sekitar tiang akibat adanya beban aksial eksentris bervariasi dan beban lateral bervariasi, yang mengakibatkan berkurangnya daya dukung tiang yang diikuti Defleksi pelat perkerasan, namun demikian pelat perkerasan dengan sistem pelat

terpaku masih dalam kondisi stabil setelah melewati beban gradualnya. Dalam analisis *FEM* ini, beban aksial eksentris 4 kN (10% dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya) dengan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, tiap penambahan variasi beban lateral dimodelkan dengan interval waktu tiap 20 detik, jadi total waktu yang diperlukan untuk variasi beban lateral adalah 60 detik atau 1 menit, sama seperti pelaksanaan uji model di laboratorium. Didapatkan besar Defleksi pelat perkerasan maksimum, yaitu 0,31 mm dari analisis *FEM* 3D.

Tabel 5. 5 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 1 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D

Nomor <i>Sensor</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-1A (Tepi pelat)	0,00
TPT-1 (Tengah pelat, dekat dari Beban)	0,07
TPP-1B (Tepi pelat)	0,00

Untuk arah melintang (arah lebar jalan) Tabel 5.5 bisa dilihat besar Defleksi akibat beban aksial eksentris 1 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan pelat perkerasan dari analisis *FEM*, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah melintang (arah melebar dari pusat beban lateral). Defleksi di *sensor* nomor TPT-1 sebesar 0,7 mm berada di tengah pelat perkerasan dekat pusat beban aksial eksentris, kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *sensor* nomor TPP-1A (tepi pelat perkerasan) sebesar 0 mm dan di *sensor* nomor TPP-1B (tepi pelat perkerasan) sebesar 0 mm. Nilai Defleksi tidak signifikan karena pusat beban aksial eksentris dan beban lateral berada diantara kedua tiang, sehingga beban yang ada di atas pelat perkerasan dapat didukung kedua tiang pelat perkerasan.

Tabel 5. 6 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 2 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D

Nomor <i>Sensor</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-1A (Tepi pelat)	0,00
TPT-1 (Tengah pelat, dekat dari Beban)	0,22
TPP-1B (Tepi pelat)	0,00

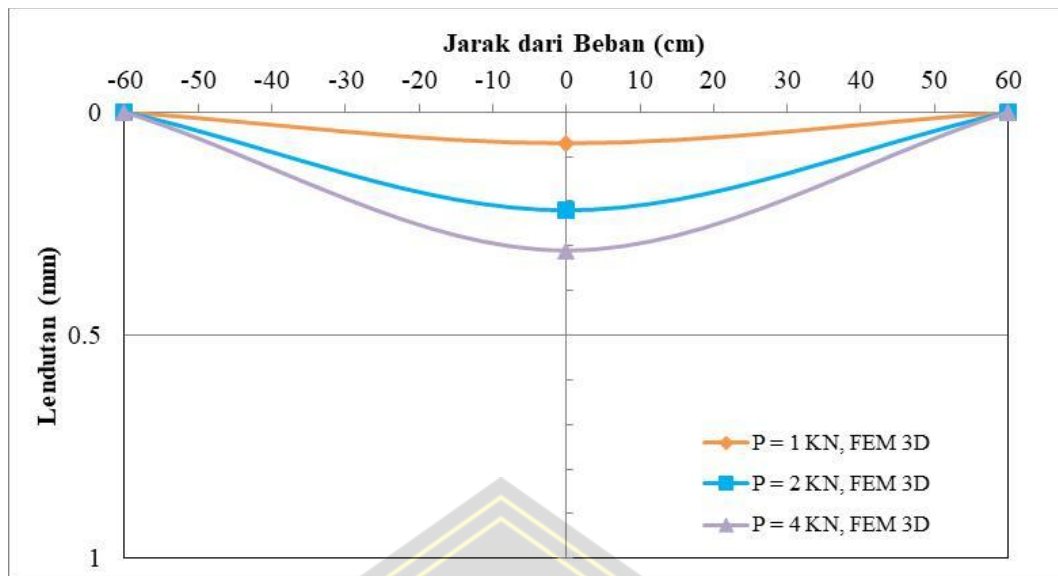
Dari arah melintang (arah lebar jalan) dari Tabel 5.6 bisa dilihat besar Defleksi akibat beban aksial eksentris 2 kN dengan variasi beban lateral berturut-

turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan pelat perkerasan dari analisis *FEM*, baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah melintang (arah melebar dari pusat beban lateral). Defleksi di *sensor* nomor TPT-1 sebesar 0,22 mm berada di tengah pelat perkerasan dekat pusat beban aksial eksentris, kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, di *sensor* nomor TPP-1A dan TPP-1B (dari tepi pelat perkerasan) Defleksi masing-masing sebesar 0 mm. Nilai Defleksi tidak signifikan karena pusat beban berada diantara kedua tiang di bawah pelat perkerasan, sehingga beban yang ada termobilisasi terlebih dahulu di kedua tiang tersebut.

Tabel 5. 7 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial 4 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D

Nomor <i>Sensor</i> pada Pelat	Besar Defleksi (mm)
TPP-1A (Tepi pelat)	0,00
TPT-1 (Tengah pelat, dekat dari Beban)	0,31
TPP-1B (Tepi pelat)	0,00

Untuk arah melintang (arah lebar jalan) Tabel 5.7 bisa dilihat besar Defleksi akibat beban aksial eksentris 4 kN dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan pelat perkerasan, dari analisis *FEM* baik di kedua tepi pelat perkerasan maupun di tengah pelat perkerasan arah melintang (arah melebar dari pusat beban lateral). Defleksi di *sensor* nomor TPT-1 sebesar 0,31 mm berada di tengah pelat dekat pusat beban aksial eksentris dan beban lateral, kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *sensor* nomor TPP-1A (tepi pelat perkerasan) sebesar 0 mm dan di *sensor* nomor TPP-1B (tepi pelat) sebesar 0 mm. Nilai Defleksi pelat perkerasan cukup signifikan karena sudah terjadi *gap* di sekitar tiang akibat adanya beban aksial eksentris dan beban lateral, adanya *gap* di antara tanah dengan tiang akan mengakibatkan berkurangnya lekatan antara tanah dengan tiang perkerasan, sehingga daya dukung tiang berkurang dan diikuti Defleksi pelat perkerasan. Dalam analisis *FEM* model ini, beban aksial eksentris 4 kN (10% dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya) dengan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN adalah Defleksi pelat perkerasan yang paling besar, yaitu 0,31 mm.



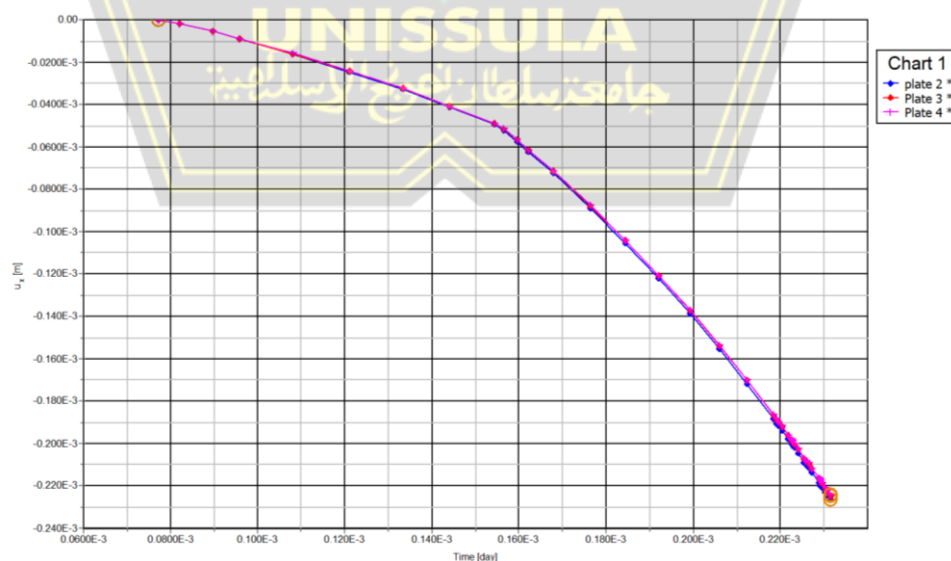
Gambar 5. 4 Defleksi Pelat arah melintang akibat beban aksial dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D

Pola lendutan maksimum untuk arah melintang (arah lebar jalan) pelat terpaku di tulangan dari analisis *FEM* bisa dilihat pada Gambar 5.4 besar Defleksi akibat beban aksial eksentris bervariasi dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan pelat perkerasan. Dari analisis *FEM* baik di kedua tepi pelat perkerasan (arah melebar dari pusat beban lateral). Defleksi di *sensor* nomor TPT-1 sebesar 31% berada di dekat pusat beban aksial eksentris dan beban lateral, kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *sensor* nomor TPP-1A (tepi pelat perkerasan) sebesar 0 mm dan di *sensor* nomor TPP-1B (tepi pelat perkerasan) sebesar 0 mm. Nilai Defleksi pelat perkerasan cukup signifikan karena sudah terjadi *gap* di sekitar tiang akibat adanya beban aksial eksentris dan beban lateral, adanya *gap* di antara tanah dengan tiang akan mengakibatkan berkurangnya lekatan antara tanah dengan tiang perkerasan, sehingga daya dukung tiang berkurang dan diikuti Defleksi pelat perkerasan. Dalam analisis *FEM* model ini, beban aksial eksentris 4 kN (10% dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya) dengan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN adalah Defleksi pelat perkerasan yang paling besar, yaitu 0,31 mm.

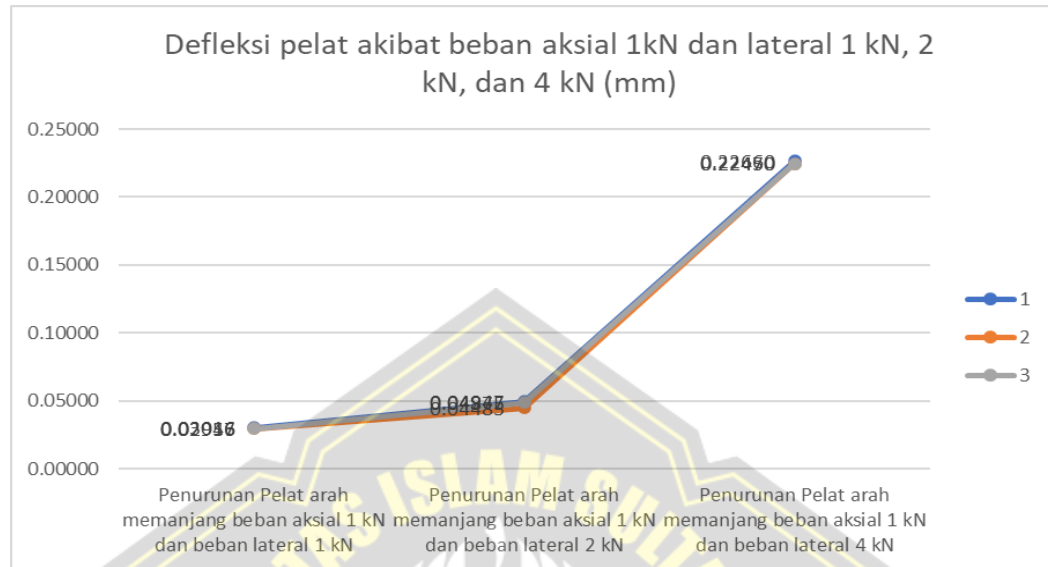
Tabel 5. 8 Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 1 arah u_x

Defleksi pelat akibat beban aksial 1 kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)		Penurunan pelat (mm)		
		1	2	3
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_x	0.03016	0.02956	0.02947
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 2 kN		0.04947	0.04485	0.04875
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 4 kN		0.22660	0.22470	0.22450

Dari Tabel 5.8 dapat dilihat besar Defleksi pelat arah u_x akibat beban aksial eksentris 1 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan bawah. Pada pembebanan di model 1 nilai *displacement* u_x nilai tertinggi terjadi pada monitoring di pelat tengah sebesar 0.22660 mm pada saat pembebanan lateral 4 kN. Penomoran pelat perkerasan mengacu pada Gambar 5.1 untuk semua pemodelan dari analisis FEM, baik pemodelan 1, pemodelan 2, dan pemodelan 3.

**Gambar 5. 5** Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 1 Arah u_x

Dapat dilihat padai Gambar 5.5 analisis *Numerik* untuk pembebanan 1 kN di model 1 nilai *displacement* u_x nilai tertinggi terjadi pada monitoring di pelat tengah sebesar 0.22660 mm pada saat pembebanan lateral 4 kN.



Gambar 5. 6 Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 1 Arah u_x

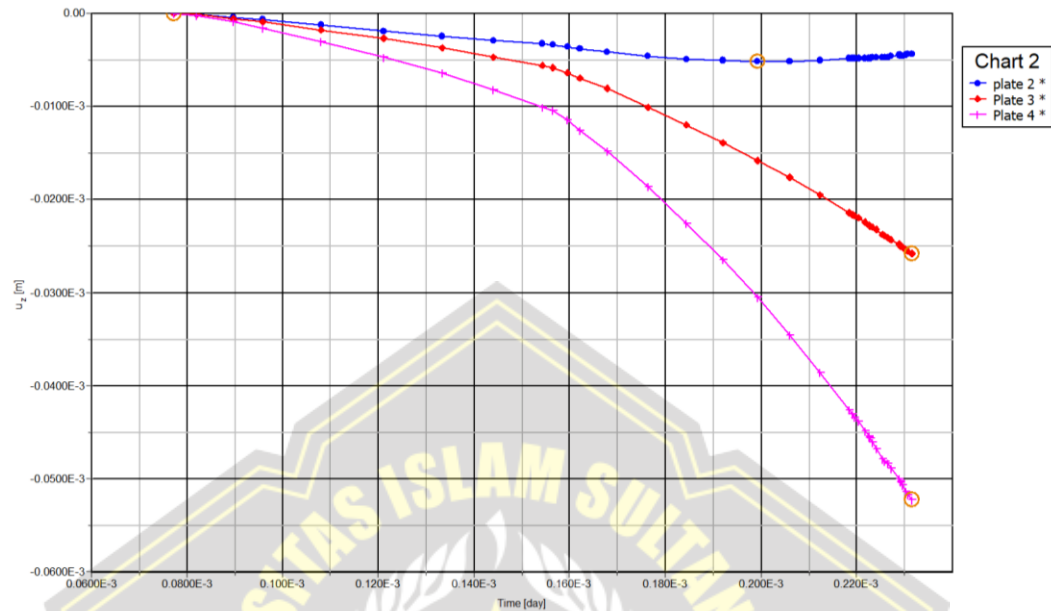
Pada Gambar 5.6 diperlihatkan hubungan antara nilai Defleksi dengan beban pada pelat perkerasan di sensor TPP-1, TPT-2, dan sensor TPP-3 yang terpasang pada model 1 dengan pembebanan aksial eksentris sebesar 1 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, besar Defleksi pelat arah u_x di tulangan bawah.

Tabel 5. 9 Hasil Validasi Numerik Pemodelan 1 arah u_z

Defleksi plat akibat beban aksial 1kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)		Penurunan pelat (mm)		
		1	2	3
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_z	0.06907	0.04063	0.02069
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 2 kN		0.00327	0.00563	0.01009
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 4 kN		0.00432	0.02577	0.05226

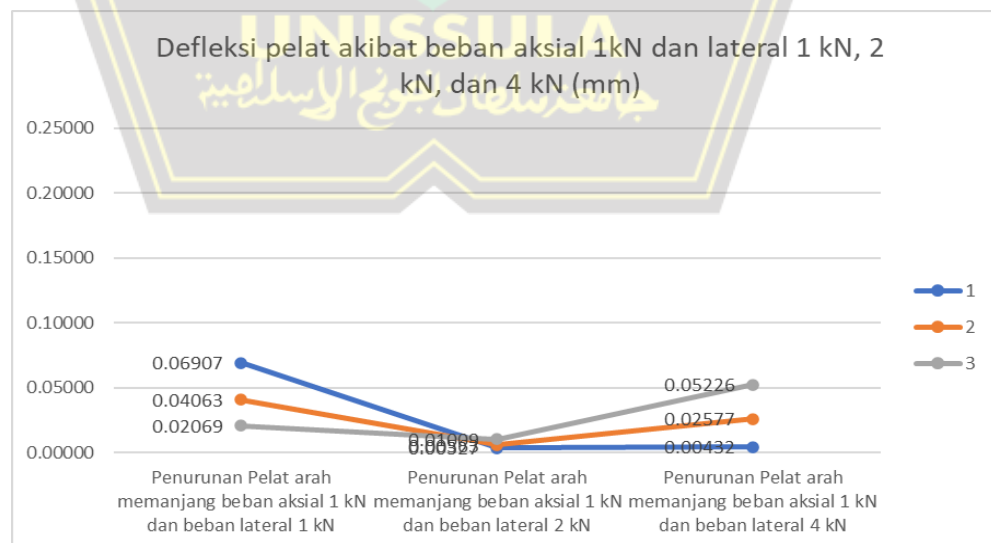
Dari Tabel 5.9 dapat dilihat besar Defleksi pelat arah u_z akibat beban aksial eksentris 1 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan bawah. Pada

pembebanan di model 1 nilai *displacement* u_z nilai tertinggi terjadi pada monitoring di pelat dekat dari beban sebesar 0.06907 mm pada saat pembebanan lateral 1 kN.



Gambar 5. 7 Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 1 u_z

Dapat dilihat pada Gambar 5.7 analisis *Numerik* untuk pembebanan aksial eksentris 1 kN di model 1 nilai *displacement* u_z nilai tertinggi terjadi pada monitoring di pelat dekat dari beban sebesar 0.06907 mm pada saat pembebanan lateral 1 kN.



Gambar 5. 8 Hasil Validasi Grafik Excel pemodelan 1 arah u_z

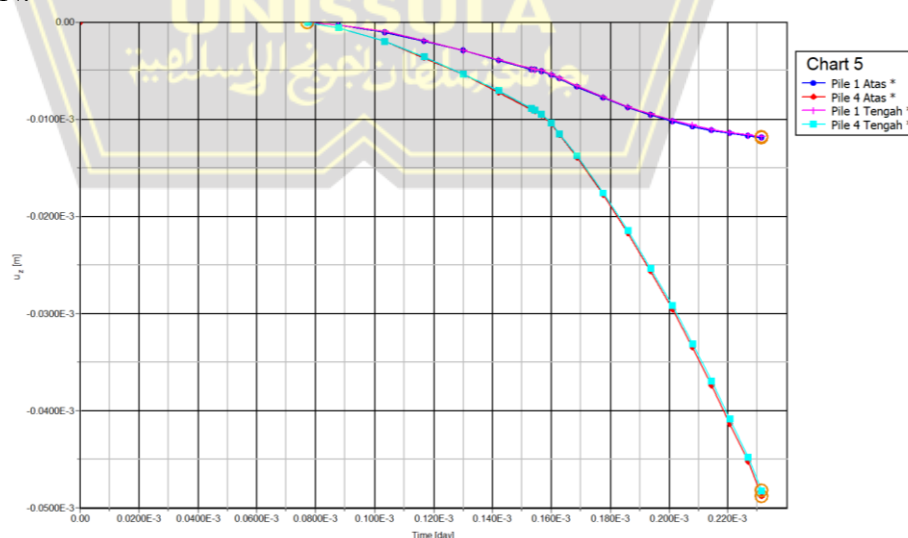
Pada Gambar 5.8 diperlihatkan hubungan antara nilai Defleksi dengan beban pada pelat perkerasan di sensor TPP-1, TPT-2, dan sensor TPP-3 yang terpasang pada model 1 dengan pembebanan aksial eksentris sebesar 1 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, besar Defleksi pelat arah u_z di tulangan bawah.

Tabel 5. 10 Hasil Validasi Numerik Pemodelan 2 arah u_z

Defleksi pelat akibat beban aksial 2kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)		Penurunan (mm)		
		1	2	3
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_z	0.12330	0.05441	0.00850
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 2 kN		0.00478	0.00577	0.00781
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 4 kN		0.00135	0.02832	0.04583

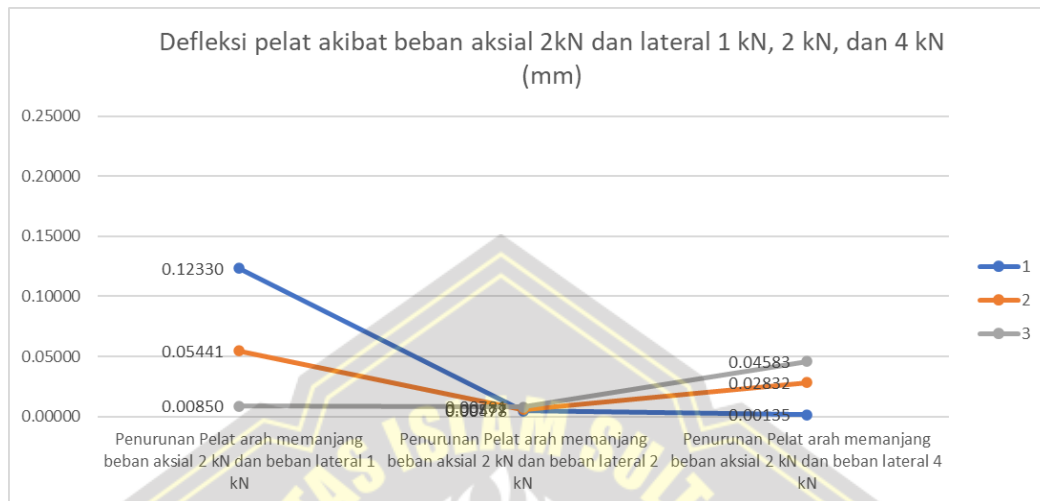
Dari Tabel 5.10 dapat dilihat besar Defleksi pelat arah u_z akibat beban aksial eksentris 2 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan bawah.

Pada pembebanan di model 1 nilai *displacement* u_z nilai tertinggi terjadi pada monitoring di pelat dekat dari beban sebesar 0.12330 mm pada saat pembebanan lateral 1 kN.



Gambar 5. 9 Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 2 arah u_z

Dapat dilihat padai Gambar 5.9 analisis *Numerik* untuk pembebanan aksial eksentris 2 kN di model 1 nilai *displacement* u_z nilai tertinggi terjadi pada monitoring di pelat dekat dari beban sebesar 0.12330 mm pada saat pembebanan lateral 1 kN.



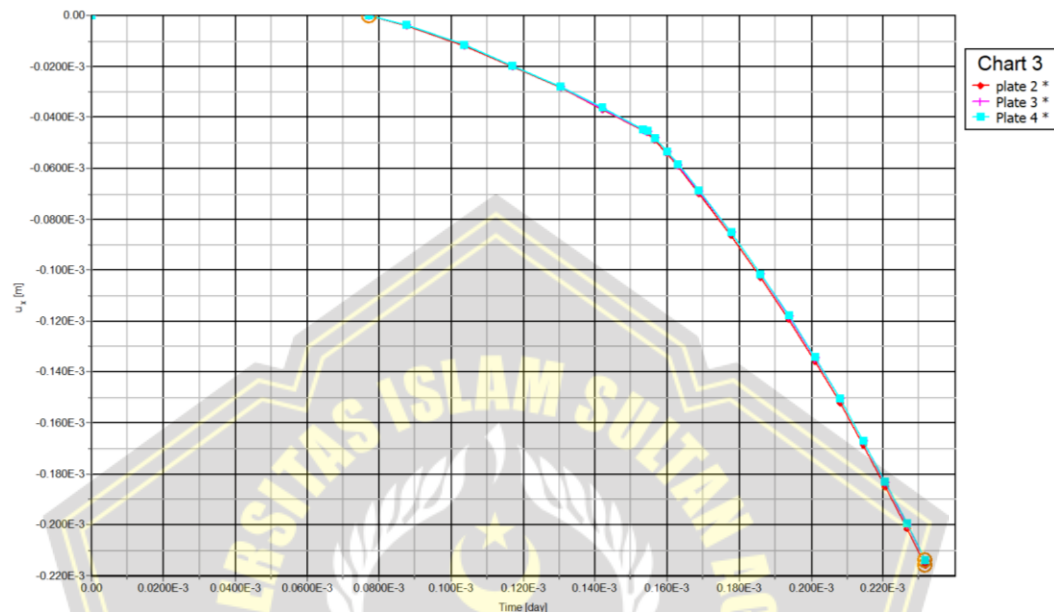
Gambar 5. 10 Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 2 Arah u_z

Pada Gambar 5.10 diperlihatkan hubungan antara nilai Defleksi dengan beban pada pelat perkerasan di sensor TPP-1, TPT-2, dan sensor TPP-3 yang terpasang pada model 2 dengan pembebanan aksial eksentris sebesar 2 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, besar Defleksi pelat arah u_z di tulangan bawah.

Tabel 5. 11 Hasil Validasi Numerik Pemodelan 2 Arah u_x

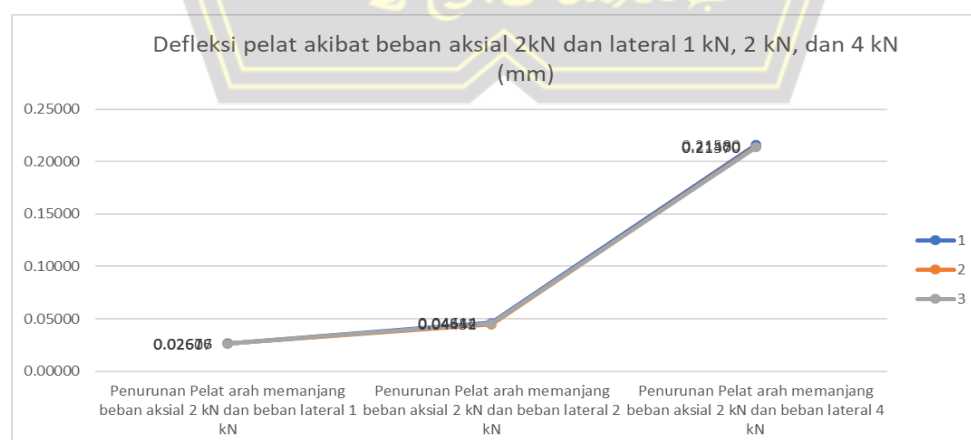
Defleksi pelat akibat beban aksial 2kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)		Penurunan (mm)		
		1	2	3
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_x	0.02676	0.02616	0.02607
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 2 kN		0.04614	0.04452	0.04542
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 4 kN		0.21580	0.21400	0.21370

Dari Tabel 5.11 dapat dilihat besar Defleksi pelat arah u_x akibat beban aksial eksentris 2 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan bawah. Pada pembebanan di model 2 nilai *displacement* u_x nilai tertinggi terjadi pada monitoring di pelat dekat dari beban sebesar 0.21400 mm pada saat pembebanan lateral 4 kN.



Gambar 5. 11 Hasil Validasi Grafik Numerik pemodelan 2 Arah u_x

Dapat dilihat pada Gambar 5.11 analisis *Numerik* untuk pembebanan aksial eksentris 2 kN di model 2 nilai *displacement* u_x nilai tertinggi terjadi pada monitoring di pelat dekat dari beban sebesar 0.21400 mm pada saat pembebanan lateral 4 kN.



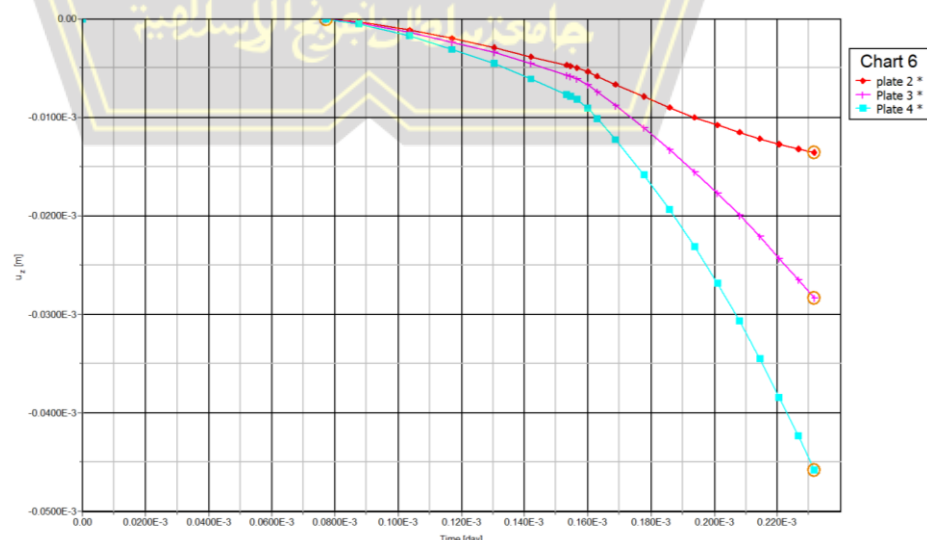
Gambar 5. 12 Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 2 Arah u_x

Pada Gambar 5.12 diperlihatkan hubungan antara nilai Defleksi dengan beban pada pelat perkerasan di sensor TPP-1, TPT-2, dan sensor TPP-3 yang terpasang pada model 2 dengan pembebanan aksial eksentris sebesar 2 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, besar Defleksi pelat arah u_z di tulangan bawah.

Tabel 5. 12 Hasil Validasi Numerik Pemodelan 3 Arah u_z

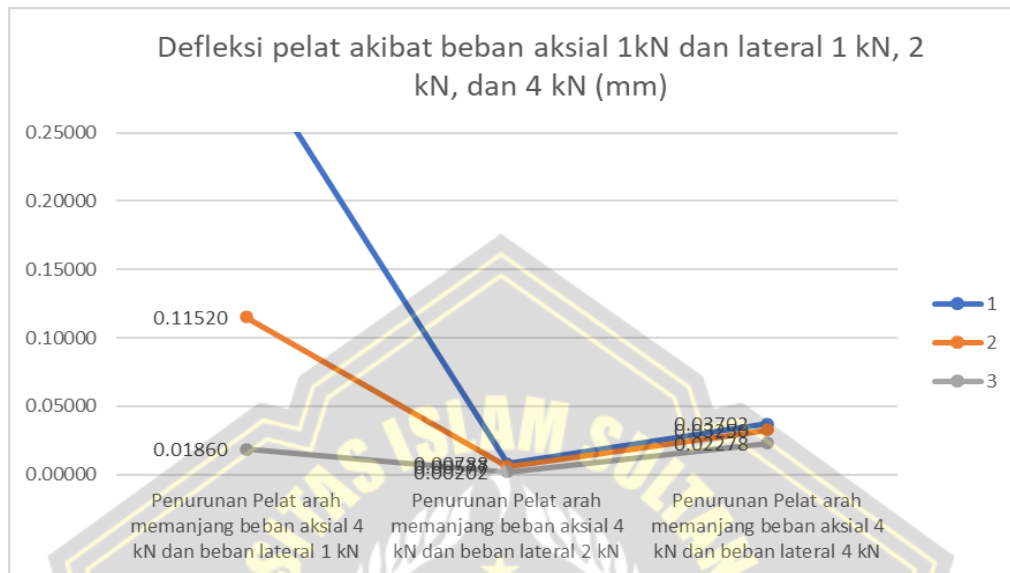
Defleksi pelat akibat beban aksial 4kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)		Penurunan pelat (mm)		
		1	2	3
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_z	0.30900	0.11520	0.01860
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 2 kN		0.00788	0.00577	0.00202
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 4 kN		0.03702	0.03250	0.02278

Dari Tabel 5.12 dapat dilihat besar Defleksi pelat arah u_z akibat beban aksial eksentris 4 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan bawah. Pada pembebanan di model 1 nilai Defleksi arah u_z tertinggi terjadi pada monitoring di pelat dekat dari beban aksial eksentris dan beban lateral sebesar 0.30900 mm pada saat pembebanan lateral sebesar 1 kN.



Gambar 5. 13 Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 3 Arah u_z

Dapat dilihat pada Gambar 5.13 analisis *Numerik* untuk pembebanan aksial eksentris 4 kN di model 1 nilai *displacement* u_z nilai tertinggi terjadi pada monitoring di pelat dekat dari beban sebesar 0.30900 mm pada saat pembebanan lateral 1 kN.



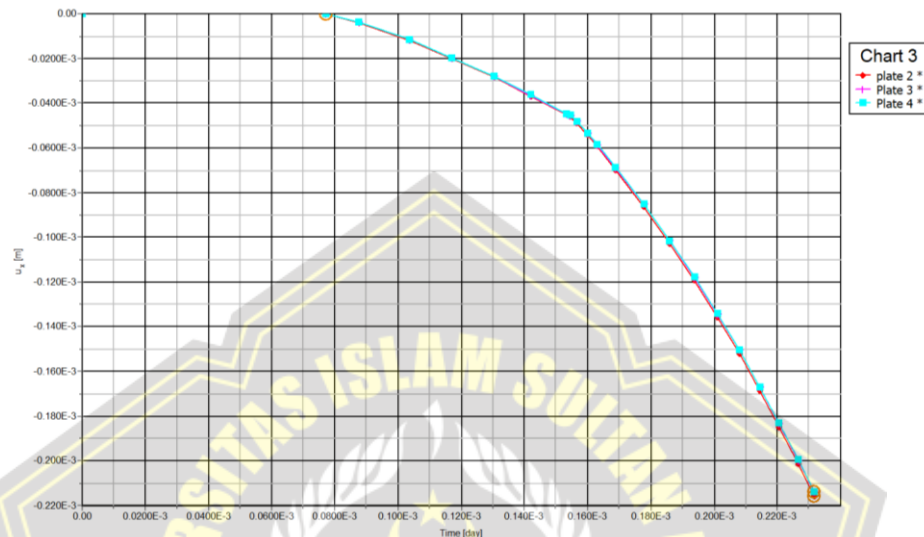
Gambar 5. 14 Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 3 Arah u_z

Pada Gambar 5.14 diperlihatkan hubungan antara nilai Defleksi dengan beban pada pelat perkerasan di sensor TPP-1, TPT-2, dan sensor TPP-3 yang terpasang pada model 3 dengan pembebanan aksial eksentris sebesar 4 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, besar Defleksi pelat arah u_z di tulangan bawah.

Tabel 5. 13 Hasil Validasi Numerik Pemodelan 3 Arah u_x

Defleksi pelat akibat beban aksial 4kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)		Penurunan pelat (mm)		
		1	2	3
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_x	0.00990	0.00935	0.00929
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 2 kN		0.03570	0.03507	0.03495
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 4 kN		0.18650	0.18460	0.18430

Dari Tabel 5.13 dapat dilihat besar Defleksi pelat arah u_x akibat beban aksial eksentris 4 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan bawah. Pada pembebanan di model 1 nilai *displacement* u_x nilai tertinggi terjadi pada monitoring di pelat dekat dari beban sebesar 0.18650 mm pada saat pembebanan lateral 4 kN.



Gambar 5. 15 Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 3 Arah u_x

Dapat dilihat pada Gambar 5.15 analisis *Numerik* untuk pembebanan aksial eksentris 4 kN di model 1 nilai *displacement* u_x nilai tertinggi terjadi pada monitoring di pelat dekat dari beban aksial eksentris dan beban lateral sebesar 0.18650 pada saat pembebanan lateral 4 kN.



Gambar 5. 16 Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 3 u_x

Pada Gambar 5.16 diperlihatkan hubungan antara nilai Defleksi dengan beban pada pelat perkerasan di sensor TPP-1, TPT-2, dan sensor TPP-3 yang terpasang pada model 3 dengan pembebanan aksial eksentris sebesar 4 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, besar Defleksi pelat arah u_x di tulangan bawah.

Tabel 5. 14 Kesimpulan Hasil Defleksi Pelat

Kesimpulan Hasil Displacement Pelat

Defleksi pelat akibat beban aksial 1 kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)				Defleksi pelat akibat beban aksial 2 kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)				Defleksi pelat akibat beban aksial 4 kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)			
Penurunan pelat (mm)				Penurunan pelat (mm)				Penurunan pelat (mm)			
123				123				123			
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 1 kN				Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 1 kN				Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 1 kN			
0.030160.029560.02947				0.123300.054410.00830				0.009900.009350.00925			
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 2 kN				Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 2 kN				Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 2 kN			
0.049470.044850.04875				0.004780.005770.00781				0.035700.035070.03495			
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 4 kN				Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 4 kN				Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 4 kN			
0.226600.224700.22450				0.001350.028320.04383				0.186500.184600.18430			
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 1 kN				Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 1 kN				Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 1 kN			
0.069070.040630.02069				0.026760.026160.02607				0.309000.115200.01860			
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 2 kN				Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 2 kN				Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 2 kN			
0.003270.005630.01009				0.046140.044520.04542				0.007880.005770.00202			
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 4 kN				Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 4 kN				Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 4 kN			
0.004320.025770.05226				0.215800.214000.21370				0.037020.032500.02278			

Pada seluruh pemodelan nilai displacement paling tinggi yang terjadi pada plate tepi yaitu pada pembebanan vertikal 4kN dan lateral 1kN pada model ke 3 dengan nilai displacement sebesar 0.309 mm ke arah u_z

Untuk menganalisis besarnya defleksi tiang pelat perkerasan, caranya sama seperti uji model di laboratorium. Untuk beban aksial eksentris bervariasi dari 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, sedang beban lateral bervariasi dari 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, dengan interval waktu penambahan beban lateral tiap 20 detik. Dari analisis *FEM* di dapatkan hasil defleksi tiang terbesar seperti dalam Tabel 5.15 di bawah.

Tabel 5. 15 Defleksi tiang akibat beban Aksial eksentris 1 kN dan Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari FEM 3D

Nomor <i>Sensor</i> pada Tiang	Defleksi (mm)
TAA-4 (tulangan atas)	0,22
TAT-5 (tulangan tengah)	0,06
TAA-6 (tulangan atas)	0,22
TAT-7 (tulangan tengah)	0,05

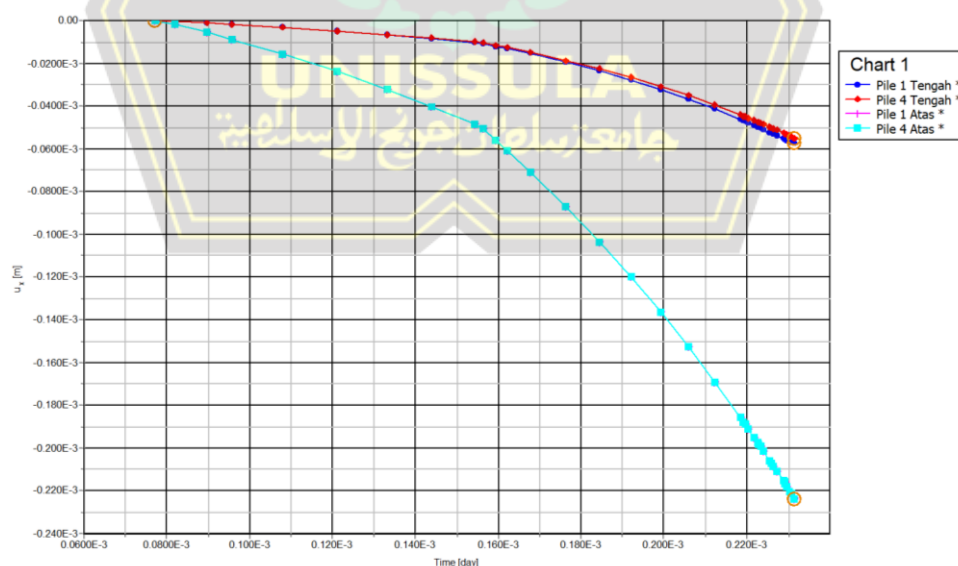
Besarnya defleksi tiang akibat beban aksial eksentris 1 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dari analisis *FEM* 3D dapat dilihat dari Tabel 5.15, Dari tabel bisa dilihat bahwa *sensor* nomor TAA-4 di tulangan bagian atas tiang mengalami defleksi yang lebih besar bila dibandingkan defleksi di *sensor* nomor TAT-5 di tulangan bagian tengah tiang. Maka tiang *sensor* nomor TAA-4 besarnya defleksi

0,22 mm sedangkan sensor nomor TAT-5 besar defleksi 0,6 mm. Dari analisis *FEM* 3D defleksi tiang 0,22 mm adalah angka defleksi yang terbesar.

Tabel 5. 16 Hasil Defleksi Pile validasi Numerik Pemodelan 1 arah u_x

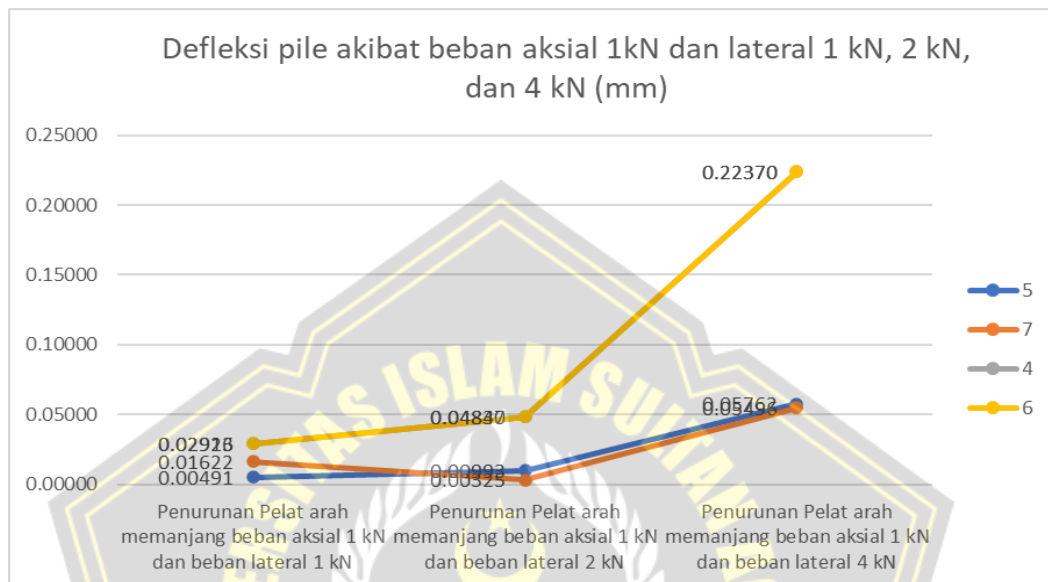
Defleksi pile akibat beban aksial 1kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)		Penurunan Pile (mm)			
		5	7	4	6
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_x	0.00491	0.01622	0.02913	0.02926
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 2 kN		0.00993	0.00325	0.04837	0.04840
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 4 kN		0.05762	0.05496	0.22370	0.22370

Dari Tabel 5.16 dapat dilihat besar defleksi *pile* (tiang) arah u_x akibat beban aksial eksentris 1 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN. Pada pembebanan di model 1 nilai defleksi *pile* arah u_x nilai tertinggi yang terjadi pada monitoring di *pile* atas, baik *pile* yang dekat dari beban aksial eksentris dan beban lateral (*pile* 1) maupun *pile* yang jauh dari beban aksial eksentris dan beban lateral (*pile* 4) sebesar 0.22370 mm pada saat pembebanan lateral 4 kN.



Gambar 5. 17 Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 1 arah u_x

Dapat dilihat pada Gambar 5.17 analisis *Numerik* untuk pembebanan aksial eksentris 1 kN di model 1 nilai defleksi tiang arah u_x nilai tertinggi terjadi pada monitoring di *pile* atas, baik yang dekat dari beban aksial eksentris dan beban lateral maupun yang jauh dari beban aksial eksentris dan beban lateral sebesar 0.22370 mm pada saat pembebanan lateral 4 kN.



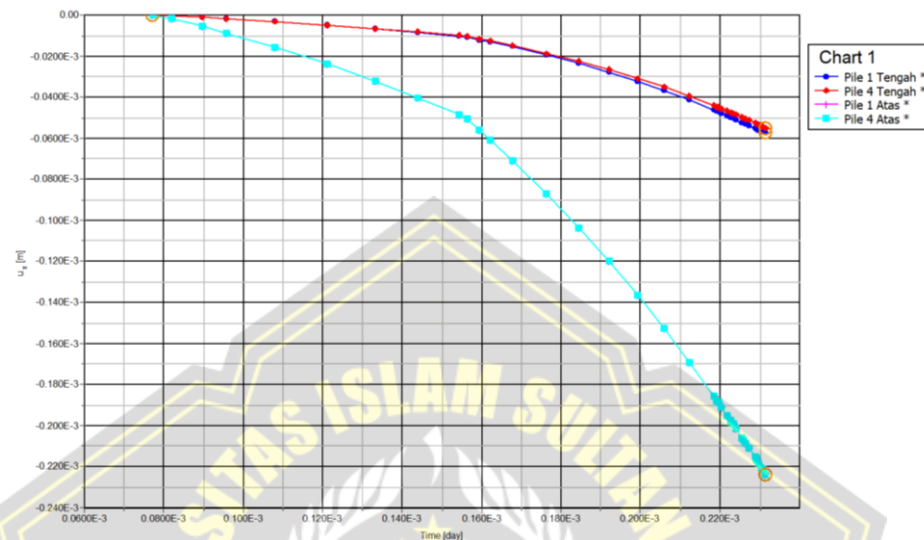
Gambar 5. 18 Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 1 arah u_x

Pada Gambar 5.18 diperlihatkan hubungan antara nilai defleksi *pile* dengan beban di sensor nomor TAA-4, TAT-5 TAA-6, dan TAT-7 yang terpasang pada *pile* model 1 dengan pembebanan aksial eksentris sebesar 1 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, besar defleksi *pile* arah u_x .

Tabel 5. 17 Hasil Defleksi Pile validasi Numerik Pemodelan 1 u_z

Defleksi pile akibat beban aksial 1kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)		Penurunan Pile (mm)			
		5	7	4	6
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_z	0.05022	0.01801	0.05064	0.01805
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 2 kN		0.00334	0.01126	0.00338	0.01138
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 4 kN		0.00308	0.05450	0.00309	0.05510

Dari Tabel 5.17 dapat dilihat besar Defleksi *pile* (tiang) arah u_z akibat beban aksial eksentris 1 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN. Pada pembebanan di model 1 nilai Defleksi *pile* arah u_z nilai tertinggi yang terjadi pada monitoring di *pile* atas, *pile* yang jauh dari beban aksial eksentris dan beban lateral (*pile* 6) sebesar 0.05510 mm pada saat pembebanan lateral 4 kN.



Gambar 5. 19 Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 1 arah u_z

Dapat dilihat pada Gambar 5.19 analisis *Numerik* untuk pembebanan aksial eksentris 1 kN di model 1 nilai Defleksi tiang arah u_z nilai tertinggi terjadi pada monitoring di *pile* atas, *pile* yang jauh dari beban aksial eksentris dan beban lateral sebesar 0.05510 mm pada saat pembebanan lateral sebesar 4 kN.



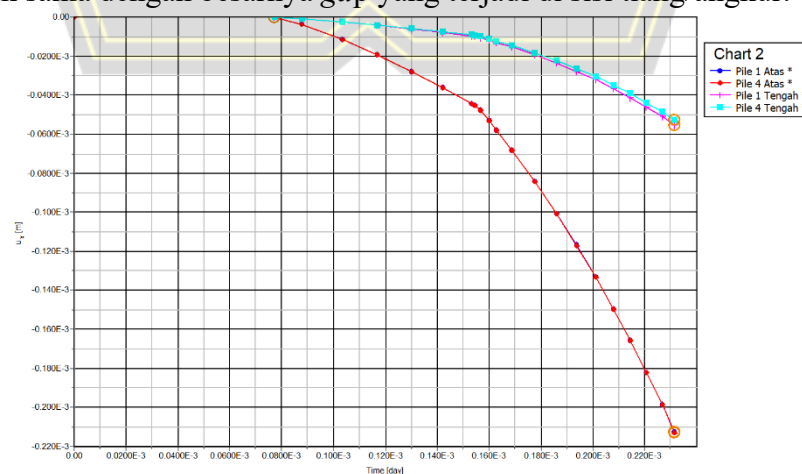
Gambar 5. 20 Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 1 arah u_z

Pada Gambar 5.20 diperlihatkan hubungan antara nilai Defleksi *pile* dengan beban di sensor nomor TAA-4, TAT-5 TAA-6, dan TAT-7 yang terpasang pada *pile* model 1 dengan pembebanan aksial eksentris sebesar 1 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, besar Defleksi *pile* arah u_x .

Tabel 5. 18 Hasil Defleksi Pile validasi Numerik Pemodelan 2 arah u_x

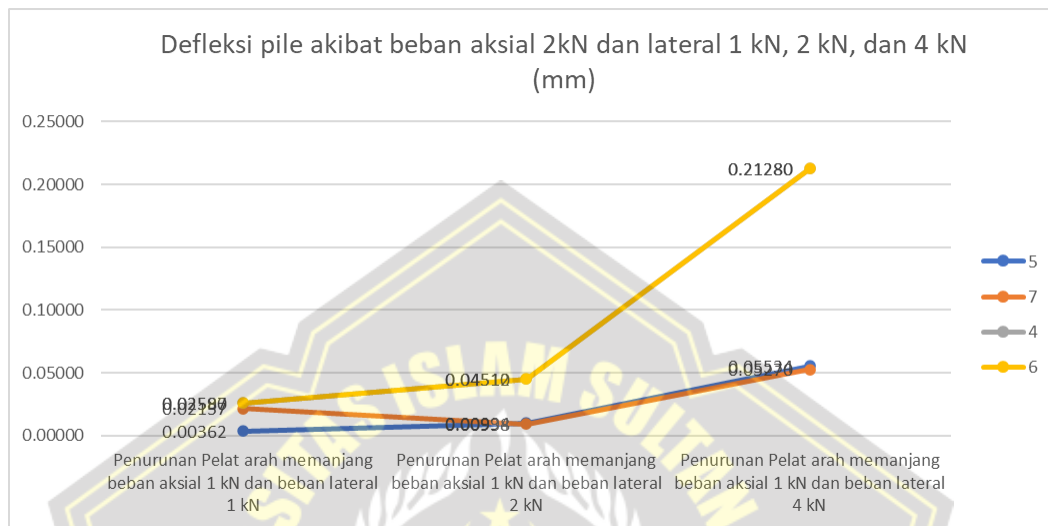
Defleksi pile akibat beban aksial 2kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)		Penurunan Pile Tengah (mm)			
		5	7	4	6
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_x	0.00362	0.02157	0.02580	0.02597
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 2 kN		0.00994	0.00938	0.04510	0.04512
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 4 kN		0.05534	0.05270	0.21280	0.21280

Dari Tabel 5.17 dapat dilihat besar defleksi *pile* (tiang) arah u_x akibat beban aksial eksentris 2 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN. Pada pembebanan di model 2 nilai defleksi *pile* arah u_x nilai tertinggi yang terjadi pada monitoring di *pile* atas, baik *pile* yang dekat dari beban aksial eksentris dan beban lateral (*pile* 1) maupun *pile* yang jauh dari beban aksial eksentris dan beban lateral (*pile* 4) sebesar 0.21280 mm pada saat pembebanan lateral 4 kN. Besarnya defleksi maksimum sama dengan besarnya gap yang terjadi di sisi tiang/angkur.



Gambar 5. 21 Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 2 arah u_x

Dapat dilihat pada Gambar 5.21 analisis *Numerik* untuk pembebanan aksial eksentris 2 kN di model 2 nilai defleksi tiang arah u_x nilai tertinggi terjadi pada monitoring di *pile* atas, baik *pile* yang dekat dari beban aksial eksentris dan lateral maupun *pile* yang jauh dari beban aksial eksentris dan beban lateral sebesar 0.21280 mm pada saat pembebanan lateral sebesar 4 kN.



Gambar 5.22 Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 2 arah u_x

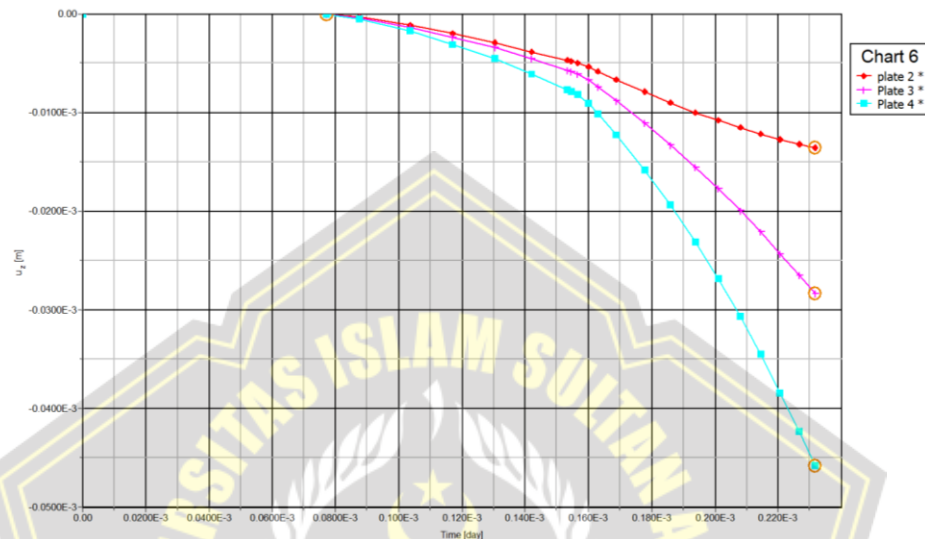
Pada Gambar 5.22 diperlihatkan hubungan antara nilai defleksi *pile* dengan beban di sensor nomor TAA-4, TAT-5 TAA-6, dan TAT-7 yang terpasang pada *pile* model 2 dengan pembebanan aksial eksentris sebesar 2 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, besar defleksi *pile* arah u_x .

Tabel 5.19 Hasil Defleksi Pile validasi Numerik Pemodelan 2 arah u_z

Defleksi pile akibat beban aksial 2kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)		Penurunan Pile Tengah (mm)			
		5	7	4	6
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_z	0.08777	0.00419	0.08864	0.00480
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 2 kN		0.00484	0.00905	0.00490	0.00917
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 4 kN		0.01174	0.04878	0.01186	0.04821

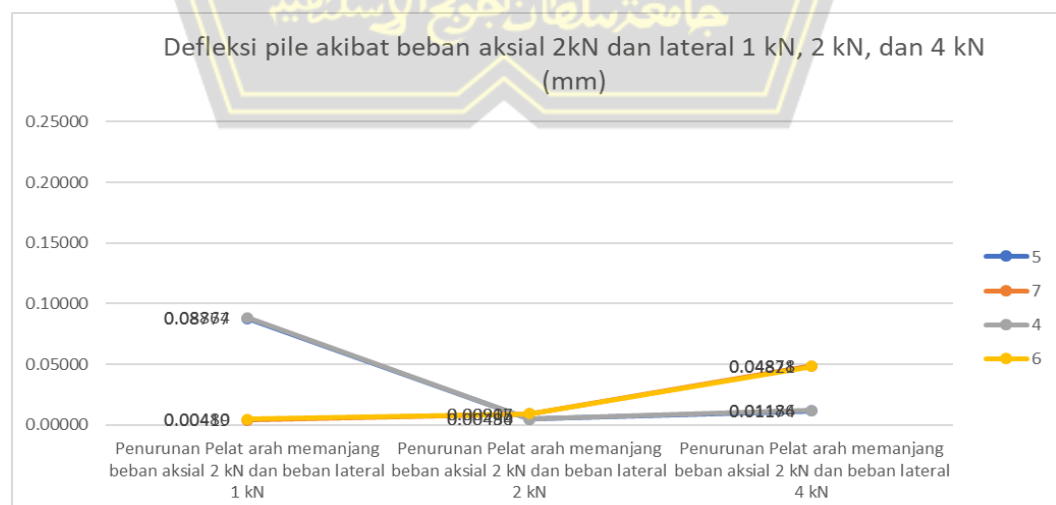
Dari Tabel 5.19 dapat dilihat besar Defleksi *pile* (tiang) arah u_z akibat beban aksial eksentris 2 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN.

Pada pembebanan di model 2 nilai Defleksi *pile* arah u_z nilai tertinggi yang terjadi pada monitoring di *pile* atas, *pile* yang dekat dari beban aksial eksentris dan beban lateral (*pile* 4) sebesar 0.08864 mm pada saat pembebanan lateral 1 kN.



Gambar 5. 23 Hasil Validasi Grafik Numerik Pemodelan 2 arah u_z

Dapat dilihat pada Gambar 5.23 analisis *Numerik* untuk pembebanan aksial eksentris 2 kN di model 2 nilai Defleksi tiang arah u_z nilai tertinggi terjadi pada monitoring di *pile* atas, *pile* yang dekat dari beban aksial eksentris dan beban lateral sebesar 0.08864 mm pada saat pembebanan lateral sebesar 1 kN.



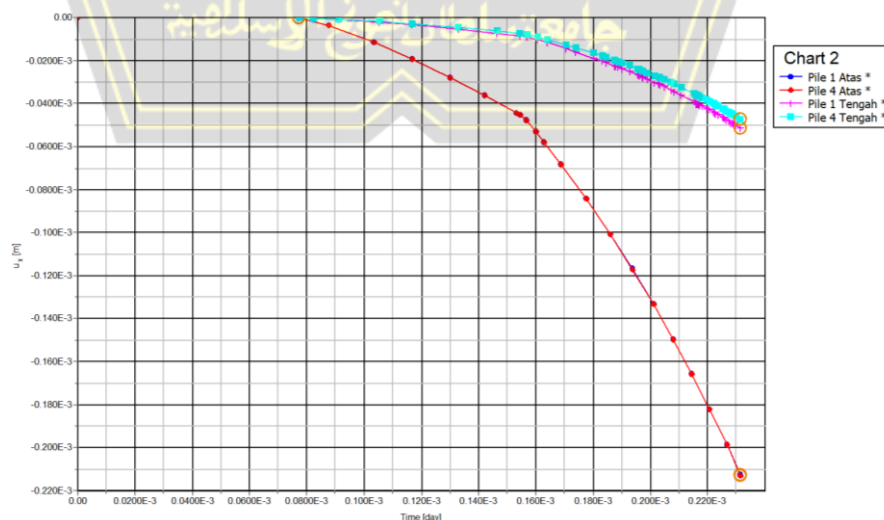
Gambar 5. 24 Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 2 arah u_z

Pada Gambar 5.24 diperlihatkan hubungan antara nilai Defleksi *pile* dengan beban di sensor nomor TAA-4, TAT-5 TAA-6, dan TAT-7 yang terpasang pada *pile* model 2 dengan pembebanan aksial eksentris sebesar 2 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, besar Defleksi *pile* arah u_x .

Tabel 5. 20 Hasil Defleksi Pile validasi Numerik Pemodelan 3 arah u_x

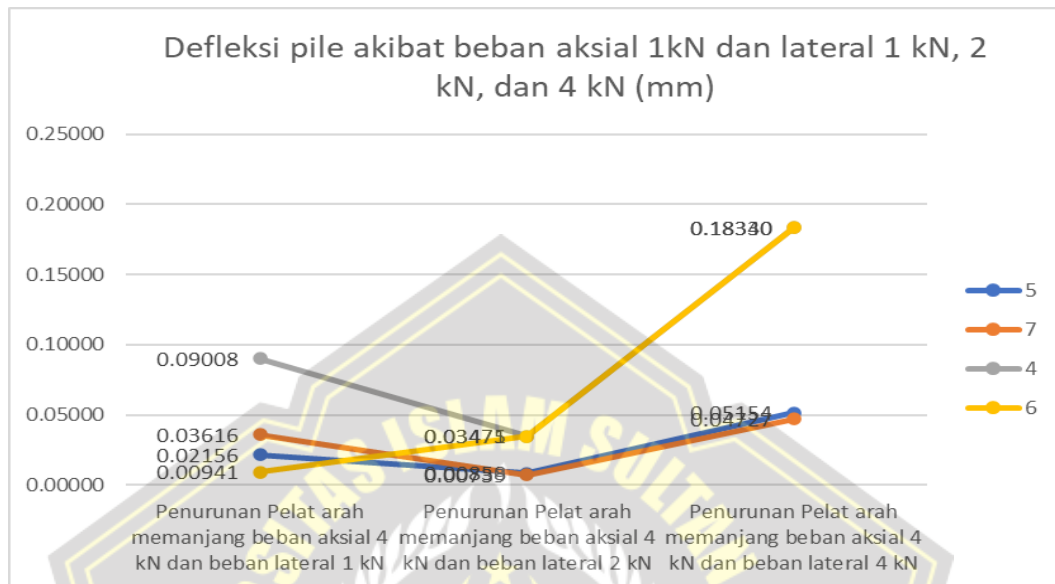
Defleksi pile akibat beban aksial 4kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)		Penurunan Pile (mm)			
		5	7	4	6
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_x	0.02156	0.03616	0.09008	0.00941
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 2 kN		0.00858	0.00739	0.03475	0.03471
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 4 kN		0.05154	0.04727	0.18340	0.18330

Dari Tabel 5.20 dapat dilihat besar defleksi *pile* (tiang) arah u_x akibat beban aksial eksentris 4 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN. Pada pembebanan di model 3 nilai defleksi *pile* arah u_x nilai tertinggi yang terjadi pada monitoring di *pile* atas, *pile* yang dekat dari beban aksial eksentris dan beban lateral (*pile* 4) sebesar 0.18340 mm pada saat pembebanan lateral sebesar 4 kN.



Gambar 5. 25 Hasil Defleksi Pile validasi Grafik Numerik Pemodelan 3 Arah u_x

Dapat dilihat pada Gambar 5.25 analisis *Numerik* untuk pembebanan aksial eksentris 4 kN di model 3 nilai defleksi tiang arah u_x nilai tertinggi terjadi pada monitoring di *pile* atas, *pile* yang dekat dari beban aksial eksentris dan lbeban ateral sebesar 0.18340 mm pada saat pembebanan lateral sebesar 4 kN.



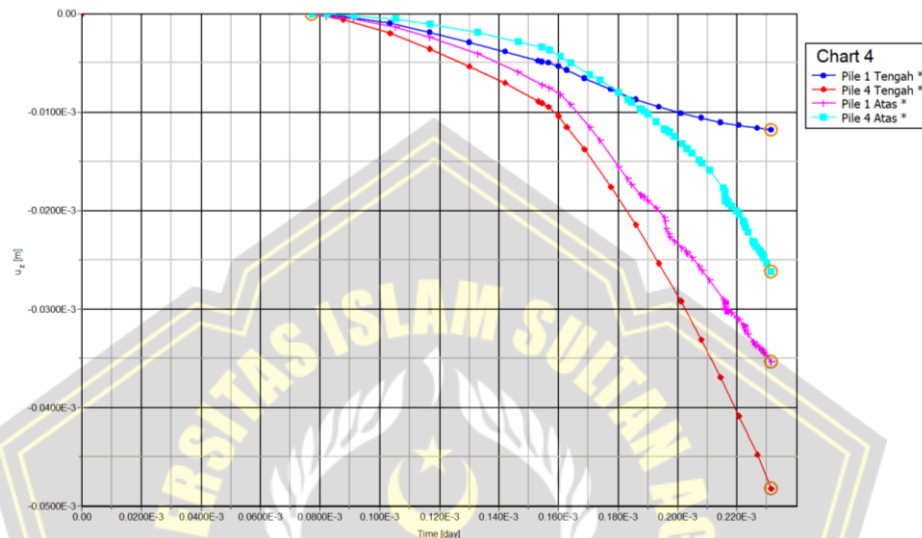
Gambar 5. 26 Hasil Defleksi Pile validasi Grafik Excel Pemodelan 3 Arah u_x

Pada Gambar 5.26 diperlihatkan hubungan antara nilai defleksi *pile* dengan beban di sensor nomor TAA-4, TAT-5 TAA-6, dan TAT-7 yang terpasang pada *pile* model 3 dengan pembebanan aksial eksentris sebesar 4 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, besar defleksi *pile* arah u_x .

Tabel 5. 21 Hasil Defleksi Pile validasi Numerik Pemodelan 3 arah u_z

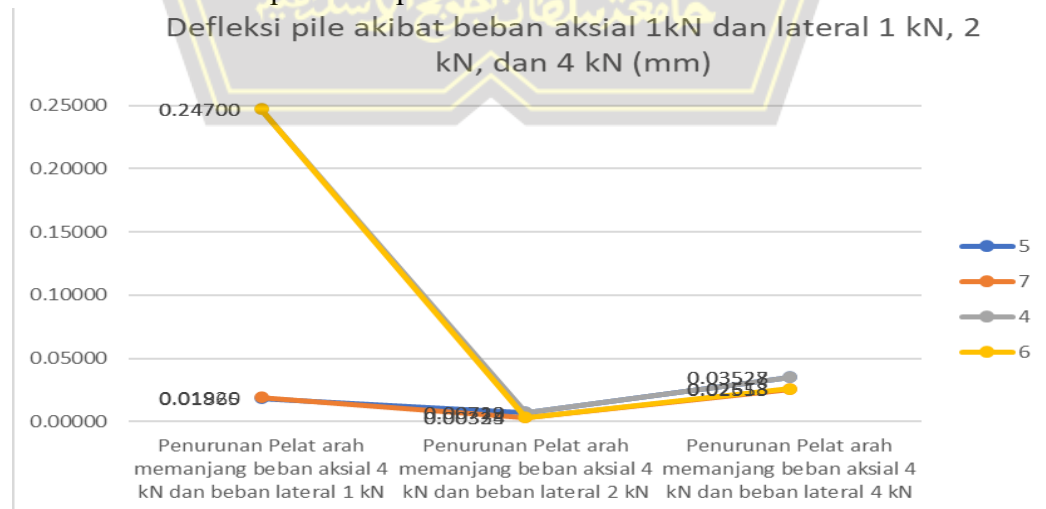
Defleksi pile akibat beban aksial 4kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)		Penurunan Pile (mm)			
		5	7	4	6
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_z	0.01865	0.01920	0.24700	0.24700
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 2 kN		0.00719	0.00325	0.00723	0.00334
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 4 kN		0.03527	0.02553	0.03528	0.02618

Dari Tabel 5.21 dapat dilihat besar Defleksi *pile* (tiang) arah u_z akibat beban aksial eksentris 4 kN dan beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN. Pada pembebanan di model 3 nilai Defleksi *pile* arah u_z nilai tertinggi yang terjadi pada monitoring di *pile* atas, baik *pile* yang dekat dari beban aksial eksentris dan beban lateral (*pile* 1) maupun *pile* yang jauh dari beban aksial eksentris dan beban lateral (*pile* 4) sebesar 0.24700 mm pada saat pembebanan lateral sebesar 1 kN.



Gambar 5. 27 Hasil Defleksi Pile validasi Grafik Numerik Pemodelan 3 arah u_z

Dapat dilihat pada Gambar 5.27 analisis *Numerik* untuk pembebanan aksial eksentris 4 kN di model 3 nilai Defleksi tiang arah u_z nilai tertinggi terjadi pada monitoring di *pile* atas, *pile* yang dekat dari beban aksial eksentris dan beban lateral sebesar 0.24700 mm pada saat pembebanan lateral sebesar 1 kN.



Gambar 5. 28 Hasil Validasi Grafik Excel Pemodelan 3 arah u_x

Pada Gambar 5.28 diperlihatkan hubungan antara nilai Defleksi *pile* dengan beban di *sensor* nomor TAA-4, TAT-5 TAA-6, dan TAT-7 yang terpasang pada *pile* model 3 dengan pembebanan aksial eksentris sebesar 4 kN dan beban lateral sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, besar Defleksi *pile* arah u_z .

Tabel 5. 22 Kesimpulan Hasil Difleksi Pile

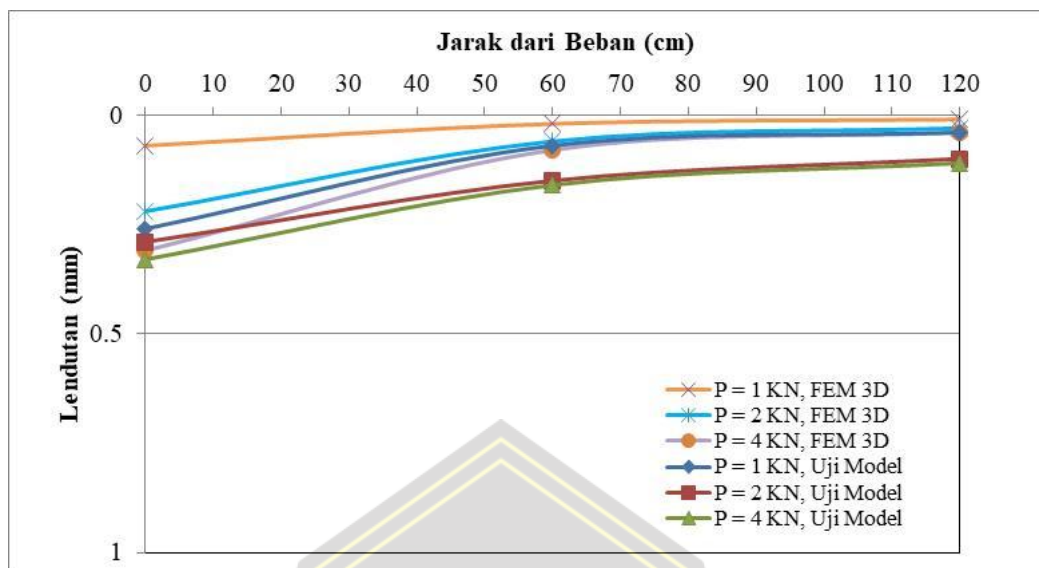
Defleksi pile akibat beban aksial 1kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)		Penurunan Pile (mm)				Defleksi pile akibat beban aksial 2kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)		Penurunan Pile Tengah (mm)				Defleksi pile akibat beban aksial 4kN dan lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN (mm)		Penurunan Pile (mm)			
		5	7	4	6			5	7	4	6			5	7	4	6
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_x	0.00491	0.01622	0.02913	0.02926	Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_z	0.08777	0.00419	0.08864	0.00480	Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_z	0.01865	0.01920	0.24700	0.24700
		0.00993	0.00325	0.04837	0.04840			0.00484	0.00905	0.00490	0.00917			0.00719	0.00325	0.00723	0.00334
		0.05762	0.05496	0.22370	0.22370			0.01174	0.04878	0.01186	0.04821			0.03527	0.02553	0.03528	0.02618
Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 1 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_z	0.05022	0.01801	0.05064	0.01805	Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 2 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_x	0.00362	0.02157	0.02580	0.02597	Penurunan Pelat arah memanjang beban aksial 4 kN dan beban lateral 1 kN	penurunan arah u_x	0.02156	0.03616	0.09008	0.00941
		0.00334	0.01126	0.00338	0.01138			0.00994	0.00938	0.04510	0.04512			0.00858	0.00739	0.03475	0.03471
		0.00308	0.05450	0.00309	0.05510			0.05534	0.05270	0.21280	0.21280			0.05154	0.04727	0.18340	0.18330

Pada seluruh pemodelan *FEM* nilai defleksi *pile* arah u_x tertinggi terjadi di *pile* atas, baik *pile* yang dekat dari beban aksial eksentris dan beban lateral (*pile* 1) maupun *pile* yang jauh dari beban aksial eksentris dan beban lateral (*pile* 4) pada pembebanan aksial eksentris sebesar 1 kN dan beban lateral sebesar 4 kN besar defleksi 0.24700 mm.

Untuk Defleksi *pile* arah u_z nilai tertinggi yang terjadi pada monitoring di *pile* atas, baik *pile* yang dekat dari beban aksial eksentris dan beban lateral (*pile* 1) maupun *pile* yang jauh dari beban aksial eksentris dan beban lateral (*pile* 4) pada pembebanan aksial eksentris sebesar 4 kN dan beban lateral sebesar 1 kN besar Defleksi 0.24700 mm.

5.2 KOMPARASI HASIL UJI MODEL DAN *FEM*

Pada Gambar Grafik di bawah ini bisa dilihat komparasi antara Defleksi pelat perkerasan dari hasil uji model di laboratorium dengan analisis *FEM*. Baik nilai Defleksi pelat arah memanjang di tulangan atas *versus FEM*, Defleksi pelat arah memanjang di tulangan bawah *versus FEM*, Defleksi pelat arah melintang di tulangan atas *versus FEM*, dan Defleksi pelat arah melintang di tulangan bawah *versus FEM*



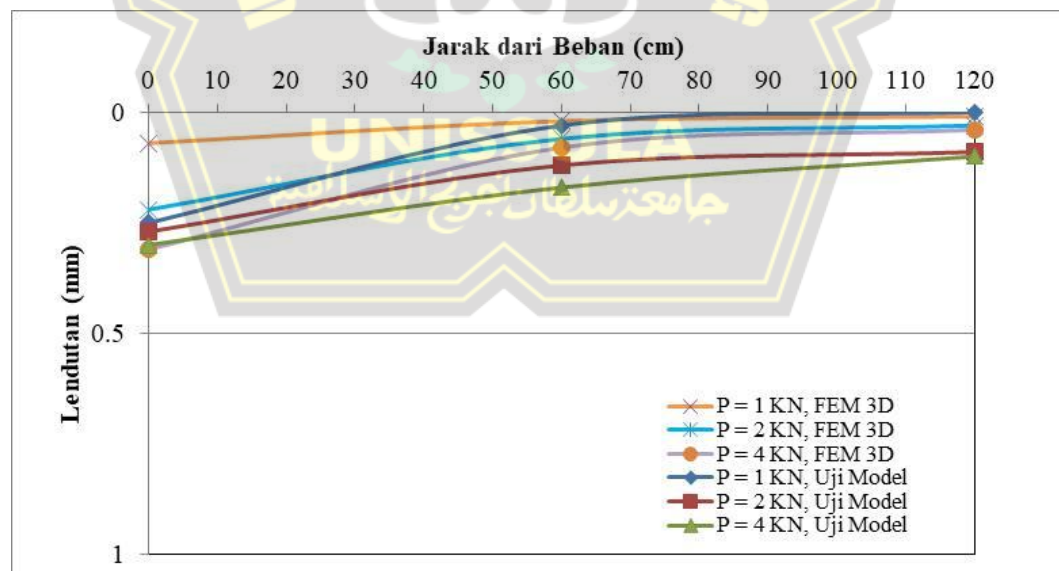
Gambar 5.29 Defleksi pelat arah memanjang di tulangan atas vs FEM 3D

Pola lendutan maksimum pada arah memanjang Pelat Terpakai di tulangan Atas pada Uji Model di laboratorium, *strain gauge* nomor TPP-A1, TPT-A3, dan TPP-A5 (arah memanjang jalan untuk kondisi lapangan) ditunjukkan oleh Gambar 5.28 dapat dilihat bahwa lendutan pelat perkerasan atas menunjukkan bahwa semakin jauh dari pusat beban aksial eksentris, lendutan cenderung semakin kecil, Namun demikian Defleksi yang terjadi pada pelat perkerasan cukup signifikan, untuk beban di atas *strain gauge* nomor TPP-A1 (tepi pelat perkerasan, dekat dari pusat beban aksial eksentris dan lateral) sebesar 0,33 mm, sedangkan di *strain gauge* nomor TPT-A3 (tengah pelat perkerasan) sebesar 0,16 mm dan Defleksi di *strain gauge* nomor TPP-A5 (tepi pelat perkerasan, jauh dari pusat beban aksial eksentris dan lateral) sebesar 0,11 mm. Angka Defleksi pelat perkerasan cukup signifikan karena sudah mulai terjadi *gap* di sekitar tiang akibat adanya beban lateral, yang mengakibatkan berkurangnya daya dukung tiang. Dalam pengujian model di laboratorium ini, beban aksial eksentris 4 kN (10% dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya) dengan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN adalah Defleksi pelat perkerasan sebesar 0,33 mm.

Pola lendutan maksimum pada arah memanjang Pelat Terpakai di tulangan dari analisis *FEM*, *sensor* nomor TPP-1, TPT-2, dan TPP-3 (arah memanjang jalan untuk kondisi lapangan) ditunjukkan oleh Gambar 5.28 dapat dilihat bahwa

lendutan pelat perkerasan menunjukkan bahwa semakin jauh dari pusat beban aksial eksentris, lendutan cenderung semakin kecil, Namun demikian Defleksi yang terjadi pada pelat perkerasan cukup signifikan, untuk beban di atas *sensor* nomor TPP-1 (tepi pelat perkerasan, dekat dari pusat beban aksial eksentris) Defleksi sebesar 0,31 mm, sedangkan di *sensor* nomor TPT-2 (tengah pelat perkerasan) Defleksi sebesar 0,8 mm dan Defleksi di *sensor* nomor TPP-3 (tepi pelat perkerasan, jauh dari pusat beban aksial eksentris dan lateral) Defleksi sebesar 0,4 mm.

Nilai Defleksi pelat perkerasan cukup signifikan karena sudah mulai terjadi *gap* di sekitar tiang akibat adanya beban aksial eksentris bervariasi dan beban lateral bervariasi, yang mengakibatkan berkurangnya daya dukung tiang yang diikuti Defleksi pelat perkerasan. Dalam analisis *FEM* ini, beban aksial eksentris 4 kN (10% dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya) dengan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, tiap penambahan variasi beban lateral dimodelkan dengan interval waktu tiap 20 detik, jadi total waktu yang diperlukan untuk variasi beban lateral adalah 60 detik atau 1 menit, sama seperti pelaksanaan uji model di laboratorium. Didapatkan besar Defleksi pelat perkerasan maksimum, yaitu 0,31 mm dari analisis *FEM* 3D.



Gambar 5. 30 Defleksi pelat arah memanjang di tulangan bawah vs FEM 3D

Dari pola lendutan pada arah memanjang Pelat Terpaku di tulangan bawah dari uji model, *strain gauge* nomor TPP-B2, TPT-B4, dan TPP-B6 (arah

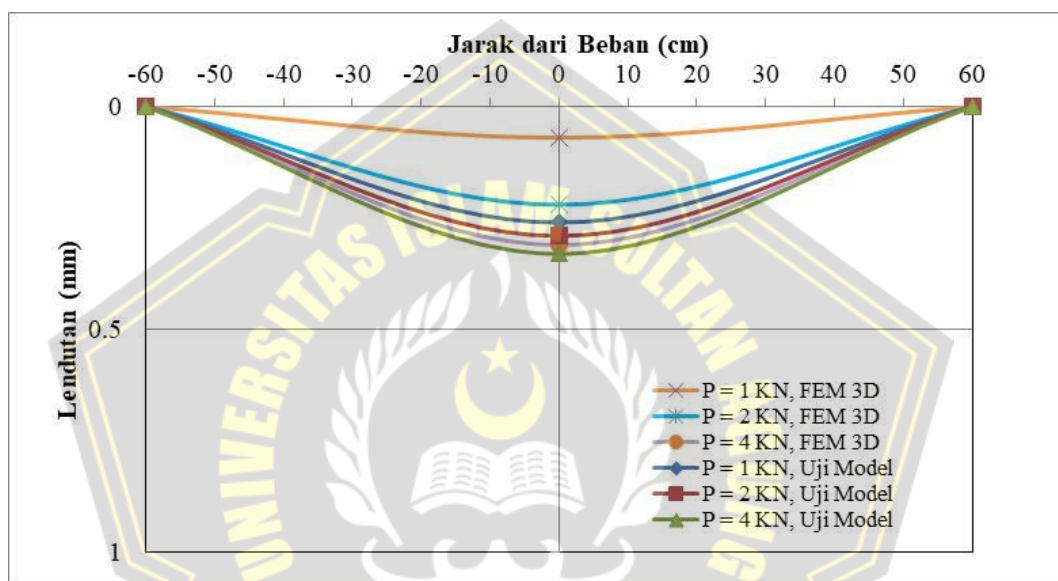
memanjang jalan untuk kondisi lapangan) ditunjukkan oleh Gambar 5.29 dapat dilihat bahwa Defleksi/lendutan pelat perkerasan di tulangan bawah menunjukkan bahwa semakin jauh dari pusat beban aksial eksentris dan lateral, Defleksi/lendutan cenderung semakin kecil, Dimana untuk beban di atas pelat perkerasan (tepi pelat perkerasan, dekat dari pusat beban) di *strain gauge* nomor TPP-B2 besarnya Defleksi/lendutan sebesar 0,30 mm, sedangkan di atas pelat perkerasan *strain gauge* nomor TPT-B4 (tengah pelat perkerasan) Defleksi sebesar 0,17 mm dan Defleksi/lendutan di pelat perkerasan *strain gauge* nomor TPP-B6 (tepi pelat perkerasan, jauh dari pusat beban) penurunan sebesar 0,10 mm.

Baik Defleksi/lendutan pelat perkerasan di tulangan atas dan pelat perkerasan di tulangan bawah menunjukkan bahwa semakin jauh dari pusat beban aksial eksentris dan lateral, besarnya Defleksi/lendutan cenderung semakin kecil, meskipun Defleksi/lendutan kecil, hal ini akan mengakibatkan pelat perkerasan mengalami Defleksi/lendutan yang cukup signifikan. Karena selain pelat perkerasan menerima beban aksial eksentris, pelat perkerasan juga menerima beban lateral, akibat adanya beban lateral, tiang akan mengalami defleksi yang mengakibatkan terjadi *gap* di sekitar tiang, sehingga akibat adanya *gap* akan mengurangi lekatan antara tanah dengan tiang yang berpengaruh pada berkurangnya daya dukung tiang, akibatnya diikuti terjadinya Defleksi pelat perkerasan.

Pola lendutan maksimum pada arah memanjang Pelat Terpaku di tulangan dari analisis *FEM*, *sensor* nomor TPP-1, TPT-2, dan TPP-3 (arah memanjang jalan untuk kondisi lapangan) ditunjukkan oleh Gambar 5.29 dapat dilihat bahwa lendutan pelat perkerasan menunjukkan bahwa semakin jauh dari pusat beban aksial eksentris, lendutan cenderung semakin kecil, Namun demikian Defleksi yang terjadi pada pelat perkerasan cukup signifikan, untuk beban di atas *sensor* nomor TPP-1 (tepi pelat, dekat dari pusat beban) Defleksi sebesar 0,31 mm, sedangkan di *sensor* nomor TPT-2 (tengah pelat perkerasan) Defleksi sebesar 0,8 mm dan Defleksi di *sensor* nomor TPP-3 (tepi pelat perkerasan, jauh dari pusat beban aksial eksentris dan lateral) Defleksi sebesar 0,4 mm.

Besar Defleksi pelat perkerasan cukup signifikan karena sudah mulai terjadi *gap* di sekitar tiang akibat adanya beban aksial eksentris bervariasi dan beban

lateral bervariasi, yang mengakibatkan berkurangnya daya dukung tiang yang diikuti Defleksi pelat perkerasan. Dalam analisis *FEM* ini, beban aksial eksentris 4 kN (10% dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya) dengan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN, tiap penambahan variasi beban lateral dimodelkan dengan interval waktu tiap 20 detik, jadi total waktu yang diperlukan untuk variasi beban lateral adalah 60 detik atau 1 menit, sama seperti pelaksanaan uji model di laboratorium. Didapatkan besar Defleksi pelat perkerasan maksimum, yaitu 0,31 mm dari analisis *FEM* 3D.

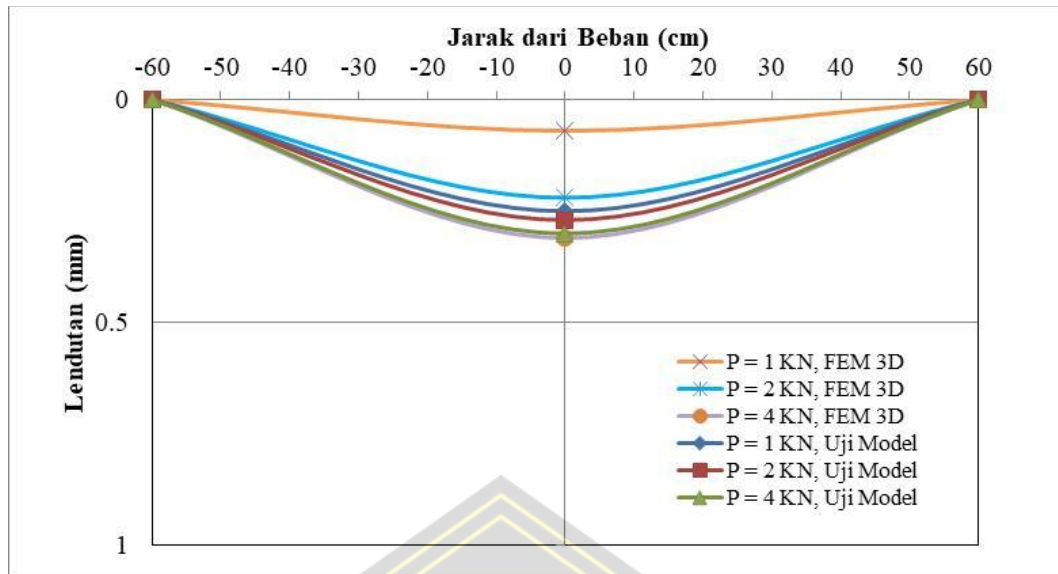


Gambar 5. 31 Defleksi pelat arah melintang di tulangan atas vs FEM 3D

Sedangkan Defleksi/lendutan pada arah melintangnya diberikan pada Gambar 5.30 pada tulangan bagian atas pelat perkerasan pada uji model di laboratorium, *strain gauge* nomor TPP-A1A, TPT-A1, dan TPP-A1B. Dapat diamati melalui model gambar tersebut bahwa pola Defleksi/lendutan berbentuk parabola. Pelat perkerasan pada arah melintang, tepi pelat perkerasan tidak mengalami Defleksi/lendutan yang signifikan. Hal ini dapat dipahami bahwa bagian melintang pelat perkerasan adalah sisi terpendek pelat perkerasan serta adanya tiang yang menopang pelat perkerasan. Untuk beban di atas *strain gauge* nomor TPT-A1 (tengah pelat perkerasan, dekat dengan beban aksial eksentris dan lateral) besarnya Defleksi/lendutan 0,33 mm, sedangkan besar Defleksi di *strain gauge* nomor TPP-A1A dan TPP-A1B sebesar 0 mm. Nilai Defleksi/lendutan pelat perkerasan di bawah pusat beban aksial eksentris dan lateral cukup signifikan

karena sudah mulai terjadi *gap* di sekitar tiang akibat adanya beban lateral, yang mengakibatkan berkurangnya daya dukung tiang. Dalam pengujian model di laboratorium ini, beban aksial eksentris yang diterapkan maksimal 4 kN (10% dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya) dengan variasi beban lateral yang diterapkan sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN. Adanya besaran beban aksial eksentris dan beban lateral tersebut di atas, maka terjadi Defleksi/lendutan pada pelat perkerasan maksimum sebesar 0,33 mm, akibatnya terjadi *gap* (besarnya *gap* sama dengan besarnya defleksi tiang) di sekitar tiang, yang akan mengurangi besarnya lekatan antara tanah dengan tiang dan berpengaruh pada berkurangnya daya dukung tiang, selanjutnya diikuti terjadinya Defleksi pelat perkerasan.

Pola lendutan maksimum untuk arah melintang (arah lebar jalan) pelat terpaku di tulangan dari analisis *FEM* bisa dilihat pada Gambar 5.30 besar Defleksi akibat beban aksial eksentris bervariasi dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan pelat perkerasan. Dari analisis *FEM* baik di kedua tepi pelat perkerasan (arah melebar dari pusat beban lateral). Defleksi di *sensor* nomor TPT-1 sebesar 0,31 mm (berada di tengah pelat perkerasan, dekat pusat beban aksial eksentris dan beban lateral), kemudian Defleksi mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *sensor* nomor TPP-1A (tepi pelat perkerasan) sebesar 0 mm dan di *sensor* nomor TPP-1B (tepi pelat perkerasan) sebesar 0 mm. Nilai Defleksi pelat perkerasan cukup signifikan karena sudah terjadi *gap* di sekitar tiang perkerasan akibat adanya beban aksial eksentris dan beban lateral, akibat *gap* di antara tanah dengan tiang perkerasan akan mengakibatkan berkurangnya lekatan antara tanah dengan tiang perkerasan, sehingga daya dukung tiang berkurang dan diikuti Defleksi pelat perkerasan. Dalam analisis *FEM* model ini, beban aksial eksentris 4 kN (10% dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya) dengan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN adalah Defleksi pelat perkerasan yang paling besar, yaitu 0,31 mm.



Gambar 5. 32 Defleksi pelat arah melintang di tulangan bawah vs FEM 3D

Bentuk Defleksi/lendutan yang sama pada arah melintangnya diberikan pada Gambar 5.31. untuk tulangan bawah pelat perkerasan dari uji model di laboratorium vs *FEM* 3D, di *strain gauge* nomor TPP-B2A, TPT-2B, dan TPP-B2B. Dapat diamati melalui model gambar tersebut bahwa pola lendutan berbentuk parabola. Adapun pada arah melintang, pinggir pelat perkerasan terjadi Defleksi/lendutan yang tidak signifikan. Hal ini dapat dipahami bahwa bagian melintang pelat perkerasan adalah sisi terpendek pelat perkerasan serta adanya tiang yang menopang pelat perkerasan, sehingga Defleksi pelat perkerasan akibat beban aksial eksentris dan lateral akan bisa ditahan oleh kedua tiang di bawah pelat perkerasan. Penempatan beban di atas *strain gauge* nomor TPT-B2 (dekat dengan pusat beban aksial eksentris dan lateral) besarnya defleksi/lendutan 0,30 mm, sedangkan di *strain gauge* nomor TPP-B2A dan TPP-B2B (tepi pelat perkerasan) masing-masing sebesar 0 mm.

Pola lendutan maksimum untuk arah melintang (arah lebar jalan) pelat perkerasan di tulangan dari analisis *FEM* bisa dilihat pada Gambar 5.31 besar Defleksi akibat beban aksial eksentris bervariasi dengan variasi beban lateral berturut-turut sebesar 1 kN, 2 kN, dan 4 kN di tulangan pelat perkerasan. Dari analisis *FEM* baik di kedua tepi pelat perkerasan (arah melebar dari pusat beban lateral). Defleksi di *sensor* nomor TPT-2 sebesar 0,31 mm berada di tengah pelat perkerasan, dekat pusat beban aksial eksentris dan beban lateral, kemudian Defleksi

mengecil menjauh dari pusat beban aksial eksentris, dari Defleksi di *sensor* nomor TPP-2A (tepi pelat perkerasan) sebesar 0 mm dan di *sensor* nomor TPP-2B (tepi pelat perkerasan) sebesar 0 mm. Nilai Defleksi pelat perkerasan cukup signifikan karena sudah terjadi *gap* di sekitar tiang akibat adanya beban aksial eksentris dan beban lateral, akibat *gap* di antara tanah dengan tiang akan mengakibatkan berkurangnya lekatan antara tanah dengan tiang perkerasan, sehingga daya dukung tiang perkerasan akan berkurang dan diikuti Defleksi pelat perkerasan. Dalam analisis *FEM* model ini, beban aksial eksentris 4 kN (10% dari beban roda tunggal rencana untuk jalan raya) dengan variasi beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN adalah defleksi pelat perkerasan yang paling besar, yaitu 0,31 mm

Dari hasil hitungan numerik FEM 3D dimana data yang dipakai sama dengan data pengujian di laboratorium, baik ukuran bak uji, model *prototipe*, material tanah, material pelat perkerasan dan tiang. Dapat dilihat pada Gambar 5.28 bahwa pola Defleksi pelat perkerasan arah memanjang sama dengan uji model di laboratorium, bahwa makin jauh dari pusat beban aksial eksentris dan lateral, Defleksi cenderung mengecil, adanya Defleksi di ujung pelat perkerasan karena adanya beban lateral dari pusat beban aksial eksentris tersebut.

Sedang pada Gambar 5.29 bahwa pola Defleksi pelat perkerasan arah melintang sama dengan uji model di laboratorium, bahwa makin jauh dari pusat beban aksial eksentris dan lateral kearah tepi pelat, Defleksi cenderung mengecil mendekati angka 0, adanya Defleksi yang mendekati 0 di tepi pelat akibat adanya beban dari pusat beban aksial eksentris dan lateral tersebut direduksi oleh kedua tiang pelat perkerasan terlebih dahulu.

Besarnya Defleksi/lendutan maksimum yang terjadi pada pelat perkerasan dari uji model di laboratorium saat beban aksial eksentris 4 kN dan beban lateral bervariasi dari 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dengan besar Defleksi/lendutan 0,33 mm. Untuk Defleksi/lendutan maksimum pada pelat perkerasan dari analisis *FEM* 3D saat beban aksial eksentris 4 kN dan beban lateral bervariasi dari 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dengan besar Defleksi/lendutan 0,31 mm.

Defleksi tiang mengalami peningkatan seiring bertambahnya beban lateral pada pelat perkerasan, dari mulai beban 1 kN, 2 kN, dan 4 kN. Besar defleksi maksimum yang terjadi pada tiang dari uji model di laboratorium saat beban aksial

eksentris 1 kN dan beban lateral bervariasi dari mulai beban 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dengan besar defleksi 0,24 mm. Sedangkan defleksi maksimum pada tiang dari analisis *FEM 3D* saat beban aksial eksentris 1 kN dan beban lateral bervariasi dari 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dengan besar defleksi 0,22 mm.

Dari hasil uji model dan simulasi (*FEM 3D*), diketahui bahwa lendutan pelat perkerasan tertinggi terjadi tepat di bawah beban aksial eksentris dan lendutan pelat menurun seiring dengan bertambahnya jarak dari pusat beban aksial eksentris. Selain itu, besarnya lendutan yang terjadi juga dipengaruhi oleh besarnya beban, semakin besar beban yang diberikan maka semakin besar lendutan yang terjadi. Hasil dari simulasi (*FEM 3D*) terdapat sedikit perbedaan hasil yang kemungkinan disebabkan karena asumsi pada simulasi. Akan tetapi hasil dari simulasi *FEM 3D* mampu mempresentasikan perilaku material dengan baik.

5.3 Perbandingan Dengan Penelitian Sebelumnya

- Berikut beberapa hasil penelitian sebelumnya yang pernah dilakukan:
 - 1) (Chandrasekaran et al., 2008), dalam penelitiannya tentang analisa tiang akibat beban lateral, menyampaikan bahwa *gap* yang terjadi antara tiang dan tanah di sekitarnya sangat berpengaruh terhadap pembebanan yang terjadi, **semakin besar beban lateral pada tiang, maka akan semakin besar *gap* yang terjadi antara tiang dan tanah**. Hasil penelitian (Chandrasekaran et al., 2008) menyebutkan bahwa *gap* yang terjadi sekitar 10 mm (0,4 kali diameter tiang) dengan kedalaman *gap* hingga mencapai 130 cm (5 kali diameter tiang).
 - 2) Mahdy Khari (2014), melakukan penelitian skala laboratorium terhadap tiang tunggal pada kondisi *fixed* yang dibebani beban lateral. Penelitian dilakukan untuk mengetahui pengaruh beban lateral pada setiap bagian tiang terhadap defleksi tiang, dari hasil tersebut didapat bahwa **defleksi terbesar berada pada ujung atas tiang dengan beban lateral yang sama**).
- Sedangkan dalam Penelitian ini :
 - 1) Defleksi tiang mengalami peningkatan seiring bertambahnya beban lateral pada pelat perkerasan mulai dari beban 1 kN, 2 kN, dan 4 kN. **Besar defleksi maksimum yang terjadi pada tiang dari uji model di**

laboratorium saat beban aksial eksentris 1 kN dan beban lateral dari 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dengan besar defleksi 0,24 mm. Sedangkan defleksi maksimum pada tiang dari analisis *FEM* 3D saat beban aksial eksentris 2 kN dan beban lateral 4 kN dengan besar defleksi 0,22 mm.

- 2) Diambil dari Tabel 4.15 di Bab IV, bahwa tulangan bagian atas tiang pelat perkerasan selalu mengalami defleksi yang lebih besar dibanding defleksi di tulangan bagian tengah tiang pelat perkerasan. Dari Gambar 4.11 Posisi dan penomoran *strain gauge* pada uji model di laboratorium, dapat dilihat besar defleksi masing-masing *strain gauge* akibat beban aksial eksentris dan lateral, diambil dari Tabel 4.16 (Bab.IV).

Tabel 5. 23 Defleksi tiang akibat beban Aksial eksentris 1 kN Beban lateral 1 kN, 2 kN, dan 4 kN

Nomor <i>Strain gauge</i> pada Tiang	Defleksi (mm)
TAA-D7	0,23 (atas)
TAA-B8	0,14 (atas)
TAT-D9	0,11 (bawah)
TAT-B10	0,10 (bawah)
TAA-D11	0,24 (atas)
TAA-B12	0,17 (atas)
TAT-D13	0,10 (bawah)
TAT-B14	0,08 (bawah)

Strain gauge di tulangan bagian atas nomor TAA-D7, TAA-B8, TAA-D11, dan TAA-B12, sedangkan *strain gauge* di tulangan bagian tengah adalah *strain gauge* nomor TAT-D9, TAT-B10, TAT-D13, dan TAT-B14. Mengacu pada Gambar 4.11 pada Bab.IV, tentang penomoran *strain gauge*, maka besar defleksi tiang pelat perkerasan adalah 0,23 mm > 0,11 mm; 0,14 mm > 0,10 mm; 24 mm > 0,10 mm; 0,17 mm > 0,08 mm.

BAB VI

KESIMPULAN, IMPLEMENTASI DAN REKOMENDASI

6.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dari hasil hitungan numerik *FEM* 3D maupun dari uji model di laboratorium dapat digambarkan bahwa pola Defleksi pelat perkerasan arah memanjang, semakin jauh dari pusat beban aksial eksentris dan lateral, Defleksi cenderung mengecil. Sedang pola Defleksi pelat perkerasan arah melintang sama dengan uji model di laboratorium, bahwa makin jauh dari pusat beban aksial eksentris dan lateral kearah tepi pelat, Defleksi cenderung mengecil mendekati angka 0, adanya Defleksi yang mendekati 0 di tepi pelat, akibat adanya beban dari pusat beban aksial eksentris dan lateral tersebut dapat direduksi oleh kedua tiang pelat perkerasan terlebih dahulu.
2. Besarnya Defleksi/lendutan maksimum yang terjadi pada pelat perkerasan dari uji model di laboratorium saat beban aksial eksentris 4 kN dan beban lateral bervariasi dari 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dengan besar Defleksi/lendutan 0,33 mm. Untuk Defleksi/lendutan maksimum pada pelat perkerasan dari analisis *FEM* 3D saat beban aksial eksentris 4 kN dan beban lateral 1 kN dengan besar Defleksi/lendutan 0,31 mm.
3. Defleksi tiang pelat perkerasan mengalami peningkatan seiring bertambahnya beban lateral bervariasi pada pelat perkerasan dari mulai sebesar 1 kN, 2 kN dan 4 kN. Besar defleksi maksimum yang terjadi pada tiang pelat perkerasan dari uji model di laboratorium saat beban aksial eksentris 1 kN dan 2 kN, beban lateral mulai dari 1 kN, 2 kN, dan 4 kN dengan besar defleksi 0,24 mm. Sedangkan defleksi maksimum pada tiang perkerasan dari analisis *FEM* 3D saat beban aksial eksentris 2 kN dan beban lateral 4 kN dengan besar defleksi 0,22 mm. Defleksi tiang saat beban aksial eksentris 4 kN dan beban lateral sebesar 1 kN dengan besar Defleksi tiang 0,24 mm Akibat terjadi *gap* di sekitar tiang perkerasan, maka akan mengurangi besarnya lekatan antara tanah dengan tiang perkerasan dan berpengaruh pada berkurangnya daya dukung tiang perkerasan, akibatnya diikuti terjadinya Defleksi pelat perkerasan.

6.2 Implementasi dan Rekomendasi

Memperhatikan hasil dan pembahasan pada bagian sebelumnya, beberapa hal penting terkait kinerja Sistem Pelat Terpaku dapat dirangkum sebagai berikut. Pelat Terpaku yang diuji secara skala laboratorium pada penelitian ini hanya berukuran 1,2 m x 1,2 m, tebal pelat 10 cm, dan terdapat 4 tiang mikro yang pendek (berdiameter 10 cm, Panjang 100 cm, dipasang pada jarak as 100 cm). Namun demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa kinerja sistem ini sangat menjanjikan untuk aplikasi. Pada kondisi yang sebenarnya, pelat terpaku yang difungsikan sebagai perkerasan jalan akan mempunyai luasan yang lebih besar, sehingga keberadaan tiang-tiang sebagai pengaku akan semakin banyak ke segala arah. Maka kinerjanya terkait kapasitas dukung dan reduksi lendutan pelat akan lebih baik lagi terhadap beban monotonik maupun repetitif. Sistem ini juga berpotensi untuk diaplikasikan pada infrastruktur lainnya yang sejenis, seperti *runway* dan *apron* pada bandara maupun lapangan parkir.

Untuk aplikasi lapangan, sistem ini memungkinkan ditempatkan langsung pada tanah dasar lunak, namun perlu terlebih dahulu dilakukan *tripping* tanah permukaan guna menghindari material organik. Sistem ini juga dapat ditempatkan di atas perkerasan sementara (berupa lapisan sirtu setebal 35 cm dan lantai kerja setebal 15 cm) sebagai alas kerja guna dilewati kendaraan berat atau ditempatkan di atas timbunan tanah (sekitar 30 cm hingga 50 cm). Dalam hal elevasi perkerasan mesti dibuat lebih tinggi dari muka tanah guna menghindari genangan, maka sistem ini dapat pula dikombinasikan dengan timbunan berbahan ringan guna mengurangi Defleksi konsolidasi tanah dasar lunak, oleh karena Sistem Pelat Terpaku ini bukanlah perbaikan tanah melainkan suatu metode untuk meningkatkan kinerja perkerasan kaku pada tanah lunak. Selain itu, beban dominan yang bekerja adalah beban sementara (lalu lintas). Sekalipun tanah dasar mengalami Defleksi, dan bila perkerasan Sistem Pelat Terpaku ini juga diizinkan mengalami Defleksi, maka Defleksi pada perkerasannya akan berupa Defleksi seragam yang berkurang.

Keuntungan-keuntungan lain yang diharapkan dengan menggunakan sistem ini antara lain

- a) Pelaksanaan konstruksi yang lebih mudah oleh karena penggunaan tiang mikro yang pendek,

- b) Tidak memerlukan alat-alat berat dalam pengerjaan,
- c) Serta tidak memerlukan perkerasan sementara (berupa lapisan sirtu setebal 35 cm dan lantai kerja setebal 15 cm) sebagai alas kerja guna dilewati kendaraan berat,
- d) Sehingga pekerjaan tidak memakan waktu yang panjang, dan
- e) Biaya konstruksi relatif lebih rendah.

Berdasarkan uraian di atas, tampaknya kinerja Sistem Pelat Terpaku ini sangat menjanjikan untuk aplikasi lapangan.



DAFTAR PUSTAKA

- Abdurrahman, E. A., Hardiyatmo, H. C., & Rifa'i, A. (2022). 3-Dimensional numerical simulation of nailed slab system settlement behavior on soft soil. *INERSIA: Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur*, 18(2), 167–176. Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia.
- Anas Puri, Hardiyatmo, H. C., & Suhendro, B. (2012). *Determining additional modulus of subgrade reaction based on tolerable settlement for the nailed-slab system resting on soft clay. International Journal of Civil & Environmental Engineering (IJCEE-IJENS)*, 12(03), 32–44. IJENS Publisher, Malaysia.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). SNI 1966:2008: Cara uji penentuan batas plastis dan indeks plastis tanah. BSN, Jakarta, Indonesia.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). SNI 03-1964-2008: Cara uji berat jenis tanah. BSN, Jakarta, Indonesia.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). SNI 3423:2008: Cara uji analisis ukuran butir tanah. BSN, Jakarta, Indonesia.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). SNI 8460-2017: Persyaratan dan perancangan geoteknik. BSN, Jakarta, Indonesia.
- Billy, H. M. (2024). Fondasi cakar ayam bentuk *honeycomb* sebagai upaya mengatasi penurunan fondasi lapis keras di atas tanah lunak [Tesis Master]. Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.
- Chandrasekaran, S. S., & Boominathan, A. (2008). *Behaviour of 2×2 pile group under static and cyclic lateral loading. Indian Geotechnical Journal*, 38(4), 424–438. Indian Geotechnical Society, New Delhi, India.
- Christensen, D. S. (2006). *Full scale static lateral load test of a 9-pile group in sand [Disertasi Doktor]. Department of Civil and Environmental Engineering, Brigham Young University, Provo, Utah, USA.*
- Deka, A. (2016). *Analysis of pile group under lateral load. Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21(18), 6209–6220. EJGE, Oklahoma, USA.
- Diana, W. (2016). Uji model skala kecil dan analisis elemen hingga perkerasan sistem pelat terpaku pada tanah dasar ekspansif [Laporan Kemajuan Disertasi]. Program Doktor Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia.

- Elhakim, A. F., Khouly, M. A. A. El, & Awad, R. (2016). *Three-dimensional modeling of laterally loaded pile groups resting in sand*. *HBRC Journal*, 12(3), 291–301. Housing and Building National Research Center, Cairo, Egypt.
- Geoteknik, L. (2008). Buku panduan praktikum mekanika tanah I dan II. Laboratorium Geoteknik, Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.
- Hardiyatmo, H. C. (2008). *Nailed-slab system for reinforced concrete slab on rigid pavement*. In *Proceedings of National Seminar on Appropriate Technology* (pp. 1–8). Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.
- Hardiyatmo, H. C. (2009). Metode hitungan lendutan pelat dengan menggunakan modulus reaksi tanah dasar ekuivalen untuk struktur pelat fleksibel. *Dinamika Teknik Sipil*, 9(2), 123–130. Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.
- Hardiyatmo, H. C. (2010a). Perancangan sistem cakar ayam modifikasi untuk perkerasan jalan raya. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta, Indonesia.
- Hardiyatmo, H. C. (2010b). *Method of calculations for the deflection, moment and shears on cakar ayam system to design concrete road pavements*. *Dinamika Teknik Sipil*, 10(1), 1–10. Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.
- Hardiyatmo, H. C. (2011). *Method to analyze the deflection of the nailed slab system*. *International Journal of Civil & Environmental Engineering (IJCEE-IJENS)*, 11(4), 22–28. IJENS Publisher, Malaysia.
- Hardiyatmo, H. C. (2014, June 4). Perkerasan jalan beton dengan menggunakan sistem pelat terpaku [Pidato Pengukuhan Guru Besar]. Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.
- Hardiyatmo, H. C. (2016). Alternatif solusi pembangunan perkerasan jalan pada subgrade berdaya dukung rendah. *INFO-TEKNIK*, 17(1), 1–12. Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.
- Hazzar, L., Hussien, M. N., & Karray, M. (2017). *On the behaviour of pile groups under combined lateral and vertical loading*. *Ocean Engineering*, 131, 174–185. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

- Hetényi, M. (1964). *Beams on elastic foundation: Theory with applications in the fields of civil and mechanical engineering*. University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, USA.
- Hussein, A. F., & El-Naggar, M. H. (2021). *Seismic axial behaviour of pile groups in non-liquefiable and liquefiable soils*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 150, 106923. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Irsyam, M. (2017). Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta, Indonesia.
- Jagodnik, V. (2014). *Behavior of laterally loaded piles in natural sandy gravels* [Tesis Doktor]. Faculty of Civil Engineering, University of Rijeka, Rijeka, Croatia.
- Li, L., Li, J., Wang, Y., & Gong, W. (2020). *Analysis of nonlinear load-displacement behaviour of pile groups in clay considering installation effects*. *Soils and Foundations*, 60(4), 929–940. Japanese Geotechnical Society, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Masyhur, I. (2018). *Bamboo pile-mattress system as an alternative of soft ground improvement for coastal embankment in Indonesia*. In *Workshop HATTI: Inovasi Teknologi Geoteknik untuk Pembangunan Berkelanjutan* (pp. 1–15). Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI), Jakarta, Indonesia.
- Nst, T. H., & Waruwu, A. (2020). Analisis penurunan tanah gambut dengan timbunan yang diperkuat grid bambu dan tiang beton. *Jurnal Jalan dan Jembatan*, 37(2), 89–102. Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR, Bandung, Indonesia.
- Octaviani, M. (2021). Analisis numerik perkerasan sistem pelat terpaku pada timbunan di atas tanah lunak [Tesis Master]. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Riau, Pekanbaru, Indonesia.
- Peng, W., Zhao, M., Zhao, H., & Yang, C. (2020). *A two-pile foundation model in sloping ground by finite beam element method*. *Computers and Geotechnics*, 120, 103423. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

- Puri, A. (2015). Studi parametrik perkerasan jalan beton sistem pelat terpaku pada tanah dasar lunak [Tesis Master]. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Riau, Pekanbaru, Indonesia.
- Puri, A. (2016). *Behavior of uplift resistance of single pile row nailed-slab pavement system on soft clay subgrade* [Tesis Master]. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Riau, Pekanbaru, Indonesia.
- Puri, A. (2018). *Differentiation of displacement factor for stiff and soft clay in additional modulus of subgrade reaction of nailed-slab pavement system. In Proceedings of the Second International Conference on Civil Engineering Research (ICCER)* (pp. 234–241). Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia.
- Puri, A., Ardiansyah, R., & Afriliyani, N. (2025). *Analysis of slab deflection in the modified cakar ayam pavement system using displacement factor derived from Puri's graph. Geomate Journal*, 28(105), 45–52. Geomate International Society, Hiroshima, Japan.
- Puri, A., Hardiyatmo, H. C., & Suhendro, B. (2012). *Application of the additional modulus of subgrade reaction to predict the deflection of nailed-slab system resting on soft clay due to repetitive loadings. In Proceedings of the 16th Annual Scientific Meeting (PIT) HATTI* (pp. 217–222). Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI), Jakarta, Indonesia.
- Puri, A., Hardiyatmo, H. C., & Suhendro, B. (2013). *Pile spacing and length effects due to the additional modulus of subgrade reaction of the nailed-slab system on the soft clay. In Proceedings of the 17th Annual Scientific Meeting (PIT) HATTI* (pp. 217–222). Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI), Jakarta, Indonesia.
- Puri, A., Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B., & Rifa'i, A. (2013). Behavior of full-scale nailed-slab system with variation on load positions [Laporan Penelitian]. Fakultas Teknik, Universitas Islam Riau, Pekanbaru, Indonesia.
- Puri, A., Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B., & Rifa'i, A. (2019). *Validating the curve of displacement factor due to full scale of one pile row nailed-slab pavement system. Geomate Journal*, 17(59), 181–188. Geomate International Society, Hiroshima, Japan.

- Puri, A., & Mildawati, R. (2019). Investigasi numerik perkerasan jalan sistem pelat terpaku terhadap variasi dimensi struktur. *BENTANG: Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 7(1), 1–7. Fakultas Teknik, Universitas Islam Riau, Pekanbaru, Indonesia.
- Puri, A., Oktavia, F., Dharmowijoyo, D. B. E., & Ali, M. (2021). *Prediction of deflection of single-pile nailed-slab by using the allowable equivalent modulus of subgrade reaction in case of additional modulus from modified Hardiyatmo method. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 832(1), 012022. IOP Publishing, Bristol, UK.
- Putri, O. T. (2019). Analisis variasi faktor aman tambahan modulus reaksi tanah dasar sistem pelat terpaku tiang pipa beton tunggal pada lempung lunak [Disertasi Doktor]. Program Doktor Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Riau, Pekanbaru, Indonesia.
- Rao, N. (2010). *Foundation design: Theory and practice*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA.
- Satibi, S. (2009). *Numerical analysis and design criteria of embankments on floating piles* [Disertasi Doktor]. Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany.
- Situmorang, A., & Pratikso, A. R. (2019). *The changes of friction capacity of the pile to support slab pavement due to lateral loads. International Journal of GEOMATE*, 17(62), 234–241. Geomate International Society, Hiroshima, Japan.
- Situmorang, A., Pratikso, M., & Rochim, A. (2020). *Deflection behaviour of slab pavement with pile on soft soil. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 11(2), 152–162. IAEME Publication, India.
- Smith, P. J. (2006). *Pre-fabricated warped pavement slab, forming and pavement systems, and methods for installing and making same* (US Patent No. 7,004,674). United States Patent and Trademark Office, Alexandria, Virginia, USA.
- Suhendro, B. (2006). Sistem cakar ayam modifikasi sebagai alternatif solusi konstruksi jalan di atas tanah lunak. *Dinamika Teknik Sipil*, 6(2), 156–165.

- Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.
- Suprayogi, B. (2021). Analisis numerik perbandingan perilaku timbunan di atas tanah lunak tanpa perkuatan dan perkuatan sistem pelat terpaku [Tesis Master]. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Riau, Pekanbaru, Indonesia.
- Syarif, S. T. F. (2020). Kajian faktor aman global modulus reaksi subgrade ekuivalen pada perkerasan sistem pelat terpaku [Tesis Master]. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Riau, Pekanbaru, Indonesia.
- Tomlinson, M. J. (1977). *Pile design and construction practice*. Cement and Concrete Association, Slough, Berkshire, UK.
- Utari, W. A., & Suhartatik, I. (2013). Kapasitas momen maksimum pondasi tiang pendek silindris akibat beban lateral pada tanah lempung dengan metode kurva P-Y. *Jurnal Media Komunikasi Teknik Sipil*, 19(2), 189–198. Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia.
- Umum, D. P., & Listrik, T. (1971). *Peraturan beton bertulang Indonesia*. Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan (LPMB), Bandung, Indonesia.
- Umum, K. P., & Marga, D. J. B. (2013). *Manual desain perkerasan jalan*. Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum, Jakarta, Indonesia.
- Wahyudi, H., Arif, M., & Ryantori. (2010). Swelling soil dan perkerasan jalan konstruksi sarang laba-laba. In *Seminar dan Pameran Sehari 2010: Inovasi Baru Teknologi Jalan dan Jembatan* (pp. 45–52). DPD HPJI Jawa Timur, Surabaya, Indonesia.
- Yanto, F. H. (2015). Analisis lendutan perkerasan kaku pada tanah lunak dengan perkuatan kolom soil cement [Tesis Master]. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia.
- Young, W. C., Budynas, R. G., & Sadegh, A. M. (2002). *Roark's formulas for stress and strain (7th ed.)*. McGraw-Hill, New York, USA.